



Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation

Benjamin Kirsch

Spezialanwendungen von Schleifscheiben - Technologische Möglichkeiten und Anforderungen sowie deren Nachhaltigkeit

Produktionstechnische Berichte aus dem FBK

Band 05/2022

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Produktionstechnische Berichte aus dem FBK

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Lehrstuhls für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation
der Technischen Universität Kaiserslautern

Herausgeber: Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation
Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich
Postfach 3049
Technische Universität Kaiserslautern
67653 Kaiserslautern

Verlag: Technische Universität Kaiserslautern

Druck: Technische Universität Kaiserslautern
Hauptabteilung 5
Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck

D-386

© Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, 2022
Technische Universität Kaiserslautern
Erwin-Schrödinger-Straße
67663 Kaiserslautern

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 978-3-95974-191-0
ISSN 0937-9061

**Spezialanwendungen von Schleifscheiben
Technologische Möglichkeiten und Anforderungen
sowie deren Nachhaltigkeit**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung der venia legendi für das Fach

Produktionstechnik
genehmigte Habilitationsschrift

von

Dr.-Ing. Benjamin Kirsch

aus Homburg

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Konrad Wegener

Dem Fachbereichsrat MV der TU Kaiserslautern vorgelegt: 13.05.2020

Datum des wissenschaftlichen Vortrags und der Erteilung der venia legendi: 30.06.2021

Titel des wissenschaftlichen Vortrags: „Additive Fertigung: Ende der spanenden Bearbeitung oder ihre Renaissance?“

Datum der Antrittsvorlesung: 04.10.2021

Titel der Antrittsvorlesung: „Spanbildung auf verschiedenen Skalen“

Vorwort und Danksagung

„Im Schleifspalt ist es dunkel.“ Dieses Bonmot mir nicht bekannter Herkunft deutet an, dass beim Schleifen noch nicht vollständig verstanden ist, was im Prozess genau passiert. Die Schleifforschung ist daher auch ein Stück weit philosophisch bzw. bietet Raum für Interpretationen, die einen wissenschaftlichen Diskurs ermöglichen und erfordern. Obwohl ich im Rahmen meiner Tätigkeit als Oberingenieur am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation auch einen tiefen Einblick in viele andere spannende Bearbeitungsprozesse erhalten habe, hat mich dieser Aspekt schon immer gereizt und letztlich motiviert, meine Habilitationsschrift in dieser Disziplin zu verfassen.

Mein Dank gilt daher meinen Schleiferkollegen Dr.-Ing. Heinrich Sudermann, Dr.-Ing. Peter Herzenstiel, Dr.-Ing. Christian Effgen und M. Sc. Jörg Hartig, die meine Begeisterung für das Verfahren teilen und deren Forschung ich teilweise mit begleiten durfte und deren Ergebnisse auch mit in diese Schrift eingeflossen sind.

Weiterhin Danke ich meinen zahlreichen Kolleginnen und Kollegen, die mir über die Jahre am FBK viel Freude bereitet haben. Alle zu nennen würde den Rahmen sprengen, aber insbesondere möchte ich M.Sc. Moritz Glatt, Dipl.-Ing (FH) Stephan Basten, Dipl.-Ing. Daniel Müller, Dipl.-Ing. Sebastian Greco und Dr.-Ing. Marco Zimmermann an dieser Stelle danken, die mir in den letzten Jahren mit Ironie und Witz den Alltag am FBK erhellt haben.

Neben meinen „wissenschaftlichen“ Kollegen gilt mein Dank natürlich auch meinen langjährigen Wegbegleitern Herrn Lutzke und Frau Schleret, die es immer wieder schafften, mich in schwierigen Zeiten aufzubauen.

Danken will ich auch meinen Hiwis, die mir über die Jahre als fleißige Helferlein zur Seite standen und mich bei der Habilitation insbesondere in Formatierungs- und Zitationsbelangen unterstützen.

Mein Dank gilt natürlich auch meiner Prüfungskommission und insbesondere meinen Gutachern Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Konrad Wegener, sowie dem Dekanat des Fachbereichs Maschinenbau.

Mein größter Dank gilt meinem Bruder André, der neben Herrn Dr.-Ing. Marco Zimmermann das Manuskript aufmerksam gelesen hat und der mich stets angetrieben hat, die Schrift fertig zu stellen.

Kaiserslautern, im Oktober 2021

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	III
1 Einleitung	1
2 Ziele der Schrift	2
3 Grundlagen	3
3.1 Spanbildung	6
3.1.1 Spanbildung bei duktilen Materialien	7
3.1.2 Spanbildung bei sprödharten Werkstoffen.....	12
3.2 Spezifische Energie und Wärmeentstehung	20
3.3 Thermisch-mechanisches Belastungskollektiv: Randzoneneigenschaften.....	26
3.4 Kühlschmiersysteme und Wärmeabfuhr.....	31
3.5 Schleifscheiben	36
3.5.1 Schneidstoffe und Kornarten	37
3.5.2 Bindungen	43
3.5.3 Verschleißformen.....	45
3.5.4 Konditionieren von Schleifscheiben	47
3.5.5 Einsatz von Schleifscheiben – Einfluss der Einstellgrößen	51
4 Spezialanwendungen	55
4.1 Einsatz herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialverfahren	55
4.1.1 Thermisches Schleifhärten.....	55
4.1.2 Ausnutzung des Größeneffekts für das Härten durch Verfestigung	59
4.1.3 Gezielte Schneidkantenpräparation mittels Schleifen.....	63
4.1.4 Zerspanung sprödharter Werkstoffe im duktilen Modus mittels speziellem Abrichtverfahren	66
4.1.5 Interne KSS-Zufuhr durch herkömmliche poröse Schleifscheiben	69
4.2 Entwicklung spezieller Schleifscheiben	72
4.2.1 Schleifscheiben mit verbesserter Schleifleistung und/oder optimierter Spanbildung	72
4.2.2 Schleifscheiben für die Zerspanung sprödharter Werkstoffe.....	98
4.2.3 Schleifscheiben für eine verbesserte Kühlschmierstoffzufuhr.....	102
4.2.4 Schleifscheiben für die Strukturierung von Oberflächen.....	118
4.2.5 Weitere Spezialentwicklungen.....	125

5	Nachhaltigkeitsbetrachtungen	128
5.1	Produktorientierte Betrachtung.....	129
5.2	Spezifischer Energiegehalt von Schleifscheiben	132
5.3	Nachhaltigkeitsbetrachtung von Spezialanwendungen	135
5.3.1	Herkömmliche Schleifscheiben für Spezialanwendungen.....	135
5.3.2	Spezienschleifscheiben	137
5.4	Fazit zur Nachhaltigkeit von Spezialanwendungen.....	143
6	Zusammenfassende Bewertung und Ausblick auf zukünftige Entwicklungen	144
7	Literaturverzeichnis.....	149
8	Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen	200
9	Kurzfassung.....	211

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Ø	Durchmesser	a _{riblet}	Riblet Aspektverhältnis
Ø	Durchschnitt	A _{gt}	Gleichmaßdehnung
°	Grad (Winkel)	AIISI	American Iron and Steel Institute
#	mesh: Einteilung von Schleifkörnungen nach amerikanischer Norm	a _p	Schnitttiefe
%	Prozent	B	mittlerer Durchmesser einer cBN Körnung in µm
2D	zweidimensional	b	Fasbreite
3D	dreidimensional	bar	Bar; Einheit des Drucks
A	Bruchdehnung	b _g	Srukturebreite
A	Abstand zwischen Austrittsreihen bei innengekühlten Schleifscheiben	b _s	Breite Schleifscheibe
a _c	Eindringgröße	°C	Grad Celcius
a _d	Abrichtzustellung	cBN	kubisches Bornitrid
a _e	Zustellung	CD	Continuous Dressing (kontinuierliches Abrichten)
a _e	Gesamtzustellung	CNC	Computer Numerical Control
a _{e,1}	Zustellung entsprechend der Höhe des abgetragenen Bereichs (bei der Schneidkantenverrundung mittels elastisch gebundener Schleifscheiben)	CFD	Computational Fluid Dynamics
a _{e,2}	Zustellung entsprechend der Höhe des voll präparierten Bereichs (bei der Schneidkantenverrundung mittels elastisch gebundener Schleifscheiben)	CIRP	International Academy for Production Engineering
a _{e,3}	Zustellung entsprechend der Höhe des Übergangsbereichs (bei der Schneidkantenverrundung mittels elastisch gebundener Schleifscheiben)	CVD	Chemical Vapour Deposition; chemische Abscheidung aus der Gasphase
a _{e,4}	Zustellung entsprechend der Höhe des unbehandelten Bereichs (bei der Schneidkantenverrundung mittels elastisch gebundener Schleifscheiben)	cm	Zentimeter
a _{e0}	initiale Vorlast	D	mittlerer Durchmesser einer Diamant Körnung in µm
a _g	Strukturtiefe	DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
		DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
		D	Schleifscheibendurchmesser
		d	Strahldurchmesser (Laser)
		d	Durchmesser eines Kornclusters
		d _s	Schleifscheibendurchmesser

d_w	Werkstückdurchmesser	h	Stunde
E	Elastizitätsmodul	h	Höhe eines Kornclusters
e_b	Grundverbrauch an Energie	h	Strukturtiefe
e_c	spezifische Energie	h	Spanungsdicke
e''_c	spezifische Energie	h_{cu}	Spanungsdicke
e_g	Energieverbrauch des Schleifens	$h_{cu\ eff}$	effektive Spannungsdicke
e_i	Energieverbrauch im Standy/Einrichtungsbetrieb	$h_{cu, krit}$	kritische Spannungsdicke
EDM	Electro-Discharge Machining (Funkenerodieren)	HDP	Einhärtetiefe
EN	Euronorm	HEDG	High Efficiency Deep Grinding
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule	HHS	herkömmliche hochharte Schleifscheibe
et al.	und andere	h_{eq}	äquivalente Spannungsdicke
EXP	Experiment	HK	Knoop-Härte
F	Einteilung von Schleifkörnungen nach FEPA-Norm	h_{max}	durchschnittliche maximale Dicke eines kommaförmigen Spans
f_d	Abrichtvorschub	h_{min}	Mindestspannungsdicke
FBK	Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation	HRC	Rockwell-Härte
FEPA	Europäischer Verband der Schleifmittelhersteller	h_{riblet}	Riblet Höhe
FKV	Faserverbundkunststoff	HV	Härte, gemessen nach dem Vickersverfahren
F_N	Normalkraft	I	Intensität (Laser)
F'_N	bezogene Normalkraft	IKS	Schleifscheibe mit Innenkühlung
FSD	Freistrahldüse	ISF	Institut für Spanende Fertigung
f_r	radialer Vorschub	ISO	International Organization for Standardization
F_T	Tangentialkraft	ISO	Internationale Organisation für Normung
F'_T	bezogene Tangentialkraft	iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
g	Gramm	IWT	Leibnitz-Institut für Werkstofforientierte Technologien
G	auch G-Verhältnis: verschlissenes Belagvolumen einer Schleifscheibe geteilt durch zerspantes Werkstoffvolumen	J	Joule
GPU	Graphic Processor Unit		
H	Härte		

K	Kelvin	p_0	Umgebungsdruck
K_c	Bruchzähigkeit	p_p	Pumpendruck
$k_{c+\alpha 0,01,0,01}$	spezifische Schnitt- und Pflügekraft	p_{δ}	Ölneldruck
kg	Kilogramm	P	Position
KSS	Kühlschmierstoff	P	Leistung (Laser)
l	Liter	P_c	Leistung (Schleifen)
l	Abstand zwischen zwei Kornclustern	P^{*c}	kontaktflächenbezogene Schleifleistung
LASER	auch Laser: light amplification by stimulated emission of radiation; Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung	pcBN	polykristallines cubisches Bornitrid
l_c	Kontaktlänge	PTFE	Polytetrafluorethylen; oft Teflon genannt
l_g	Kontaktlänge	PVD	Physical Vapour Deposition (physikalische Gasphasenabscheidung)
l_k	Kontaktlänge	q	Geschwindigkeitsverhältnis
L_s	Länge einer Struktur auf der Schleifscheibe	q	Wärmequelle
L_w	Länge einer Struktur auf dem Werkstück	Q	KSS-Volumenstrom
M	Mega (millionenfaches einer Einheit)	Q_{δ}	Ölnebel-Volumenstrom
m	Milli (tausendstel einer Einheit)	Q^*_w	bezogenes Zeitspanvolumen
MD	Molekulardynamik	R_a	arithmetischer Mittenrauhwert
min	Minute	r_{β}	Schneidkantenradius
ml	Milliliter	r	Laserradius
mm	Millimeter	R_e	Streckgrenze
MPa	Megapascal	REM	Rasterelektronenmikroskop
MMS	Minimalmengenschmierung	R_m	Zugfestigkeit
n	Drehzahl	R_{max}	maximale Rautiefe
NC	Numerical Control	$R_{p0,2}$	0,2-%-Dehngrenze
n_d	Überdeckungsgrad (beim Abrichten)	R_q	quadratische Rauheit
nm	Nanometer	R_z	gemittelte Rauhtiefe
NUT	genutete Schleifscheibe	s	Sekunde
p	Druck	SAE	Society of Automotive Engineers (Amerikanische Vereinigung, welche Stahlsorten standardisiert)
p	Strukturabstand		

SFB	Sonderforschungsbereich	α	Anstellwinkel
SIM	Simulation	α	Austrittswinkel KSS
s_{riblet}	Riblet Höhe	α	Freiwinkel
t_c	Schnittzeit	α	Einhüllender Winkel bei der Diskretisierung einer Schneidkante
TRR	Transregio		
T_μ	Schnitteinsatztiefe		
TU	Technische Universität	α	Öffnungswinkel (Schneidkeil)
U	Umdrehungen	α_{curv}	Freiwinkel, unterhalb dem es zu einem Kontakt der Freifläche mit dem Werkstück kommt (kinematisch berechnet)
UP	Ultrapräzision		
\dot{V}	Volumenstrom		
v	Vorschubgeschwindigkeit		
v_c	Schnittgeschwindigkeit	α_e	Freiwinkel
v_{KSS}	Strömungsgeschwindigkeit des Kühlschmierstoffs	α_{riblet}	Riblet Spitzenwinkel
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	$\alpha_{\text{tip,riblet}}$	Riblet Spitzenradius
v_{fad}	axiale Abrichtvorschubgeschwindigkeit	β	Keilwinkel
v_{frd}	radiale Abrichtvorschubgeschwindigkeit (Abrichteinstechgeschwindigkeit)	β_1	Strömungswinkel am Eintritt eines Kanals / Krümmungswinkel des Kanaleintritts
v_{ft}	Vorschubgeschwindigkeit	β_2	Strömungswinkel am Austritt eines Kanals / Krümmungswinkel des Kanalaustritts
v_{rd}	Umfangsgeschwindigkeit der Abrichtrolle	γ	Spanwinkel
v_s	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit	γ	Korrekturfaktor bei der kritischen Spannungsdicke
v_{sd}	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit	γ	Winkel zwischen zwei Kanälen einer Schleifscheibe mit Innenkühlung
v_w	Werkstückgeschwindigkeit	ε	Dehnung
v_w	Vorschubgeschwindigkeit	η	Anteil an Unterbrechungen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	θ	Anstellwinkel
W	Watt	μ	Mikro (millionstel eine rEinheit)
w	Strukturbreite	μ	Reibverhältnis
w	Abstand zweier Kornreihen	μ	Reibverhältnis
YAG	Yttrium Aluminium Granat	ρ	Dichte
z	Defokussierung (Laser)	σ	Standardabweichung
z	Tiefe unter der Oberfläche	σ	Spannung

σ	Eigenspannung	$\sigma_{\text{thermisch}}$	thermisch bedingte Eigen- spannungen
$\sigma_{\text{mechanisch}}$	mechanisch bedingte Eigen- spannungen	φ	Blendenwinkel
$\sigma_{\text{resultierend}}$	resultierende Eigenspannungen		

1 Einleitung

Schleifen ist eines der ältesten Fertigungsverfahren. Traditionell gehört es zu den Endbearbeitungsverfahren, wird also dort eingesetzt, wo hohe Form- und Maßhaltigkeiten gefordert sind. Mit der Entwicklung der synthetischen, hochharten Schneidstoffe Diamant und cBN (kubischer Bornitrid) im industriellen Maßstab gewinnt es seit Ende des letzten Jahrhunderts zudem für die Realisierung hoher Abtragsraten an Bedeutung.

Schleifen ist ein Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. Die Schneiden befinden sich an den im Werkzeug gebundenen Abrasivstoffen, den Körnern. Die Anzahl, die Geometrie und die Lage der Schneiden sind nicht definiert. Dabei kommen die Schneiden regellos zum Einsatz und ihre Anzahl ist sehr hoch; hieraus resultiert ein niedriger Materialabtrag pro Korn. Daraus erwachsen die Vor- und auch die Nachteile des Schleifens im Vergleich zu konkurrierenden spanenden Verfahren wie Drehen, Fräsen oder Bohren. Die Vorteile liegen in geringen Belastungen pro Korn und damit der Möglichkeit der Erlangung hoher Materialabtragsraten bei generell geringem Verschleiß der Werkzeuge. Weiterhin ergeben sich aus dem geringen Materialabtrag pro Korn die guten erreichbaren Oberflächenrauheiten und die Möglichkeit zur Bearbeitung sprödharter Werkstoffe, bei denen eine kritische Spannungsdicke beim Abtrag unterschritten werden muss. Nachteile erwachsen aus dem hohen Anteil an Reib- und Pflügevorgängen, die in Verbindung mit den negativen Spanwinkeln der Körner zu hohen Temperaturen im Prozess führen. Es besteht die Gefahr thermischer Überlastungen der geschliffenen Werkstücke und es resultieren Verlustenergien im Prozess.

Die Wahl der Zusammensetzung der Schleifscheibe, vom abrasiven Medium über die Bindung bis hin zum Grundkörper und damit der Wahl der Korngröße und Kornkonzentration, der Kornform und Splitterfreudigkeit, sowie Kornhaltekräften und Verschleißwiderstand, Abrichtbarkeit und Schnittfreudigkeit, resultiert in eine schier unendliche Anzahl verfügbarer Schleifscheiben am Markt, angepasst an die Vielzahl an Bearbeitungsaufgaben. Obwohl sich diese herkömmlichen Schleifscheiben voneinander unterscheiden, sind sie im Grundaufbau gleich. Sie bestehen aus einem Schleifbelag, der gleichzeitig den Grundkörper bildet oder der auf einem Grundkörper aufgebracht wird. Der Belag besteht aus Korn und Bindung, die Körner sind stochastisch verteilt.

Neben diesen herkömmlichen Schleifscheiben sind aus der Forschung eine große Anzahl an Spezialeschleifscheiben bekannt, oder Anwendungen herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialanwendungen die über den üblichen Materialabtrag hinausgehen. Im Rahmen der Schrift wird ein Überblick über diese Spezialanwendungen gegeben und dabei deren technologische Möglichkeiten und Anforderungen diskutiert sowie eine Bewertung der Nachhaltigkeit der verschiedenen Konzepte vorgenommen.

2 Ziele der Schrift

Ziel der Schrift ist es, die Möglichkeiten und Grenzen von Anwendungen und Entwicklungen von Schleifscheiben zu diskutieren, die über den Stand der industriell üblichen Einsatzfälle des Schleifens und über die am Markt verfügbaren Schleifscheiben hinaus gehen. Die Quantität der verfügbaren Literatur zu solchen Spezialanwendungen ist enorm, die Arbeiten reichen teilweise mehrere Jahrzehnte zurück. Teilweise existieren gar Patente von Firmen zur Entwicklung von Spezialschleifscheiben. Beim Studium der Produktkataloge namhafter Hersteller finden sich jedoch im Grunde nur herkömmliche Schleifscheiben.

Die Spezialanwendungen werden jeweils vorgestellt, die erzielten Ergebnisse diskutiert und kritisch reflektiert. Vor- und Nachteile sowie eventuelle Hemmnisse für die Erreichung einer Serienreife werden beleuchtet. Nach der technologischen Bewertung erfolgt eine Betrachtung der Nachhaltigkeit der Spezialanwendungen, um eine abschließende Beurteilung zu ermöglichen, welche Konzepte sowohl technologisch also auch ökologisch und ökonomisch sinnvoll erscheinen und welche nicht. Hintergrund dieser Überlegungen ist die Tatsache, dass ein Spezialverfahren technologisch noch so interessant oder fähig sein mag, so lange es keine Vorteile für den Einsatz der Produkte oder eine Steigerung der Nachhaltigkeit der Produkte mit sich bringt, ist die Verfolgung des Spezialverfahrens nicht zu empfehlen. Daraus ergeben sich Empfehlungen für die Forschung und die Industrie zur Verfolgung bestimmter Spezialanwendungen.

Um die technologischen Aspekte der Spezialanwendungen verstehen zu können, bedarf es der Kenntnis der Grundlagen des Schleifens. Diese werden in Kapitel 3 vermittelt. Das Kapitel soll dabei nicht die einschlägige Literatur ersetzen (zum Beispiel ^{335, 408, 555}), sondern stellt eine Zusammenfassung der für die Schrift relevanten Teile dieser Literatur dar, ergänzt um Veröffentlichungen. Dabei werden alle für das Verständnis der Spezialanwendungen relevanten Grundlagen behandelt. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Spanbildung bei duktilen und spröden Materialien. Es wird verdeutlicht, dass sämtliche Vorgänge beim Schleifen auf die Vorgänge bei der Spanbildung zurückgeführt werden können. Die Spanbildung wiederum ist eine direkte Folge des Aufbaus und der Beschaffenheit der Schleifscheibe, die bei den meisten Spezialanwendungen gezielt beeinflusst wird. Ein weiteres Feld, welches von einer Reihe von Spezialanwendungen adressiert wird, ist die Wärmeabfuhr. Entsprechend werden die thermischen Aspekte des Schleifens bei den Grundlagen eingehend behandelt. Diejenigen Grundlagen des Schleifens, die für das Verständnis der Spezialanwendungen weniger relevant sind, werden nur kurz angesprochen. Zur Vertiefung sei auf die genannte Literatur verwiesen.

Explizit ausgenommen ist der Bereich der Mikrozerspanung. Die Wirkmechanismen, Anforderungen und Zielsetzungen weichen hier stark von der Makrobearbeitung ab und auch die Werkzeuge unterscheiden sich erheblich.

3 Grundlagen

Schleifen gehört nach DIN 8580 zu den trennenden Fertigungsverfahren und zur Gruppe der spanenden Verfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Es wird unterschieden nach dem Schleifen mit rotierendem Werkzeug, dem Bandschleifen und dem Hubschleifen. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird unter Schleifen das Schleifen mit rotierendem Werkzeug nach DIN 8589-11¹⁷¹ verstanden, worauf sich die Ausführungen in dieser Arbeit ebenfalls beziehen. Darin ist Schleifen definiert als:

Ein spanendes Fertigungsverfahren mit vielschneidigen Werkzeugen, deren geometrisch unbestimmte Schneiden von einer Vielzahl gebundener Schleifkörper aus natürlichen oder synthetischen Schleifmitteln gebildet werden und mit hoher Geschwindigkeit, meist unter nichtständiger Berührung zwischen Werkstück und Schleifkorn den Werkstoff abtrennen. (DIN9589-11)

Aus dieser Definition wird ersichtlich, dass sich das Schleifen grundlegend von spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmten Schneiden unterscheidet. Die Schneiden beziehungsweise Schleifkörper sind die Schleifkörner (im Weiteren auch nur Körner genannt), zum Beispiel aus Diamant, Siliziumkarbid oder Aluminiumoxid (siehe Kapitel 3.5.1). Die geometrische Unbestimmtheit bezieht sich dabei nicht auf den makroskopischen Gesamtaufbau der Werkzeuge, sondern auf die Form und Verteilung der Körner. Im Prozess kommen die Körner regellos zum Einsatz, wobei nicht alle auf dem Umfang des Schleifwerkzeugs befindlichen Schneiden mit dem Werkstück in Berührung kommen (siehe Kapitel 3.1). Während in der geometrisch bestimmten Zerspanung die Schneidengeometrie an bestimmte Bearbeitungsaufgaben angepasst werden kann (beispielsweise Bohrer mit facettierten Schneidenecken für die Gussbearbeitung), ist dies bei Schleifwerkzeugen nur bedingt möglich. Während Schneidstoffe entsprechend den zu bearbeitenden Werkstoffen gewählt werden und die Kornarten in begrenztem Maße ebenfalls angepasst werden können (siehe Kapitel 3.5.1), kann die eigentliche Schneidengeometrie nicht gesteuert werden. Betrachtet man ein beliebiges Korn, so ergibt sich je nach späterer, regelloser Lage des Kornes im Werkzeug eine Vielzahl möglicher Keilwinkel. Frei- und Spanwinkel ergeben sich dann entsprechend dem sich bei der Schleifwerkzeugherstellung zufällig ergebendem Keilwinkel (siehe auch Kapitel 3.1). Schleifen kann aufgrund seiner hohen Anzahl an Schneiden, deren geringen Dimensionen und ihrer unregelmäßigen Verteilung nur durch statistische Beschreibungen erklärt werden⁵⁴⁷.

Eine weitere Charakteristik beim Schleifen sind die stets negativen Spanwinkel⁵³⁵. Wie groß die Winkel tatsächlich sind, ist, basierend auf Literaturwerten, nicht eindeutig. Angaben reichen von 0° bis -35° , bei einem durchschnittlichen Winkel von -17° ¹⁹ zu 0° bis -80° bei durchschnittlichen Winkeln von -30° bis -40° ¹⁴¹. Selbstverständlich sind diese Winkel auch stark abhängig von Kornformen und Korntypen (zum Beispiel blockig und splittrig, siehe Kapitel 3.5.1), womit quantitative Aussagen erschwert werden. Berücksichtigt man darüber hinaus noch die effektiven Spanwinkel, also die tatsächlichen Spanwinkel, die sich bei den realen Eingriffsbedingungen ergeben, so kommen noch die Kantenverrundungen der Körner zum Tragen. Ausgehend von Eindringtiefen der Einzelkörner kleiner $5\ \mu\text{m}$ gibt Gühring hier im Mittel -81° an; nach Einsatz der Schleifscheibe gar -85° ²²². Aus negativen Spanwinkeln resultiert eine erhöhte Wärmeentwicklung bei der Spanbildung (siehe Kapitel 3.1). Je negativer der Spanwinkel, desto größer sind die plastischen Verformungen im Span und der Scherebene und damit auch die Schnittkräfte. Sehr große negative Spanwinkel verhindern eine Spanbildung; der

Werkstoff fließt unter dem Korn hindurch^{2, 1}. Damit gehen höhere benötigten Energien zur Zerspanung und höhere thermische Belastungen einher. Weiterhin liegt ein hoher Anteil an Reiben und Pflügen vor, da die Schneiden im Verhältnis zur Spanungsdicke als Stumpf anzusehen sind⁵²².

Die Winkel und Größen an der Schneide sind in Abbildung 1 verdeutlicht. Hierin ist auch die Abhängigkeit der Winkel von der Eingriffstiefe des Kornes aufgezeigt, der Spanungsdicke h_{cu} . Da die Kanten der Schneide nicht gerade sind, ändert sich mit der Spanungsdicke bei gleichem Korn der Spanwinkel. Weiterhin ändern sich die Winkel bei konstanten Eindringtiefen, aber fortschreitendem Verschleiß.

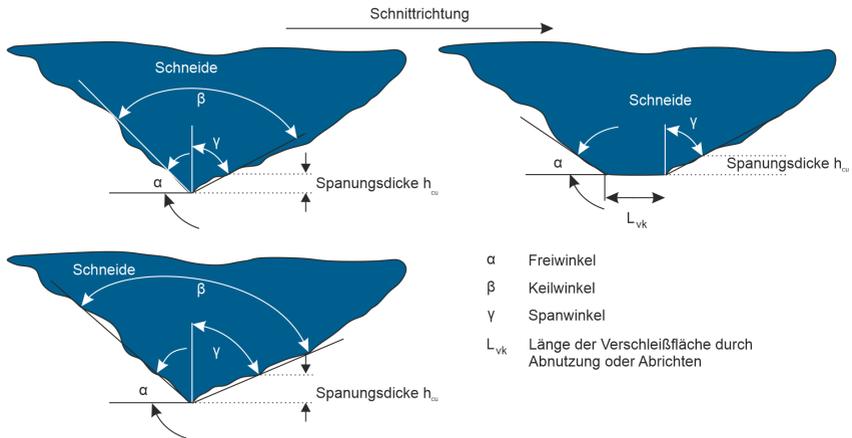


Abbildung 1: Größen am Schneidkeil in Analogie zur Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide, als Erweiterung und Ergänzung zu³³⁵

Neben der Unbestimmtheit der Körner und der Winkel am Korn ist ihre hohe Anzahl ein wesentlicher Unterschied zu Werkzeugen der geometrisch bestimmten Zerspanung⁵²². Beim Drehen kommen maximal zwei Schneiden (Haupt- und Nebenschneide) zum Eingriff, beim Bohren in der Regel fünf (zwei Haupt-, zwei Neben- und die Querschneide), beim Fräsen mit Messerköpfen kann die Anzahl mehrstellig sein. Beim Schleifen hingegen kommen, je nach Werkzeuggeometrie, Kornkonzentration und Eingriffsbedingungen (siehe auch Kapitel 3.5), tausende oder mehr Schneiden während eines Überschliffs in Eingriff; die Interaktion und Überlagerung der Einzelkorneingriffe macht die Beschreibung der Vorgänge in der Kontaktzone sehr komplex.

Die Schnittgeschwindigkeiten sind um ein Vielfaches höher als beim Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden. Schnittgeschwindigkeiten beim konventionellen Schleifen liegen typischerweise bei ca. 30 m/s, bei hochharten Schleifscheiben bei über 100 m/s, in industriellen Anwendungen der Massenfertigung bis hin zu 250 m/s (siehe Kapitel 3.5). Die Schnittgeschwindigkeit ergibt sich aus der Vektoraddition der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit und der Vorschubgeschwindigkeit. Während beim Drehen, Fräsen oder Bohren der Vorschub pro Umdrehung oder Vorschub pro Zahn entscheidend für die Prozesssteuerung ist, ist diese

Angabe beim Schleifen nicht möglich. Hier hat eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit eine Erhöhung der Schleifscheibenumdrehungen pro Zeit zur Folge, ohne Auswirkungen auf die Materialabtragsrate. Der Abtrag pro Zeit verteilt sich daher auf eine höhere Anzahl an Schneiden, die Belastung pro Korn sinkt.

Die geringe Größe der Körner, die hohe Anzahl an Körnern, die negativen Spanwinkel und die hohen Schnittgeschwindigkeiten haben vergleichsweise sehr geringe Abtragsraten pro Schneide beziehungsweise sehr geringe Spannungsdicken zur Folge. Typische unverformte Spannungsdicken liegen im Bereich $1\ \mu\text{m}$ bis $2\ \mu\text{m}$ ⁴⁰⁰. Daraus resultieren die Vor- und Nachteile des Schleifens. Die Vorteile sind hohe mögliche Abtragsraten und hohe erreichbare Oberflächengüten beziehungsweise geringe Oberflächenrauheiten. Aufgrund der sehr geringen erreichbaren Spannungsdicken eignet sich das Schleifen, im Gegensatz zum Drehen oder Fräsen mit Spannungsdicken im zwei bis dreistelligen Mikrometerbereich, für die Bearbeitung sprödharter Werkstoffe (siehe Kapitel 3.1); die Formgebung von Keramiktteilen erfolgt fast ausschließlich durch Schleifen²⁸⁰. Nachteile sind hohe spezifische Energien zur Zerspanung und hohe Wärmebelastungen der Werkstücke (siehe Kapitel 3.3). Gerade bei Keramiken kann es zu Schädigungen bei unsachgemäßer Prozessführung kommen, welche die Widerstandsfähigkeit und das Einsatzverhalten geschliffener Bauteile negativ beeinflussen können^{205, 273, 352, 532, 577, 636}. Um dies zu vermeiden, ist insbesondere auf geringe Spannungsdicken zu achten, worauf in Kapitel 3.1 näher eingegangen wird. Dabei hat auch die Schleifscheibenzusammensetzung einen entscheidenden Einfluss¹³.

Obwohl die Belegung von Schleifscheiben regellos erfolgt, ergibt sich aufgrund der Siebung der jeweils verwendeten Körnung (siehe Kapitel 3.5.1) eine statistische Verteilung der Körner. Durch die Modellierung von Schleifscheiben basierend auf diesen statistischen Werten können numerische Schleifscheibenmodelle erstellt werden, die gewisse Aussagen über den Schleifprozess bei Verwendung hochharter Schleifscheiben liefern können^{31, 682, 734}. Die Beschränkung auf hochharte Schleifscheiben geht auf die Verwendung von cBN und Diamant zurück, die eine gewisse Größe und charakterisierbare Geometrien aufweisen⁴⁶. Durch geometrische Durchdringungsberechnungen beziehungsweise kinematische Simulationen können so für eine modellierte Schleifscheibentopographie Werkstückrauheiten und Aussagen über Spannungsdicken getroffen werden^{284, 308}. Dabei ist eine sorgfältige Modellierung der Schleifscheibe notwendig um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten. Die Schleifscheibe muss anhand von licht- und rasterelektronischen Messungen charakterisiert werden, oder direkt mit Hilfe von 3D Messtechnik gescannt werden^{284, 584, 663}. Dabei ist insbesondere die korrekte Modellierung des Verschleißzustands wichtig³¹. Geometrische Durchdringungsberechnungen berücksichtigen jedoch nicht die spezielle Charakteristik von Schleifprozessen, den hohen Anteil an elastischen und plastischen Verformungen, womit nur eingeschränkte Aussagen möglich sind. Bereits frühe Arbeiten zeigten, dass die Kopplung mit simplen plastomechanischen Modellen Abhilfe schaffen kann⁵⁸⁴. Aktuelle Arbeiten fokussieren auf gitterfreie Simulationsmethoden, die eine Parallelisierung auf GPUs (Graphic Processor Units) erlauben; dies ermöglicht die Berechnung und Überlagerung von Einzelkorneingriffen⁵²¹. Problematisch ist jedoch die Modellierung der Materialeigenschaften. So ist die Anwendung des weit verbreiteten Johnson-Cook Modells aufgrund fehlender Informationen des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs bei den vorliegenden Dehnraten nicht sinnvoll, da die Fließspannung des Werkstoffs von der Dehnrate abhängt¹⁴. Die

Dehnraten beim Schleifen sind jedoch um Größenordnungen höher als diejenigen, für welche Fließkurven verfügbar sind³³⁸.

Eine Übersicht über bestehende Ansätze zur Modellierung des Schleifprozesses, deren Möglichkeiten und Grenzen, findet sich in²⁴⁸. Es lässt sich sagen, dass aufgrund der hohen Komplexität des Schleifprozesses, konkret der Ungewissheit, welche Vorgänge in der nicht einsehbaren Kontaktzone stattfinden, eine Simulation des Schleifprozesses bisher noch nicht den realen Prozess abbilden kann. Aufgrund des hohen Einflusses des Kühlschmierstoffs (siehe Kapitel 3.4), kann eine realitätsnahe Simulation des Schleifens auch nur unter dessen Berücksichtigung erreicht werden, was bisher nicht realisiert wurde.

In den folgenden Unterkapiteln wird näher auf die genannten Charakteristika des Schleifens eingegangen, die wesentlich für die Unterschiede zum Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden sind: die Spanbildung und die spezifische Energie. Diese Grundlagen werden in den danach folgenden Kapiteln aufgegriffen und in Bezug zu den jeweiligen Betrachtungsgrößen gesetzt. Die Ausführungen (auch in den folgenden Kapiteln) beziehen sich in der Regel auf die Zerspanung von Stahl und anderen Metalllegierungen, die auch das Groß der geschliffenen Materialien in der Industrie bilden. Sollten andere Materialien behandelt werden, so wird dies entsprechend vermerkt.

3.1 Spanbildung

Eine Bildung von Spänen beim Schleifen wurde in wissenschaftlichen Arbeiten zuerst von Alden postuliert¹¹ und durch optische Untersuchungen des Schleifschlammes bestätigt (Beiträge von Ernst und Tarasov in¹⁸⁷). Wie bei jedem Zerspanprozess bestimmt die Spanbildung den Prozess und das Einsatzverhalten der Werkzeuge. Für eine Optimierung der Werkzeuge und insbesondere für die Entwicklung von Spezialwerkzeugen ist die Kenntnis der Vorgänge bei der Spanbildung unerlässlich. Hierbei muss die Spanbildung zweier Materialgruppen unterschieden werden, duktile Materialien und sprödharte Materialien. Um eine Materialtrennung zu erreichen, müssen die Bindungskräfte zwischen Atomen, Ionen oder Molekülen überwunden werden⁵²⁰. Grundsätzlich handelt es sich bei duktilen Werkstoffen um eine irreversible Verformung und bei sprödharten Materialien um eine Bruch- oder Rissbildung⁵²⁰. Deutlich wird das unterschiedliche Verformungsverhalten duktiler und spröder Materialien durch den Zugversuch, welcher das Spannungs-Dehnungsverhalten des Materials betrachtet (Abbildung 2).

Bei beiden Materialgruppen gibt es einen elastischen Bereich, der durch die Hooksche Gerade beschrieben wird. Wird die Zugprobe entlastet, so geht die Probe in ihren makroskopischen Ausgangszustand zurück. Die Steigung der Hookschen Gerade wird durch das Elastizitätsmodul beschrieben und ist bei sprödharten Materialien in der Regel höher als bei duktilen Materialien. Bei duktilen Materialien kommt es ab der Überschreitung eines materialspezifischen Grenzwertes, der Streckgrenze, zur plastischen Verformung des Materials. Bei Entlastung der Zugprobe verbleibt eine plastische Verformung beziehungsweise Einschnürung. Dabei ist zwischen duktilen Materialien mit oder ohne ausgeprägte Streckgrenze zu unterscheiden. Bei Materialien mit ausgeprägter Streckgrenze nimmt die Dehnung der Zugprobe bei konstanter Last zunächst zu. Duktile Materialien ohne ausgeprägte Streckgrenze weisen einen kontinuierlichen Übergang zwischen elastischem und plastischem Bereich auf. Bei weiter ansteigender Belas-

tung schnürt die Probe schließlich ein, es kommt zu einer deutlichen Verjüngung des Querschnitts in einem begrenzten Teil der Probe, die Zugfestigkeit ist erreicht. Bei weiterer Belastung schnürt die Probe bis zum Bruch weiter ein.

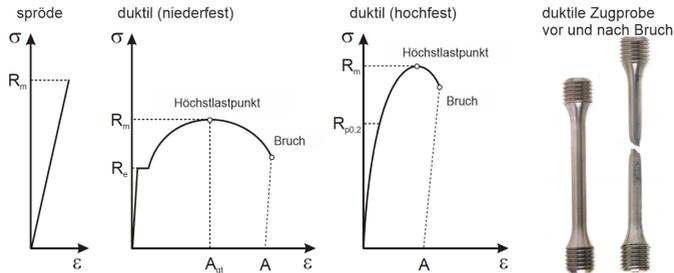


Abbildung 2: Fließkurven verschiedener Werkstoffklassen; nach ⁵²⁰

Plastische Verformungen stellen die Bewegung von Versetzungen kristalliner Werkstoffe dar. Spannungen im Material werden damit abgebaut. Die Ionenkristalle sprödharter Werkstoffe können unter üblichen Bedingungen nicht plastisch verformt werden, das Material verhält sich spröde. Ist die Zugfestigkeit erreicht, kommt es direkt zum Bruch der Probe. Ein Spannungsabbau über die Bewegung von Versetzungen ist hier nicht möglich.

Wegen der unterschiedlichen Eigenschaften duktiler und spröder Materialien weichen auch die Mechanismen bei der Spanbildung ab, worauf im Folgenden eingegangen wird. Typische duktile Materialien sind Stähle und andere Metalle, sprödharte Materialien sind (technische) Keramiken und Gläser.

3.1.1 Spanbildung bei duktilen Materialien

Beim Drehen und Bohren sind die Haupt- und Nebenschneiden nach Erreichen des stationären Prozessbereichs ständig im Eingriff. Der Anteil des Schnittwegs der Schneide bis zum Erreichen des stationären Prozessbereichs ist in der Regel, abhängig von der Eingriffslänge, sehr gering. Beim Schleifen erfolgt der Schneideneingriff diskontinuierlich, vergleichbar dem Fräsen. Abhängig von Gegen- oder Gleichlauf dringen die Schneiden mit Null- oder voller Spanungsdicke in das Werkstück ein (Ausnahme bilden die Eingriffsbedingungen am Grabengrund beim Vollnutschleifen mit Schleifstiften, welches mit dem Vollnutfräsen als Sonderfall vergleichbar ist). Wie beim Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide ^{69, 578} muss eine Mindestspanungsdicke erreicht werden, ab der es zur Spanabnahme kommt ^{304, 402, 413}. Relevant ist hierbei die Korneindringtiefe, nicht die Zustellung ⁴³. Man spricht hierbei vom Erreichen der Schnitteinsatztiefe T_{μ} . Die Spanbildung wird in drei Phasen unterteilt (Abbildung 3). In Phase I kommt es aufgrund der geringen Eingriffstiefe nur zu elastischen Verformungen und Reibung. Mit steigender Eingriffstiefe kommt es zusätzlich in Phase II zu plastischer Verformung und der Bildung von Aufwürfen hin zu den Seiten des Kornes (Gratbildung), sowie zu plastischem Materialfluss unterhalb des Kornes. In Phase III kommt nach Erreichen der Schnitteinsatztiefe zu den genannten Vorgängen die Spanbildung hinzu; gleichzeitig ist stets ein Anteil plastischer Verformung vorhanden ⁴¹⁴ und, bedingt durch grundlegende Materialeigenschaften (hookesches Gesetz), auch elastische Verformung. Der Übergang von Phase II zu III entspricht

dem Überschreiten der Scherspannung über die Fließgrenze respektive Bruchfestigkeit des Werkstoffs⁵⁶⁰.

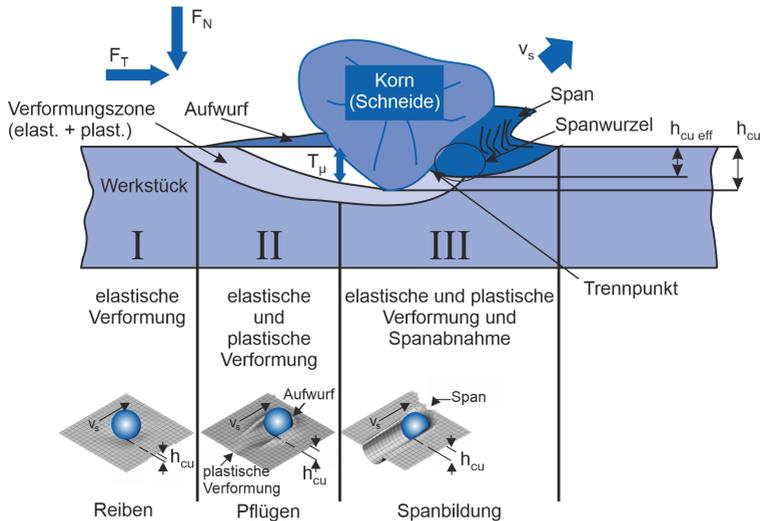


Abbildung 3: Die drei Phasen der Spanbildung beim Schleifen; nach³³⁵ und⁶⁶⁵, sowie¹⁴

Dieses Spanbildungsmodell beruht, im Gegensatz zum Modell der Spanbildung der geometrisch bestimmten Zerspanung^{390, 680}, nicht auf Beobachtungen des Prozesses. Der Schleifprozess konnte, aufgrund der hohen Schnittgeschwindigkeiten, den geringen Eingriffsdimensionen und der nicht einsehbaren Kontaktzone, bisher nicht unmittelbar aufgezeichnet werden. Das Modell beruht auf Spanwurzeluntersuchungen durch Schnittunterbrechungen und Kornausbrüche¹⁸⁷, Einkornritzversuchen und den bereits genannten Analogien zur geometrisch bestimmten Zerspanung. Weiterhin haben zahlreiche Untersuchungen aus der Tribologie zum Verschleifen von Oberflächen durch Hartstoffpartikel oder zu Rauheiten gleitender Oberflächen zum Verständnis der Vorgänge beim Schleifen beigetragen (zum Beispiel^{314, 446, 549}).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass Analogieversuche wie zum Beispiel Ritzversuche die Vorgänge während des Schleifens nur näherungsweise widerspiegeln; vor allem die thermischen Bedingungen weichen erheblich ab⁵⁹⁵. Im Realprozess findet ein erhebliches Maß an Überlagerungen einzelner Korneingriffe statt, welche Spannungsfelder induzieren⁶³⁵. Viele Körner erreichen nur Phase I oder II der Spanbildung und erhöhen aufgrund der Reibung die Temperaturen, was zu einem veränderten Materialverhalten führt⁶⁵⁵, zum Beispiel zu einer abgesenkten Streckgrenze. Weitere abweichende Aspekte sind die Abwesenheit von Spänen beim Einkornritzen, die bei der Überlagerung der Eingriffe beim Schleifen im Prozess vorhanden sind, und vor allem die geänderten Kühlschmierbedingungen⁶³⁵. Dennoch zeigt sich, dass das beschriebene Spanbildungsmodell zum Verständnis und zur Erklärung von Vorgängen beim Schleifen von erheblichem Nutzen ist.

Eine hohe Anzahl an Autoren hat zu diesem Spanbildungsmodell beigetragen. Als Ursprung lassen sich die Arbeiten von Hahn in den 60er Jahren nennen, der den Korneingriff in die Phasen Reiben, Pflügen und Schneiden unterteilt hat²³⁹. Während manche Forscher aus der gleichen Zeit dies schnell übernahmen⁶¹⁰, ist in früheren Arbeiten und Arbeiten anderer Zeitgenossen oft nur von zwei Phasen die Rede, dem Reiben oder Pflügen (englisch rubbing/ploughing), wobei hiermit nur das plastische Verformen des Materials bezeichnet wurde, und der Spanbildung (siehe zum Beispiel^{213, 446, 549}). Dies ist wohl auch der schwierigen messtechnischen Erfassung der elastischen Phase geschuldet, die erst kürzlich erstmals quantifiziert werden konnte⁵¹⁴. Dennoch belegten frühe Untersuchungen bei geringsten Zustellungen von $0,2\ \mu\text{m}$, dass es weder zu einem Spanabtrag noch zu plastischer Verformung kommt, womit das drei-Phasen-Modell belegt wurde⁶⁰⁶ und sich entsprechend durchsetzte.

Neuere Arbeiten von Denkena et al. setzten eine Vorrichtung zur plötzlichen Schnittkraftunterbrechung ein, um die Spanbildung während des Schleifens einzufrieren und damit beobachtbar zu machen¹⁶³. Obwohl nur bei geringen Schnittgeschwindigkeiten durchgeführt ($5\ \text{m/s}$), bilden die Ergebnisse erstmals die Spanbildung bei einem Realversuch ab. Dabei konnten verschiedene Spanformen beobachtet werden, auch solche, die durch lateralen Materialfluss an den Seiten der Körner entstanden sind (Abbildung 4 Bild eins bis drei). Weiterhin konnten auch Materialverdrängungen detektiert werden, die aus Phase II der Spanbildung beziehungsweise dem Mechanismus des Mikropflügens resultieren (Abbildung 4 Bild 4). Somit kann entlang der Kontaktlänge ein Zunehmen des Materialabtrags respektive eine Abnahme rein plastischer Verdrängungsvorgänge beobachtet werden, also den Übergang von Phase II zu Phase III, jedoch liegen alle Mechanismen an beliebigen Stellen in der Kontaktzone gleichzeitig vor.

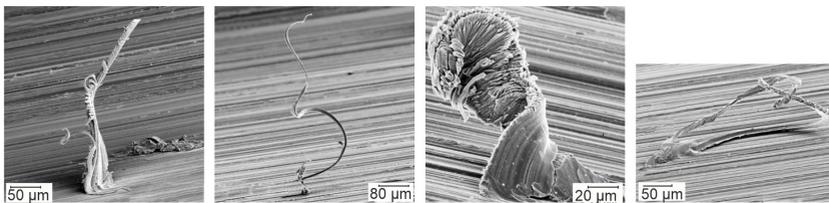


Abbildung 4: REM-Aufnahmen von Schleifspänen; nach¹⁶³

Der Anteil des gesamten Eingriffs einer Schneide an Phase III nimmt mit sinkender Einzelkornzustellung ab und der Anteil des Pflügens nimmt zu⁶⁰⁶. Somit ist der Anteil des Pflügens bei geringen Einzelkornzustellungen dominant⁶⁰⁶. Aber selbst bei sehr kleinen Zustellungen kommt es zur Bildung von Spänen⁶⁰⁶, die auf das Mikroermüden an den Ritzrändern zurückgeführt werden. Diese Abtragsmechanismen sind stark von der Kornform abhängig und werden in Kapitel 3.5.1 vertieft.

Höhere Schnittgeschwindigkeiten verschieben aufgrund der Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Dehnrate die Übergangsschnittiefen. In Einkornritzversuchen konnten dies Anderson et al. nachweisen¹⁴. So verschob sich der Übergang von Phase I zu Phase II der Spanbildung von $0,06\ \mu\text{m}$ bei $5\ \text{m/s}$ auf $1,09\ \mu\text{m}$ bei $30\ \text{m/s}$. Der Übergang von Phase II zu Phase III verschob sich von $3,21\ \mu\text{m}$ bei $5\ \text{m/s}$ auf $4,31\ \mu\text{m}$ bei $30\ \text{m/s}$. Ermittelt wurden diese Übergänge anhand der gemessenen Kraftverläufe im Vergleich zu gefitteten Kraftverläufen bei

ansteigender Ritztiefe¹⁴; die angegebenen Werte sind somit nicht als absolut zu betrachten. Andererseits nimmt bei steigender Schnittgeschwindigkeit der Anteil an abgetragenen Material im Verhältnis zu verdrängtem Material zu und die Materialaufhäufungen (pile-up) sind auch absolut kleiner¹⁴; ein Anstieg der Schnittgeschwindigkeit ist somit trotz größerer Schnitttiefen als positiv zu bewerten.

Die Spanungsdicke lässt sich im Gegensatz zum Zerspanen mit geometrisch bestimmter Schneide nicht berechnen. Dies ist vor allem den Schleifwerkzeugen geschuldet, deren stochastische Prägung die Vorhersage der Eingriffsbedingungen unmöglich macht. Die Anzahl aktiver Schneiden und deren Geometrie kann nicht vorhergesagt werden und ist weiterhin von der gewählten Kinematik abhängig⁵⁷⁶. Als Anhaltspunkt für die Größe der Späne dient die Berechnung der unverformten Spanungsdicke h_{\max} , die durchschnittliche maximale Dicke eines kommaförmigen Spans⁵⁷⁶. Die am häufigsten verwendeten Formeln zu deren Berechnung basieren auf Analysen von Alden¹¹, Guest²²¹, Pahlitsch und Helmerdig⁴⁹⁵, Reichenbach et al.⁵¹⁶, Peklenik⁵⁰², Okamura und Nakajima (Angabe in⁵⁷⁶; Original nicht beziehbar), Kassen³⁰⁹ und Werner⁶⁸⁸. Für die Berechnung sind jedoch eine Charakterisierung der Schleifscheibentopographie und die Unterscheidung nach statischen (alle Körner, die über die Bindung herausragen) und dynamischen beziehungsweise kinematischen (alle aktiv spanenden) Körnern notwendig, die entweder extrem aufwendig und nur auf den momentanen Zustand der Schleifscheibe bezogen werden kann, oder mit starken Vereinfachungen einhergeht, da die Anzahl kinematischer Schneiden unter anderem mit der Schnittgeschwindigkeit⁶⁶³ oder der aufgebrachtten Last (elastisches Verhalten der Bindung)⁵¹⁶ variieren. Weiterhin kann ein Korn auch mehrere Schneiden aufweisen und die Messungen sind wegen der geringen Dimensionen der Schneiden generell fehlerbehaftet⁶⁶³.

Um diese messtechnischen Probleme zu umgehen, gab es in den 60er und 70er Jahren Bestrebungen eine universale, einfach zu berechnende Analogiegröße zur Spanungsdicke zu finden. Diese Größe beruht auf Untersuchungen von Kurrein³⁶³, Colding¹⁴¹, eine Zusammenfassung seiner Arbeiten findet sich in¹³⁹ und¹⁴⁰ (hierin als äquivalente Dicke eines Spans bezeichnet)), Werner und Younis⁶⁸⁹, Peters⁵⁰⁵ sowie König und Werner (laut⁵⁷⁶; Ursprungsquelle nicht beziehbar) und wurde im Rahmen einer CIRP Arbeitsgruppe zum Quotienten aus dem bezogenen Zeitspannungsvolumen Q'_w (Produkt aus Vorschubgeschwindigkeit und Zustellung) zur Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s definiert⁵⁷⁶. Diese Größe wird als äquivalente Spanungsdicke h_{eq} bezeichnet. Sie ist der Kehrwert des „Schleifäquivalents“, welches von Colding¹⁴⁰ postuliert wurde und zum Vergleich des Verschleißes beim Schleifen mit dem beim Fräsen und Drehen diente (siehe auch⁷⁰⁰). Die äquivalente Spanungsdicke beschreibt *„die Dicke eines theoretischen Spanungskörpers, der vom Eintritt eines bestimmten Schneidflächenelements in das Werkstück bis zu seinem Austritt zerspannt wird.“*³³⁵. Die äquivalente Spanungsdicke quantifiziert damit auch den Einfluss der Stellgrößen auf die Spanungsdicke. Eine Steigerung der Zustellung oder der Vorschubgeschwindigkeit führt zu steigenden Spanungsdicken, eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit zu deren Senkung.

Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Größe direkt mit den Kräften, der resultierenden Oberflächengüte des Werkstücks und dem Verschleißverhalten der Schleifscheibe korreliert⁵⁷⁴ und somit eine geeignete Kenngröße zur Charakterisierung des Schleifprozesses

darstellt ⁵⁷⁶, wobei eine Steigerung von h_{eq} sich stets negativ auf die genannten Größen auswirkt.

Damit sagt die äquivalente Spannungsdicke aus, dass kleinere Abtragsraten im Hinblick auf die Oberflächenqualität, die Kräfte und den Verschleiß zu bevorzugen sind, und dass hohe Abtragsraten durch höhere Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten kompensiert werden können.

Somit wären kleine Spannungsdicken stets zu bevorzugen. Hierbei wird jedoch der Aspekt der spezifischen Energie, also der Effizienz des Schleifprozesses vernachlässigt. Große Spannungsdicken sind hierbei vorteilhaft, denn mit ihnen geht eine Reduzierung der spezifischen Energien einher ⁵¹⁶. Dies ist auf die Reduzierung des Reibens und Pflügens ⁵¹⁶ und damit an Verlustenergien zurückzuführen. Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 3.2 näher eingegangen.

Obwohl die äquivalente Spannungsdicke also ein einfaches Mittel zur Charakterisierung des Prozesses darstellt, berücksichtigt sie nicht alle relevanten Aspekte des Prozesses und sie ist keinesfalls mit der beziehungsweise den unterschiedlichen, auch von der Kornform und -größe abhängigen, realen Spannungsdicken im Prozess gleichzusetzen. Zur Abbildung aller relevanten Effekte existieren zahlreiche analytische Ansätze zur Modellierung des Schleifprozesses, um eine Vorhersage des Prozesses zu ermöglichen. Während Modelle zum Beispiel von Challen und Oxley ¹²³, Komvopoulos et al. ³⁵⁰ oder Abede und Appl ¹ sehr gut für die Vorhersage von Kräften ⁶⁴⁰ und Abtragsraten ³¹² beim Einkornritzen angewendet werden können, sind diese nur eingeschränkt auf reale Schleifprozesse anwendbar ⁶⁴⁰, da hierzu eine detaillierte Beschreibung der Schleifscheibentopographie und des Verschleißzustands, insbesondere der Kornform, notwendig ist ⁶³⁸. Weiterhin zeigen die Ergebnisse von Einkornritzversuchen und darauf basierende Modelle abweichendes Verhalten zu realen Schleifprozessen ¹²³, da sich hierbei die Bedingungen stark von denen beim realen Schleifen unterscheiden. So sind die Temperaturen beim Schleifen deutlich höher, was Auswirkungen auf das Materialverhalten hat, und der Einfluss der Überlagerung der Schneiden und den variierenden Eingriffstiefen wird vernachlässigt. Weiterhin variiert der Anteil an pflügenden und derjenigen der spanenden Schneiden während des Eingriffs ⁵³³.

Die Spannungsdicke wird also durch die Kinematik des Prozesses bestimmt. Darüber hinaus hängt die Spannbildung wesentlich von der Schleifscheibenspezifikation ab. Dies umfasst globale physikalische Eigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit der Bindung oder deren dämpfende Eigenschaften, aber auch mikroskopische Einflussgrößen wie die Kornkonzentration, -größe und -form. So ist die Spannbildung aufgrund der vorliegenden negativen Spanwinkel durch hohe Umformgrade und einen hohen Anteil plastischer Verformung geprägt ¹⁵⁴. Der Span läuft nicht an der Spanfläche eines Kornes ab, sondern wird vor der Schneide gestaucht und gequetscht oder zu den Seiten hin verdrängt. Allzu negative Spanwinkel verhindern eine Spannbildung vor dem Korn ⁴⁴⁶. Die negativen Spanwinkel haben zur Folge, dass mehr Material zu den Seiten hin verdrängt und abgetragen wird als vor der Schneide ⁶⁰⁷. Ein großer Anteil des Materialabtrags findet somit durch Materialermüdung statt; das Material wird durch aufeinanderfolgende Schneiden immer wieder verdrängt und verformt, bis es versprödet und sich von der Werkstückoberfläche löst ^{314, 414} oder von nachfolgenden Schneiden abgetragen wird ⁶⁰⁷.

Eine Steigerung der Korngröße oder die Reduzierung der Kornkonzentration führt zu größeren Spannungsdicken. Eine Steigerung der Bindungshärte führt im Allgemeinen bei sonst gleichen

Bedingungen ebenfalls zu größeren Spannungsdicken. Auf die genannten Zusammenhänge wird in den jeweiligen Abschnitten von Kapitel 3.5 noch näher eingegangen.

3.1.2 Spanbildung bei sprödharten Werkstoffen

Bei der Bearbeitung sprödharter Werkstoffe (zum Beispiel Keramik, Glas) erfolgt die Zerspannung bei hoher Eindringtiefe einer Schneide nicht durch die beschriebene klassische Spanbildung. Durch die Bearbeitung werden Mikrorisse induziert, die sich durch weitere Belastung ausbreiten, das Material schwächen (Mikroermüdung) und schließlich zum Ausbrechen und Abplatzen von Bruchstücken des Materials führen^{59, 286}. Die Folge sind nicht scharfe beziehungsweise mit Ausbrüchen behaftete Kanten (chipping) und Kerben auf der Oberfläche (cracking), also geringe Bearbeitungsqualitäten⁵⁹⁵. Weiterhin kommt es auch zu Rissen in das Werkstück hinein, die zum frühzeitigen Versagen der Bauteile im Einsatz führen können^{413, 562}. Diese resultieren aus Deformationen respektive Überlastungen des Materials, die zu Eigenspannungen führen^{355, 411, 413, 540}. Dabei kann es aufgrund verbleibender Zugspannungen im Material auch nach Tagen ohne weitere Belastung zur Rissbildung kommen⁴⁴⁵. Die Mikroermüdung oder der Spröbruch als Abtragsmechanismus bei sprödharten Werkstoffen zeigt sich auch in der Oberflächenbeschaffenheit. Während bei duktilen Werkstoffen eine in Schnittrichtung gerichtete Oberflächenstruktur (Schleifriefen) durch die Korneindringbahnen entsteht, ist dies bei sprödharten Werkstoffen nicht der Fall, die Oberflächenrauheit in Schnittrichtung unterscheidet sich nur wenig von der senkrecht dazu²⁸⁷.

Wie auch bei der Spanbildung duktiler Materialien beruhen die Erkenntnisse zur Spanbildung beziehungsweise den Abtragsmechanismen keramischer Werkstoffe auf Analogieversuchen. Dazu gehören neben Einkornritzversuchen insbesondere auch Eindringversuche mit meist pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen. Diese Untersuchungen aus dem Bereich der Materialwissenschaften unter statischen Belastungen sprödharter Werkstoffe führten zu folgender, heute allgemein anerkannter, Beschreibung nach Lawn und Swain³⁷¹ (Abbildung 5):

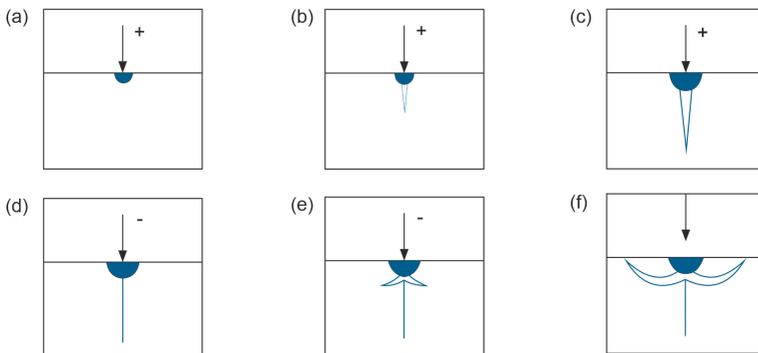


Abbildung 5: Schädigungsmodell sprödharter Werkstoffe bei Eindringen eines Indenters³⁷¹

Beim Eindringen des Körpers kommt es zu einer irreversiblen Deformation (blau in der Abbildung) im Kontaktpunkt (a). Bei weiter steigender Eindringtiefe respektive Belastung kommt es bei Überschreitung eines materialspezifischen Grenzwerts zur Rissinitiierung (b). Bei weiterer

Laststeigerung kommt es zu einer stabilen Rissausbreitung (c). Bei Entlastung, aber weiterem Kontakt des Eindringkörpers mit der Oberfläche, schließt sich der entstandene Riss wieder, heilt jedoch nicht aus (d). Kurz vor dem Abheben des Eindringkörpers kommt es zur Entspannung des Materials, überlagert durch Zugeigenspannungen im Spannungsfeld; dabei kommt es zur Ausbildung von lateralen Rissen (e). Bei kompletter Entlastung wachsen die lateralen Risse weiter (f), es kann zu chipping kommen.

Dieses Modell wurde analog auf das Schleifen übertragen. Im Gegensatz zum Spanbildungsmodell duktiler Werkstoffe mit einer Korneindringkurve in drei Phasen und einer bogenförmigen Eindringbahn geht es von einer konstanten Eindringtiefe und einer geradlinigen Eindringbahn aus. Die Bildung lateraler und axialer Risse bei Entspannung, sozusagen unter dem Eindringkörper⁶⁰³, finden entlang der Eindringbahn des Kornes statt. In Erweiterung des 2D-Modells zur Be- und Entlastung bei Indentationsversuchen geht das Modell für die 3D-Belastung während des Schleifens noch von radialen Rissen aus, also den Ausbrüchen an den Ritzrändern (Abbildung 6).

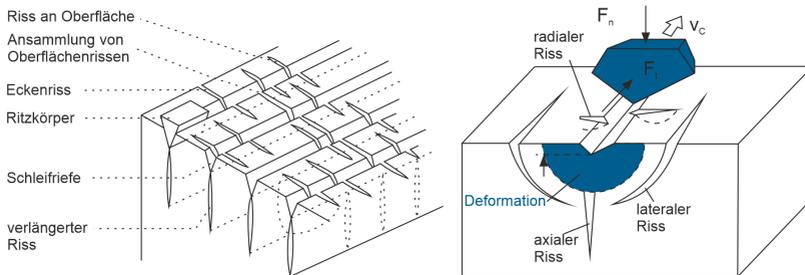


Abbildung 6: Rissbildung an einer geritzten Oberfläche²⁴² und generalisiertes 3D-Abtragsmodell³³⁵

Risse treten bei Überschreitung material- und geometrieabhängiger mechanischer Grenzlaster beziehungsweise Grenzenergien auf^{315, 585, 603}, thermische Einflüsse sind aufgrund der hohen Temperaturbeständigkeit keramischer Werkstoffe eher gering¹⁸⁸. In diesem Sinne hat auch die Ritzgeschwindigkeit keinen Einfluss, da kein Einfluss auf die thermische Belastung resultiert⁶³. Da die Risslänge direkt mit der Belastung zusammenhängt⁴¹¹, muss der Schleifprozess entsprechend ausgelegt werden. Es konnte auch gezeigt werden, dass die Biegefestigkeit keramischer Bauteile mit zunehmender Werkstückrauheit oder Normalkräften im Prozess abnimmt⁴⁸⁶. Bei der Auslegung des Prozesses hat insbesondere die Kornform¹³⁸ und Korngröße^{277, 290, 296, 486, 634} einen Einfluss auf die Belastungen des Werkstücks im beziehungsweise durch den Prozess und das Ermüdungsverhalten der Werkstücke nach der Bearbeitung. Indenterversuche zeigten, dass mit steigender Indenterlast die Biegefestigkeit der belasteten Proben abnahm⁴⁸⁶. Bei gleichen Stellgrößen beim Schleifen von Siliziumkeramik wurde eine steigende Anzahl³⁰¹ und Größe²⁹⁰ an Oberflächendefekten mit steigender Korngröße beobachtet.

Bei der spröden Zerspanung unterscheiden sich die Späne deutlich von Metallspänen. Hierbei gibt es keine Aufschmelzungen, die „Späne“ sind kleine Keramikpartikel, keine länglichen, kontinuierlichen Späne^{6, 277, 283, 287, 497, 595}. Dies ist auf den Abtragsmechanismus des Sprödbrechens im Gegensatz zur Scherung bei Metallen zurückzuführen^{6, 287}.

Zerspanung sprödharter Werkstoffe im duktilen Modus

Die vorhergehenden Ausführungen beziehen sich auf die Materialtrennung durch Spröbruch und Mikroermüdung, die spröde Zerspanung. Je nach Prozessführung können jedoch auch bei sprödharten Materialien kontinuierliche Späne, also Fließ- und Lamellenspäne^{3, 5, 63, 177, 282, 283, 399, 410, 443, 459, 543, 540, 595, 648, 709} erzeugt werden, die plastisches Fließen implizieren. Bei entsprechender Prozessführung zeigen auch Ritzversuche plastische Aufwürfe an den Seiten der Ritze^{681, 723} und sogar mikrometergroße segmentierte Späne^{542, 630}. Dies wird auf den sogenannten duktilen Zerspanungsmodus zurückgeführt^{59, 62}, der erstmals von King und Tabor dokumentiert wurde³¹⁸. Dieser ist durch Werkstücke mit scharfen, ausbruchsfreien Kanten und Oberflächen gekennzeichnet^{22, 437}. Die Oberfläche im duktilen Modus bearbeiteter sprödharter Werkstoffe zeigt die typische, durch plastische Verformung und Spannbildung resultierende Riefenbildung des Schleifens⁴⁶⁴. (Mikro-)Risse in der Randzone, wie sie beim spröden Abtrag vorliegen, werden im duktilen Modus vermieden⁸⁶.

Obwohl empirisch nachweisbar und auch quantifizierbar, ist der genaue Mechanismus des duktilen Modus nicht abschließend geklärt. Der Mechanismus, der bei spröden Materialien zu einem duktilen Verhalten führt, wird mit dem Erreichen hoher hydrostatischer Drücke begründet^{72, 74, 190, 267, 413, 540, 709}, basierend auf den grundlegenden Überlegungen von Mohr⁴⁴⁰. Dies wurde in frühen Arbeiten zu Zug- und Druckversuchen unter Anlegen eines hydrostatischen Druckfeldes von Bridgman⁷³ folgendermaßen erklärt: ein Bruch kann nur dann erfolgen, wenn dabei Energie freigesetzt wird. Ein (spröder) Zugbruch kann daher unter idealen Bedingungen nur dann erfolgen, wenn die Zugspannung den angelegten, äußeren hydrostatischen Druck erreicht. Der hydrostatische Druck in der Verformungszone reduziert also die Tendenz zur Rissbildung⁶¹ beziehungsweise unterdrückt diese³⁹⁹, da Rissbildung nur bei Zugspannungen auftritt¹⁷ und ein hydrostatisches Spannungsfeld Druckeigenstressungen induziert²¹⁴.

Dies wird auch durch neuere Arbeiten zur Analyse des Übergangs von spröder zu duktiler Zerspanung bei der Ultrapräzisions(UP)-Bearbeitung mittels Molekulardynamik (MD)-Simulationen im Nanometerbereich bestätigt²¹⁴. Cai et al. konnten zeigen, dass bei Unterschreitung einer kritischen Spannungsdicke Druckeigenstressungen im Material induziert werden, die eine Rissausbreitung verhindern,^{116, 117} beziehungsweise dass bei ausreichend kleiner Spannungsdicke die Scherspannungen höher sind als die Fließspannungen und damit eine Versetzungsbewegung ermöglicht wird¹¹⁵. Tanaka et al. zeigten ebenfalls, dass die Scherung unter Druckspannung bei Silizium zu einem duktilen Modus führt⁶⁰⁹. Unter Vernachlässigung des Einflusses der Prozesstemperatur bei Annahme einer sehr scharfen Schneide (Schneidkantenradius 50 nm) zeigten die Simulationen von Xiao et al. einen duktilen Abtrag bei Unterschreitung einer bestimmten Zustellung in naher quantitativer Übereinstimmung mit Ritzversuchen in gleichen Dimensionen. Die Simulationsergebnisse deuten darauf hin, dass die spröde Zerspanung bei Überschreiten eines Grenzwerts der Spannungsdicke auf die Initiierung von Zugeigenstressungen zurückzuführen ist⁷⁰³.

Der hydrostatische Druck muss im Bereich der Härte des Materials liegen⁵ und muss sowohl in der Scherzone, als auch vor und nach der Schneide und bis hin zur Werkstückoberfläche dreidimensional vorliegen, also in alle drei Raumrichtungen⁸⁶. Hohe hydrostatische Drücke werden durch verrundete Schneiden begünstigt⁵⁴¹, scharfe Schneiden führen zur Rissausbreitung durch Indizierung von Zugeigenstressungen in der Trennzone⁷⁰⁷. Ebenso begünstigen

negative Spanwinkel hydrostatische Spannungsfelder^{460, 707} und damit den duktilen Modus⁶¹. Beide Zusammenhänge wurden durch Finite Elemente-Simulationen bestätigt⁷⁰¹. Es wird ein viskoses Verhalten des Materials erreicht⁵⁴⁰, Molekülreihen gleiten aufeinander ab, es findet plastische Verformung statt⁷². Die Vorgänge im Material bei plastischer Verformung sind dabei analog zu duktilen Materialien, also Phasentransformationen, zweidimensionale Gitterfehler (Korngrenzen, Stapelfehler, Zwillingsbildung, etc.) und chemische Reaktionen⁷²⁴. Plastisches Verhalten liegt demnach vor, wenn ein genügend hoher Druck pro Fläche aufgebracht wird⁵⁷³. Dabei wird eine direkte Überwindung der chemischen Bindung angenommen⁴⁴⁵, dieses Phänomen wird als Mikroplastizität beschrieben⁵⁷³. König und Sinhoff erklären das duktile Verhalten durch das Aufstauen von Scherspannungen, die zur Plastifizierung führen³⁵⁵. Während manche Autoren^{443, 666, 724} den Hauptmechanismus zur duktilen Zerspanung hochdruckbedingten Phasentransformationen (high-pressure phase transformation) zuschreiben, also quasi einer Metallisierung sprödharter Werkstoffe⁴⁴³, so wird in anderen Veröffentlichungen auf das Abgleiten von Versetzungen verwiesen^{387, 388} (beides unter der Voraussetzung hoher hydrostatischer Drücke) beziehungsweise dem Vorliegen von Scherspannungen im hydrostatischen Druckbereich. Die Fließvorgänge sind auf sehr kleine, nanoskalige oder atomare Nahbereiche beschränkt; diese sind um den Faktor 10^6 bis 10^8 kleiner als bei Metall⁵⁴⁰. Bei Gläsern kann die plastische Zone durch thermische Aktivierung bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur vergrößert werden⁵⁴⁴. Hohe Temperaturen begünstigen also den duktilen Modus^{359, 542}. Jedoch muss das Material nicht verflüssigt werden; der duktile Modus kann auch bei Temperaturen unterhalb denjenigen vorliegen, bei denen Glas flüssig ist⁴⁴³ insofern ein hydrostatisches Druckfeld erreicht wird⁷⁰⁷.

Eine anschauliche Untersuchung findet sich in⁵⁰⁰. Hier wurde der Einfluss eines hydrostatischen Druckfeldes auf den Übergang von duktilem zu sprödem Materialverhalten im Zugversuch nachgewiesen. Dabei verhielt sich Marmor umso duktiler, je höher der hydrostatische Druck war, siehe Abbildung 7.

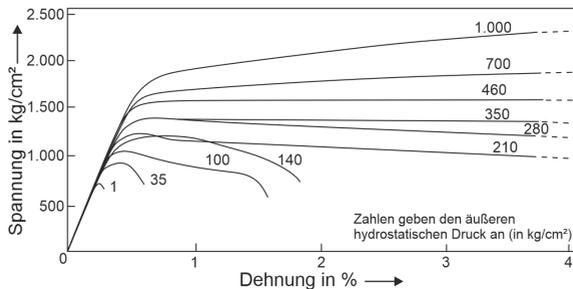


Abbildung 7: Steigende Duktilität eines sprödharten Werkstoffs beim Zugversuch aufgrund steigenden hydrostatischen Drucks; nach⁵⁰⁰

Die Bedeutung des hydrostatischen Drucks wurde auch in Untersuchungen von Brinksmeier et al. nachgewiesen⁸⁶. Hierzu wurden Ritzversuche in einem Druckbehälter durchgeführt. Der Druck im Behälter wurde über das Druckmedium (Mineralöl) bei sonst gleichen Ritzbedingungen von 0 MPa auf 280 MPa erhöht. Mit steigendem Druck wurde eine Erhöhung des Anteils duktiler Bearbeitung nachgewiesen und die kritische Ritztiefe (Tiefe eines Ritzes, ab dem es

zum spröden Materialabtrag kommt) konnte erhöht werden. So wurde bei einem Druck von 200 MPa eine Verdopplung der kritischen Ritztiefe im Vergleich zum Ritzten ohne anliegenden Druck erreicht.⁸⁶

Wie lassen sich diese Betrachtungen aus Indentations- und Ritzversuchen und werkstoffkundlichen Untersuchungen auf den Zerspanprozess übertragen? Das externe Druckfeld zur Erlangung hydrostatischer Drücke kann durch Bedingungen im Zerspanprozess ersetzt werden, die ebenfalls ein hydrostatisches Druckfeld erzeugen⁷⁰⁷. Hohe hydrostatische Drücke werden durch geringe Lasten auf einem sehr kleinen Bereich erreicht⁷⁰⁹. Eine weitere anschauliche Erklärung zur Erlangung des duktilen Modus in der Zerspanung stellt die von einigen Autoren verwendete energetische Betrachtung dar. Sie geht von einer kritischen Dimension des Abtragsvorgangs am Einzelkorn oder am Ritzkörper aus. Unterhalb dieser kritischen Dimension erfolgt plastische Verformung, da Spröbruch und Mikrorisse verhindert werden^{189, 197, 276, 386, 399, 630}, beziehungsweise die eingebrachte Energie nicht zur Rissbildung ausreicht^{58, 59, 369, 558}. Andere Theorien sprechen von immer vorhandenen Mikrorissen in sprödharten Materialien, die bei Unterschreitung einer kritischen Abtragsgröße nicht weiter verstärkt werden beziehungsweise, dass die Bruchzähigkeit des Materials nicht überschritten wird^{387, 648, 657}.

Zhang et al. zeigten dies bei Einkornritzversuchen; während bei der geringsten Zustellung von 0,8 μm Aufwürfe entstanden, die auf plastisches Fließen hindeuten, gingen mit einer Steigerung der Ritztiefe steigende Schädigungen in Form von Ausbrüchen einher⁷²³. Dies ist in Abbildung 8 verdeutlicht. Toh und McPherson haben bei Ritzversuchen gezeigt, dass ein duktiler Abtragsverhalten vorliegt, wenn werkstoffspezifische kritische Ritzkräfte unterschritten werden⁶³⁰. Maßgebend ist hier die Kraftkomponente in Normalrichtung¹⁶⁹. Ein duktiler Zerspanungsmodus liegt demnach vor, wenn die pro Korn resultierende Belastung einen werkstoffabhängigen Grenzwert unterschreitet^{59, 352}, die Belastung pro Korn also gering ist⁴⁸⁶. Da die Belastung pro Korn direkt mit der Spannungsdicke korreliert, wird beim Schleifen die Spannungsdicke als Kriterium herangezogen⁷¹⁵.

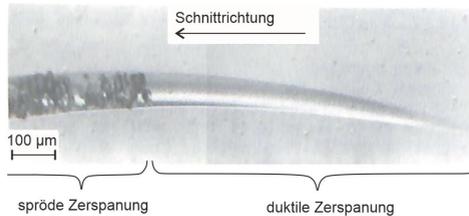


Abbildung 8: Übergang von duktiler zu spröder Zerspanung bei steigender Eindringtiefe; nach⁴⁴²

Die Übertragung der Wirkmechanismen des Übergangs duktil-spröde aus der werkstoffkundlichen Betrachtung auf die Zerspanung bezieht sich somit auf die Dimension des Abtrags am Einzelkorn. So kategorisierten Shimada et al. die Vorgänge basierend auf den Kriterien der Spannungen⁵⁵⁸. Bei Vorgängen respektive Zustellungen größer als die Mikroskala kommt es zur Rissbildung, bevor eine plastische Verformung erreicht wird, da der kritische Spannungswert für das Auftreten von Rissen ist gering. Bei mikro- bis submikrometerskaligen Zustellungen wird die Scherspannung zum Lösen von Elementarzellen eher erreicht als die Zugspannung

im Material, bei der es zur Rissbildung kommt. Bei submikrometerskaligen oder nanoskaligen Zustellungen findet plastische Verformung statt, bevor es zur Rissbildung kommen kann.

Die Spannungsdicke, bei deren Unterschreitung es bei der Zerspanung sprödharter Werkstoffe zu einem duktilen Abtrag kommt, wurde von Scattergood sowie Bifano und ihren Co-Autoren als kritische Spannungsdicke bezeichnet^{58,61}. Dieser Begriff hat sich sowohl in der UP-Bearbeitung als auch beim Schleifen durchgesetzt. Bifano erstellte ein Modell dieser werkstoffabhängigen kritischen Spannungsdicke $h_{cu,krit}$ (eine ausführliche Behandlung der Thematik findet sich in seiner Dissertationsschrift⁵⁶, die wesentliche Erkenntnisse sind in⁵⁸ und⁵⁹ zusammengefasst). Das Modell basiert auf Indentationsversuchen von Lawn et al.³⁷⁰, die eine kritische Eindringtiefe für den Übergang von sprödem zu duktilem Verhalten definierten, basierend auf dem E-Modul, der Härte und dem Rissausbreitungskriterium (letztlich motiviert durch die Arbeiten im späten 19. Jahrhundert von Hertz zur Härte von Körpern²⁵⁷ und Boussinesq zur Berechnung von Spannungsfeldern (die Untersuchungen von Boussinesq aus dem Jahre 1885 wurden in⁶²⁹ erläutert) sowie den Theorien zum Bruch elastisch-spröder Körper aus dem frühen 20. Jahrhundert von Giffith²¹⁹). Das Rissausbreitungskriterium wurde von Lawn und Marshall als proportional zum Verhältnis der Größen Härte H und Bruchzähigkeit K_c gesetzt⁴¹⁸. Marshall und Lawn ermittelten folgende Proportionalität der kritischen Eindringtiefe a_c :

$$a_c \sim (E/H)(K_c/H)^2 \quad (\text{Formel 1})$$

Dabei ist der Term E/H für übliche keramische Materialien im gleichen Bereich und somit der Term K_c/H entscheidend für das unterschiedliche Verhalten verschiedener Werkstoffe (E : Elastizitätsmodul)⁶³. Dieser Term wird daher auch „brittleness index“, also Sprödeindex genannt^{63,418}. Beachtet werden muss dabei, dass die Härte lastabhängig ist⁶³. Unterhalb der kritischen Eindringtiefe herrscht duktiler Verformungsverhalten, oberhalb sprödes („fracture dominated“) Verhalten.

Zur Quantifizierung der kritischen Spannungsdicke führte Bifano Versuche an verschiedenen spröden Materialien durch. Bifano verglich die empirisch ermittelten Spannungsdicken, bei welchen ein Übergang von duktiler zu spröder Zerspanung stattfand, mit der Formel der kritischen Eindringtiefe a_c und erhielt als Formel:

$$h_{cu,krit} = \gamma \cdot (E/H)(K_c/H)^2 \quad (\text{nach } 58) \quad (\text{Formel 2})$$

Hierin ist γ ein Korrekturfaktor für die Prozessbedingungen. Mit einem Korrekturfaktor von $\gamma=0,15$ zeigte diese Formel gute Übereinstimmung mit einer breiten Anzahl an sprödharten Materialien, außer solchen, bei denen sich die Bruchzähigkeit mit der Eindringtiefe deutlich ändert. *(Anmerkung: Zu beachten ist, dass Bifano die Spannungsdicke mit der Zustellung pro Umdrehung gleichsetzte und sie somit fehlerbehaftet ist, da die nominelle Zustellung beim Schleifen nicht mit der Einzelkornzustellung gleichzusetzen ist. Da sich die Zustellungen pro Umdrehung jedoch deutlich unter $1 \mu\text{m}$ bewegten, ist dieser Fehler tatsächlich als gering zu betrachten, beziehungsweise die maximale Einzelkornzustellung betrug hierbei lediglich $1 \mu\text{m}$.)*

Die kritische Spannungsdicke, unterhalb derer ein duktiler Materialabtrag möglich ist, liegt etwa im Bereich von $0,01 \mu\text{m}$ bis maximal $2 \mu\text{m}$ ^{5,47,391,428,460,540,677,694,735}, abhängig von Härte und Zähigkeit des Materials. Die kritische Spannungsdicke ist weiterhin von der Kristallorientierung abhängig⁵⁴⁰. Ein häufig verwendeter pauschalisierter Grenzwert ist $1 \mu\text{m}$ (siehe zum Beispiel³⁹¹). Dieser Wert wurde auch bei verschiedenen Schleifbedingungen verifiziert, bei denen

die unverformte Spannungsdicke h_{\max} mit den Schleifergebnissen korreliert wurde³⁸⁵. Die kritische Spannungsdicke wird nicht zuletzt von den Prozessbedingungen selbst beeinflusst. So verschieben beispielsweise höhere Temperaturen die Rissinitiierung zu größeren Eindringtiefen³⁹¹, was allein durch eine Erhöhung der Ritzgeschwindigkeit^{391, 544} aufgrund erhöhter innerer und äußerer Reibung⁵⁴² erfolgen kann, respektive je höher die Temperatur des Werkstoffs, desto viskoser ist sein Verhalten⁵⁴². Daneben wird, wie bei der Spannbildung duktiler Werkstoffe erläutert, die Spannungsdicke auch durch die Prozessparameter beeinflusst, vordringlich durch die Vorschubgeschwindigkeit, weshalb in früheren Arbeiten zunächst von einer kritischen Vorschubgeschwindigkeit gesprochen wurde⁶¹. Der Korrekturfaktor γ in Formel 2 muss somit prozessspezifisch ermittelt werden.

In der Literatur herrscht keine Einigkeit, ab wann unter Berücksichtigung des Arbeitsergebnisses von einem duktilen Modus gesprochen werden kann. Bifano schlägt als Grenzwert eine Schädigungsrate auf der geschliffenen Oberfläche (Grübchenbildung ohne Risse) von kleiner 10 % vor⁵⁹, Mayer und Fang schlagen als Kriterium die Bruchfestigkeit der Werkstücke nach der Bearbeitung vor⁴²⁵, da im duktilen Modus bearbeitete Werkstücke eine höhere Bruchfestigkeit aufweisen⁴¹⁰. Meist wird jedoch vom duktilen Modus gesprochen, wenn seitliche Aufwürfe an den Ritzrändern aufgrund plastischer Verformung zu erkennen sind oder wenn keine Ausbrüche und Risse sichtbar sind.

Die spezifischen Energien zur Zerspanung sind im duktilen Modus um ein²⁷⁶ bis zwei Größenordnungen größer als bei der Mikroermüdung⁴¹³. Dies ist auf die eingebrachten Verformungen⁶³⁵ beziehungsweise die Verlustenergien durch das Reiben und Pflügen bei kleinen Spannungsdicken zurückzuführen^{18, 411, 595}, worauf in Kapitel 3.2 näher eingegangen wird. Der Kraftabfall beim Übergang von duktil zu spröde kann auch damit begründet werden, dass die Rissinitiierung den Materialabtrag erleichtert⁸⁶. Daher können die spezifischen Energien und auch die Prozesskräfte im duktilen Modus höher sein als bei Materialien höherer Härte⁶. Dabei ist die benötigte Energie umso höher, je höher die Glasübergangstemperatur²⁷⁶. Dieser Zusammenhang wurde von Bifano und Fawcett zur Prozesssteuerung verwendet⁶⁰. Beim Übergang von duktiler zu spröder Zerspanung fallen die spezifischen Energien ab, womit die Prozessparameter bei Messung der Leistung oder Kräfte entsprechend eingestellt werden können⁶⁰. Weiterhin ist der Verlauf der spezifischen Energie im Bereich duktiler Zerspanung stetig und unregelmäßig im Bereich spröder Zerspanung⁶⁷⁷. Der Ansatz der Prozesssteuerung spröd/duktil durch Messung der spezifischen Energie wurde auch von anderen Autoren erfolgreich verfolgt¹⁸ und konnte auch auf die ultraschallangeregte Zerspanung erweitert werden⁷²⁵. Durch eine Ultraschallanregung kann die kritische Spannungsdicke bei sonst gleichen Bedingungen deutlich erhöht werden^{135, 442}, siehe Abbildung 9. Moriwaki et al. führten dies auf eine bessere Schmierung durch die Unterbrechung des Kontakts Spanfläche/Span zurück, womit geringere Kräfte einhergehen⁴⁴². Die gleiche Begründung wird von Zhou et al. angeführt, wobei sie weiterhin von reduzierter Reibung durch den unterbrochenen Kontakt ausgehen; durch beide Effekte werden die Prozesskräfte und damit die Wahrscheinlichkeit der Rissinitiierung und –ausbreitung reduziert⁷³².

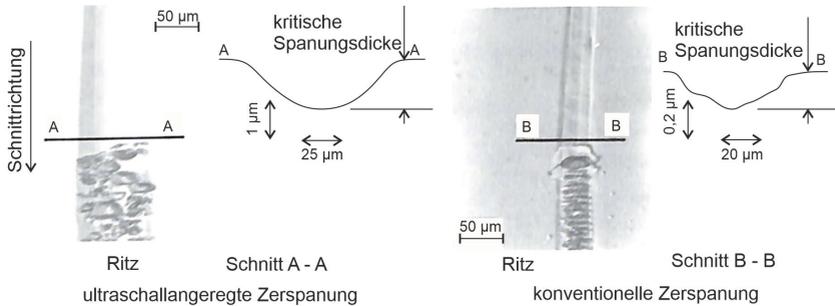


Abbildung 9: Vergrößerung der kritischen Spannungsdicke durch Ultraschallanregung; nach ⁴⁴²

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei der Bearbeitung sprödharter Werkstoffe die Schädigung mit der Belastung beziehungsweise Zustellung zunimmt ^{321, 459, 722}, was auch in Ritzversuchen mit kontinuierlich steigender Zustellung ^{94, 723} oder Eindruckkraft ⁶⁰³ gezeigt werden konnte, und dass durch die schleifende Bearbeitung aufgrund geringerer erreichbarer Einzelkornzustellungen hohe Oberflächengüten ^{65, 294} erreicht werden können. Da es beim duktilen Modus zu keiner Mikroermüdung oder Rissinitiierung kommt, sind höhere Biege- ⁵⁶² und Bruchfestigkeiten ⁴¹⁰ der bearbeiteten Materialien beziehungsweise Werkstücke erreichbar. Weiterhin werden im duktilen Modus Druckeigenstressungen induziert, die zu höheren möglichen Belastungen der Bauteile im Betrieb führen können ³⁵².

Um den duktilen Modus zu erreichen, sind Maschinen mit hoher Positioniergenauigkeit, mit hohen Steifigkeiten und präzisen Achsen notwendig ^{57, 352, 562, 694, 715}, auch um die Überschreitung der kritischen Spannungsdicke aufgrund von Schwingungen ^{428, 539} und Verlagerungen ²⁹⁴ auszuschließen. Weiterhin können hohe Schnittgeschwindigkeiten aufgrund der damit einhergehenden geringen Spannungsdicken zum Erreichen des duktilen Modus führen ^{133, 540}. Schleifen im duktilen Modus stellt eine Alternative zum Polieren dar ²⁹⁴. Vorteile bei der Keramikbearbeitung sind hierbei höhere Form- und Maßgenauigkeiten ^{58, 435} und kürzere Bearbeitungszeiten ¹⁷⁷ und damit letztlich eine höhere Wirtschaftlichkeit und Produktivität ⁸⁶. Um die Produktivität zu erhöhen, kann konventionelles Schleifen mit anschließendem Schleifen im duktilen Modus kombiniert werden. Dabei muss im duktilen Modus die gesamte Abtragstiefe der Schädigungstiefe (vertikale Risstiefe) entsprechen, die aus dem konventionellen Schleifen resultiert ⁶⁵.

Nicht zuletzt spielt auch beim duktilen Modus die Topographie der Schleifscheibe ²⁷⁶ und ein angepasstes Abrichten ⁶⁹⁴ eine entscheidende Rolle. Variierende Kornüberstände und die Korngeometrie können zur lokalen Überschreitung der kritischen Spannungsdicke und damit zu erhöhten Einzelkornkräften führen, die Sprödbbruch zur Folge haben können ³²⁰. Die Biegefestigkeit nimmt mit steigender Korngröße ab ²⁸⁶. Weiterhin zeigten Ritzversuche, dass die Kornform selbst einen Einfluss hat ⁶³, bestätigt durch frühe Indenterversuche in spröden Materialien ⁶⁰⁴. Stumpfer Schneiden begünstigen den duktilen Modus ^{61, 94, 211, 355, 459, 707}, da sie ein Spannungsfeld erzeugen, welches durch viskoses Fließen die Rissbildung unterdrückt ⁶⁸¹. Dem widersprechen Morris et al., da scharfe Schneiden höhere Spannungen induzieren ⁴⁴³. Vermutlich

ist dies aber auf die physikalische Spannung bezogen, also Kraft pro Fläche, wobei bei identischer Kraft eine spitze Schneide höhere Spannungen hervorruft. Zu beachten ist weiterhin, dass mit stumpferen Schneiden bei gleichbleibender Einzelkornspannungsdicke respektive Einzelkornzustellung bei Ritzversuchen eine Steigerung der Kräfte einhergeht, die wiederum zu einer Rissinitiierung führen kann. Eine Unterscheidung zwischen Ritzversuchen und Schleifen ist hier also notwendig; eine Abstumpfung der Schneiden auf einer Schleifscheibe hat bei sonst konstanten Bedingungen eine Reduzierung der Einzelkornspannungsdicke zur Folge und ist somit als positiv zu bewerten. Weiterhin begünstigen negative Spanwinkel den duktilen Modus ^{61, 94, 190, 443, 609, 703, 707, 709}, da die Rissbildung durch die Induzierung von Druckeigenstressungen unterdrückt wird ⁶³ beziehungsweise ein viskoser Materialfluss begünstigt wird ^{211, 540} und das Spannungsfeld einem hydrostatischem entspricht. Bei gleichen Schnittparametern führt der Einsatz kleiner Korngrößen tendenziell zum duktilen Modus, grobe Körner zum spröden Abtrag ^{282, 301, 464, 595}; hohe Kornkonzentrationen wirken sich ebenfalls günstig aus ⁶³⁶. Beides ist auf eine Reduzierung der Einzelkornspannungsdicke zurückzuführen.

Der duktile Abtragsmechanismus bei der Bearbeitung sprödharter Werkstoffe wird auch beim Ultrapräzisionsdrehen genutzt, bei welchem durch die Verwendung sehr steifer Maschinen bei geringen Zustellungen ($<1 \mu\text{m}$) ein duktiler Modus und somit höchste Oberflächengüten erreicht werden (zum Beispiel ^{388, 460, 708}). Vorteil des Ultrapräzisionsdrehens im Vergleich zum Schleifen sind die Möglichkeiten der Herstellung sehr scharfer Diamantschneiden mit definierter Geometrie, womit die Spannungsdicke gezielt eingestellt werden kann. Variierende Kornüberstände beim Schleifen können, wie bereits erwähnt, zur teilweisen Überschreitung der kritischen Spannungsdicke führen. Dieser Eigenschaft wird durch die Entwicklung von Spezialschleifscheiben für die Feinbearbeitung sprödharter Werkstoffe entgegengewirkt (siehe Kapitel 4.2.2).

3.2 Spezifische Energie und Wärmeentstehung

Aus den Mechanismen der Spanbildung wird ersichtlich, dass die spezifische Energie, also die benötigte Energie pro abgetragenen Materialvolumen, beim Schleifen höher ist als beim Spannen mit geometrisch bestimmter Schneide; für typische Schleifprozesse um ein bis zwei Größenordnungen ⁴⁰³. Alle spanabnehmenden Körner durchlaufen die drei Phasen der Spanbildung. In Phase I und II reiben und pflügen die Körner, was zu plastischen Verformungen und innerer Reibung im Werkstück führt. Beim Flachsleifen und vor allem beim Außenrundsleifen sind die Kontaktlängen und damit die Eingriffslängen pro Korn vergleichsweise kurz. Der stationäre Anteil eines Korneingriffs ist demnach ebenfalls gering und die energieverlustreichen Anteile der Spanbildung (Phase I und II) entsprechend hoch ⁴⁰³. Weiterhin erreichen nicht alle mit dem Werkstück in Kontakt kommenden Körner Phase III der Spanbildung ⁶¹⁰, reiben und pflügen jedoch ³⁵ und tragen somit zum Energieverbrauch bei. Die stets negativen Spanwinkel führen zu erhöhten Scherarbeiten und plastischen Verformung im Span, die ebenfalls höhere Energien bedingen.

Die für den Prozess benötigte und damit in den Prozess eingebrachte Energie beim Feinschleifen setzt sich zusammen aus ⁴⁹¹:

- Erwärmung des Werkstücks,
- Erwärmung des Werkzeugs,

- kinetische Energie der Späne (vernachlässigbar),
- Erwärmung der Späne,
- Wärmestrahlung (an Umgebung),
- Generierung der Werkstückoberfläche – Oberflächenenergie (vernachlässigbar),
- (verbleibende) Eigenspannungen und Gefügeänderungen im Werkstück und in den Spänen (vernachlässigbar).

Daraus folgt, dass praktisch alle in den Prozess eingebrachte Leistung in Wärme umgewandelt wird^{221, 491}. Die Erwärmung von Werkstück, Werkzeug und Spänen ist auf grundlegende physikalische Prinzipien zurückzuführen: Reibung und plastische Verformungen. Allgemein werden die Vorgänge bei der energetischen Betrachtung des Schleifprozesses auf diese physikalischen Vorgänge zurückgeführt beziehungsweise auf diese beschränkt. Die gesamte Energie setzt sich somit zusammen aus^{360, 405, 414},

- Reibenergie,
- Energie für plastische Verformung (Pflügen),
- Spanbildungsenergie.

Die Reibenergie bezeichnet die Energie, die durch Reibung an der Freifläche der Körner entsteht. Sie ist also proportional zur Kontaktfläche Körner-Werkstück und somit zum Schleifscheibenverschleiß (englisch wear flat area – Kornanflächung). Neben der Kontaktfläche ist sie abhängig vom Werkstoff⁴⁰⁷ und den KSS-Bedingungen⁴⁸⁵. Die Pflügenergie entspricht der Energie, die auf die plastische Verformung des Materials ohne Materialabtrag entfällt, diese tritt also ab Phase II der Spanbildung auf. Sie ist weitgehend unabhängig von der zerspannten Metallsorte, kann jedoch durch Schmierung herabgesetzt werden^(402, basierend auf Daten aus 407 und 485). Die Spanbildungsenergie bezeichnet sowohl die Scherenergie in der Scherzone, die Energie zur Formung des Spans, als auch die Reibung des Spans an der Spanfläche⁴⁰². Die reine Scherenergie kann näherungsweise mit der Schmelzenergie pro Materialvolumen gleichgesetzt werden und entspricht 75 % der Spanbildungsenergie⁴⁰⁵, die restlichen 25 % verfallen also, aufgrund der Vernachlässigbarkeit anderer Energieanteile (siehe oben), auf die Reibung des Spans und die Spanformung¹⁴³.

Bei eisenhaltigen Legierungen wird praktisch alle Reib- und Pflügenergie ins Werkstück geleitet, und etwa 45 % der Spanbildungsenergie geht in die Späne^{398, 405}. Die geringen mit dem Span abgeführten Anteile der Wärme beim Schleifen können auch auf die sehr hohen Schergeschwindigkeiten zurückgeführt werden⁴¹³.

Untersuchungen haben gezeigt, dass die spezifische Energie überproportional mit sinkenden Spannungsdicken zunimmt^{43, 87, 413, 463, 587, 664}. Dies gilt auch für die Zerspanung sprödharter Materialien im duktilen Modus¹³¹, zurückzuführen auf die plastischen Verformungen (siehe Abschnitt 3.1), die in höhere Energieanteile resultieren als die spröden Abtragsmechanismen²⁸¹. Dieser Zusammenhang wird beim Schleifen Größeneffekt genannt^{43, 278}. Dieser Effekt ist auch aus der Materialforschung bekannt, nämlich, dass die Bruchspannung³⁰⁵ und die Zugspannung²¹⁹ mit sinkendem Durchmesser von Drähten oder Fasern bei sonst gleichen Materialkenngrößen ansteigt. In Analogie zum Schleifen werden die kleinen Faserdurchmesser den kleinen Spannungsdicken gleichgesetzt⁴³. Der Größeneffekt kann unter anderem auf Inhomogenitäten wie Korngrenzen, Kristalldefekte oder Verunreinigungen zurückgeführt werden⁴³. Materialdefekte ermöglichen erst eine plastische Verformung, da ideale Kristallgitter sehr hohe

Bindungskräfte aufweisen. Je kleinskaliger der Materialabtrag ist, desto weniger Materialdefekte, die eine Verformung oder das Wandern und Gleiten von Versetzungen ermöglichen, und damit letztlich eine Materialtrennung ermöglichen, liegen vor. Zusätzlich zu diesen Materialeffekten kommt beim Schleifen duktiler Materialien oder sprödharter Materialien im duktilen Modus hinzu, dass mit sinkenden Spannungsdicken der Anteil des Mikropflügens steigt⁸⁷, also ein erhöhter Anteil des Reibens und Pflügens vorliegt^{85, 304, 527}. Während das Pflügen bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide (aufgrund einer immer vorhandenen Verrundung der Schneide beziehungsweise endlich scharfen Schneiden) für die Spanbildung energetisch nach der Scherung der zweitrangige Mechanismus ist¹⁰, kann der Energieanteil des Reibens und Pflügens beim Schleifen den Anteil der Spanbildung beziehungsweise Scherung sogar übersteigen^{547, 671}. Die Spannungsdicke (und damit die Größe der Späne) ist dabei nicht nur abhängig von der Kinematik (siehe Abschnitt 3.5.5) respektive der Abtragsrate⁴¹³, so dass mit steigenden Abtragsraten aufgrund des höheren Anteils des Spanens anstelle des Reibens und Pflügens sinkende spezifische Energien einhergehen²⁹⁸, sondern insbesondere auch noch von der Schleifscheibenspezifikation. Der Größeneffekt wird durch weniger scharfe Schneiden verstärkt beziehungsweise stumpfe Schneiden führen bei gleicher Spannungsdicke zu höheren Kräften^{210, 278}, da weniger scharfe Schneiden in einen höheren Anteil des Mikropflügens resultieren und die spezifische Energie beim Pflügen stets höher ist als beim Schneiden⁶³⁹. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Kornverrundung zum Tragen kommt, wenn die Einzelkorneindringtiefe geringer ist als der halbe aktive Radius der Kornspitze²⁸⁰. Eine Verrundung resultiert aus dem Verschleiß des Korns und eine Kornverrundung ist äquivalent zu einer Zunahme des Kornradius⁶³⁷. Steigende Kornkonzentrationen erhöhen die spezifische Energie aufgrund sinkender Spannungsdicken und verstärken somit den Größeneffekt⁵²⁷. In⁵²⁷ wurde sogar gezeigt, dass der Einfluss der Kornkonzentration denjenigen der Kinematik deutlich übersteigt. Weiterhin wird der Größeneffekt durch negative Spanwinkel verstärkt⁶⁷⁰, das heißt negative Spanwinkel führen zu einem noch stärkeren Anstieg der spezifischen Energien.

Der Größeneffekt begründet die Schwierigkeiten der Simulation von Schleifprozessen. Bei der Modellierung spanender Prozesse wird ein Trennkriterium definiert, ab der es zum Materialabtrag beziehungsweise zur Spanabnahme kommt. Üblicherweise wird hierzu die Hypothese der maximalen Scherspannung oder die Verformungsenergiehypothese herangezogen⁴³. Der Größeneffekt erschwert eine Anwendung dieser Kriterien auf das Schleifen⁴³, es kann keine Relation zu den materialwissenschaftlichen Kennzahlen zum Beispiel aus dem Zugversuch gemacht werden; bei gegebener Dehnung ist die vorliegende Spannung (Kraft pro Fläche) aufgrund des Größeneffekts viel höher als bei großen Zustellungen, wie sie zum Beispiel beim Drehen vorliegen.

Die steigende Bedeutung und Verbreitung der Mikrozerspanung, insbesondere des Mikrofräsens, führte zu einer deutlichen Zunahme wissenschaftlicher Untersuchungen der Spanbildung auf diesen Skalen. Hier werden auch Größeneffekte untersucht, wobei der Begriff in der Mikrozerspanung eine breitere Bedeutung hat und vornehmlich die Unterschiede zwischen konventionellen (geometrisch bestimmten) Zerspanungsprozessen und Mikrozerspanungsprozessen fokussiert. Allgemein wird hierunter verstanden, dass mit der Skalierung von Makroprozessen auf die Mikroebene Abweichungen von intensiven, von der Masse unabhängige Größen, zum Beispiel Temperatur, oder extensiven, von der Masse abhängige Größen, zum Beispiel Trägheitskräfte, auftreten können. Größeneffekte können demnach kategorisiert werden in Dichte-,

Form- und Mikrostruktureffekte ⁶⁶⁷. Ein intensiv erforschter Größeneffekt ist die Änderung der Verhältnisse bei der Spanbildung. Hierbei werden zwei Haupteffekte betrachtet: der Einfluss kleiner werdender unverformter Spannungsdicken, die in den Bereich der Mindestspannungsdicke (beim Schleifen als Schnitteinsatztiefe bezeichnet, siehe Abschnitt 3.1) kommen und der Einfluss endlich scharfer Schneiden. Der erste Effekt beschreibt den steigenden Einfluss elastisch-plastischer Verformungen und der Freiflächenreibung bei der geometrisch bestimmten Zerspanung (vergleiche Abbildung 10), die bei makroskaligen Prozessen der geometrisch bestimmten Zerspanung im Regelfall vernachlässigt werden können. Der zweite Effekt beschreibt einerseits die Zunahme plastischer Verformungen vor der Schneide, da das Material nicht mehr getrennt, sondern gestaucht wird und andererseits, dass aufgrund der geringen Spannungsdicken das Verhältnis von Schneidkantenradius zu Spannungsdicke größer eins ist, und somit negative effektive Spanwinkel trotz eventuell positiver Spanwinkel am Schneidkeil vorliegen.

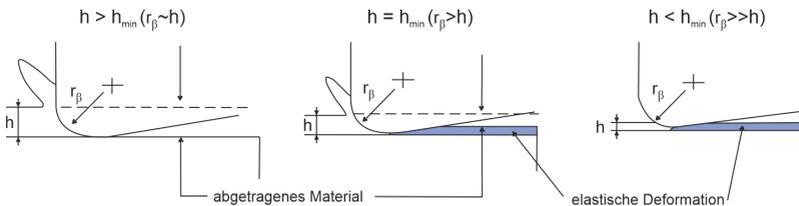


Abbildung 10: Einfluss der Mindestspannungsdicke h_{\min} bei der Mikrozerspanung: je kleiner die Spannungsdicke h im Verhältnis zur Mindestspannungsdicke h_{\min} , desto höher der Anteil an elastischen Verdrängungsvorgängen, bis es schließlich zu einer rein elastischen Deformation kommt; in Erweiterung zu ¹²¹; plastische Verdrängungsvorgänge wurden nicht berücksichtigt

Cheng und Huo haben den Größeneffekt der spezifischen Energie, der auch bei der Mikrobearbeitung eine große Rolle spielt, basierend auf den Erkenntnissen des Präzisionsdrehens und des Schleifens (siehe die jeweiligen referenzierten Quellen an den Aussagen) in ihrem Buch „Micro-Cutting: Fundamentals and Applications“ ¹³⁷ auf den Einfluss des Materials und der Schneidkante bezogen:

- Materialeinfluss
 - Materialverfestigungen aufgrund steigender Dehnungsgeschwindigkeiten und temperaturabhängige Fließspannungen steigen mit sinkender Spannungsdicke ^{122, 357} oder aufgrund fehlender Defekte auf der Mikroskala ^{43, 668} (*Anmerkung: in anderen Worten: weniger Defekte im Material erschweren den Materialabtrag*).
 - Kleinskalige Inhomogenitäten führen zu lokalen Steigerungen der spezifischen Energie ⁵⁵⁴.
 - Metallurgische und mikrostrukturelle Änderungen in kleinen Skalen führen zu Materialverfestigungen ⁶⁶⁸.
- Einfluss der Schneidkante
 - Effekte negative Spanwinkel führen zu einem erhöhten Anteil des Pflügens und letztlich zu höheren spezifischen Energien ³⁹⁴.
 - Ist die unverformte Spannungsdicke kleiner als der Schneidkantenradius, steigen die spezifischen Schnittkräfte an ⁶⁰⁸.

Die Verhältnisse beim Mikrospanen beschreiben treffend diejenigen beim Schleifen: negative Spanwinkel, stumpfe Schneiden und hohe Freiflächenreibung. So zeigten Zhang et al., dass der Anteil elastischer Verformung sowie elastische Rückfederung und damit Reibung an den Freiflächen bei kleinen Spannungsdicken nicht vernachlässigbar ist⁷²⁵. Es wurde bereits in frühen Arbeiten postuliert, dass die Freiflächenreibung einen wesentlich signifikanteren Anteil zur Reibung beiträgt als die Reibung an der Spanfläche²⁴⁰. Die hohe Freiflächenreibung zeigt sich auch in den Kraftverhältnissen. Während die Tangentialkraft bei der geometrisch bestimmten Zerspanung aufgrund der Dominanz der Spanbildungskräfte doppelt so groß ist wie die Normalkraft, ist dieses Verhältnis beim Schleifen genau umgekehrt²⁴⁰. Je kleiner die Spannungsdicken, desto höher ist der Anteil der Freiflächenreibung²⁴⁰.

Das besondere beim Schleifen ist, dass zu den genannten Effekten beim Mikrospanen noch die Überlagerung einer Vielzahl an Eingriffen kommt. Dies hat sich ändernde Spannungsdicken während eines Eingriffs zur Folge, da Ritzspuren vorheriger Eingriffe „auf dem Weg“ des Korneingriffs liegen, sowie eine höhere Temperaturbelastung. Diese wiederum führt zur Erweichung des Werkstoffes, womit einerseits die Zerspanung erleichtert wird aber andererseits ein noch höherer Anteil an Verdrängungen beziehungsweise plastischen Verformungen des Werkstoffes resultiert.

Die spezifische Energie ist werkstoffabhängig. Je höher der Schmelzpunkt des Materials, also je höher die Bindungsenergie, desto höher ist die spezifische Energie⁴⁰⁷. Eine Abhängigkeit der spezifischen Energie von der Wärmebehandlung oder der Härte ist bei Stählen nicht gegeben^{44, 403, 413, 419}. Die Temperaturen unmittelbar im Kontakt Korn-Werkstoff sind so hoch, dass die Wärmebehandlung egalisiert wird⁴⁰⁷. Eine ähnliche Aussage trifft die bereits angesprochene These der Schmelzenergie von Malkin und anderen. Er postuliert, dass der Anteil der spezifischen Energie, welcher der Spanabnahme zuzuordnen ist, bei Metallen etwa der Schmelzenergie entspricht^{232, 398, 402, 403, 412, 413}. Derjenige Anteil der spezifischen Energie, der über die Schmelzenergie hinausgeht, ist auf Reiben und Pflügen zurückzuführen⁴¹²; die Scherenergie erreicht also den maximal möglichen Wert⁴⁰³.

Im Allgemeinen gehen mit sinkenden Spannungsdicken sinkende Oberflächenrauheiten einher. Positiver Nebeneffekt höherer spezifischer Energien sind also geringere Oberflächenrauheiten⁵⁸⁷. Es muss also eine werkstoff- und anforderungsgerechte Balance zwischen eingebrachten (spezifischen) Energien und erzielbarer Oberflächenqualitäten erreicht werden. Zu beachten ist jedoch, dass mit steigenden spezifischen Energien die Gefahr der Überhitzung der Oberfläche und damit der Randzonenschädigung steigt⁴⁰¹.

Die hohen spezifischen Energien und die hohen Temperaturen in der Kontaktzone, die auch über der Schmelztemperatur von Stählen liegen können, führen nicht zwangsläufig zum Schmelzen des Werkstoffes. Schmelztemperaturen von Werkstoffen gelten, ähnlich den meisten Werkstoffkennwerten, für Gleichgewichtsbedingungen. Da sich die Wärmequelle (die Schleifscheibe) jedoch sehr schnell bewegt, und die Schleifscheibe eine Vielzahl einzelner Wärmequellen entspricht (die einzelnen Schneiden), kommt es nicht zu einem Gleichgewichtszustand⁴⁹¹. Hier ist bei gegebener Schnittgeschwindigkeit die Vorschubgeschwindigkeit entscheidend. Die Schnittgeschwindigkeit bestimmt zwar die Intensität der Wärmequelle, die Vorschubgeschwindigkeit bestimmt jedoch die Wärmeeindringzeit und die Wärmeübertragung.

Bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten gelangt weniger Wärme in das Werkstück, die Temperaturen des Werkstücks sind geringer²⁴⁰.

Dieser Charakteristika der sich bewegenden Wärmequelle wird bei der Modellierung der Temperaturen Rechnung getragen. Die Modellierung der entstehenden Wärme geht auf die Arbeiten von Jaeger zurück²⁹⁵. Dabei wird die Schleifscheibe als eine sich bewegende, rechteckförmige Wärmequelle modelliert, die sich entlang des Werkstücks bewegt (siehe Abbildung 11 oben rechts). Eine praxisnahe Anwendung des Modells erfolgte erstmals durch DesRuisseaux in seiner Dissertationsschrift⁵²⁹, die wesentlichen Ergebnisse sind in⁵³⁰ zusammengefasst. Die Arbeiten von DesRuisseaux wurden von vielen Forschern aufgegriffen, verfeinert und für die Berechnung der thermischen Belastung beim Schleifen verwendet. Allen voran zu nennen sind die Arbeiten von Malkin und Guo^{229–232, 409}. Dabei wird angenommen, dass die gesamte in den Prozess eingebrachte Energie in Wärme umgewandelt wird. Die Modellgüte und damit die Aussagekraft zur Wärmebeeinflussung des Werkstücks hängt davon ab, wie gut derjenige Anteil der Wärme, der ins Werkstück gelangt, abgeschätzt wird, was wiederum von den Eingangsgrößen des Schleifprozesses abhängt, also der Kinematik, der Schleifscheibe, dem Werkstück und den Einsatzbedingungen, allen voran der KSS-Zufuhr⁴⁰⁸.

Die praktische Anwendbarkeit dieser Modellierungen nach Jaeger wurde ebenfalls von Malkin und seinen Ko-Autoren gezeigt, sowie von zahlreichen aktuelleren Untersuchungen, die hierauf basieren (siehe zum Beispiel^{254, 587}). Malkin definierte eine kritische spezifische Energie, ab der es zu Randzonenschädigungen in Form von Schleifbrand kommt⁴⁰⁴. Auf Schleifbrand wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich mit der Verfeinerung der Modelle von Malkin⁵²⁴. So hat sich beispielsweise gezeigt, dass eine dreieckige Wärmequelle (siehe Abbildung 11) besser mit gemessenen Temperaturverteilungen übereinstimmt als die oft modellierte rechteckförmige⁵²⁵. Weiterhin wurden anstelle der bewegten Wärmequellen basierend auf Jaeger auch ein Modell mit geneigter Wärmequelle⁵²⁶ und ein Kreisbogenmodell⁵²⁸ entwickelt, welche je nach Schleifbedingungen akkuratere Ergebnisse zeigten.

Obwohl die zugrunde liegenden Prinzipien der Wärmeübertragung gut verstanden sind, sind die Wechselspiele zwischen KSS-Zufuhrbedingungen, Abrasivstoffen und dem Materialverhalten weiterhin herausfordernd⁵²⁴. Die Abhängigkeit der thermischen Vorgeschichte und der Legierungselemente auf die Werkstückschädigung sind weiterhin nicht modellierbar oder gar regelbar⁵²⁴. Auf dieses Wechselspiel wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

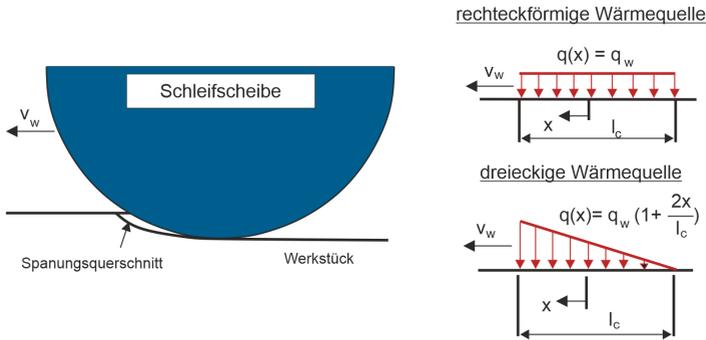


Abbildung 11: Spannungsquerschnitt und sich daraus ergebende Modellierungen der Wärmequelle nach ⁵²⁴

3.3 Thermisch-mechanisches Belastungskollektiv: Randzoneneigenschaften

Die hohen spezifischen Energien und die damit verbundene generierte Wärme führen zu hohen Temperaturbelastungen der bearbeiteten Werkstücke. Diese thermischen Belastungen sind bis auf Spezialanwendungen (siehe Kapitel 4.1) unerwünscht. Theoretische Betrachtungen, basierend auf dem Modell von Jaeger ²⁹⁵, ergaben für eine Einzelkornzustellung von $15\ \mu\text{m}$ maximale Temperaturen am Schleifkorn von $1.760\ \text{°C}$ ²²¹. Weitere Berechnungen zeigen bei üblichen Schnittbedingungen Temperaturen in der Scherzone von $1.100\ \text{°C}$ bis $1.760\ \text{°C}$ ^{426, 491}. Mittlere Temperaturen in der Scherzone von rund $1.100\ \text{°C}$ wurden in Experimenten bestätigt ⁴⁹¹. Diese Temperaturen weit über dem Schmelzpunkt vieler Metalle bedeuten nicht, dass die Temperatur im Werkstück den Schmelzpunkt überschreitet, da die Hitzequelle (das Korn) sehr schnell über die Oberfläche gleitet und somit nur eine geringe Zeit zur Wärmeleitung zur Verfügung steht ²²¹. So gibt Lierske in seiner Dissertationsschrift, basierend auf messtechnisch unterstützen analytischen Betrachtungen beim Schleifen von Al_2O_3 oder Si_3N_4 , Temperaturen bei einer Spannungsdicke von $1\ \mu\text{m}$ von ca. $1.300\ \text{°C}$ an der Schneide an, die in einer Tiefe von $5\ \mu\text{m}$ zur Oberfläche bereits auf $600\ \text{°C}$ absinken ³⁸⁰. Somit sind nicht die Spitzentemperaturen an individuellen Körnern relevant für das Auftreten thermischer Schädigungen, sondern die Werkstück-Hintergrundtemperatur; diese ist jedoch als Addition der Wärme der einzelnen Schneiden unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung aufzufassen ^{240, 404, 530}. Die genannten Berechnungen der Temperaturen am Einzelkorn zeigen, dass die Temperaturen beim Schleifen wesentlich höher sind als bei der Zerspanung mit definierter Schneide. Dabei findet die Temperaturentwicklung in sehr kurzer Zeit statt. Snoyes et al. dokumentierten einen Temperaturanstieg von einigen $100\ \text{°C}$ in einer Zeitspanne von wenigen Millisekunden in einige Millimeter Tiefe zur Oberfläche ⁵⁷⁵. Die extremen Temperaturgradienten (sowohl die Erwärmung als auch die Abkühlung erfolgt in sehr kurzen Zeiten) und Leistungsdichten führen zu einer Kurzzeitwärmebehandlung des Materials, resultierend in von klassischen Wärmebehandlungsverfahren abweichenden Materialeigenschaften ⁸⁰.

Die in der Kontaktzone generierte Wärme kann über das Werkstück, die Schleifscheibe, den Kühlschmierstoff (Kapitel 3.4) und die Späne abgeführt werden ³⁶⁸. Bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide werden, je nach Schnittbedingungen, bis zu $80\ \%$ der in den

Prozess eingebrachten Energie über die Späne abgeführt¹⁶⁹. Im Gegensatz dazu dissipiert beim Schleifen bis zu 90 % der in den Prozess eingebrachten Energie in Form von Wärme in das Werkstück^{405, 413, 575, 576}; der Anteil, der über die Späne abgeführt wird, kann vernachlässigt werden³⁶⁸, was nicht zuletzt auf die geringen Dimensionen der Späne und die diskontinuierliche Spannbildung zurückgeführt werden kann^{76, 392}.

Die thermischen Belastungen des Werkstücks werden mit mechanischen überlagert. Diese resultieren aus der Spannbildung, umfassen also die aus der Spannbildung entstehenden (statischen) Normal- und Tangentialkräfte, aber allen voran resultieren sie aus den plastischen Verformungen des Werkstoffs bei der Spannbildung. Die mechanischen Belastungen führen zu einer erhöhten Versetzungsdichte im Kristallgitter, also zu Kaltverfestigungen^{75, 76}.

Eine Steigerung der mechanischen Belastungen geht stets mit einer Steigerung der thermischen Belastungen einher. Es entsteht somit ein thermisch-mechanisches Belastungskollektiv, welches die Eigenschaften der oberflächennahen Schichten beeinflusst. Es kann nach einer inneren und einer äußeren (Grenz-)Schicht unterschieden werden (nach⁵⁴⁵ und⁶⁹⁵), deren Gesamtheit als Randzone bezeichnet wird⁷⁵. Die äußere Schicht ist sehr dünn, ihre Größe liegt in atomaren Größenordnungen⁴³². Hier finden vornehmlich chemische Reaktionen statt, es handelt sich um eine Oxid- und Absorptionsschicht. Diese kann teilweise, aber in der Regel nicht vollständig, durch Reinigung entfernt werden und beeinflusst typische Oberflächeneigenschaften wie Benetzung, elektrische Leitfähigkeit etc. Die innere Grenzschicht zeichnet sich durch geänderte und damit vom Kernmaterial abweichenden Eigenschaften aus und stellt die eigentliche Randzone dar. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die innere Grenzschicht, diese wird fortan als Randzone bezeichnet.

Die Eigenschaften werden durch werkstoffkundliche Termini charakterisiert, allen voran die Härte, die Gefügezusammensetzung und die Eigenspannungen. Eine umfassende Beschreibung der Effekte in der Randzone für spanende Prozesse erfolgte in den 1960er Jahren durch Field und Kahles unter dem Begriff „surface integrity“¹⁹⁵. Dieser Begriff, der auch heute noch verwendet wird und für den keine treffende Übersetzung existiert, umfasst die folgenden Phänomene für alle Formgebenden Verfahren¹⁹⁵:

- **Plastische Deformation:** hohe Spannungen im Material führen zur Kaltverfestigung des Materials.
- **Temperaturgradient:** die Oberflächentemperaturen können sehr hohe Temperaturen erreichen, während direkt unter der Oberfläche viel geringere Temperaturen herrschen; es liegen also sehr steile Temperaturgradienten vor.
- **Eigenspannungen:** die hohen Spannungen, in Verbindung mit hohen Temperaturen führen zur Bildung von Eigenspannungen in der Randzone. Es kommt zur Ausbildung von Druck- und Zugeigenspannungen, wobei an der Oberfläche in der Regel Druckspannungen vorliegen, die dann in Zugspannungen übergehen.
- **Phasenumwandlungen:** aufgrund der hohen Temperaturen kann es zur Reaustenitisierung in der Randzone kommen. Durch den KSS und die hohen Temperaturgradienten kommt es dann in der Regel zur Bildung von Martensit, Bainit oder vergleichbaren Gefügen.
- **Anlassen:** Wärmebehandlungen zur Härtung des Werkstoffs können durch Rekristallisationseffekte egalisiert werden.

- Verspritztes, geschmolzenes Material: hierunter verstanden Field und Kahles mögliche, unerwünschte Nebeneffekte bei Prozessen wie Electro-Discharge Machining oder Elektronenstrahlbearbeitung. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch einen ähnlichen Effekt bei der Zerspanung mit sehr hohen KSS-Drücken. Hier kann es aufgrund der hohen kinetischen Energie beschleunigter Späne zu plastischen Verformungen an der Werkstückoberfläche oder gar zu Ausschmelzungen der Späne auf der Oberfläche kommen¹²⁰.
- Makrorisse: bei manchen Metallen kann es zu sichtbaren Rissen auf der Oberfläche kommen.
- Freilegen von Materialfehlern: durch spanende Prozesse können vorher nicht sichtbare Fehler (Einschlüsse, Leerstellen, Risse) freigelegt werden.
- Oberflächenbeschaffenheit: die aus dem Zerspanprozess resultierende Oberflächenmorphologie kann zum Beispiel die Ermüdungsfestigkeit beeinflussen. Kerben aufgrund einer Schruppbearbeitung können als Keime für Ermüdungsrisse fungieren.

Diese Zusammenfassung der Effekte in der Randzone ist auch heute noch gültig und umfassend. Lediglich die Bedeutung einzelner Kriterien hat sich geändert. Gerade die Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit oder Oberflächenmorphologie und deren gezielte Einstellung zur Funktionsoptimierung und –steuerung ist in den letzten Jahren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (zum Beispiel in den von der DFG geförderten Schwerpunkten SFB926 „Bauteiloberflächen: Morphologie auf der Mikroskala“ und TRR136 „Prozesssignaturen“). Hierzu wurden auch spezielle Schleifscheiben entwickelt, die in Kapitel 4.2.4 behandelt werden.

Die Randzone beeinflusst wichtige Eigenschaften geschliffener Werkstücke und Bauteile wie Festigkeit, Dauerfestigkeit, Wechselfestigkeit und Verschleißverhalten. So geht bei Bauteilen die einer Wechselbelastung unterliegen das Versagen aufgrund von Ermüdungsbrüchen von der Oberfläche oder der oberflächennahen Randschicht aus¹⁹⁶. Während bei allen spanenden Bearbeitungsverfahren eine Änderung der Randzoneneigenschaften vorliegen kann, sind diese beim Schleifen aufgrund der höheren Energieeinbringung stärker ausgeprägt. So legten wiederum Field und Kahles dar, dass zum Beispiel die Dauerwechselfestigkeit erheblich von den Schleifbedingungen beeinflusst wird. Es wurde bei verschiedenen Werkstoffen gezeigt, dass Schleifen je nach Prozessparametern im Vergleich zu anderen Prozessen (Fräsen, Elektropolieren, EDM, etc.) sowohl zu sehr hoher als auch sehr niedriger Dauerbiegewechselfestigkeit führen kann¹⁹⁶. Die erhebliche mögliche Beeinflussung der Randzone durch Schleifen führte sogar zur Prägung eines prozessspezifischen Begriffs, dem Schleifbrand. Schleifbrand ist eine farblich sichtbare Beeinflussung der Werkstückoberfläche, resultierend aus der Oxidation der Oberfläche, verbunden mit einer Reaustenitisierung⁴⁰⁴, die bei gehärteten Stählen zu einer Neuhärtungszone in der Randschicht führen kann²³² oder gegenteilig zu einer Anlasszone⁴⁰⁷. Er tritt bei Überschreitung einer werkstoffabhängigen Grenztemperatur in der Kontaktzone auf⁴⁰⁷, welche analytisch berechnet werden kann. Die Vorhersage von Schleifbrand geht auf die im vorigen Kapitel erwähnten Arbeiten von Malkin zurück, der mit Hilfe der Jaeger-Gleichung eine werkstoffabhängige kritische spezifische Energie definierte, ab der es zum Schleifbrand kommt^{232, 402, 404}. Das Auftreten hängt vom Wärmefluss, also der Konvektion zum Werkstück, zur Schleifscheibe, zum KSS und zu den Spänen ab. Dies wiederum hängt von den Kontaktbedingungen, dem Schleifscheibenzustand, der Schnittgeschwindigkeit, der Abtragsrate und den thermischen Eigenschaften von Werkstück, Körnern und KSS ab. So verschiebt eine höhere

Abtragsrate den maximalen Wärmefluss ins Werkstück (W/mm^2) bis zum Auftreten von Schleifbrand nach oben²⁹⁹. Bei gegebenen Schleifbedingungen hängt das Auftreten von Schleifbrand sehr stark vom Zustand beziehungsweise Verschleißfortschritt der Schleifscheibe ab; je höher der Verschleiß, desto höher die Gefahr von Schleifbrand^{402, 586}.

Schleifen wird vornehmlich für die Bearbeitung harter Werkstoffe eingesetzt. Darunter fallen insbesondere harte und gehärtete Stähle, also Stähle mit hohem Kohlenstoffgehalt, oder Stähle, die einer Wärmebehandlung zur Steigerung der Härte unterworfen wurden. Die zweite wichtige Werkstoffgruppe sind sprödharte Werkstoffe, also optische Gläser und technische Keramiken. Weitere Werkstoffgruppen sind Hochtemperaturwerkstoffe wie Titan- oder Nickelbasislegierungen. Die Gefügestruktur und deren Beeinflussung durch das Schleifen dieser Werkstoffgruppen unterscheiden sich teilweise erheblich voneinander. Allen Werkstoffgruppen gemein ist jedoch die Ausbildung von Eigenspannungen. Eigenspannungen als Größe zur Beschreibung der Randzoneigenschaften sind gegenüber zum Beispiel Phasenumwandlungen oder der Härte auch deshalb von hoher Bedeutung, da sie auch bei der Feinbearbeitung bei geringen Abtragsraten und somit geringer thermischer Beeinflussung vorliegen können, bei der in der Regel keine Phasenumwandlungen oder (messbare) Härteänderungen auftreten.

Eigenspannungen sind Spannungen, die im Inneren eines Werkstückes ohne das Wirken äußerer Kräfte und Momente vorliegen⁶⁹⁹. Die hieraus resultierenden inneren Kräfte und Momente befinden sich somit im Gleichgewicht. Weiterhin befinden sie sich im thermischen Gleichgewicht, durch äußere Temperatureinwirkung hervorgerufene Lastspannungen sind somit keine Eigenspannungen⁶⁹⁹. Es wird unterschieden nach Eigenspannungen erster, zweiter und dritter Art: Eigenspannungen erster Art erstrecken sich über größere Werkstoffbereiche (mehrerer Körner), zweiter Art über kleinere Bereiche (ein Korn oder Kornbereiche) und dritter Art über kleinste Bereiche (mehrere Atomabstände). Von technischer Bedeutung sind daher neben Eigenspannungen zweiter Art insbesondere solche erster Art, auf die sich die folgenden Ausführungen beziehen.

Eigenspannungen können dem Einsatz der Werkstücke und Bauteile förderlich sein oder zu einem frühzeitigen Versagen führen⁸⁴. Zur Beschreibung des Gleichgewichtszustands in einem Werkstück wird nach positiven (Druck-) und negativen (Zug-) Eigenspannungen unterschieden. Die unterschiedlichen Vorzeichen der Eigenspannungen korrelieren dabei direkt mit dem thermisch-mechanischen Belastungskollektiv beim Schleifen. Die hohen in den Prozess eingebrachten spezifischen Energien werden in Wärme und plastische Verformung umgewandelt. Thermische Belastungen führen zu Zugeigenspannungen⁵⁷⁵, plastische Verformung führt zu mechanischen Lasten und damit zur Ausbildung von Druckeigenspannungen.

Ob Zug- oder Druckspannungen nach der Bearbeitung vorliegen ist also eine Frage der Prozesssteuerung und der Signifikanz der thermischen und mechanischen Einflüsse bei deren Überlagerung. In Abbildung 12 ist dieser Zusammenhang in Abhängigkeit der kontaktoberflächenbezogenen Schleifleistung P''_c dargestellt. Zunächst dominiert bei geringen P''_c der Einfluss der Reibung und es kommt zu thermisch bedingten Zugeigenspannungen. Bei weiterer Steigerung kommt es zu mechanischen Belastungen und zu plastischen Verformungen, woraus die sprunghafte Ausbildung von Druckeigenspannungen resultiert. Bei weiterer Steigerung der Schleifleistung steigen die Temperaturen und damit die Bildung von Zugeigenspannungen.

Vorliegende Druckeigenspannungen werden durch diese Überlagerung verringert. Schließlich dominieren thermische Einflüsse und es liegen wieder Zugeigenspannungen vor.

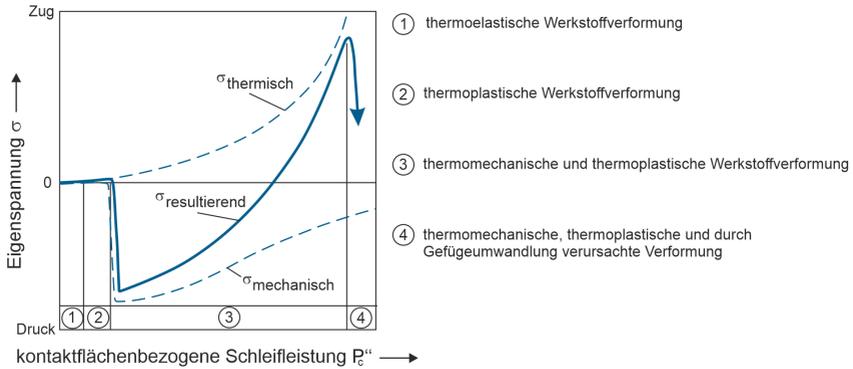


Abbildung 12: Superposition thermischer und mechanischer Wirkungen und daraus resultierender Eigenspannungsverlauf in Abhängigkeit der Schleifleistung ¹⁰⁰

Eigenspannungen überlagern sich mit Lastspannungen und beeinflussen somit das Einsatzverhalten geschliffener Bauteile. Statische und zyklische Biege- und Torsionsbelastungen, tribologische und korrosive Belastungen, und auch Wälzbelastungen wirken sich in der Bauteilrandzone am stärksten aus ¹⁰⁰. Druckeigenspannungen wirken solchen Belastungen entgegen; die mechanisch induzierten plastischen Verformungen in der Randzone können zu einer Steigerung der Verschleiß- und Ermüdungsfestigkeit und damit der Festigkeit der Bauteile im Einsatz führen ^{84, 87}. Generell wirken sich Druckeigenspannungen positiv auf die Ermüdungsfestigkeit aus ^{197, 538}, Zugeigenspannungen wiederum führen zu frühzeitigem Versagen ⁸⁴, da sie die Ermüdungsfestigkeit herabsetzen ^{393, 575}.

Beim Eingriff in das aufgrund von Eigenspannungen im Werkstück vorliegende Kräfte- und Momentengleichgewicht treten makroskopische Maßänderungen auf. Dies kann bei der Zerspannung zum Verzug von Werkstücken führen ¹⁹⁵. Tatsächlich sind Eigenspannungen der primäre Grund für den Verzug und die Deformation zerspannter Werkstücke, insbesondere in dünnwandigen Bereichen; dabei haben die in Halbzeugen vorliegenden Eigenspannungen einen erheblichen Einfluss auf die Form- und Maßhaltigkeit zerspannter Werkstücke, aber auch die Schnittbedingungen beeinflussen die Eigenspannungen und somit die Werkstückqualität ⁶⁷⁸. Nach dem Prozess und dem Ausschleifen des Werkstücks kann es dann zur Deformation des Werkstücks aufgrund der wieder ins Gleichgewicht kommenden Zug- und Druckeigenspannungen kommen ³⁷⁴. Befindet sich ein Werkstück zunächst im Gleichgewicht, so kann es zu Deformationen kommen, wenn dünne Schichten Material abgetragen werden, in denen kein Gleichgewicht herrscht, also überwiegend Druck- oder Zugspannungen vorliegen. Nach dem Abtrag dieser dünnen Schichten stellt sich wieder ein Gleichgewicht ein, das mit dem Verzug des Werkstücks einhergeht ²²⁴.

Das thermisch-mechanische Belastungskollektiv beim Schleifen ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Kinematische Eingriffsverhältnisse, Prozessparameter, Werkstoffcharakteristika, die KSS-Zufuhr und die Schleifscheibenspezifikationen bilden einen komplexen

Wirkzusammenhang und müssen einzeln und auch in ihrem jeweiligen Zusammenspiel betrachtet werden⁶³¹. Während die Werkstoffcharakteristika einen dominierenden Einfluss haben⁵⁰⁴, ist prozessseitig die Schleifscheibenspezifikation als wesentlicher Einflussfaktor auf die Ausprägung der Eigenspannungen zu nennen¹⁰⁰. Dies ist exemplarisch für die Wahl des Abrasivmittels in Abbildung 13 dargestellt.

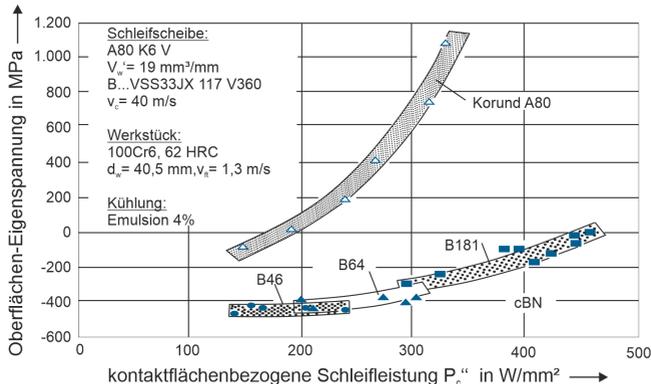


Abbildung 13: Einfluss des Abrasivmittels auf die Oberflächen-Eigenspannungen beim Innenrundsleifen; nach⁷⁵

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich thermische Einflüsse negativ und mechanische positiv auf das Einsatzverhalten der Bauteile auswirken. Den thermischen Einflüssen wird durch die KSS-Zufuhr begegnet, was im nächsten Kapitel behandelt wird. Weiterhin existieren zahlreiche Entwicklungen von Sonderwerkzeugen, die auf eine Reduktion der thermischen Einflüsse abzielen. Diese können unterschieden werden nach Maßnahmen zur Änderung der Wärmeaufteilung beziehungsweise zur Reduktion der in das Werkstück gelangenden Wärme (zum Beispiel innengekühlte Schleifscheiben) und Maßnahmen zur Reduktion der entstehenden Wärme im Prozess (zum Beispiel definiert gesetzt Schleifscheiben). Bezüglich der positiven mechanischen Einflüsse zielen Untersuchungen auf eine Nutzung oder Verstärkung der mechanischen Einflüsse ab (zum Beispiel durch die Verwendung elastisch gebundener Schleifscheiben). Auf die genannten Entwicklungen wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

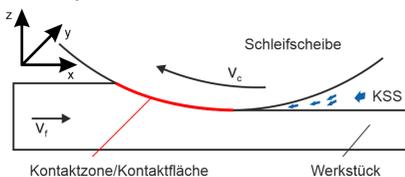
3.4 Kühlschmiersysteme und Wärmeabfuhr

Simulationsgestützte Optimierungen, das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Schneidkeilgeometrie und Spanbildung oder die werkstoffspezifische Auslegung von Schneidstoffen und Beschichtungen sind bei den Prozessen Drehen, Fräsen und Bohren aufgrund der guten Beobachtbarkeit und der vergleichsweise einfachen empirischen Zusammenhänge beim geometrisch bestimmten Spanen im Vergleich zum Schleifen weit vorangeschritten. Demgegenüber steht die KSS-Zufuhr beim Schleifen schon seit Jahrzehnten im Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen und es existiert eine breite, detaillierte Wissensbasis. Dies ist nicht zuletzt auf die sehr hohe Bedeutung der Wärmeabfuhr beim Schleifen aufgrund der hohen spezifischen

Energien zurückzuführen. Während die Trockenerspanung bei geometrisch bestimmten Zerspansprozessen, allen voran beim Fräsen und Drehen, bereits weit verbreitet beziehungsweise bei einigen Werkstoffen industrieller Standard ist, ist der Einsatz von KSS beim Schleifen mit herkömmlichen Schleifscheiben unverzichtbar. Untersuchungen zum Trockenschleifen zeigten Probleme bei der Spanabfuhr und der Reinigung der Schleifscheiben, resultierend in Zusetzen und vorzeitigem Versagen der Werkzeuge^{306, 341, 593}. Im Prozess ist die Spanabfuhr durch die Spülwirkung des KSS wichtig, um Beschädigungen der Führungen zu vermeiden^{365, 625, 626, 633} und die Kontaktzone frei von Spänen zu halten. Weiterhin müssen die Führungen und Spindeln von Schleifmaschinen gekühlt werden, um die Maschinengenauigkeit zu gewährleisten. Aus diesen Gründen wird trotz einiger weniger dokumentierter erfolgreicher Versuche zum Trockenschleifen bei sehr geringen Abtragsraten ohne die Entwicklung spezieller Schleifscheiben die Qualität und Produktivität des Nassschleifens niemals erreicht werden^{251, 341, 343, 618, 673, 691}. Aufgrund der Problematik der Spanabfuhr ist auch eine Minimalmengenschmierung (MMS), also die Zufuhr von Volumenströmen kleiner 50 ml/h nicht praktikabel³⁴⁰. Die Schmierwirkung der MMS führt zu Reduzierungen der Prozesskräfte^{91, 272, 342, 569, 620} und zur Reduzierung spezifischer Energien^{238, 583}. Die Oberflächenqualität und die thermische Belastung der Werkstücke ist jedoch nicht akzeptabel^{238, 271, 272, 319, 342, 365, 569, 583}. Ein weiteres Problem ist der verfahrensbedingte Ölnebel. Bei der MMS wird das Öl nicht flüssig, sondern als Sprühnebel in die Kontaktzone gebracht. Dieser Zustand wird beim Schleifen mit Öl sonst möglichst vermieden, da sich Ölnebel entzünden können. Industriell ist das Trockenschleifen auf einige wenige Sonderanwendungen begrenzt, zum Beispiel das Entfernen der Zunderhaut von Brammen im noch heißen Zustand, MMS findet keine Anwendung.

Der KSS gelangt über den Spanraum an die Wirkzone. Beim Drehen und Fräsen ist der Spanraum quasi unendlich, da er von der Spanfläche der Schneide in die Umgebung übergeht. Beim Bohren entspricht er dem Volumen der Spannut des Anteils des Bohrers, der sich im Eingriff befindet. Beim Schleifen wird der Spanraum durch die Kontaktzone definiert, also dem Bereich des Kontakts zwischen Werkstück und Schleifscheibe. Dieser Bereich, auch Schleifspalt genannt, beschreibt den Spanraum und die Körner, die sich innerhalb dieser Kontaktfläche befinden (siehe Abbildung 14) und ist definiert durch die Kontaktfläche multipliziert mit dem maximalen Kornüberstand eines Kornes innerhalb dieses Bereichs. Der Spanraum ergibt sich somit zum Volumen des Schleifspalts abzüglich des Volumens aller Körner in diesem Bereich. Der durch den Spanraum geförderte KSS-Volumenstrom wird als Kontaktzonenvolumenstrom bezeichnet.

Schleifprozess



Schleifspalt (vergrößerter Ausschnitt)

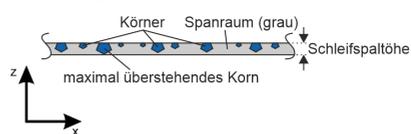


Abbildung 14: Kontaktzone, Schleifspalt und Spanraum

Der Spanraum ist neben der Wahl der Bindung (siehe Kapitel 3.5.2) wesentlich von der Kornkonzentration abhängig (Kapitel 3.5.1). Hohe Kornkonzentrationen verringern den Spanraum.

Darüber hinaus verringern die Körner, die nur Reiben und Pflügen und nicht zum Materialabtrag beitragen, sowie die Körner, die nicht mit dem Werkstück in Kontakt kommen, jedoch über die Bindung hinausragen, das Spanraumvolumen. Einige der in Kapitel 4.2 vorgestellten Konzepte zielen auf eine Reduzierung der Anzahl dieser Körner, um den Spanraum zu erhöhen. Daneben verfügen galvanisch belegte Schleifscheiben mit ihren hohen Kornüberständen generell über große Spanräume und sind damit für hohe Zeitspanvolumina geeignet (Kapitel 3.5.2).

Ein weiteres Hemmnis der KSS-Zufuhr stellt die Prozesskinematik dar. Es liegen hohe Kontaktlängen vor, gerade beim Tief- und Hochleistungsschleifen, die die KSS-Zufuhr erschweren²³². Generell ist die Zufuhr beim Außenrunds Schleifen vergleichsweise einfach, beim Innenrunds Schleifen aufgrund der hohen Kontaktlängen und der schlechten Zugänglichkeit besonders erschwert. Das Planschleifen ist zwischen den beiden Verfahren einzuordnen. Darüber hinaus wird die Zufuhr durch die hohen Schnittgeschwindigkeiten erschwert, also die hohen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten, die zur Ausbildung eines um die Schleifscheibe rotierenden Luftpolsters führen, welches durch Grenzschichthaftung entsteht⁴⁸⁹ und das Arbeitsergebnis sowie den Prozess beeinflussen kann^{104, 118, 152, 179, 215, 236, 337, 416, 645}. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass der KSS mit etwa derjenigen Geschwindigkeit in die Kontaktzone gefördert werden muss, mit der die Schleifscheibe rotiert, um das Luftpolster zu durchdringen und eine maximale Menge an KSS im Schleifspalt zu erreichen^{433, 441, 488}. Die Austrittsgeschwindigkeit des KSS aus der Düse geht im Quadrat in den benötigten Druck am Düsenaustritt ein. Um die notwendigen Austrittsgeschwindigkeiten zu realisieren, sind daher gerade beim Hochleistungsschleifen mit seinen hohen Schnittgeschwindigkeiten hohe Drücke notwendig. Der KSS wird daher in der Regel unter wesentlich höheren Drücken zur Kontaktzone geführt als beim Spanen mit geometrisch bestimmter Zerspanung (Hochdruckkühlungen für die Bearbeitung von Hochleistungswerkstoffen ausgenommen). Die hierzu benötigten Pumpen und entsprechenden Filteranlagen tragen weiterhin zu den hohen Kosten und benötigten Energien bei. Der Vorteil hoher Zufuhrgeschwindigkeiten beziehungsweise -drücke liegt darin, dass die Schleifscheibe den KSS nicht beschleunigen muss, womit die Spindel entlastet wird und geringere Spindelleistungen benötigt werden.

Gewöhnlich werden Öle und wasserbasierte Emulsionen eingesetzt. Diese unterscheiden sich in ihrer Wärmekapazität und Schmierwirkung voneinander. Emulsionen weisen die höhere Wärmekapazität auf und erzielen daher eine hohe Kühlwirkung während Öle über die besseren Schmiereigenschaften verfügen^{336, 687}. Emulsionen führen also bei gleicher Zufuhrmenge mehr Wärme pro Zeit ab, während die überlegene Schmierwirkung von Öl die Entstehung von Wärme a priori reduziert.

Die Kühlwirkung beider Medien ist thermodynamischen Grenzen unterworfen. Bei steigenden Temperaturen kommt es zur Bildung von Bläschen an den Grenzflächen zum Werkstück und Werkzeug. Dieses Blasensieden resultiert in eine Durchmischung der Flüssigkeit, womit der Wärmeübergang verbessert wird. Bei weiterer Steigerung der Temperatur des Mediums bildet sich jedoch eine isolierende Dampfdicht zwischen dem Medium und dem Werkstück und Werkzeug, welche als isolierende Schicht wirkt; der Wärmeübergang sinkt schlagartig (Leidenfrost Effekt).³⁶⁶

Dieses Filmsieden genannte Phänomen wurde beim Schleifen beobachtet. Die Kühlwirkung sinkt schlagartig, es kommt zu Werkstückrandzonenschädigungen, die Wärmeübertragung zum

KSS wird unterbrochen²³². Die Temperaturen, die beim Auftreten des Filmsiedens in der Kontaktzone herrschen, entsprechen denen beim Trockenschleifen^{42, 368, 712}. Öl-basierte KSS haben den Vorteil, dass die Temperaturen, ab denen es zum Filmsieden kommt, höher sind als diejenigen bei Emulsionen. Gerade bei thermisch kritischen Prozessen ist daher die Verwendung von Ölen vorteilhaft.

Untersuchungen zum Einfluss des KSS auf die Spanbildung beim Ritzen haben gezeigt, dass eine Schmierung das Gebiet des Schneidens entlang eines Korneingriffs verlängert; der Bereich des Pflügens wird reduziert³¹². Weiterhin werden weniger Aufwürfe an den Ritzrändern erzeugt³¹². Es kommt bereits bei kleineren Spanungsdicken zur Spanbildung³¹⁴, die Schnitteinsatztiefe wird reduziert. Insgesamt steigt also die Effizienz der Spanbildung mit der Schmierwirkung. Dies konnte auch in Schleifversuchen nachgewiesen werden. Die Schmierung reduziert die Reibung im Kontakt, daraus resultierende Verlustenergien werden verringert^{413, 485} und es resultieren gleichzeitig kleinere Kräfte und ein geringerer Werkzeugverschleiß^{90, 91, 104, 146, 264, 344, 434, 485, 644, 683}, da niedrigere Temperaturen den Werkzeugverschleiß reduzieren³⁰⁴; die spezifischen Energien sinken⁴⁸⁵. Die mit der Schmierung einhergehende Reduzierung der Temperatur wird im Allgemeinen wichtiger eingeschätzt als die Kühlwirkung der Emulsion^{76, 421, 565, 575, 665}.

Die KSS-Zufuhr erfolgt nahezu immer über Freistrahldüsen. Darunter fallen die in der Industrie gerade bei modernen Werkzeugschleifmaschinen sehr weitverbreiteten Segmentschläuche, die ebenfalls sehr weit verbreiteten konventionellen Freistrahldüsen in verschiedensten Formen und die Punktstrahldüsen, die einen besonders laminaren und gerichteten KSS-Strahl erzeugen können. Eine weitere Kategorie sind die Schuhdüsen, die an die Schleifscheiben angepasst werden und diese umschlingen. Der KSS wird hierbei unter geringem Druck zugeführt und durch die Schleifscheibenrotation in die Kontaktzone gefördert. Dies hat den Vorteil, dass Pumpen geringer dimensioniert werden können, die benötigten Spindelleistungen steigen jedoch an⁴⁸⁹. Weiterhin müssen sie an die Schleifscheibengeometrie angepasst werden und bei Verschleiß nachgeführt werden, weshalb sie industriell eher selten eingesetzt werden^{685, 696}. Abbildung 15 zeigt einige Beispiele der genannten Düsenformen.

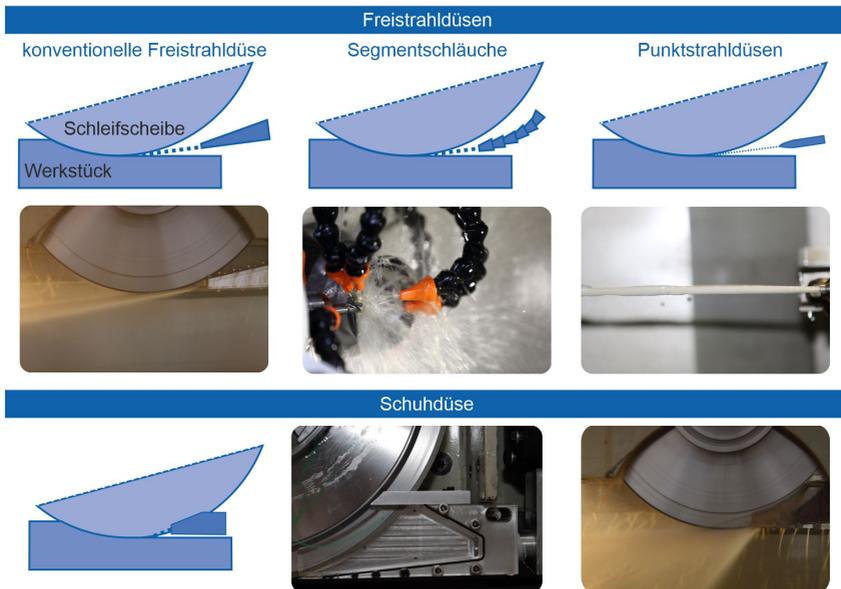


Abbildung 15: Einige Düsenformen

Einsatz von Freistrahldüsen

Freistrahldüsen führen den KSS in einem Strahl zur Kontaktzone. Die Strahlform wird durch die Austrittsgeometrie der Düse bestimmt, es kommen runde, rechteckige und an die Werkstückkontur angepasste Querschnitte zum Einsatz. Es werden je nach Prozess Volumenströme von 10 l/min bis 500 l/min eingesetzt. Neben dem Volumenstrom hat insbesondere die Positionierung der Düse einen hohen Einfluss auf den Prozess und das Prozessergebnis^{45, 90, 101, 356}. Es existieren zahlreiche Untersuchungen zur Anpassung der Düseigenschaften an den Prozess; bis auf wenige abweichende Ergebnisse herrscht weitgehend Konsens³³⁰ und die Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ein laminarer beziehungsweise kohärenter Strahl verbessert das Durchdringungsvermögen des KSS durch das Luftpolster und erhöht den Kontaktzonenvolumenstrom und damit die Kühlwirkung^{8, 684}; dieser laminare Strahl wird durch scharfe Kanten am Düsenaustritt und glatte Innenwände der Düse realisiert^{251, 427, 489}.
- Eine Steigerung der KSS-Austrittsgeschwindigkeit führt zu einer Steigerung des Kontaktzonenvolumenstroms und damit einer Verbesserung des Prozessergebnisses^{166, 237, 705}, jedoch nur bis zu einem gewissen Grenzwert, ab dem es zu keiner weiteren Steigerung kommt oder das Ergebnis gar verschlechtert wird^{433, 487–490, 548}. Dieser Grenzwert entspricht etwa der KSS-Austrittsgeschwindigkeit^{487–490}. Das Verhältnis der KSS-Austrittsgeschwindigkeit zur Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit sollte 0,8 bis 1 betragen⁴⁴¹; dies wird als Gleichlaufkühlung bezeichnet.

- Eine Steigerung des KSS-Zufuhrvolumens kann zu einer Steigerung des Kontaktzonen-volumenstroms führen^{186, 548, 697}, wobei der Effekt geringer ist als die Steigerung der KSS-Austrittsgeschwindigkeit^{104, 441}.
- Der Strahl sollte tangential zur Schleifscheibe gerichtet sein^{104, 487–490, 548}.
- Ein geringer horizontaler Abstand der Düse zur Kontaktzone erhöht den Kontaktzonen-volumenstrom und verbessert den Prozess und das Prozessergebnis^{7, 79, 104, 186, 362, 441, 684}.

Werden diese Gestaltungs- und Ausrichtungsrichtlinien beachtet, so lässt sich eine effiziente KSS-Zufuhr verwirklichen. So hat Jochum gezeigt, dass das G-Verhältnis bei gleichen Prozessbedingungen in Abhängigkeit der KSS-Zufuhr von 600 bis 30.000 variieren kann³⁰⁰. Jedoch sind, wie aus der Auflistung ersichtlich, die Düsen auch an die Änderungen im Prozess beziehungsweise den Einstellgrößen anzupassen. In der Industrie wird dies häufig nicht beachtet. Die Düse wird einmal eingestellt und bei Parameteränderungen nicht justiert. Um dies zu lösen, entwickelten Heinzel et al. eine Düsenpositioniervorrichtung in Verbindung mit einem in der Schleifscheibe integrierten Temperatursensor, welcher in der Lage ist, die Düsenposition und den Zufuhrvolumenstrom automatisiert an die Schleifaufgabe anzupassen²⁵².

Trotz solch optimaler Düsenkonfigurationen wird in der Regel mit einem Überangebot an KSS gearbeitet. Der Kontaktzonen-volumenstrom ist in der Regel wesentlich geringer als der KSS-Volumenstrom^{186, 233}. Einfache analytische Betrachtungen zeigen, dass er durch den Spanraum und die Fließgeschwindigkeit des KSS in der Kontaktzone definiert ist^{323, 328}. Der Kontaktzonen-volumenstrom hängt somit neben den Düsenparametern im Wesentlichen von den Schleifscheibeneigenschaften ab²³². Daher ist die Entwicklung von Werkzeugen zur Erhöhung der Menge an KSS im Prozess Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (siehe Kapitel 4.2.3).

3.5 Schleifscheiben

Schleifscheiben sind achsensymmetrische Werkzeuge, die aus einem Grundkörper und dem abrasiven Belag bestehen²⁸. Grundsätzlich wird zwischen konventionellen und hochharten Schleifscheiben unterschieden. Die Klassifizierung erfolgt primär nach dem verwendeten Schneidstoff. Bei konventionellen kommen häufig Korund und Siliciumcarbid zum Einsatz, bei hochharten Schleifscheiben Diamant und kubisch kristallines Bornitrid (cBN). Der eigentliche Unterschied besteht jedoch nicht im verwendeten Schneidstoff, sondern im Aufbau der Werkzeuge. Während konventionelle Schleifscheiben vollständig aus dem Schleifbelag (Korn und Bindung) bestehen, ist der in der Regel wenige Millimeter dünne Schleifbelag hochharter Schleifscheiben auf einem Grundkörper aufgebracht.

Welche Art von Schleifscheibe verwendet wird, hängt vom Werkstoff und der Bearbeitungsaufgabe ab: für die Bearbeitung weicher Materialien und bei kleinen Abtragsraten kommen tendenziell konventionelle Schleifscheiben zum Einsatz, für die Bearbeitung harter Materialien und bei höheren Abtragsraten hochharte. Hierin ist sowohl die Verwendung des Schneidstoffs als auch der Aufbau der Werkzeuge begründet. Die hochharten Schneidstoffe Diamant und cBN sind deutlich härter als die konventionellen Schneidstoffe Korund oder Siliciumcarbid und daher für die Bearbeitung harter Materialien eher geeignet (siehe Kapitel 3.5.1). Andererseits sind Diamant und cBN wesentlich teurer als die konventionellen Schneidstoffe, ihr Einsatz ist daher nur bei hohen Abtragsraten oder bei hoher Wertschöpfung sinnvoll. Hohe Abtragsraten können

durch die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit erreicht werden. Eine hohe Schnittgeschwindigkeit, also eine hohe Drehzahl der Schleifscheibe, hat eine größere Anzahl an Umdrehungen pro Zeit zur Folge. Dadurch verteilt sich der Materialabtrag auf eine größere Anzahl an Körnern, die Spannungsdicke am Einzelkorn sinkt. Somit kann die mit hohen Abtragsraten einhergehende steigende Kornbelastung kompensiert werden. Hierin ist die Verwendung eines Grundkörpers bei hochharten Schleifscheiben begründet. Durch die Verwendung keramischer, metallischer oder faserverstärkter Grundkörper widersteht die Schleifscheibe den mit hoher Drehzahl einhergehenden Fliehkräften (die Geschwindigkeit geht in die Fliehkraft zum Quadrat), die bei konventionellen Schleifscheiben zum Bersten führen würden. Auch die Form der Schleifscheibe muss diesen extremen Bedingungen angepasst werden⁶⁵⁶. Übliche Schnittgeschwindigkeiten liegen im Bereich 200 m/s bis 250 m/s³⁴⁰, im Versuchsbetrieb werden noch deutlich höhere Werte erreicht. So wurden Versuchsschleifscheiben mit Grundkörpern aus Aluminium und faserverstärktem Kunststoff bei Schnittgeschwindigkeiten bis zu 500 m/s entwickelt³⁵³. Im Umkehrschluss ist damit auch begründet, weshalb Korund und Siliziumkarbid nicht in Verbindung mit einem Grundkörper verwendet werden. Die wenige Millimeter dicken Beläge würden bei diesen vergleichsweise weichen Schneidstoffen zu schnell verschleifen, um die Verwendung eines Grundkörpers wirtschaftlich zu machen.

In der Regel werden Schleifscheiben in Abstimmung zwischen Anbieter und Anwender auf die jeweilige Bearbeitungsaufgabe abgestimmt, also die Werkzeugmaschine, das zu bearbeitende Material und die zu erzielende Werkstückbeschaffenheit sowie die angestrebten Stückzahlen. Die Schleifscheibenformen und -maße richten sich nach den FEPA Richtlinien (Europäischer Verband der Schleifmittelhersteller), gehen jedoch je nach Kundenanforderungen auch über diese hinaus. Das Gleiche gilt für die Zusammensetzung der Körnungen und Bindungen. Es ergeben sich quasi unendlich viele Kombinationen an Schleifscheiben, die von den Herstellern beherrscht werden müssen. Die folgenden Unterkapitel, welche die verschiedenen Schneidstoffe und Bindungen behandeln, können daher nur einen groben Überblick geben und die allgemeinen Zusammenhänge darstellen. Weiterhin wird auf die Aspekte des Verschleißes von Schleifscheiben und deren Konditionierung eingegangen. Abschließend wird kurz erläutert, welchen Einfluss die Stellgrößen haben.

3.5.1 Schneidstoffe und Kornarten

Schneidstoffe für Schleifscheiben weisen eine hohe Härte und Verschleißbeständigkeit auf. So ist die Härte aller Schneidstoffe für das Schleifen höher als die in der geometrisch bestimmten Zerspanung häufig verwendeten Hartmetalle. Die Verschleißbeständigkeit resultiert neben der Härte aus thermischer und chemischer Beständigkeit. Die wichtigsten Schneidstoffe sind Korund (Aluminiumoxid), Siliziumkarbid, kubisches Bornitrid (cBN) und Diamant. Diese Schneidstoffe werden synthetisch hergestellt und haben in der industriellen Anwendung die natürlichen Kornwerkstoffe verdrängt, da synthetische Schneidstoffe über reproduzierbare Eigenschaften verfügen. Die wichtigsten Eigenschaften der Schneidstoffe sind vergleichend in Abbildung 16 aufgeführt.

	Al ₂ O ₃	Sol-Gel	SiC	cBN	Diamant
Dichte (g/cm ³)	3,96	3,87	3,15	3,48	3,52
Härte (HK01)	1.850-2.000	1.900-2.400	2.450-5.000	4.500-5.000	5.000-7.000
Härte (HV01)	2.100	-	2.500	6.000	-
E-Modul (GPa)	400	-	400	680	890
Poissonzahl	0,20	-	0,17	0,17	0,20
Reibkoeffizient	0,34	0,34	-	0,19	0,05-0,15
Schmelzpunkt (°C)	2.050	-	2.300	2.730	3.700
Temperaturbeständigkeit (°C)	1.750	2000	1.500	1.200	900
Wärmeausdehnungskoeffizient (10 ⁻⁶ /K)	7,4 (<500°C) 7,5-8,5 (>500°C)	-	4,7	3,6	0,8 (RT) 1,5-4,8 (>500°C)
Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	30 (RT) 14 (400°C)	30 (RT) 14 (400°C)	110 (RT) 55 (600°C)	200 (400°C)	600-2000 (RT)
spez. Wärme (J/gK)	1,08 (400°C)	1,08 (400°C)	1,1 (500°C)	1,57 (400°C)	6,19 (RT)

Abbildung 16: Eigenschaften verschiedener Abrasivmedien ⁷³⁴

Korund und Siliziumkarbid werden bei ihrer Herstellung gezielt verunreinigt, um ihre Eigenschaften zu modifizieren. So führen beispielsweise geringe Mengen an Chromoxid oder Titanoxid bei der Herstellung von Korund zu einer verringerten Härte, jedoch einer deutlichen Verbesserung der Zähigkeit ³³⁵. Damit können die Eigenschaften des Schneidstoffs gezielt auf das zu bearbeitende Material abgestimmt werden, vergleichbar der Legierung von Schneidstoffen der geometrisch bestimmten Zerspanung, wie beispielsweise bei Schnellarbeitsstahl.

Aufgrund der teuren Grundkörper, der geringen Belagsdicke und der aufwendigen Herstellung hochharter Schleifscheiben werden für diese die besonders verschleißfesten Schneidstoffe cBN und Diamant verwendet. CBN wird überall dort eingesetzt, wo der Einsatz von Diamant nicht möglich ist. Das heißt bei thermisch kritischen Prozessen und bei der Zerspanung niedrig-eisenhaltiger Stähle, da sich Diamant bei hohen Temperaturen zersetzen kann und der Kohlenstoff des Diamanten in den Stahl diffundieren kann.

Wie in Abbildung 16 ersichtlich verfügt kein Werkstoff über alle positiven Eigenschaften gleichzeitig. Die Wahl der Schneidstoffart selbst erfolgt ebenfalls entsprechend dem zu zerspanenden Material und den Prozessbedingungen. Im Allgemeinen wird Korund für die Zerspanung von unlegierten und legierten Stählen bis 63 HRC eingesetzt, Siliziumkarbid bei spröderen Werkstoffen wie Gusseisen, Gläsern und Keramik. Sind höhere Abtragsraten oder hohe Standzeiten gefordert (zum Beispiel beim Profilschleifen oder wenn hohe Formgenauigkeiten gefordert sind), so kommen cBN für Stahlwerkstoffe und Diamant für sprödharte Werkstoffe zum Einsatz.

Gerade die Entwicklung von cBN ermöglicht das wirtschaftliche Schleifen auch bei hohen Abtragsraten. Neuere Untersuchungen mit Korngrößen von 300 µm bis 600 µm zeigen, dass höhere Abtragsraten und damit kürzere Bearbeitungszeiten als beim Drehen erreicht werden können ¹⁵⁵. Die hervorragende Wärmeleitfähigkeit von cBN bringt vor allem bei Werkstoffen Vorteile, die selbst geringe Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. So wird über das cBN Korn bei der Bearbeitung von Ni-Basiswerkstoffen ein erheblicher Anteil der Wärme abgeführt ⁵⁸⁷. Auch

bei anderen Werkstoffen ist dies von Vorteil; selbst bei geringen Abtragsraten oder kleinen Kontaktflächen wird viel Wärme über das Korn abgeführt²³² und dadurch insgesamt weniger thermische Schädigungen am Werkstück erreicht³⁹⁷. Im direkten Vergleich Korund und cBN wurden in der Randzone bei Korund Zugeigenspannungen detektiert, während bei cBN Druckeigenspannungen erreicht wurden¹⁰⁰, was wiederum auf geringere thermische Belastungen bei der Verwendung von cBN zurückgeführt werden kann. Allgemein kann gesagt werden, dass der größte Teil der Wärme bei konventionellen Schleifscheiben in das Werkstück gelangt²³², während bei hochharten Schleifscheiben aufgrund deren hoher Wärmeleitfähigkeit viel Wärme über die Schleifscheibe aus dem Prozess abgeführt wird²³².

Neben den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Körner hat ihre Spezifikation, also die Korngröße, Kornart (splittig vs. blockig), Kornform und die Kornkonzentration einen hohen Einfluss, da sie die Spanbildung und die Vorgänge in der Kontaktzone beeinflussen. Kornwerkstoffe werden mit Hilfe von Siebmaschinen klassifiziert. Dabei sind die Korngrößen genormt^{16, 170, 194, 193}. Für jede Korngröße sind die Maschenweiten der Siebe vorgegeben. Hieraus ergibt sich eine statistische, in Grenzen gleichmäßige Gaußverteilung der Korngrößen bei einer gegebenen Korngröße⁵⁸². Dies hat jedoch sehr uneinheitliche Kornüberstände im Initialzustand der Schleifscheibe zur Folge, vor allem bei galvanischen Belägen (siehe Kapitel 3.5.2). Die resultierende ungleichmäßige Hüllkurve hat einen Einfluss auf das Verschleißverhalten (siehe Kapitel 3.5.3). Abbildung 17 verdeutlicht den Einfluss verschiedener Korngrößen auf die sich ergebende Hüllkurve.

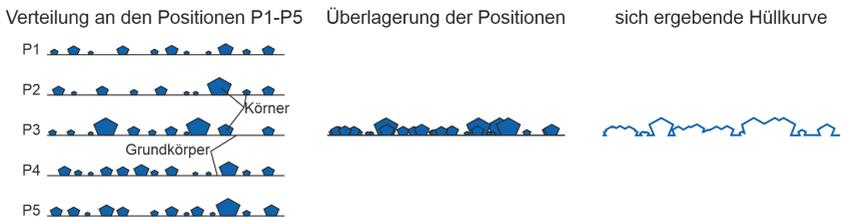


Abbildung 17: Schematische Darstellung sich ergebender Hüllkurven am Beispiel der Überlagerung von fünf Einzelverteilungen

Blockige Körnungen sind widerstandsfähiger und ermöglichen einen hohen Spanabtrag, während splittige Körnungen einen besseren Selbstschärfefeekt aufweisen. Die Kornformen reichen von spitzen, tetraederförmigen Kristallen bis hin zu stumpfen, quaderförmigen⁷³⁴. Der Einfluss der Kornspezifikation auf die Spanbildung wird folgend näher erläutert.

Einfluss der Kornspezifikation auf die Spanbildung und die Oberflächenausprägung

Während Randeffekte, also seitlich zur Schneide stattfindende Materialverdrängung bei der Spanbildung beim geometrisch bestimmten Spanen aufgrund der großen Eingriffsbreiten vernachlässigt werden können, haben diese beim Schleifen einen erheblichen Einfluss⁵²², da die Eingriffsbreite in etwa der Eingriffstiefe entspricht. Wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, ist daher bei der Spanbildung eine dreidimensionale Betrachtung notwendig. Hierbei hat die Kornform im Zusammenspiel mit der Eindringtiefe einen entscheidenden Einfluss. Die Erkenntnisse

beruhen hierbei wieder auf Ergebnissen der Materialforschung zum Verschleiß durch das Ritzen abrasiver Teilchen auf Oberflächen und aus der Triboforschung (siehe zum Beispiel^{147, 312, 314, 361, 429, 640, 736, 737}) und wurden von Martin und Yegenoglu auf das Schleifen übertragen⁴²¹. Die vier identifizierten Mechanismen sind (siehe auch Abbildung 18):

- Mikrospanen-Schälspanen,
- Mikrospanen-Fließspanen,
- Mikropflügen,
- Mikrofurchen.

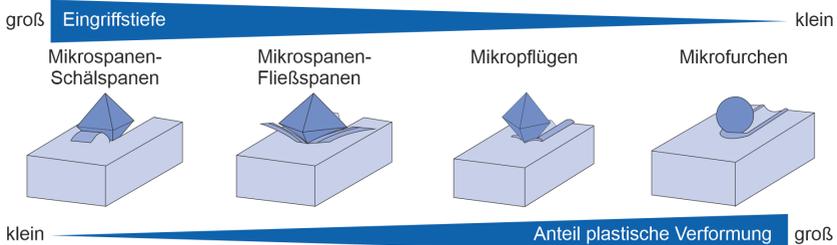


Abbildung 18: Abtragsmechanismen bei dreidimensionaler Betrachtung; nach⁴²¹

Welcher Mechanismus vorliegt hängt von der Eingriffstiefe, und der Orientierung des Korns ab. Steht die Spanfläche bei hohen Eingriffstiefen annähernd senkrecht zur Bearbeitungsrichtung, so kommt es zum Mikrospanen-Schälspanen; der Span wird ähnlich wie bei der geometrisch bestimmten Zerspanung abgeschält; der Anteil an plastischer Verformung ist gering. Steht die Spanfläche nicht senkrecht zur Bearbeitungsrichtung, so wird das Material verdrängt und fließt seitlich am Korn vorbei. Bei ausreichend hohen Eingriffstiefen wird die Fließgrenze dennoch überschritten und die Spanbänder lösen sich vom Furchungsrand (Mikrospanen-Fließspanen). Bei kleineren Eingriffstiefen bleibt das verdrängte Material an den Furchungsrändern haften (Mikropflügen - Phase III der Spanbildung wird nicht erreicht). Ein Materialabtrag findet erst durch nachfolgende Körner statt. Das zu den Seiten verdrängte Material führt zu einer Erhöhung der Eingriffstiefe nachfolgender Körner. Bei sehr kleinen Eingriffstiefen kann die Spitze des Korns als eine stumpfe Kugel angenähert werden, die Orientierung hat keine Bedeutung mehr. Das Material wird nur noch verformt und verdrängt, ein Stofffluss findet unterhalb des Korns, im Werkstoffinneren statt (Mikrofurchen). Durch wiederholtes Mikrofurchen kommt es zur Materialermüdung und dem Ablösen kleiner Werkstoffschichten von der Oberfläche (Oberflächenermüdung). Diese geringen Einzelkornzustellungen werden mit 1 μm bis 5 μm beziffert, Zustellungen, die beim Schleifen eher als groß zu bewerten sind.⁴²¹

Die genannten Mechanismen gelten für tetraeder- beziehungsweise pyramidenförmige, spitze Schneiden. Die Bildung von Aufwürfen ist jedoch auch stark von der Kornform abhängig⁴²⁴. Gerade bei geringen Zustellungen sind unter Berücksichtigung dieser Mechanismen blockige Körner vorteilhaft bezüglich einer effizienten Spanbildung. Sie verfügen über einen großen Eingriffsbereich und, je nach Orientierung, eine große Spanfläche, welche das Aufstauen des Werkstoffs vor dem Korn anstelle des seitlichen Fließens begünstigt. Sie können nicht als Kugel betrachtet werden; es kommt bei geringen Eindringtiefen eher zum Mikropflügen als zum

Mikrofurchen. Stumpfe Körner, also blockige oder stark verschlissene tetraederförmige, führen in der Tendenz zu guten Oberflächen⁶³⁹, wobei schärfere Körner die Schnittnormalkräfte reduzieren⁴²⁴. Generell hat die Kornform einen Einfluss auf die Zerspankräfte und –energien^{278, 639}.

Rasim et al. führten detaillierte Untersuchungen zum Einfluss der Kornform auf die Schnitteinsatztiefe (siehe Kapitel 3.1.1) durch. Körner mit unterschiedlichen Spanwinkeln γ , Öffnungswinkeln α und Spitzenwinkeln β wurden untersucht (Nomenklatur und ein beispielhaftes Ergebnis siehe Abbildung 19). Verschleiß wurde nicht berücksichtigt. Aus der praktisch unendlichen Kornvielfalt und den möglichen Kombinationen der Winkel ergibt sich ein äußerst komplexer Zusammenhang. Die Analyse der Änderung der Schnitteinsatztiefe pro Grad Änderung des jeweiligen Winkels ergab, dass der Spanwinkel den größten Einfluss auf die Schnitteinsatztiefe hat, wobei negativere Spanwinkel zu größeren Schnitteinsatztiefen führen, da mehr Material vor dem Korn in Richtung Werkstückoberfläche verdrängt wird. Bei Öffnungswinkeln von 180° (Ausrichtung der Spanfläche in Schnittrichtung) ist der Einfluss des Spanwinkels geringer als bei Werten kleiner 180° . Der Einfluss des Spitzenwinkels ist größer als der des Öffnungswinkels.⁵¹⁴

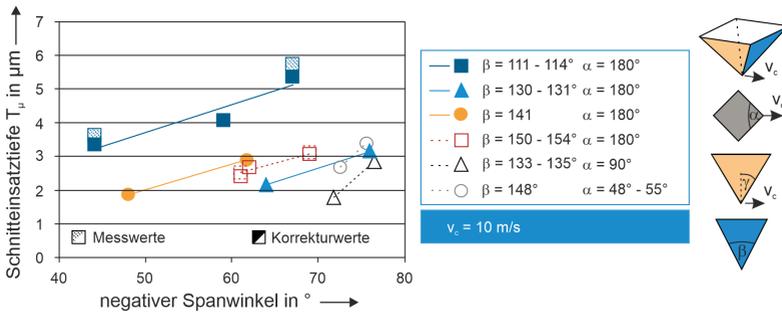


Abbildung 19: Schnitteinsatztiefe in Abhängigkeit des Spanwinkels und der Komorientierung; nach⁵¹⁴

Zu beachten ist jedoch, dass aufgrund der geringen Einzelkornzustellungen nicht die Makrogeometrie der Schneiden wichtig ist, sondern die (meist zerklüftete) Geometrie des Eingriffsbereichs⁴³. Spuren eines einzigen Kornes weisen feine Gräben auf, ein Korn repräsentiert also viele Schneiden. Ritzversuche zeigen, dass es dabei auch zur Bildung von Mikrospänen kommt, die in ihrer Größe denen der einzelnen Schneiden eines einzigen Kornes entsprechen⁶⁰⁶. Somit kann die Größe des Materialabtrags in einem noch viel kleineren Bereich als dem der Korngrößen liegen. Weiterhin ist zu beachten, dass Seitengrater und Verdrängungsmechanismen neben den Winkeln der Einzelkörner auch von der Werkstückhärte, der Schnittgeschwindigkeit und den KSS-Bedingungen abhängen². Durch die statistische Verteilung von Kornform und -Anordnung liegen gleichzeitig exzellente und mangelhafte Schneiden vor⁶⁴³. Die Oberfläche ergibt sich aus der Überlagerung der einzelnen Ritzspuren; das Profil der Ritzspuren resultiert aus der jeweiligen Kornverteilung, durch mehrfaches Überschleifen beziehungsweise eine hohe Anzahl an Überlagerungen wird die Oberfläche geglättet⁵³⁷.

Das Glätten beziehungsweise die Überlagerung der Eingriffe und die Eingriffsbedingungen selbst sind neben den bereits genannten Aspekten auch wesentlich von der Kornkonzentration abhängig. Bei gleicher Korngröße (und Kornform) führt die Steigerung der Kornkonzentration zu:

- höhere Anzahl aktiver Körner,
- geringerer Abtrag pro Korn, also kleinere Einzelkornspannungsdicke³³⁵,
- kleinere Kräfte,
- besseren Oberflächen²⁷⁷,
- höherer Anteil an elastisch-plastischen Verdrängungsvorgängen, höherer Anteil an Reibung⁸⁷,
- geringerer Spanraum,
- größere thermische Belastung⁸⁷.

Dies sich teilweise widersprechenden oder gegenläufigen Effekte (zum Beispiel kleinere Kräfte vs. höhere thermische Belastung) erschweren die Wahl der Kornkonzentration. Generell werden hohe Konzentrationen eher bei groben Körnungen eingesetzt, niedrige bei feinen. Dies ergibt sich aus dem Spanraum. Bei groben Körnungen ist selbst bei hohen Konzentrationen geometriebedingt Spanraum vorhanden, bei feinen Körnungen wird dieser zu gering.

Der Einfluss der Kornspezifikation und –konzentration auf die Spanbildung eröffnet vielfältige Möglichkeiten zur Steuerung des Materialabtrags. Neben einer entsprechenden Abstimmung dieser statistischen Größen auf die jeweilige Schleifaufgabe ermöglicht es auch die Herstellung von speziellen Schleifscheiben, worauf in Kapitel 4.2.1 eingegangen wird.

Zu erwähnen sind noch die neuartigen Schleifkörnungen der Firma 3M mit dem Markennamen Cubitron II. Diese Keramikkörner sind sehr definiert in Ihrer Form, es handelt sich um Dreiecke (Abbildung 20). Während ihre Form wesentlich definierter ist als die herkömmlicher Abrasivmittel, ist ihre Anordnung und Verteilung in der Bindung weiterhin regellos (Abbildung 20). Aus der definieren Form resultieren schärfere Schneiden, der Einsatz geht mit reduzierten Kräften und Temperaturen beziehungsweise höheren möglichen Zeitspanvolumen einher²¹⁷. Schleifscheiben mit dieser Körnung sind am Markt vorhanden, wissenschaftliche Untersuchungen finden sich praktisch keine (bei der referenzierten Quelle handelt es sich um den Beitrag eines Schleifscheibenherstellers).

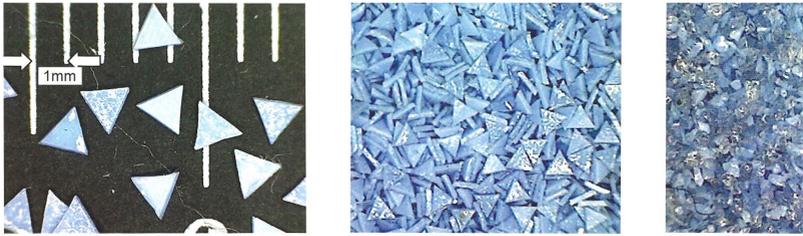


Abbildung 20: Detailansicht der Cubitron II Körner (links), Schleifscheibenbelag einer konventionellen Sinterkornscheibe (Mitte) im Vergleich zu einer Cubitron II (rechts); nach ²¹⁷

3.5.2 Bindungen

Die Hauptaufgabe der Bindung, die Fähigkeit, die Körner trotz wirkender äußerer Kräfte im Verbund zu halten, wird als Härte bezeichnet. Je härter eine Bindung, desto höher sind die Kornhaltekräfte. Die Bindungshärte ist ein entscheidender Faktor für die Konstanz des Einsatzverhaltens von Schleifscheiben ⁵⁰⁴. Gleichzeitig soll die Bindung abgestumpfte Körner aus dem Verbund freigeben. Eng mit den Kornhaltekräften einer Bindung gekoppelt ist der Spanraum der Schleifscheibe. Je höher die Kornhaltekräfte einer Bindung, desto höher der mögliche Kornüberstand bei reduzierter Gefahr des Herausbrechens der Körner bei Belastung; höhere Kornüberstände gehen dabei mit größeren Spanräumen einher. Ein großer Spanraum ermöglicht höhere Zeitspanvolumina und bietet Raum für KSS in der Kontaktzone. Neben der Hauptaufgabe der Kornbindung ist die Bindung für das dynamische Verhalten der Schleifscheibe (Dämpfung), deren Profilierbarkeit und die Wärmeabfuhr aus der Kontaktzone verantwortlich.

Die drei gebräuchlichsten Bindungsklassen sind Kunstharz-, Keramik- und Metallbindungen. Kunstharzbindungen sind nachgiebig, verfügen daher über eine hervorragende Dämpfung im System, sind stoßunempfindlich und gut profilierbar. Sie werden daher für das Trennschleifen eingesetzt, wenn geringe Schleifscheibenbreiten gefordert sind. Aufgrund ihrer Schockresistenz bei gleichzeitig hoher Bindungshärte werden sie traditionell bei hohen Abtragsraten eingesetzt. Nachteil ist ihre Temperaturempfindlichkeit, die geringe chemische Widerstandsfähigkeit und die vergleichsweise geringen Kornhaltekräfte.

Keramische Bindungen sind chemisch widerstandsfähig und temperaturbeständig, jedoch empfindlich gegen schnelle Temperaturwechsel. Sie werden aus Fritten, Feldspat und Hilfsstoffen gefertigt. Über die Zusammensetzung können die Eigenschaften der Bindung wie Temperaturbeständigkeit und Viskosität an die Bearbeitungsaufgabe angepasst werden. Aufgrund ihrer guten Profilierbarkeit bei gleichzeitig hoher Formbeständigkeit werden sie beim Profilschleifen eingesetzt. Größter Vorteil keramischer Bindungen ist ihre einstellbare Porosität. Die Poren in der Bindung bieten Platz für den Transport des KSS in die Kontaktzone und dienen als Spanraum für den Abtransport der Späne. Keramische Bindungen kommen daher bei der Zerspannung langspanender Werkstoffe zum Einsatz.

Metallische Bindungen verfügen über die höchsten Kornhaltekräfte und die höchste Wärmeleitfähigkeit. Sie sind daher für hohe Abtragsraten und somit für hochharte Schleifscheiben be-

sonders geeignet. Die Klasse der Metallbindungen umfasst die Sinterbindungen und die galvanischen Bindungen. Sinterbindungen, meist aus Kupfer/Zinn oder Kobalt/Bronze aber auch aus Hartmetall oder Nickel und Eisen, sind wie die Kunstharz- und Keramikbindungen Volumenbindungen. Demgegenüber sind galvanische Bindungen einschichtig. Die Körner werden auf den Grundkörper gestreut und dann galvanisch gebunden. Ist die Kornlage verschlissen, ist das Standzeitende erreicht. Folglich können galvanisch belegte Schleifscheiben nicht profiliert werden. Vorteile galvanisch gebundener Schleifscheiben sind die höchsten Kornhaltekräfte und der über die galvanische Abscheidung frei steuerbare Spanraum. Der Spanraum korreliert direkt mit der verwendeten (mittleren) Korngröße und der Einbetttiefe der Körner. Die Einbetttiefe wird dabei je nach zu bearbeitendem Werkstoff so gering gewählt wie möglich, um maximale Spanräume bei gleichzeitig ausreichend hohen Kornhaltekräften zu realisieren. Die großen Spanräume ermöglichen eine vergleichsweise hohe KSS-Zufuhr in die Kontaktzone und führen in Verbindung mit der hohen thermischen Leitfähigkeit der Bindung zu einem kühleren Schliff. Damit sind galvanische Bindungen für höchste Abtragsraten und das Hochleistungsschleifen besonders geeignet.

Eine vergleichsweise neue Entwicklung sind Metallhybridbindungen. Sie kombinieren die Vorteile von Kunstharz- und Metallsinterbindungen beziehungsweise kompensieren deren jeweilige Nachteile¹⁸¹. Sie verfügen über höhere Kornhaltekräfte, Verschleißfestigkeit, thermische Beständigkeit und Wärmeleitfähigkeit als klassische Kunstharzbindungen, sind aber weiterhin gut abrichtbar. Dieser Bindungstyp ist für die Herstellung der Nuten von Bohrern und Fräsern besonders geeignet.

Ein Bindungstyp, der in den letzten Jahren wieder an Bedeutung gewinnt, sind die elastischen Bindungen oder Gummibindungen. Diese werden als hochharte Schleifscheiben, in der Regel auf einem Aluminiumgrundkörper mit Diamant als Schneidstoff, zum Feinschleifen und Polieren eingesetzt. Elastische Bindungen als sehr weiche Vertreter der Kunstharzbindungen finden zunehmend Anwendung zur Generierung feinsten Oberflächen – oft wird der Schleifprozess dann als Polieren bezeichnet. Industriell bereits Standard ist zum Beispiel das Polieren von Spannuten von Bohrern für die Aluminiumzerspannung, um möglichst geringe Reibwerte zu erzielen. In²⁵⁵ wurden die Möglichkeiten einer wirtschaftlich günstigen Bearbeitung von Zahnrädern mit solchen Polierscheiben vorgestellt. Das Besondere hierbei ist, dass der Materialabtrag nicht mehr weg- sondern kraftgesteuert ist und sich entsprechend auch bei Variation der Normalkraft im Prozess ändert⁶³⁹. Je höher die Elastizität, desto höher muss die aufgebrachte Kraft sein, um eine ausreichende Steifigkeit der Bindung zur Realisierung eines Materialabtrags zu erreichen⁸⁷; bei zu geringen Kräften werden die Körner in die Bindung gedrückt. Weiche Bindungen führen zu einem höheren Anteil an plastischen Deformationen des Werkstoffs im Prozess und zu einem geringeren Materialabtrag⁸⁷ und damit zu höheren spezifischen Energien⁶³⁹. Durch das Ausweichen der Körner in die Bindung nehmen mehr Körner am Materialabtrag teil, da der Radius der Hüllkurve kleiner wird und somit Körner mit geringem Kornüberschuss die Hüllkurve erreichen; die mittleren Spannungsdicken werden geringer. Weiche Bindungen begünstigen daher den duktilen Modus bei der Zerspannung sprödharter Werkstoffe aufgrund geringerer Einzelkornkräfte⁵⁹.

Nachteil elastischer Bindungen sind die geringeren E-Module, welche eine deutliche Fliehkraftaufweitung nach sich ziehen. Dies kann zu Abweichungen in der Form- und Maßhaltigkeit des

Werkstücks führen; verstärkt durch den kraftgesteuerten anstelle des weggesteuerten Materialabtragsmechanismus. Das Ankratzen gestaltet sich bei diesen Scheiben sehr schwierig, da die hohe Dämpfung der Bindung die Anwendung von üblichen Acoustic-Emission Antastensoren erschwert. Es muss manuell angekratzt werden, wofür spezielle, meist optisch gestützte Strategien entwickelt werden müssen.

3.5.3 Verschleißformen

Der Verschleiß ist ein integraler Prozessbestandteil, der sehr langsam, aber kontinuierlich zunimmt⁶¹⁰. Es wird nach mikroskopischem und makroskopischem Verschleiß unterschieden. Unter mikroskopischem Verschleiß versteht sich der Korn- und der Bindungsverleiß im Mikrometerskaligen Bereich. Unter makroskopischem Verschleiß verstehen sich der Kantenverschleiß und der Radialverschleiß der Schleifscheibe, also ein Profilverlust. Weiterhin werden hierunter Unrundheiten und Welligkeiten der Schleifscheibe verstanden. Makroskopischer Verschleiß entsteht in Folge von fortschreitendem oder übermäßigem mikroskopischem Verschleiß.

Mikroskopischer Verschleiß und dessen Folgen

Kornverschleiß tritt in Form von Abrasion, Splitterung und Kornbruch auf. Die Abrasion ist die Folge der durch chemische und thermische Vorgänge (Oxidation und Diffusion) hervorgerufenen Entfestigung der äußeren Randschicht eines Kornes³⁵⁴. Durch die mechanische Belastung (Kontakt Korn-Werkstück) werden diese äußeren Schichten abgetragen, was zu einem Abrieb beziehungsweise einer Abflachung des Kornes führt (Kornanflächung, englisch ‚wear flat‘). Die Folgen sind eine höhere Reibung aufgrund einer vergrößerten Kontaktfläche, die Steigerung der Spannungsbreite und die Reduzierung der Spannungsdicke, da durch die Abnahme des Kornüberstands mehr Körner in Eingriff kommen. Der Kornabrieb führt zu effektiven Freiwinkeln von 0° . Die Kornanflächungen tragen daher neben den negativen Spanwinkeln erheblich zu den hohen Reibanteilen und damit den hohen spezifischen Energien bei. Sie sind weiterhin der Grund für die (relativ und absolut) hohen Normalkräfte²⁴¹. Der Einfluss des Freiwinkels wurde auch in Arbeiten der ETH Zürich gezeigt. Hier wurde, unterstützt durch Ergebnisse einer kinematisch-phänomenologischen Simulation, anhand von Einkornritzen mit verschiedenen Korngeometrien gezeigt, dass mit steigendem Freiwinkel ein effizienterer, also weniger reib- und pflügedominierter Prozess einhergeht^{643, 642}, siehe Abbildung 21.

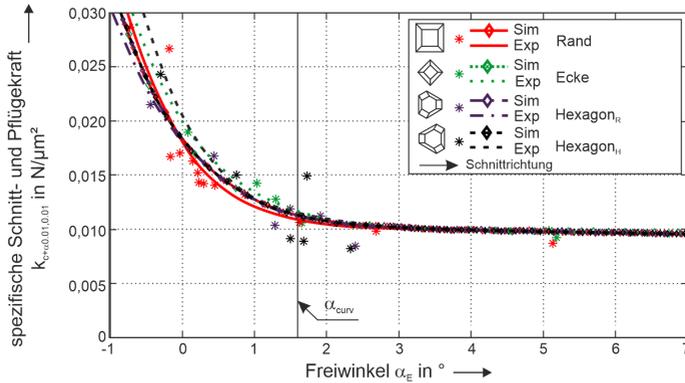


Abbildung 21: Einfluss des Freiwinkels auf die spezifische Schnittkraft bei verschiedenen Kornformen und -orientierungen, mit α_{curv} als dem Freiwinkel, unterhalb dem es zu einem Kontakt der Freifläche mit dem Werkstück kommt (kinematisch berechnet); nach ⁶⁴³

Das Abstumpfen der Körner geht stets mit einer Steigerung der Kräfte ^{304, 407} und Schnittleistungen ²⁸⁷ aufgrund der Erhöhung der Reibung ⁴¹⁴ und damit der spezifischen Energie ⁴⁰⁸ einher. Untersuchungen zeigten, dass die Tangentialkraft direkt mit dem Anteil an Kornanflüchungen korreliert ³⁶⁰. Höhere Kräfte führen wiederum zu einem schnelleren Verschleiß ¹¹⁴. Dadurch steigt die Temperatur in der Kontaktzone, womit die Abrasion selbst wiederum begünstigt wird (dieser Wirkungskreis ist in Abbildung 22). Die steigenden Kräfte führen außerdem zu höheren Verlagerungen im Maschinensystem und damit zu höheren Formabweichungen ²⁸⁷. Harte Schleifscheiben, kleine Korngrößen und feines Abrichten begünstigen die Kornanflüchung ⁴⁰⁷. Positiv hingegen ist, dass mit steigendem Verschleiß die Werkstückrauheiten sinken ²⁷⁹. Dies ist auf die sinkenden Einzelkornspannungsdicken aufgrund der steigenden Anzahl aktiver Körner (der Radius der Hüllkurve der Schleifscheibe wird kleiner) und das Einebnen von Rauheitsspitzen durch die größer werdenden Kontaktflächen Korn-Oberfläche zurückzuführen.

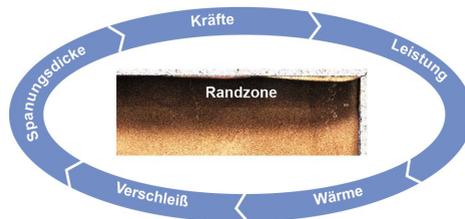


Abbildung 22: Verschleiß und seine Wechselwirkungen

Die mechanische und thermische Wechselbelastung aufgrund des diskontinuierlichen Korneingriffs und die KSS-Zufuhr induziert Ermüdungsrisse in der Kornstruktur. Als Folge splittren Teile des Korns ab oder es kommt im Extremfall zum Kornbruch. Die Splitterung und der Kornbruch haben jedoch einen positiven Nebeneffekt. Stumpfe Kornbereiche werden durch scharfe Kornbereiche ersetzt; die Reibung und die Kräfte im Prozess nehmen wieder ab ³⁴⁵.

Eine abgestimmte Splitterfreudigkeit wird daher bei der Herstellung von Schneidstoffen angestrebt. Abgestimmt bedeutet hier, dass das Korn nicht bereits bei geringen Belastungen splintern darf, da die Schleifscheibe sonst zu schnell verschleifen würde, aber so schnell splintern soll, dass es nicht zu übermäßiger Kornanflächung oder Kornausbrüchen kommt.

Bindungsverschleiß tritt auf in Form von Abrasion oder Bindungsbruch. Die Folge ist die Abnahme der Härte der Schleifscheibe beziehungsweise das Herausbrechen einzelner Körner. Ausgelöst wird Bindungsverschleiß ebenfalls direkt durch die chemische, thermische und mechanische Belastung. Somit ist der Bindungsverschleiß eine indirekte Folge der Kornanflächung, die wie erläutert zu einer Steigerung der thermischen und mechanischen Belastung im Prozess führt. Daneben kommt es zur Abrasion aufgrund des Reibens der Späne an der Bindung, die unter Umständen weicher ist als das abgetragene Material. Weiterhin kann der Bindungsverschleiß durch chemisch aktivierte Prozesse auftreten ³⁵⁴.

Schleifscheiben unterliegen einem hohen Initialverschleiß ⁴⁴⁶, sowohl bezüglich Abstumpfen ⁴⁰⁷ als auch bezüglich Kornbruch und Kornausbruch ⁴⁰⁶. Dies ist auf die zunächst geringe Anzahl aktiver Körner aufgrund der sehr ungleichmäßigen Initial-Hüllkurve und die zu Anfang sehr spitzen und damit instabilen Kornspitzen zurückzuführen. Da die Bindung eine geringere Härte aufweist als die Körnung, ist der Bindungsverschleiß dominant bezüglich des Verschleißvolumens und damit des makroskopischen Verschleißes (bei konventionellen Scheiben) ⁴⁰⁶. Der Bindungsverschleiß hängt wiederum mit den Beträgen der Kräfte zusammen. Da die Kräfte sehr stark vom Abstumpfen der Körner abhängen, ist die Kornanflächung wiederum entscheidend für den Gesamtverschleiß, obwohl das Abstumpfen im Betrag einen sehr geringen Anteil am Gesamtverschleiß hat ⁴⁰⁶.

Neben den genannten Verschleißeffekten kann es, vor allem bei erhöhten Prozesstemperaturen, zum Anhaften von Spänen beziehungsweise Werkstückmaterial im Spanraum kommen. Dieses Zusetzen der Schleifscheibe führt ebenfalls zu einem Anstieg der Schnittkräfte ³⁴⁵. Weiterhin kann es zu Schwingungen kommen, die zu unerwünschten Rattermarken führen ⁶⁶¹. Größere Körnungen neigen aufgrund des größeren Spanraums weniger zum Zusetzen als feine Körnungen ⁶³⁷. Dem Zusetzen der Schleifscheibe und dem Verschleiß wird durch das Konditionieren begegnet.

3.5.4 Konditionieren von Schleifscheiben

Um die Schleifscheibe nach Verschleiß oder Zusetzen wieder schleiffähig zu machen, wird diese konditioniert. Unter dem Begriff Konditionieren werden das Abrichten und das Reinigen der Schleifscheibe zusammengefasst. Beim Reinigen werden Zusetzungen des Spanraums entfernt. Das Abrichten umfasst die Teilprozesse Profilieren und Schärfen.

Beim Profilieren werden Korn und Bindung abgetragen, bis die Schleifscheibe wieder das gewünschte Profil aufweist. Die Schleifscheibe ist dadurch stumpf, Korn und Bindung befinden sich auf einer ebenen Hüllkurve. Zur Wiederherstellung der Mikrotopographie wird die Schleifscheibe geschärft. Beim Schärfen wird die Bindung zurückgesetzt, bis die Körner wieder ausreichend über die Bindung herausragen und der Spanraum wiederhergestellt ist. Das abschlie-

Reinigen dient zur Entfernung etwaiger Span-, Korn- oder Bindungsreste nach dem Abrichtprozess, also der Reinigung des Porenraums. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 23 dargestellt.

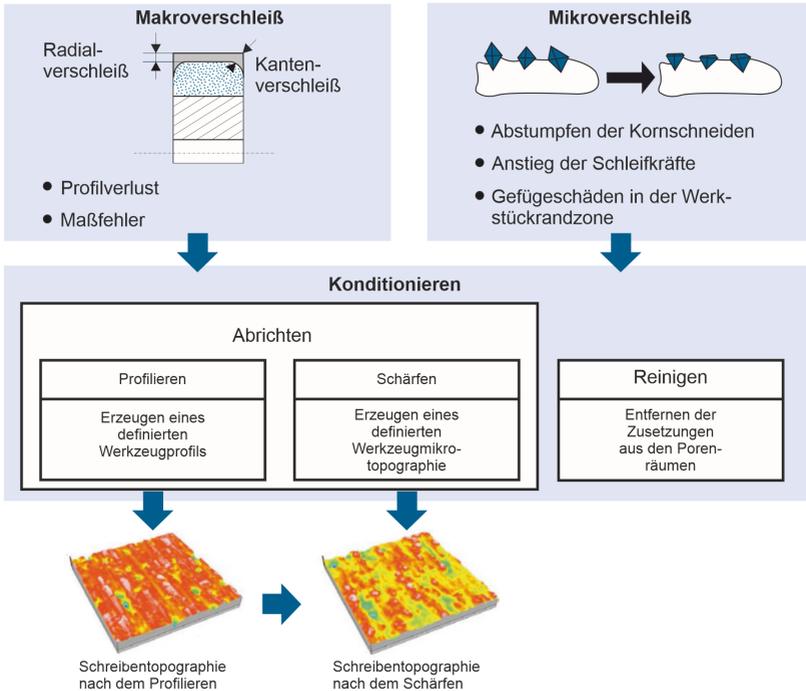


Abbildung 23: Verschleißformen und Schritte beim Konditionieren ³³⁵

Der Prozess des Reinigens kann auch ohne ein Konditionieren angewandt werden. Häufig werden sogenannte Reinigungsdüsen während des Schleifens eingesetzt, die separat zu den KSS-Zufuhrdüsen eingesetzt werden und auf die Schleifscheibe gerichtet werden. Heinzel und Antupov zeigten, dass durch eine optimierte Positionierung und Gestaltung der Reinigungsdüse bei der Bearbeitung von Inconel 718 die Schleifkräfte um 30 % und letztlich der Schleifscheibenverschleiß um 20 % reduziert werden konnte ²⁴⁹. Reichen Reinigungsdüsen nicht aus beziehungsweise kommt es mit oder ohne Reinigungsdüsen zu Zusetzungen des Belags, ist aufgrund geringen Verschleißes aber kein Konditionieren notwendig, so werden bei Diamant und cBN-Schleifscheiben Schärfsteine eingesetzt. Die Schleifscheibe wird rotierend in diese eingefahren. Schärfsteine bestehen aus Edelkorund oder Siliziumkarbid, meist keramisch gebunden; die Zusammensetzung ist ähnlich Schärfsteinen für den Privatgebrauch. Ziel ist es, die weniger festen Zusetzungen zu entfernen, ohne dass die Bindung oder das Korn verschlissen werden.

Je nach Qualitätsanforderungen erfolgt in der Regel ein regelmäßiges Abrichten, schon bevor es zu negativen beziehungsweise messbaren Auswirkungen des Verschleißes kommen kann.

Ein zu häufiges Abrichten macht den Prozess jedoch unwirtschaftlich ⁶⁶¹. Daher ist das fachgerechte Abrichten ein wesentlicher Bestandteil bei der Beherrschung des Schleifprozesses.

Abrichtwerkzeuge

Zum Profilieren werden in der Regel Diamantwerkzeuge verwendet, um den Verschleiß der Abrichtwerkzeuge zu minimieren; teilweise auch Naturdiamanten, die über eine höhere Härte verfügen als synthetische. Es kommen stehende und rotierende Abrichtwerkzeuge zum Einsatz ³³⁵, siehe Abbildung 24. Stehende Abrichtwerkzeuge führen keine Bewegung in Umfangsrichtung der Schleifscheibe aus. Die Abrichtbewegung erfolgt durch axiales Abfahren der Schleifscheibenkontur. Die Prozesskinematik gleicht dem Längs-Umfangs-Planschleifen. Stehende Abrichtwerkzeuge sind Einkornabrichter mit einem einzigen Diamanten, Abrichtfliesen mit mehreren in einer Reihe angeordneten Diamanten und Vielkornabrichter mit mehreren auf einer Fläche verteilten Diamanten. Bei den rotierenden Abrichtwerkzeugen entspricht die Kinematik dem Längs-Umfangs-Außen-Rundschleifen. Rotierende Abrichtwerkzeuge verfügen stets über eine Vielzahl an Diamanten. Es wird unterschieden nach den Profilrollen, die das Negativprofil des gewünschten Schleifscheibenprofils aufweisen, den Formrollen, bei denen das gewünschte Profil der Schleifscheibe flexibel mittels NC-Steuerung abgefahren wird, und den Topfscheiben, mit denen geradlinige Profile erzeugt werden.

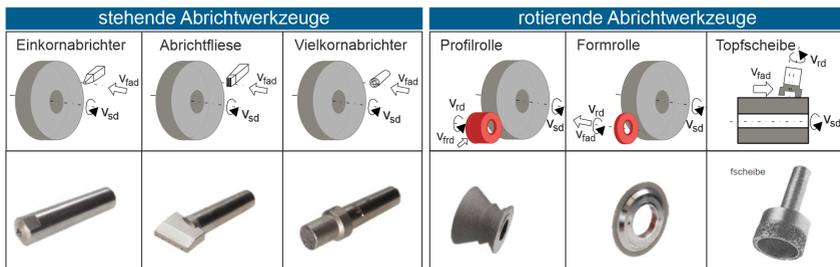


Abbildung 24: Verschiedene Typen von Abrichtwerkzeugen und jeweilige Abrichtkinematik; nach ³³⁵

Zum Schärfen kommen konventionelle Abrasivwerkstoffe zum Einsatz, die in Blöcken oder Scheiben gebunden sind oder in einem Strahl auf die Schleifscheibe geführt werden. Die weichere Bindung wird abrasiv abgetragen, während die härtere Körnung nicht oder nur wenig abgetragen wird; das Profil bleibt erhalten. Ein Überschärfen, also der Abtrag von zu viel Bindung, führt zu überhöhten Kornüberständen, die beim Einsatz zum Ausbrechen der Körner führen oder gar zum Profilverlust. Bei metallischen Bindungen erfolgt das Schärfen zudem durch chemische, elektrochemische oder funkenerosive Verfahren.

Einfluss der Abrichtparameter

Die Abrichtparameter sind der Abrichtvorschub, die Abrichtzustellung, der Abrichtüberdeckungsgrad (ein Maß für den Abstand der durch das Abrichtwerkzeug auf der Schleifscheibe erzeugten Rillen) und bei rotierenden Abrichtwerkzeugen zusätzlich das Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis (Verhältnis zwischen Umfangsgeschwindigkeit der Abrichtrolle und Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe).

Auf die Auswirkung der einzelnen Abrichtparameter soll hier nicht weiter eingegangen werden (siehe hierzu zum Beispiel ³³⁵ oder ⁶⁸⁶). Insgesamt definieren die Abrichtparameter die Topographie der Schleifscheibe und damit deren Wirkrautiefe ⁴⁹⁶ und schließlich direkt das Schleifergebnis und auch die Eigenspannungen im Werkstück ^{84, 631}. So führt zum Beispiel sehr feines Abrichten, also geringe Abrichtzustellungen und Abrichtvorschübe, zur Erzeugung stumpfer Körner beziehungsweise gleichmäßigen Hüllkurven ⁵²⁷ und damit zu hoher Reibung, hohen Temperaturen und Kräften, sowie hoher spezifischer Energie und auch zur Bildung von Zugeigenspannungen ^{84, 100, 527}. Umgekehrt können durch ein gröberes Abrichten die Körner splittieren und damit scharfe Schneiden erzeugt werden. Mit anderen Worten, das Abrichten beeinflusst direkt die Mikrotopographie der Schleifscheibe und damit die Spanbildung sowie die in Kapitel 3.1 erläuterten Wirkzusammenhänge.

Kontinuierliches Abrichten

Neben der üblichen Methode, prozessintermittierend abzurichten, wurde Ende der 70er Jahre das kontinuierliche Abrichten der Schleifscheibe während des Prozesses entwickelt ⁵⁰¹. Wie der Name schon sagt, wird hierbei die Schleifscheibe während des Schleifens über den gesamten Schnittweg kontinuierlich abgerichtet. Ziel ist es, die Schnittfähigkeit konstant zu halten beziehungsweise ein Zusetzen der Schleifscheibe zu verhindern. Mittels einer Diamantabrichtrolle werden bei stetigen kleinen Zustellungen abgestumpfte Schneiden nach jedem Eingriff geschärft oder aus der Bindung gebrochen ⁶⁴⁹.

Im Englischen wird dies als continuous dressing bezeichnet, abgekürzt CD. Teilweise hat sich auch im deutschen Sprachraum die Bezeichnung CD-Schleifen durchgesetzt.

Mit der kontinuierlichen Schärfung gehen einige Vorteile einher ⁶⁴⁹:

- kürzere Schleifzeiten und höhere Zerspanvolumina (höhere Produktivität) ^{275, 649},
- geringere thermische Werkstückrandzonenbeeinflussung (weniger Reiben und Pflügen) ⁶⁴⁹,
- geringere und konstante Schnittkräfte (kontinuierlich scharfe Schneiden) ⁶⁴⁹,
- geringere Rauheiten ²⁷⁵ (*Anmerkung: dies ist eigentlich nicht mit der Spanbildungstheorie vereinbar, da stumpfe Schneiden eher zu geringeren Rauheiten führen; eventuell gab es hier im Referenzprozess Probleme durch Anhaftungen, die mit dem CD-Schleifen vermieden wurden*).

Bei richtiger Auslegung der Abrichtzustellung ist der Verschleiß laut ⁶⁴⁹ nicht größer als beim üblichen Schleifen, jedoch ist der Prozess schwieriger zu optimieren. Auch in ²⁷⁰ wird anhand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dokumentiert, dass CD-Schleifen günstiger ist als Schleifen mit intermittierendem Abrichten, jedoch nur bei optimaler Auslegung des CD-Prozesses. So gibt es auch Quellen, die von zweifach höherem Schleifscheibenverschleiß beim CD-Schleifen bei gleichem Abtragsvolumen wie intermittierendem Abrichten sprechen ²⁷⁵ beziehungsweise einem höheren Verschleiß beim CD-Schleifen aufgrund eines Mangels an Prozesswissen ²⁸⁵. Diese wirtschaftlich gesehen schwierige Sachlage beschränkt die Anwendung eher auf Prozesse, bei denen ein intermittierendes Abrichten nicht mehr ausreicht, um ein Zusetzen der Schleifscheibe zu verhindern, zum Beispiel dem Tiefschleifen bei hohen Zeitspanvolumina ³⁵¹ oder dem Schleifen von Nickelbasislegierungen ²⁷⁰.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das CD-Schleifen zwar Potential zur Verbesserung des Schleifens oder der Erweiterung seines Anwendungsgebietes denkbar macht (Schleifen duktiler Werkstoffe, die sonst zu einem raschen Zusetzen der Schleifscheibe führen), jedoch das mangelnde Wissen zur Auslegung der Abrichtparameter eine Verbreitung offenbar verhinderten. Nach „Erfindung“ des Verfahrens in den 1970ern und einigen grundlegenden Untersuchungen in dieser Zeit finden sich nur noch relativ wenige Veröffentlichungen. Ein verwandter Nachfolger ist das in den 90er-Jahren entwickelte ELID-Schleifen, das elektrolytische Abtragen der Bindung während des Prozesses, siehe Abschnitt 4.1.4.

3.5.5 Einsatz von Schleifscheiben – Einfluss der Einstellgrößen

Die Stellgrößen sind die Zustellung, die Vorschubgeschwindigkeit und die Schnittgeschwindigkeit (die Vektoraddition von Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit; aufgrund der hohen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten häufig mit dieser gleichgesetzt). Die Steigerung der Zustellung bei sonst konstanten Bedingungen führt zu einer Steigerung des Zeitspannvolumens und der Kontaktlänge. Hieraus ergeben sich steigende Prozesskräfte und der Wärmeeintrag in das Werkstück nimmt zu. Die Spannungsdicke wird nur gering beeinflusst, da trotz höherem Zeitspannvolumen die Kontaktlänge steigt und damit mehr Körner in Eingriff kommen können und auch die Spannungslänge steigt. Die Einzelkornbelastung steigt daher nur gering. Bei sehr hohen Zustellungen und vergleichsweise geringen Vorschüben und Schnittgeschwindigkeiten spricht man vom Tiefschleifen.

Bei Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit und sonst konstanten Bedingungen ergeben sich ebenfalls ein höheres Zeitspannvolumen und höhere Zerspankräfte. Dennoch nimmt der Wärmeeintrag in das Werkstück ab. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass sich wegen der konstanten Kontaktlänge höhere Spannungsdicken ergeben (der Materialabtrag wird erhöht, die Anzahl an aktiven Schneiden hingegen nicht) und damit die Effizienz des Prozesses steigt (geringere Anteile an Reiben und Pflügen) und andererseits hat die entstehende Wärme aufgrund der geringeren Kontaktzeiten weniger Zeit in das Werkstück zu fließen. Nachteilig sind hierbei höhere Oberflächenrauheiten und ein höherer Kornverschleiß aufgrund der steigenden Einzelkornbelastungen. Bei sehr hohen Vorschüben und geringen Zustellungen und Schnittgeschwindigkeiten spricht man vom Pendelschleifen. Die Anwendung extrem hoher Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/min wird als Schnellhubschleifen bezeichnet. Hierbei müssen jedoch auch die Schnittgeschwindigkeiten erhöht werden, um die steigende Einzelkornbelastung zu kompensieren.

Die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit durch Steigerung der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit bei sonst konstanten Parametern hat keinen Einfluss auf das Zeitspannvolumen. Die Anzahl an Werkzeugumdrehungen wird erhöht, ohne dass mehr Material pro Zeit abgetragen wird. Als Folge hiervon sinken die Einzelkornspannungsdicken. Der Materialabtrag wird auf mehr Schneiden verteilt beziehungsweise es stehen mehr Schneiden pro Zeit zur Verfügung. Als Folge sinken die Kräfte am Einzelkorn und damit die Einzelkornbelastung, der Verschleiß der Schleifscheibe nimmt ab und die Oberflächengüte steigt. Nachteilig ist ein höherer Wärmeeintrag in das Werkstück aufgrund der Zunahme von Reibeffekten und der schwieriger werdenden Kühlung. Hohe Schnittgeschwindigkeiten bei konventionellen Zustellungen und Vorschüben werden beim Hochgeschwindigkeitsschleifen angewendet.

Zur Vertiefung sei auf das Kapitel Prozessgestaltung in ³³⁵ verwiesen, hier findet sich eine hervorragende Übersicht über den Einfluss der Stellgrößen und der Wahl der Schleifscheibenspezifikation in Abhängigkeit der Bearbeitungsaufgabe.

Schleifen ist ursprünglich ein Endbearbeitungsverfahren. Das heißt, hohe Werkstückqualitäten (Maßhaltigkeit, Oberflächengüte) werden bei geringen Abtragsraten erzielt. Damit steht es oft am Ende der Bearbeitungskette und ist der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide nachgelagert. Die Prozessführung bei geringen Abtragsraten ist vergleichsweise einfach. Geringe erzeugte Wärmemengen bei mäßigen Schleifscheibengeschwindigkeiten resultieren in gut beherrschte Prozesse mit geringen Anforderungen an die KSS-Zufuhr und die Schleifscheiben selbst. Mit der Entwicklung des Hochleistungsschleifens (englisch High-Efficiency-Deep-Grinding – HEDG) wurde mit dieser Prämisse gebrochen. Beim Hochleistungsschleifen werden sehr hohe Zeitspanvolumina gefahren, womit das Schleifen eine wirtschaftliche Alternative zum Drehen oder Fräsen darstellt und eine hohe Produktivität bei zum Beispiel der Herstellung von Werkzeugen (Bohrer, Fräser) oder Komponenten der Antriebstechnik (Kurbelwellen, Nockenwellen) erreicht wird.

Das Hochleistungsschleifen stellt die Kombination des Tiefschleifens und des Schnellhubschleifens mit dem Hochgeschwindigkeitsschleifen dar – hohe Zustellungen bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten, gepaart mit hohen Schnittgeschwindigkeiten. Alle drei Prozessparameter werden an die technologischen Grenzen maximiert. Dabei werden trotz hoher Abtragsraten geringe Werkstücktemperaturen erreicht. Erklären lässt sich dies folgendermaßen:

- Beim Tiefschleifen, also der Bearbeitung bei hohen Zustellungen, fließt ab Überschreitung eines gewissen Zustellungswerts ein großer Anteil der in den Prozess eingebrachten Wärme in den zu zerspanenden Bereich und damit in die Späne ⁵⁸⁶. Dies hat einerseits den Effekt, dass die fertige Werkstückoberfläche beziehungsweise -randzone zu einem geringeren Teil wärmebelastet wird und der zu zerspanende Bereich aufgrund der Wärmeeindringung erweicht und die Zerspanung vereinfacht wird ⁵²³.
- Beim Hochleistungsschleifen werden zusätzlich hohe Vorschubgeschwindigkeiten gefahren, die Zeit zur Wärmeleitung in das Werkstück wird geringer ²⁹⁸ und damit auch die Temperatur in der Werkstückrandzone ^{504, 523}.
- Zur Kompensation der hohen Zustellungen und Vorschubgeschwindigkeiten, die hohe Kornbelastungen und Spannungsdicken zur Folge haben, dienen die hohen Schnittgeschwindigkeiten, die diesen beiden Effekten entgegenwirken.
- Insgesamt werden aufgrund der hohen Zeitspanvolumina geringe spezifische Energien erreicht ⁵⁸⁶.

Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 25 und Abbildung 26 veranschaulicht.

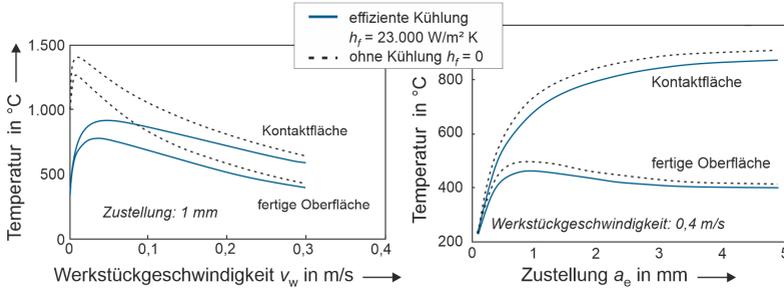


Abbildung 25: Berechnete Temperaturen bei unterschiedlichen Schnittbedingungen nach ⁵⁸⁶

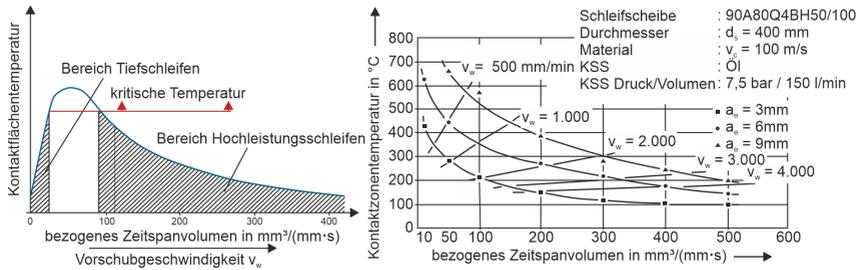


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen Zeitspannvolumen und Temperaturen beim Hochleistungsschleifen schematisch (links) und in realen Versuchen (rechts); nach ⁶¹⁶

Die beim Hochleistungsschleifen erreichbaren Abtragsraten sind enorm. Zustellungen bis 30 mm ²⁹⁹, bei ebenfalls hohen Vorschubgeschwindigkeiten bis zu 10 m/s ⁶¹⁶, resultierend in Abtragsraten bis zu 3.000 mm³/(mm·s) ⁶¹⁶, wobei Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten bis zu 200 m/s anzuwenden sind.

Die Vorteile einer geringeren Wärmebeeinflussung bei hohen Zustellungen wurden auch analytisch nachgewiesen ²⁹⁸, basierend auf dem Modell von Carslaw und Jaeger ¹¹⁹, siehe Abschnitt 3.2. Entgegen der üblichen Modellierung nach Jaeger wurde dabei eine dreieckige Wärmequelle angenommen, die auch einen Wärmefluss in Richtung Span beziehungsweise zu zerspannenden Volumen berücksichtigt, da diese die Bedingungen beim Tiefschleifen besser abbildet ⁵²³. Beim Tiefschleifen kann der Anteil der Wärme, der in das Werkstück gelangt, in Verbindung mit einer guten KSS-Zufuhr, die Temperaturen unterhalb des Filmsiedens gewährleistet, auf 20 % reduziert werden ²⁹⁸.

Die KSS-Zufuhr ist beim Tiefschleifen besonders kritisch, da die Belastung der Scheibe und damit die Temperaturen unmittelbar im Kontakt sehr hoch sind und es zum Filmsieden kommen kann. Generell sind die Anforderungen an die Maschinen und KSS-Systeme als Nachteile beim Hochleistungsschleifen zu nennen. Hinsichtlich der Maschinen müssen diese sehr steif ausgeführt sein und über leistungsstarke, hochdrehende Spindeln verfügen. Hinsichtlich der KSS-Systeme wird berichtet, dass Zufuhrdrücke von über 80 bar benötigt werden, um eine anforde-

rungsgerechte KSS-Zufuhr sicherzustellen⁵⁸⁷. Auch die Schleifscheiben werden beim Hochleistungsschleifen stark belastet. Ein hoher Verschleiß ist die Folge, weshalb ebenfalls eine leistungsstarke Kühlung zur Kompensation erforderlich ist⁵⁸⁷. Weiterhin muss die Schleifscheibe häufig abgerichtet werden, um deren Einsatzfähigkeit zu gewährleisten⁶¹⁶.

Nicht zuletzt dient die Entwicklung mancher Spezialschleifscheiben dazu, hohe Abtragsraten zu erreichen, jedoch auf die genannten aufwendigen Maschinen- und Peripheriesysteme verzichten zu können und auf vorhandene, wesentlich preiswertere konventionelle Maschinensysteme zurückgreifen zu können. Anders formuliert: das konventionelle Schleifen als Endbearbeitungsverfahren unter Verwendung konventioneller Schleifscheiben ist ein in der Industrie beherrschter Prozess, da geringe Belastungen für die Schleifscheibe, die Maschine und damit letzten Endes auch für die geschliffenen Werkstücke vorliegen. Die Entwicklung von Spezialschleifscheiben ist daher insbesondere für thermisch kritische Prozesse und hohe Materialabtragsraten interessant, sowie für spezielle, unübliche Anwendungen.

4 Spezialanwendungen

Die Ausführungen in Kapitel 3 machen deutlich, dass die Gestaltung des Werkzeugs viele Freiheitsgrade bietet. Über die Korngrößen, Kornverteilung und Kornkonzentration sowie die Einsatzvorbereitung kann das Prozess- und Einsatzverhalten über die kinematischen Stellgrößen hinaus gesteuert werden. Die Gestaltung der Schleifscheibe lässt damit neben dem herkömmlichen Einsatz Spezialanwendungen zu, welche in diesem Kapitel näher betrachtet werden. Diese sind beispielsweise die Schneidkantenpräparation geometrisch bestimmter Werkzeuge, die gezielte Optimierung der Spanbildung für den Einsatz bei der Trockenerspannung oder die Mikrostrukturierung von Werkstücken.

Die in Kapitel 4 vorgestellten Konzepte werden in zwei Kategorien unterteilt: herkömmliche Schleifscheiben und spezielle Schleifscheiben. Unter herkömmlichen Schleifscheiben werden solche verstanden, die, entsprechend der allgemein üblichen Definition, über einen durchgängigen Schleifbelag mit stochastisch verteilten Körnern verfügen (konventionellen Schleifscheiben und hochharte Schleifscheiben, siehe auch Kapitel 3.5). Spezielle Schleifscheiben sind somit solche, die von dieser Definition abweichen. Darunter fallen beispielsweise Schleifscheiben mit unterbrochenem Schleifbelag. Die Dimensionen der Unterbrechungen im Schleifbelag reichen dabei von wenigen Mikrometern bis hin zu mehreren Millimetern. Weitere spezielle Schleifscheiben sind beispielsweise solche, deren Körner nicht stochastisch verteilt sind, oder solche, bei denen die Kornform oder der Schleifbelag gezielt modifiziert wurden.

4.1 Einsatz herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialverfahren

Nach der hier eingeführten Definition herkömmlicher Schleifscheiben fallen die meisten industriell verfügbaren und auch forschungsseitig untersuchten Schleifscheiben in diese Kategorie. Deren Einsatz für Spezialverfahren, also ein Einsatz, der nicht primär dem Materialabtrag im Sinne der Erzeugung der Makrogeometrie des Werkstücks dient, ist jedoch vergleichsweise selten. Aus der verfügbaren Literatur lassen sich die folgenden Spezialverfahren zuordnen, deren Zweck und Ergebnisse im Anschluss erläutert werden:

- Schleifhärten,
- Ausnutzung des Größeneffekts für eine Oberflächenhärtung,
- Einsatz für die Schneidkantenpräparation geometrisch bestimmter Werkzeuge,
- Zerspanung sprödharter Werkstoffe im duktilen Modus mit Hilfe spezieller Abrichtverfahren,
- Interne KSS-Zufuhr durch herkömmliche, poröse Schleifscheiben.

4.1.1 Thermisches Schleifhärten

Das Schleifhärten oder Grind-hardening wurde am Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT) der Universität Bremen entwickelt und erstmals 1994 veröffentlicht⁸³. Beim Schleifhärten wird die hohe Energieumsetzung gezielt genutzt, um positive Randzoneneigenschaften zu erhalten⁸¹. Das Verfahren ist aufgrund schneller Aufheizgeschwindigkeiten und des erreichbaren Selbstabschreckeffekts den Kurzzeit-Wärmebehandlungen zuzuordnen (vergleiche Kapitel 3.3)⁸⁰.

Während thermische Schädigungen neben Zugeigenspannungen zu Härteabfällen oder gar zur Rissbildung führen, werden beim Schleifhärten ungehärteter oder vergüteter Stähle positive Eigenschaften wie Härtesteigerungen und Druckeigenspannungen erzielt¹⁰⁰. Dies wird erreicht, indem die Austenitisierungstemperatur überschritten wird und der Stahl abgeschreckt wird (durch Wärmeleitung in die kühleren Bereiche des Werkstücks und/oder durch Kühlschmierstoff). Es entsteht ein feinkörniges martensitisches Gefüge. Voraussetzung ist die Verwendung von härtbaren, unter- oder übereutktoider Stähle⁸⁰.

Es entsteht im randnahen Bereich nicht anätzbarer Martensit, der im Gefügeschliff weiß erscheint (White Etching Area). Dieses martensitische Gefüge ist besonders hart und spröde. Unmittelbar darunter kommt es zur Bildung von anätzbarem Martensit, welcher ebenfalls deutlich härter ist als das Grundgefüge⁸³. Es gelang, das Schleifhärten so zu steuern, dass der feinkörnigen martensitischen Randschicht keine Anlasszone folgte, wie sie bei unsachgemäßer Prozesssteuerung und damit unbeabsichtigter Martensitbildung häufig entsteht. Untersuchungen belegen, dass die martensitisch gehärteten Bereiche frei von Rissen sind⁹⁹.

Das wirtschaftliche Potential liegt in der Einsparung von Wärmebehandlungsschritten⁸², die schwer in die Prozesskette zu integrieren und mit hohen Kosten verbunden sind¹⁰². Funktionsteile wie Wälzlager, Führungen oder Getriebegehäuse, die klassisch einer solchen Wärmebehandlung unterzogen werden müssen, werden ohnehin schleifend endbearbeitet, womit die Integration des Schleifverfahrens in der Prozesskette bereits gegeben ist. Härteverläufe von Proben, die mittels Schleifhärten und dem konkurrierenden Verfahren des Laserstrahlhärtens behandelt wurden, zeigen ähnliche Verläufe (Abbildung 27).

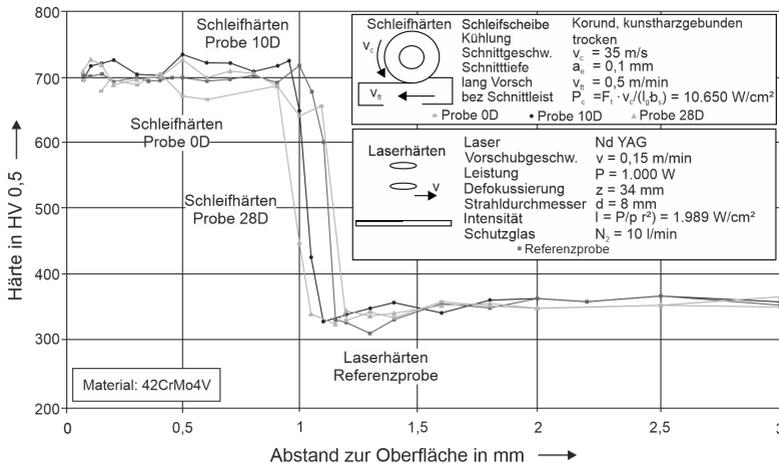


Abbildung 27: Dokumentation der Reproduzierbarkeit und der Prozessstabilität des Schleifhärtens anhand der Härtetiefenverläufe⁸⁸

Um die notwendigen Temperaturen zur Überschreitung der Anlasstemperaturen zu erreichen, müssen für das Schleifhärten Prozessparameter gewählt werden, die einem Schrappprozess entsprechen. Daher ist ein zweiter Überschleif notwendig, um die geforderte Form- und Maßhal-

tigkeit zu erreichen ⁸². Schon geringe Mengen an KSS führen beim Schleifhärten zu einer deutlichen Abnahme der Einhärtetiefen, weshalb das Schleifhärten in der Regel ohne KSS durchgeführt wird ⁸⁰.

Wie bei konventionellen Wärmebehandlungen ist das Ergebnis des Schleifhärtens eine Funktion von Dauer und Intensität der Wärmeeinwirkung ¹⁰⁰. Dabei gilt, je größer die übertragene Leistungsdichte ist, desto schneller wird die Randschicht erwärmt ⁸⁰. Um bei diesen Kurzzeit-Wärmebehandlungen Einhärtetiefen zwischen 0,2 mm bis 1,5 mm zu erreichen, sind Leistungsdichten zwischen 2,5 W/mm² und 60 W/mm² notwendig ³⁷⁹. Ergebnisse belegen, dass beim Schleifhärten Einhärtetiefen bis 1,8 mm möglich sind ¹⁰²; die erwähnten Leistungsdichten werden also erreicht. In den Studien wurde der Einfluss der Stellgrößen und der Schleifscheibenspezifikation untersucht, die Ergebnisse werden folgend erläutert.

Steigende Einhärtetiefen (HPD) können durch eine Steigerung der Zustellung erreicht werden (Abbildung 28). Damit gehen steigende spezifische Energien bei gleichzeitig steigender Kontaktlänge einher. Durch die Transformation von Ferrit und Perlit in Martensit entstehen Druckeigenspannungen, welche die rein thermisch induzierten Zugeigenspannungen, im Zusammenspiel mit den mechanisch induzierten Druckeigenspannungen überkompensieren (siehe auch Kapitel 3.3). Dem zustellungsabhängigen Gebiet der Druckeigenspannungen folgt ein ausgleichendes Gebiet von Zugeigenspannungen; die Eigenspannungsverläufe gleichen denen beim Induktionshärten ¹⁰².

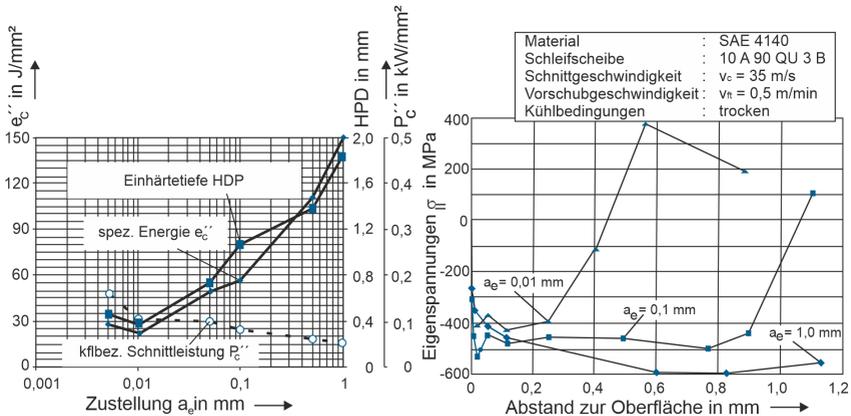


Abbildung 28: Einhärtetiefe in Abhängigkeit der Zustellung; nach ¹⁰²

Steigende Vorschubgeschwindigkeiten gehen mit steigender Schnittleistung, jedoch sinkenden spezifischen Energien einher, was auf sinkende Kontaktzeiten beziehungsweise Überschliffzeiten zurückzuführen ist. Die Überschliffzeit beschreibt die Dauer, die ein Punkt auf der Werkstückoberfläche benötigt, um die geometrische Kontaktlänge zu durchlaufen. Zwei gegensätzliche Effekte kommen hier zum Tragen:

- Bei sehr geringen Vorschubgeschwindigkeiten ist die Überschliffzeit hoch, die benötigte Leistung und damit in die Randzone eingebrachte Energie jedoch gering.

- Bei sehr hohen Vorschubgeschwindigkeiten ist die Schleifleistung hoch, aufgrund geringer Kontaktzeiten ist die eingebrachte Energie jedoch reduziert.

Dies führt zu einem unregelmäßigen Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit, wie in Abbildung 29 dargestellt. Maximale Einhärtetiefen werden bei mittleren Vorschubgeschwindigkeiten erzielt.

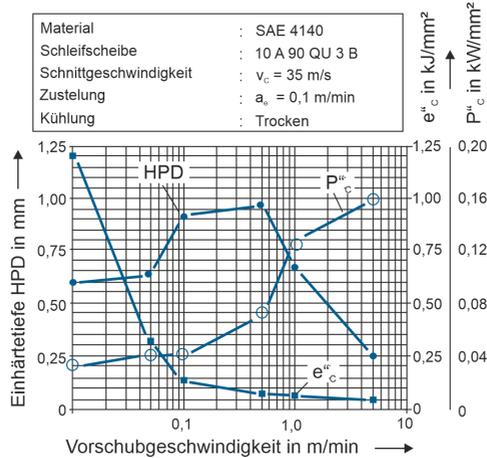


Abbildung 29: Einhärtetiefe in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit ¹⁰²

Bei der Variation der Schnittgeschwindigkeit im Bereich 20 m/s bis 100 m/s ergab sich kein eindeutiger Zusammenhang ¹⁰². Dies wurde darauf zurückgeführt, dass die Steigerung einerseits höhere Leistungsumsetzungen zur Folge hat, andererseits jedoch die Schnittkräfte gesenkt werden; als günstiger Arbeitsbereich werden 30 m/s bis 35 m/s genannt ⁸⁰.

Bezüglich der Schleifscheibenspezifikation ergaben sich die besten Ergebnisse bei Verwendung von Korund als Schleifmittel. Dies wurde auf die schlechtere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu cBN zurückgeführt; es gelangt mehr Wärme in das Werkstück. Die benötigten Energien bei Verwendung von cBN sind um den Faktor drei höher als bei Verwendung von Korund ⁵⁹⁴. Weiterhin kann es bei Verwendung von cBN als Schneidstoff aufgrund der abgeführten Wärme in die Schleifscheibe zu Schädigungen der Bindung kommen, weshalb diese beim Schleifhärten gekühlt werden muss. Dies erfordert ein Abstreifen des die Schleifscheibe kühlenden KSS vor der Kontaktzone, wenn das Schleifhärten selbst trocken durchgeführt werden soll ⁵⁹⁴.

Der besseren Eignung keramischer Schneidstoffe widersprechen die Ergebnisse hinsichtlich der Bindung. Es wurden geringe Einhärtetiefen mit keramisch gebundenen anstelle kunstharzgebundener Schleifscheiben im Trockenschliff ermittelt. Zurückgeführt wurde dies auf einen raschen Verschleiß unter den Bedingungen des Schleifhärtens; die eigentlich thermisch weniger widerstandsfähige Kunstharzbindung zeigte bessere Ergebnisse, zurückzuführen auf ihre geringere Thermoschockempfindlichkeit und ihre geringere Neigung zum Zusetzen ^{80, 89}. Generell ergeben sich im Trockenschliff aufgrund der hohen thermisch-mechanischen Belastungen der

Schleifscheiben geringe G-Verhältnisse (verschlissenes Belagvolumen einer Schleifscheibe geteilt durch zerspanntes Werkstoffvolumen), welche die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens beeinträchtigen⁸⁰.

In weiterführenden Untersuchungen wurden daher die Schleifscheibenspezifikation und der Einsatz von KSS näher betrachtet^{89,93}. Während bei Variation der Bindungsspezifikation nur geringe oder nicht eindeutige Änderungen erzielt wurden, ergab sich bei Variation der Körnung ein deutliches Ergebnis. Feinere Körnungen ergaben sinkende Einhärtetiefen trotz höherer eingebrachter Leistungen. Dies wurde auf schärfere Schneiden bei feinerer Körnung und damit eine geringere thermische Wirkung zurückgeführt⁹³; Kornsorten, die nicht splitterfreudig sind und eher zum Abstumpfen neigen, eignen sich eher, da sie den Reibanteil im Kontakt erhöhen⁸⁹. Dem steht ein deutlicher Anstieg der Standzeit bei feineren Körnungen gegenüber. Weiterhin wurden die Verteilung der Porosität und die Größe der Poren untersucht. Maximale Einhärtetiefen wurden bei Korundschleifscheiben mittlerer Korngröße, offener Struktur und gleichmäßiger Porenverteilung erreicht⁹³. Weiterhin ergaben sich unter Verwendung von KSS bessere Ergebnisse mit keramischen Bindungssystemen im Vergleich zu solchen aus Kunstharz⁸⁹. Da der Verschleiß auch bei Verwendung von KSS vergleichsweise hoch ist, hat sich das CD-Abrichten beim Schleifhärten zur Erlangung konstanter Ergebnisse bewährt⁸⁹.

Untersuchungen zum Gleitverschleißwiderstand mittels Pin-on-Disc Tribometerversuchen mit einer Aluminiumoxidkugel (Härte 2.100 HV) zeigten, dass der Verschleiß durch das Schleifhärten deutlich reduziert werden konnte. Die Prüfkraft betrug 30 N, die Prüfdauer 10 min; gemessen wurde die Tiefe der resultierenden Gleitverschleißspur. Im Vergleich zu einer vorvergüteten Probe konnte durch Schleifhärten eine Steigerung des Gleitverschleißwiderstands um 88 % bis 91 % erreicht werden. Der Verschleiß war sogar etwas geringer als bei einer induktiv gehärteten Probe⁹⁹.

Neuere Untersuchungen des IWT in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der TU München beschäftigten sich mit der simulationsgestützten Vorhersage der Einhärtetiefe und des resultierenden Bauteilverzugs^{198, 348, 349, 579, 719, 720}. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe eines thermometallurgischen und thermomechanischen Finite-Elemente(FE)-Modells Härtetiefenverläufe numerisch ermittelt werden können. Kern des Modells ist die Modellierung der thermischen Oberflächeneffekte und der Wärmeeinbringung mittels Wärmequellenmodell. Das Modell wurde mittels experimentell ermittelter Wärmestromdichteverteilungen kalibriert. Weiterhin ist das Modell in der Lage, den Verzug in Folge der thermischen Beeinflussung des Bauteils mit hinreichender Genauigkeit vorherzusagen. Damit kann es genutzt werden, um optimale Parameter für den Schleifhärteprozess zu ermitteln.

4.1.2 Ausnutzung des Größeneffekts für das Härten durch Verfestigung

Eine abgewandelte Form des Schleifhärtens stellt das Grind-Strengthening dar²⁵⁰. Der Prozess wurde ebenfalls am IWT der Universität Bremen entwickelt. Hierbei wird eine Änderung der Randzoneeneigenschaften in Form von Härtesteigerungen und dem Einbringen von Druckeigenstress angestrebt. Im Unterschied zum Schleifhärten wird diese Änderung jedoch nicht thermisch, sondern mechanisch erreicht. Der Härtemechanismus ist die Verfestigung der Oberfläche aufgrund plastischer Deformationen²⁸⁰. Hierbei wird der Größeneffekt des Schleifens

ausgenutzt, also die hohen spezifischen Energien bei kleinen Spannungsdicken (siehe Kapitel 3.2), bei denen der Anteil der Reibung und der plastischen Deformation besonders hoch ist (Abbildung 30).

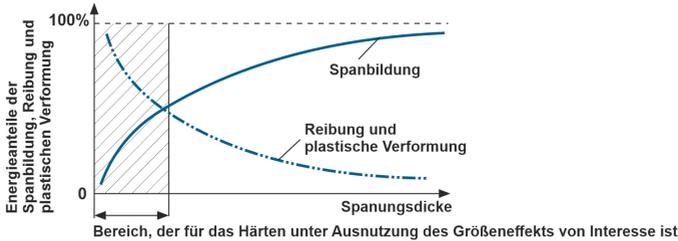


Abbildung 30: Zusammenhang zwischen Energieanteilen und Spannungsdicke; nach ⁸⁵ in Ergänzung zu ⁶⁶⁴

Gelingt es, den Reibanteil gering zu halten, so steht ein hoher Anteil der Energie für eine Kaltverfestigung unter dem Korn zur Verfügung ⁸⁵. Der anzustrebende Abtragsmechanismus ist das Mikropflügen; die Prozesstemperaturen müssen ebenfalls gering gehalten werden. Um beide Bedingungen einzuhalten, sind geringe Schnittgeschwindigkeiten und geringe Zustellungen anzuwenden ²¹². Sind diese Bedingungen eingehalten, sind höhere Spannungen auf der Oberfläche die Folge, resultierend in höhere Druckeigenspannungen, die auch tiefer in der Randzone vorliegen ⁸⁵.

Untersuchungen zum Einfluss der Schnittgeschwindigkeit zeigten deutliche Unterschiede der spezifischen Energien bei geringen Änderungen. Sinkende Schnittgeschwindigkeiten gingen mit steigender spezifischer Energie einher, verstärkt durch geringe Vorschubgeschwindigkeiten, die wiederum in größere Druckeigenspannungen in der Randzone resultierten, auch in größer reichende Tiefen (Abbildung 31); thermische Einflüsse wurden erfolgreich vermieden. Mikrohärteuntersuchungen zeigten einen Anstieg der Härte mit größer werdenden Druckeigenspannungen. ⁷⁸

Der untersuchte Schnittgeschwindigkeitsbereich von 0,5 m/s bis 3,3 m/s zur Unterdrückung thermischer Einflüsse ist jedoch nicht geeignet, um wirtschaftlich Schleifen zu können. Die erreichbaren Abtragsraten sind gering. In weiterführenden Untersuchungen wurden die Möglichkeiten der Randschichthärtung bei höheren Schnittgeschwindigkeiten und damit der Integration von Materialabtrag und Randschichthärtung untersucht ^{77, 250}. Dazu wurde ein dreistufiger Schleifzyklus angewandt, bestehend aus Schruppen, Schlichten und Endbearbeitung, mit jeweils abnehmender Abtragsrate. In den Untersuchungen wurde jeweils ein industrieller Prozess bei 60 m/s mit einem Grind-Strengthening bei 20 m/s verglichen. Bis auf die Schnittgeschwindigkeit wurden alle Parameter beim Vergleich konstant gehalten. Bei der geringeren Schnittgeschwindigkeit waren die Prozesskräfte und die Rauheiten erwartungsgemäß höher. Vor dem Schleifen wurden Zugeigenspannungen der Bauteile mit einem Betrag von 200 MPa detektiert. Nach der Bearbeitung konnten bei beiden Schnittgeschwindigkeiten Druckeigenspannungen eingebracht werden, welche bei der niedrigen Schnittgeschwindigkeit höher ausfielen und in eine größere Tiefe reichten (Abbildung 32).

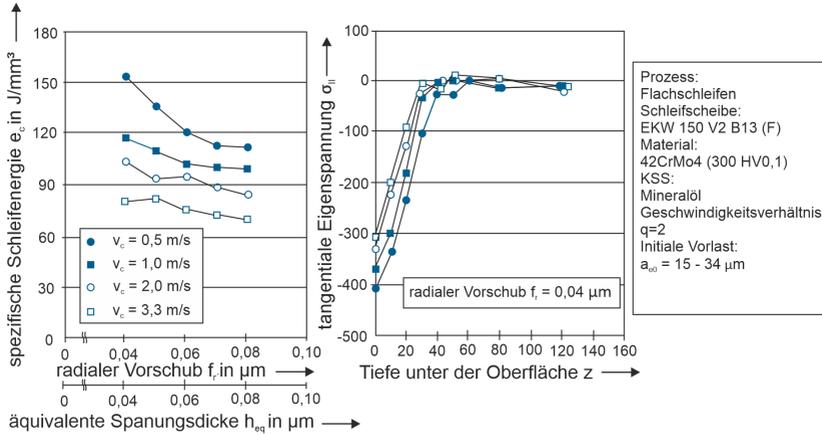


Abbildung 31: spezifische Schleifenergien in Abhängigkeit der Schnittparameter und resultierende Eigenspannungstiefenverläufe⁷⁸

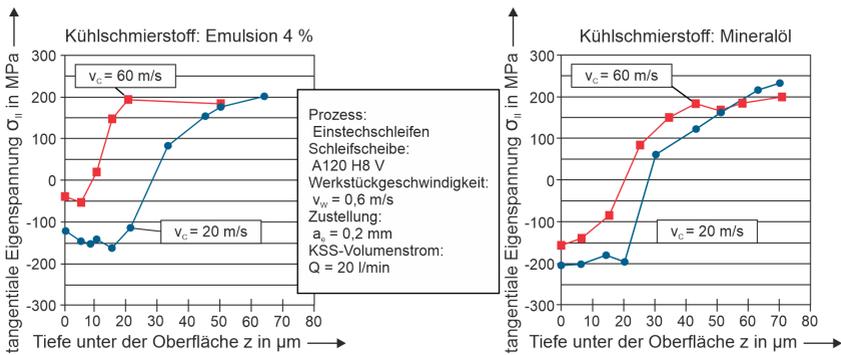


Abbildung 32: Eigenspannungstiefenverläufe nach dem Schleifhärten für unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten und Kühlschmierstoffe²⁵⁰

Reibverschleißuntersuchungen belegten einen höheren Verschleißwiderstand der mit 20 m/s geschliffenen Oberflächen. Abbildung 32 ist ebenfalls zu entnehmen, dass mit Verwendung von Mineralöl anstelle Emulsion höhere Druckeigenspannungen und größere Einwirktiefen erreicht werden können. Aufgrund der besseren Schmierung bei der Verwendung von Öl kann ein höherer Anteil des Mikroplügens erwartet werden, der die Randschichtverfestigung steigert.²⁵⁰

Interessanterweise ergeben sich bei Verwendung von Diamant als Schneidstoff mit steigenden Korngrößen zwar erwartungsgemäß geringere spezifische Energien, jedoch größere Beträge der Druckeigenspannungen. Bezieht man die spezifischen Energien auf die Anzahl der aktiven Körner, in diesem Falle basierend auf den Berechnungen von Werner⁶⁸⁸, vergleiche Kapitel 3.1, so ergeben sich pro Korn höhere spezifische Energien bei gröberer Körnung. Damit

erklären sich die größeren Druckeigenstressungen und es wird deutlich, dass die (globale) spezifische Energie alleine nicht als Kriterium ausreicht.²⁵⁰ Dies bestätigt wieder die hohe Relevanz der Vorgänge am Einzelkorn.

Der Vergleich verschiedener Korund-Korngrößen und Bindungstypen (keramisch- und kunstharzgebunden) bei gleichen Stellgrößen zeigte, dass der resultierende Eigenspannungsverlauf durch die Schleifscheibenspezifikation beeinflusst wird. Die Ergebnisse belegen, dass die Korngrößen einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Eigenspannungsverläufe haben, der Bindungstyp jedoch zu deutlichen Abweichungen führt. Die Verwendung kunstharzgebundener Schleifscheiben im Gegensatz zu keramisch gebundenen führte unabhängig von der Korngröße zu größeren Druckeigenstressungen, die in eine größere Tiefe der Randzone reichten (Abbildung 33). Dies wurde auf kleinere mittlere Korngrößen bei kunstharzgebundenen Schleifscheiben und damit höheren plastischen Deformationen beziehungsweise einem höheren Anteil des Mikropflügens zurückgeführt.

Schleifscheibe	Abrasivmedium	Korngröße (FEPA®-Standard)	Bindungstyp
A	monokristallin/weisses Korund	F80/F100/F150	keramisch
B	monokristallin/weisses Korund	F80/F100/F150	keramisch (Poren infiltriert mit Kunstharzbindung)
C	monokristallin/weisses Korund	F220/F220	keramisch
D	monokristallin/weisses Korund	F80/F100	Kunstharz
E	monokristallin/weisses Korund	F100/F120	Kunstharz
F	monokristallin/weisses Korund	F150/F180	Kunstharz
G	monokristalliner Korund (seeded gel) /weisses Korund	F150/F180	Kunstharz

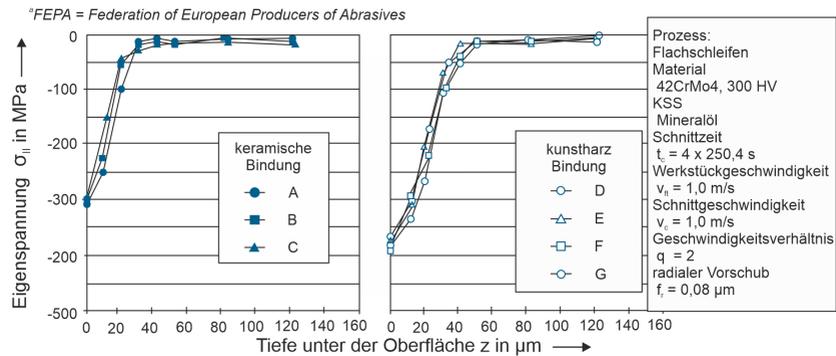


Abbildung 33: Ausprägung des Eigenspannungs-Tiefenverlaufs in Abhängigkeit der Schleifscheibenspezifikation; nach⁷⁸

Noch weichere Bindungen versprechen somit eine Verstärkung des Härteeffekts bei einer weiteren Reduzierung der Spanungsdicken (siehe auch Kapitel 3.5.2). In⁸⁷ wurde eine elastische Bindung aus Polyurethan-Schaum, die klassisch für die Glasbearbeitung eingesetzt wird, einer keramisch gebundenen gegenübergestellt. Die Prozessstrategie entsprach wieder dem dreistufigen Verfahren aus Schruppen, Schlichten und Endbearbeitung. Die Prozesskräfte und damit auch die spezifischen Energien waren bei der elastischen Bindung deutlich höher, beim finalen

Prozessschritt um etwa den Faktor 27 für die Normalkraft und Faktor 10 für die Tangentialkraft; die erzielten Rauheiten waren um circa die Hälfte geringer. Erwartungsgemäß waren die Größe der Druckeigenspannungen und deren Einwirktiefe bei der elastischen Bindung höher.⁸⁷

4.1.3 Gezielte Schneidkantenpräparation mittels Schleifen

Die Mikrogeometrie der Schneidkante geometrisch bestimmter Werkzeuge ist seit einigen Jahren Gegenstand intensiver Untersuchungen. Ihr Einfluss auf die Spanbildung beziehungsweise den Materialabtrag ist vergleichbar dem Einfluss der Kornform und -größe bei Schleifwerkzeugen. Die Schneidkante ist bei der Bearbeitung hohen thermischen und mechanischen Belastungen unterworfen und sie beeinflusst maßgeblich die Qualität der erzeugten Oberfläche¹⁵³. Durch eine gezielte Gestaltung der Schneidkante kann die Haftung von Schutzschichten und die Leistungsfähigkeit der Werkzeuge erheblich gesteigert werden⁶⁷. Diese Schneidkantenpräparation wird in der Industrie häufig durch abrasives Strahlen, Bürsten und Schlepps Schleifen realisiert. Diese Verfahren sind in gewissen Grenzen steuerbar. So lässt sich beispielsweise der Betrag der Verrundung, der Schneidkantenradius, durch die Prozesszeit steuern. Neben der vergleichsweise einfach zu kontrollierenden Größe der Verrundung ist jedoch auch die Form der Verrundung entscheidend für den Einsatz. Neuere Untersuchungen zeigen, dass ein inhomogener Verlauf, also ein entlang einer Schneidkante variierender Verlauf, zur Anpassung an die veränderlichen Eingriffsbedingungen entlang der Schneide von Vorteil sein kann²⁴⁴.

Das gezielte Einstellen der Form, aber insbesondere inhomogene Präparationen, sind mit den industriell üblichen Verfahren nur schwer oder nicht herstellbar, was nicht zuletzt auf die ungerichtete Bearbeitung zurückzuführen ist¹⁸⁰. Diesen Anforderungen kann mittels der Präparation via Laser begegnet werden. Hierbei ist eine gezielte Steuerung des Präparationsergebnisses möglich. Dies wird entweder mittels Pikosekundenlaser¹⁵³ oder Nanosekundenlaser^{235, 234} erreicht. Nachteil beim Pikosekundenlaser sind die längeren Bearbeitungszeiten, welche das Verfahren in Verbindung mit den teuren Strahlquellen unwirtschaftlich machen. Die Verwendung eines Nanosekundenlasers ermöglicht kurze Prozesszeiten, jedoch wird die Randzone der Werkzeuge negativ beeinträchtigt, was sich beim Einsatz derart präparierter Werkzeuge negativ auf die Schichthaftung und in der Folge die Werkzeugstandzeit auswirkt⁶⁸. Dies ist auf die thermisch induzierten Zugeigenspannungen zurückzuführen.

Als Alternative bietet sich das Schleifen an, da es aufgrund des mechanischen Wirkprinzips günstige Eigenspannungszustände ermöglicht und als bahngeländes Verfahren eine diskrete Steuerung zulässt. In der Literatur finden sich zwei in den letzten Jahren entwickelte Konzepte zur Schneidkantenpräparation, die eine gezielte Einstellung von Verrundungsgröße und -form ermöglichen.

Das erste Konzept wurde am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen IFW der Leibniz Universität Hannover entwickelt^{162, 164, 658, 659}. Es basiert auf der Verwendung einer kunstharzgebundenen Diamantschleifscheibe beim Quer-Seiten-Planschleifen auf einer 5-Achs-Schleifmaschine. Dies ermöglicht zwar nicht die unmittelbare Herstellung einer kontinuierlichen Verrundung der Schneidkante, da dies eine Oszillation der B-Achse (Abbildung 34) während des Schleifens erfordern würde, jedoch die Annäherung einer Verrundung über diskretisierte Fasen. Durch die diskretisierte Zustellung der B-Achse bei kontinuierlicher Bewegung der C-Achse und ausreichender Anzahl an Fasen wird so eine ausreichende Annäherung

an eine Verrundung erreicht (Abbildung 34). Bereits ab einer Anzahl von 5 Fasen liegt der Flächenfehler unter 5 %. Mit diesem Verfahren wurden in ersten Versuchen verschiedene Schneidkantenradien und -formen an Hartmetall-Wendeschneidplatten erzeugt. Dabei zeigte sich, dass der Prozess über mehrere präparierte Wendeschneidplatten mit einer maximalen Abweichung von 11 % des „Schneidkantenabschnitts zur Spanfläche“ und geringen Abweichungswerten bei anderen Verrundungsgrößen relativ gut wiederholbar ist. Innerhalb der Verrundungsgrößen einer einzigen Wendeschneidplatte lagen ebenfalls Abweichungen von bis zu 10 % vor. Die Abweichungen waren umso höher, je kleiner die Fasenbreite bei der Diskretisierung war. Dies wurde auf den Einfluss von Achs- und Positionierfehlern zurückgeführt, die sich prozentual bei kleiner werdender Fasenbreite stärker bemerkbar machen. Abweichungen durch elastische Deformationen der Wendeschneidplatte und ihrer Einspannung konnten durch eine Anpassung der Kinematik kompensiert werden.

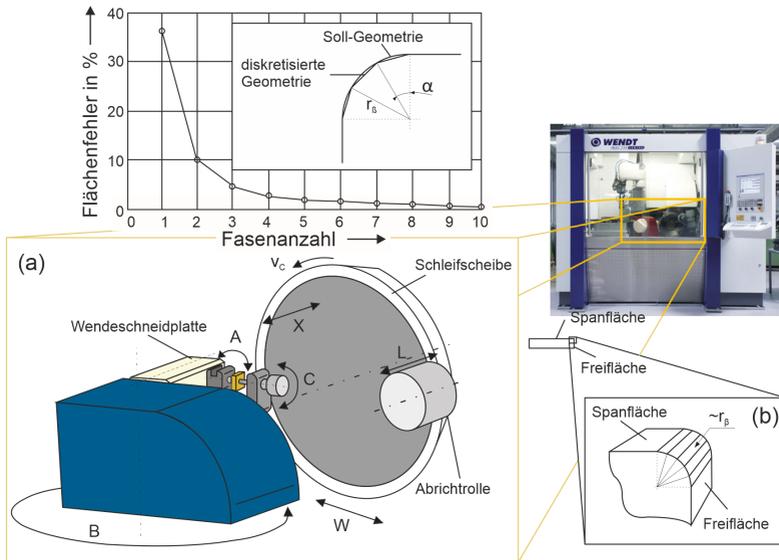


Abbildung 34: Prinzip der Herstellung und Diskretisierung der Kantenverrundung durch mehrere Fasen; ^{164, 658}

Das zweite Konzept wurde am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation FBK der TU Kaiserslautern entwickelt ^{23–25, 180, 182–184, 245}. Das Konzept beruht auf der Verwendung elastisch gebundener Schleifscheiben und wurde zunächst für Fräser entwickelt und später auf Wendeschneidplatten und Bohrer erweitert. Wie in Abschnitt 3.5.2 beschrieben, sind elastische Bindungen besonders weich; das Korn kann während der Bearbeitung in die Bindung zurückweichen. Die prinzipielle Eignung solcher Bindungen für die Schneidkantenpräparation wurde in Arbeiten des Instituts für Spanende Fertigung ISF der TU Dortmund gezeigt ^{55, 103, 265, 266}. Ziel der Arbeiten an der TU Kaiserslautern war die Entwicklung eines Verfahrens zur Schneidkantenpräparation mittels elastisch gebundener Schleifscheiben, wobei Verrundungsgröße und -form der präparierten Schneiden frei steuerbar sein sollten.

Das Verfahren ist angelehnt an das Schleifen von Fasen an Schneiden, ähnlich den Untersuchungen des IFW, wobei der Materialabtragsmechanismus sich grundlegend unterscheidet. Während das Schleifen von Fasen rein weggesteuert geschieht, beinhaltet der Abtrag aufgrund der Eigenschaften der elastischen Bindung auch einen kraftgesteuerten Anteil. Die Bindung verformt sich im Kontaktbereich auf makroskopischer Ebene und schmiegt sich an die Schneidkante an. Der Materialabtrag startet nicht, bevor eine gewisse Vorspannung in der Bindung erreicht wurde. Diese beiden Eigenschaften führen dazu, dass einerseits eine Verrundung anstelle einer Fase geschliffen wird und andererseits auch die Herstellung asymmetrischer Schneidengeometrien ermöglicht wird. Der Materialabtrag beziehungsweise der Bereich, in welchem die Schleifscheibe im Eingriff ist, kann in vier Bereiche aufgeteilt werden, siehe Abbildung 35 links. Im Bereich $a_{e,1}$ ist eine ausreichend hohe Vorspannung erreicht, um einen vollständigen Materialabtrag zu erreichen. Im Bereich $a_{e,2}$ wird die eigentliche Verrundung erreicht. Es liegt ein unvollständiger Abtrag vor, da die Vorspannung von der Spitze der Schneide zu den Seiten hin nicht mehr ausreichend groß ist. Die Kraft, die in z-Richtung im Belag wirkt, ist zu gering. Im Bereich $a_{e,3}$ ist der Materialabtrag unvollständig, es handelt sich um einen Übergangsbereich. Während in den oberen Bereichen des Übergangsbereichs noch ein geringer, die Rauheit leicht reduzierender Materialabtrag stattfindet, führt die sinkende Vorspannung nach unten hin zur Unterschreitung des kritischen, für den Abtrag notwendigen Wert. In Bereich $a_{e,4}$ findet trotz Eingriff keinerlei Materialabtrag statt. Dies verdeutlicht, dass die Wahl einer Kinematik, welche einen Kraftfluss nicht nur in z-Richtung, sondern auch anteilig in x-Richtung bewirkt, einen Gestaltungsraum für die gezielte Herstellung verschiedenster Verrundungsformen zulässt. In den Untersuchungen wurde eine Vielzahl an möglichen Stellgrößen variiert und deren Einfluss auf die resultierende Gestalt der Schneidkante ermittelt (einige davon sind in Abbildung 35 rechts dargestellt). Neben verschiedenen Schleifscheibenformen wurden die Stelle der Schleifscheibe, die im Eingriff ist, bezeichnet als Präparationsstrategie, die Härte der Bindung, die Kornkonzentration, die Vorschubgeschwindigkeit, die Zustellung und der Fasenwinkel, also der Winkel, in dem die Schleifscheibe relativ zur Spitze der Schneide angestellt ist, variiert.

In neueren Untersuchungen wurde die Herstellung der bereits erwähnten inhomogenen Schneidkantenverläufe untersucht²⁴⁴. Ziel war es, im Bereich der Hauptschneide große Verrundungsradien und im Bereich der Nebenschneide geringe Radien zu generieren. Im Bereich der Hauptschneide soll somit den hohen Belastungen während der Spanbildung begegnet werden, wobei im Bereich der Nebenschneide, in welchem die eigentliche Oberfläche generiert wird, geringe Radien zu geringeren Rauheiten führen sollen. Die Herstellung solcher inhomogener Verrundungen gelang sowohl für Werkzeuge für das Drehen als auch für das Bohren.

Durch die Kombination beziehungsweise die geeignete Abstimmung der Stellgrößen ist mit diesem Verfahren eine nahezu freie Wahl der Verrundung möglich. Versuche zur Wiederholbarkeit und auch zur gezielten Steuerung gewünschter Formen, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, belegten eine industrielle Reife. Grenzen ergeben sich lediglich bei größeren Verrundungsradien. Die hierzu notwendigen hohen Zustellungen können zu Schädigungen des Schleifbelags führen, das Präparationsergebnis wird unregelmäßig und nicht mehr kontrollierbar. Industriell übliche Radien von bis zu 90 μm können jedoch prozesssicher hergestellt werden.

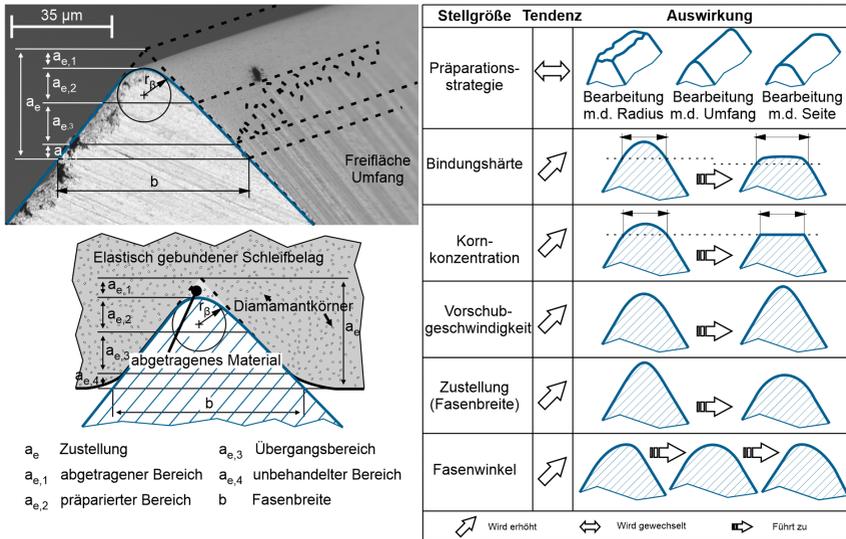


Abbildung 35: Prinzip der Schneidkantenpräparation mit elastisch gebundenen Schleifscheiben (links) und Einfluss verschiedener Stellgrößen auf das Verrundungsergebnis (rechts); nach ¹⁸⁰

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, können durch den Größeneffekt beim Schleifen mit elastisch gebundenen Werkzeugen Druckeigenstressungen in der Randzone induziert werden. Es kann angenommen werden, dass auch Druckeigenstressungen bei der Präparation der Schneidkanten mittels elastisch gebundener Schleifscheiben entstehen. Dies würde sich günstig auf die Stabilität der Schneide und auch auf die Schichthaftung auswirken und kann damit die Leistungsfähigkeit der Werkzeuge steigern. Aufgrund der geringen Dimensionen des präparierten Bereichs an der Schneidkante konnte dies jedoch messtechnisch bisher nicht erfasst werden.

4.1.4 Zerspanung sprödharter Werkstoffe im duktilen Modus mittels speziellem Abrichtverfahren

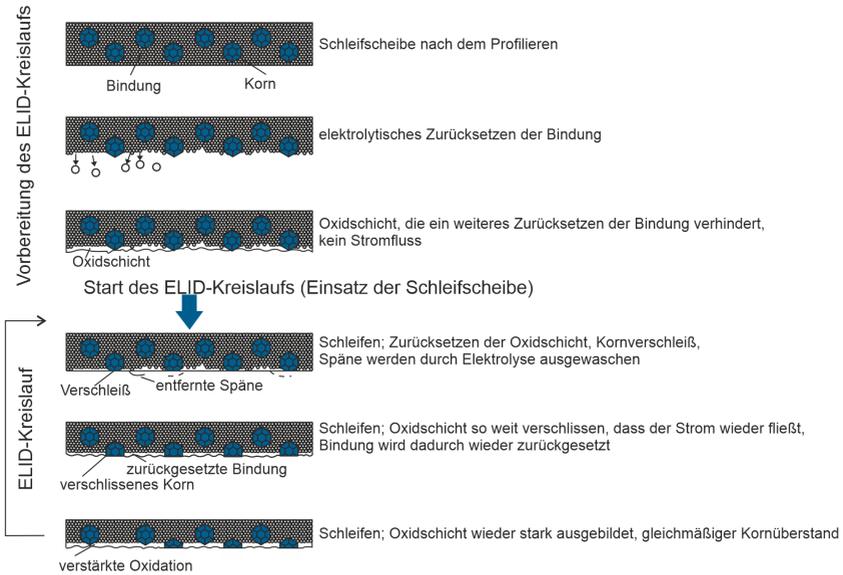
Bei sprödharten Werkstoffen unterliegt die Herstellung von Oberflächen mit Rauheiten im Nanometerbereich besonderen Herausforderungen. Zur Vermeidung der Rissbildung muss ein duktiler Materialabtrag erreicht werden; dies wird durch die Unterschreitung einer materialabhängigen kritischen Spannungsdicke erreicht (siehe Kapitel 3.1.2). Eine Möglichkeit, sehr hohe Oberflächengüten durch kleine Spannungsdicken zu erhalten, ist die Verwendung sehr kleiner Korngrößen (auf andere Möglichkeiten zur Einhaltung kleinster Spannungsdicken mittels Spezielschleifscheiben wird in Kapitel 4.2.2 eingegangen). Kleine Spannungsdicken bei der Verwendung kleiner Korngrößen resultieren aus den geringen Dimensionen der Schneiden und auch aufgrund der Verteilung des Materialabtrags auf eine Vielzahl von Schneiden (siehe Kapitel 3.5). Problematisch bei kleinen Korngrößen ist es jedoch, einen ausreichenden Kornüberstand zu erreichen, um Platz für Späne und KSS zu erhalten und generell die Schnittfähigkeit (Schärfe) der Schleifscheibe zu gewährleisten. Ragen die Körner nicht aus der Bindung heraus,

so können sie auch keinen Span abnehmen, die Scheibe wirkt stumpf. Die Bindung muss also entsprechend fein abgerichtet werden. Gleichzeitig sind hohe Kornhaltekräfte von Nöten, um den aus der hohen Härte sprödharter Werkstoffe resultierenden Kräften standhalten zu können. Metallgebundene Schleifscheiben bieten diese hohen Kornhaltekräfte, sind jedoch schlecht abrichtbar.

Diese widersprüchlichen Anforderungen und schwierigen Bedingungen erschwerten in der Vergangenheit eine wirtschaftliche schleifende Bearbeitung sprödharter Werkstoffe. 1990 entwickelten Ohmori und Nakagawa⁴⁷⁴ einen Abrichtprozess, um den Anforderungen an die duktile Zerspanung gerecht zu werden: das electrolytic in-Process dressing (ELID), also das elektrolytische Abrichten im Prozess. Erste Versuche hierzu finden sich von Murata et al.⁴⁵⁰. Ohmori und Nakagawa werden jedoch, vermutlich auch aufgrund der Qualität und Quantität ihrer Untersuchungen, häufig als Erfinder der Technologie genannt. Wie der Name schon sagt, wird die Bindung während des Prozesses kontinuierlich zurückgesetzt, um einen steten Kornüberstand bei geringen Korngrößen zu erreichen (siehe auch Kapitel 3.5.4).

Elektrolytisch bedeutet, dass ein Strom zwischen der Schleifscheibe und einer Elektrode mit Hilfe eines Pulsgenerators angelegt wird. Die Schleifscheibe dient dabei als Pluspol. Der Stromfluss wird über ein Elektrolyt sichergestellt, dieses kann auch durch den im Prozess verwendeten KSS realisiert werden.

Das Schema zum Ablauf des ELID-Prozesses ist in Abbildung 36 dargestellt. Zunächst findet nach dem Profilieren ein prä-Abrichten statt, bei dem durch elektrolytisches Abtragen von Eisen aus der Bindung ohne Angriff der nichtleitenden Diamantkörner der initiale Kornüberstand erstellt wird. Dabei bildet sich ein Eisenoxidfilm auf der Schleifscheibenoberfläche, der bei weiterem Wachstum als Isolator wirkt und den Stromfluss behindert. Die Dicke dieser Isolationschicht auf der fertig abgerichteten Schleifscheibenoberfläche beträgt etwa 5 µm bis 10 µm. Nun wird die Schleifscheibe eingesetzt. Die Oxidschicht wird aufgrund der Reibung im Prozess beziehungsweise bei Kontakt zum Werkstück abgetragen, die Körner dringen in das Werkstück ein, der Strom fließt durch das Elektrolyt wieder zwischen Schleifscheibe und Elektrode. Der Prozess des elektrolytischen Abtragens beginnt erneut; mit dem Abtragen der isolierenden Oxidschicht steigt die Stromstärke wieder an, die Bindung wird abgetragen, die Oxidschicht bildet sich wieder aus. Weit überstehende Körner brechen schließlich aus der Bindung aus, die Schleifscheibe wirkt stets scharf. Es tritt also der „ELID-Selbstschärfeeffekt“ mit hohen Kornüberständen bei hohen Kornhaltekräften ein. Weiterhin werden, sozusagen als Nebeneffekt, Werkstückmaterialablagerungen in der Bindung durch die Elektrolyse ausgewaschen. Die Schleifscheibe setzt sich, trotz der geringen Korngrößen, nicht zu.

Abbildung 36: Illustration des ELID-Kreislaufs; nach ⁴⁷⁵

Die ersten detaillierten Untersuchungen von Ohmori und Nakagawa ⁴⁷⁴ beschäftigten sich mit dem Einfluss des Vorschubs und des Schnittwegs auf die Oberflächenrauheit sowie des Standweges beim ELID-Schleifen mit einer #4.000 mesh Schleifscheibe (mittlere Korngröße ca. 4,06 μm) bei der Endbearbeitung der Oberfläche von Silizium-Wafern ($d=100\text{ mm}$). Es konnten bei gleichen Parametern deutlich geringere Rauheiten im ELID-Modus erreicht werden als ohne das ELID-Abrichten. Bei geringen Vorschüben konnten im ELID-Modus maximale Rautiefen von $R_{\text{max}}=48\text{ nm}$ und arithmetische Mittenrauwerte von $R_{\text{a}}=8\text{ nm}$ bei geringen Standardabweichungen über einen Schnittweg von einem Meter erreicht werden. Selbst nach der Bearbeitung von 500 Waferplatten zeigte sich ein konstantes Einsatzverhalten und kein Zusetzen der Schleifscheibe. Schon in diesen ersten Untersuchungen konnten sie unter Verwendung hochgenauer Maschinen mit hydrostatischen Lagern und Achsen mit Auflösungen im Bereich der Dimensionen der Korngrößen unter Verwendung einer Schleifscheibe mit #30.000 mesh (mittlere Korngröße 0,31 μm) spiegelnde Oberflächen herstellen. Messungen zeigten, dass Oberflächenschädigungen (Risse) ab Korngrößen von #8.000 mesh (mittlere Korngröße $\sim 2\text{ }\mu\text{m}$) nur bis in eine Tiefe von 1 μm vorlagen ⁴⁷⁸.

In den folgenden Jahren untersuchte Ohmori mit diversen Co-Autoren die Herstellung solcher Oberflächen in Spiegelqualität auf Siliziumoberflächen (siehe zum Beispiel ^{472, 475}) und in anderen sprödharten Materialien (siehe zum Beispiel ⁴⁸), sowie die Erweiterung auf ELID Läppen (siehe zum Beispiel ^{291, 292}), ELID-Honen (siehe zum Beispiel ^{476, 559}) und der Anwendung des ELID-Schleifens für die Herstellung von Mikrowerkzeugen mit minimalen Spitzendurchmessern bis zu 1 μm ^{67, 310, 311}. Es wurden Korngrößen von #1.200 mesh (mittlere Korngröße $\sim 5,5\text{ }\mu\text{m}$) ²⁹¹ bis zu #3.000.000 mesh (mittlere Korngröße $\sim 5\text{ nm}$) untersucht ²⁹³. Letztere

wurden in Verbindung mit metall-kunstharzgebundenen Hybridschleifscheiben eingesetzt, wobei maximale Rautiefen von gerade einmal 2,50 nm in Glas²⁹³ vorlagen⁴⁷⁷. Die meisten Arbeiten sind im Buch „Electrolytic in-process dressing ELID Technologies – Fundamentals and Applications“ zusammengefasst⁴⁷³.

Neben Ohmori, dem Erfinder des ELID-Schleifens, haben auch zahlreiche andere Forscher die Vorteile der Technologie gezeigt. Neben der Bearbeitung von Silizium^{124, 125, 288} wurden auch beispielsweise BK7 und SF10 Gläser⁴⁷ oder Saphir²⁴³ mittels ELID-Schleifen im duktilen Modus bei Rauheiten im Nanometerbereich bearbeitet.

Das Verfahren kann auf jeder beliebigen Maschine mit Hilfe eines mobilen Stromgenerators (zum Beispiel ein EDM-Pulsgenerator) und einer in der Maschine anzubringenden Elektrode angewendet werden⁴⁷⁵. Obwohl für einen effizienten und gut funktionierenden ELID-Prozess spezielle Bindungen benötigt werden beziehungsweise der ELID-Prozess mit nicht angepassten metallischen Belägen nur bedingt funktioniert, ist dies keine echte Einschränkung, da auf den ELID angepasste Schleifscheiben seit den 1990er Jahren am Markt verfügbar sind⁵⁶¹. Dass die eher konservative Schleifscheibenindustrie so kurz nach der Entwicklung der Technologie reagierte zeigt das Potential und die Industrietauglichkeit des ELID-Schleifens. Auch die erreichbaren Standzeiten der Schleifscheiben sind hoch.

Laut eines Review-Artikels zum ELID-Schleifen³⁸⁴ sind Hemmnisse für die breite industrielle Anwendung des ELID-Schleifens in der Industrie die geringeren erreichbaren Abtragsraten, der mit dem kontinuierlichen Abrichten einhergehende Schleifscheibenverschleiß und Phänomene, die mit der Oxidschicht zusammenhängen. Dies sind einerseits das geringe Verständnis beziehungsweise die Komplexität des Reib- und Verschleißverhaltens dieser Schicht (siehe zum Beispiel³¹³) und die Gefahr des Ausbrechens ganzer Diamantkörner aufgrund zu dicker Oxidschichten und damit einhergehend zu dünner Bindung des Korns in die Grundbindung beim Initialkontakt (siehe zum Beispiel¹⁹²).

4.1.5 Interne KSS-Zufuhr durch herkömmliche poröse Schleifscheiben

Wie in den Grundlagen ausführlich erläutert, ist die KSS-Zufuhr ein entscheidendes Element bezüglich der Prozesssicherheit, des Arbeitsergebnisses und auch der Wirtschaftlichkeit. Neben zahlreichen Ansätzen zur Optimierung der KSS-Zufuhr mittels Spezialschleifscheiben (Abschnitt 4.2.3) existieren auch einige Untersuchungen zur internen KSS-Zufuhr, also der Zufuhr des KSS in die Kontaktzone durch das Werkzeug anstelle von außen mittels externer Düsen, unter Verwendung herkömmlicher Schleifscheiben. Dabei wird der KSS über Düsen oder (teilweise sehr komplexe) Zufuhrapparate zur Schleifscheibe geleitet, der Porenraum der Schleifscheibe, meist von innen, mit KSS gefüllt und der KSS somit durch die Schleifscheibe direkt in den Kontakt gefördert. Einige solcher Aufbauten sind in Abbildung 37 dargestellt.

stückrauheiten vor. In aktuelleren Versuchen von Yao und Sasahara et al.^{534, 711} unter Verwendung einer Schleifscheibe mit 50 % Porenvolumen wurden Stahl, Inconel 718, sowie ein Faserverbundkunststoff (FKV) bearbeitet. Auch hier trat der KSS in Form eines Nebels am Schleifscheibenumfang aus. In den ersten Versuchen⁷¹¹ wurde Emulsion bei 2 l/min bis 15 l/min im Vergleich zu konventioneller externer Kühlung untersucht. Hierbei konnten bei interner KSS-Zufuhr deutlich geringere Werkstücktemperaturen und auch reduzierte Werkstückrauheiten als bei externer Zufuhr erreicht werden. In den Untersuchungen zur Bearbeitung von FKV⁵³⁴ wurde die interne Zufuhr mit Emulsion bei 20 l/min mit externer KSS-Zufuhr und auch mit einem Fräsprozess verglichen; sowohl beim Schleifen mit externer Zufuhr als auch beim Fräsen wurde ebenfalls 20 l/min Emulsion eingesetzt, jedoch über sieben externe Düsen. Die interne Zufuhr war den beiden Referenzprozessen deutlich überlegen: geringere Werkstücktemperaturen, bessere Oberflächenqualität, geringere Zusetzungen der Schleifscheiben, geringere Grate, Delaminationen und Faserausbrüche konnten erreicht werden⁵³⁴.

Weitere Untersuchungen finden sich in²¹⁸ und⁵³¹. Bei diesen Untersuchungen sollte die Förderwirkung verstärkt werden, um einen höheren KSS-Volumenstrom am Schleifscheibenumfang zu erreichen. Graham und Whiston verwendeten hierzu neben einem anliegenden Pumpendruck einen Luftstrahl, der den KSS in das Schleifscheibengefüge drücken sollte²¹⁸ und Salje erhöhte den Pumpendruck, um die KSS-Zufuhr durch eine Hohlspindel in die poröse Schleifscheibe zu erhöhen⁵³¹. Beide berichteten ein besseres Einsatzverhalten als bei externer Zufuhr.

Eine etwas aufwändigere Lösung, die eigentlich einer Spezialschleifscheibe gleichkommt, verfolgten Martinov und Rivkin⁴¹⁷. Sie verwendeten eine Schleifscheibe, die im Inneren über Bohrungen verfügte. Diese Bohrungen waren mit einem porösen Schleifbelag verdeckt, durch welchen der durch die Bohrungen geförderte KSS zum Schleifscheibenumfang gelangte. Wenn auch Angaben über die Porosität fehlen, so war diese wohl recht gering: die Schleifscheibe musste bei 0,012 l/min Zufuhr von Öl 15 Minuten im Leerlauf betrieben werden, bevor die gesamte Umfangafläche der Schleifscheibe mit Öl benetzt war. Zusätzlich wurden 8 l/min Wasser extern dem Prozess zugeführt. Mit zusätzlicher interner Ölzufuhr konnte die Standzeit verdoppelt werden, sowie geringere Werkstückrauheiten und Schleifkräfte realisiert werden, zurückzuführen auf die Schmierwirkung des Öls.

Eine Kühlung mit Emulsion anstelle von Wasser, was eine zusätzliche Schmierwirkung mit sich bringen würde, hätte eventuell den gleichen Effekt wie die interne Ölzufuhr; Untersuchungen hierzu liegen jedoch nicht vor. Einen Hinweis hierzu findet sich aber in ähnlichen Untersuchungen von Pahlitzsch und Appun der TU Braunschweig:

Diese wandten wieder das einfachere Prinzip der Zufuhr des KSS in eine konventionelle, poröse Schleifscheibe an^{493, 494}; *ein Bericht über diese Untersuchungen findet sich auch von Bart in*⁵⁰. Ziel hierbei war es die Ölnebelbildung bei reiner externer KSS-Zufuhr zu vermeiden, indem extern Emulsion zugeführt wird und intern Öl. Dieses Ziel, also die Vermeidung der Ölnebelbildung, wurde erreicht. Die besten Ergebnisse hinsichtlich Schleifscheibenverschleiß und Werkstückrauheit wurden jedoch bei rein externer Zufuhr mit Öl erreicht.

Zusammenfassend lässt sich über die interne KSS-Zufuhr über herkömmliche poröse Schleifbeläge sagen, dass es sich um einen interessanten, technologisch jedoch nur bedingt sinnvollen Ansatz handelt. Für die Realisierung der internen Zufuhr sind maschinenseitig Modifikationen

notwendig. Die einfachste Lösung ist noch die Verwendung einer Hohlspindel, durch welche der KSS gefördert werden kann. Ist dies maschinenbedingt nicht möglich, kommen aufwendige Spezialvorrichtungen zum Einsatz, siehe auch Abbildung 37. Neben diesen Maßnahmen, um die Förderung des KSS durch die Schleifscheibe überhaupt erst zu ermöglichen, ergeben sich Probleme durch das Zusetzen der Schleifscheibe. Um dies zu vermeiden, sind aufwendige beziehungsweise feine Filtersysteme notwendig, wie zum Beispiel in ⁵³¹ oder ⁴⁹³ berichtet. Weiterhin müssen sehr poröse Schleifscheiben eingesetzt werden, da die Poren untereinander verbunden sein müssen, um den Fluss vom Inneren der Schleifscheibe zu deren Umfang zu ermöglichen. Letzteres bedingt auch vergleichsweise geringe Mengen an KSS, die überhaupt gefördert werden können. Diese Methode bietet also eine Alternative zur Trockenbearbeitung beziehungsweise stellt einen alternativen Ansatz zur Minimalmengenschmierung dar, kann jedoch nicht mit einer optimierten externen Zufuhr konkurrieren. Dies zeigt sich auch darin, dass sich seit den 80er Jahren keine weiteren Versuche finden. Es bleibt zu erwähnen, dass der Effekt der Befüllung der Porenräume und damit des Transports des KSS in die Kontaktzone über die Poren auch bei externer Zufuhr erreicht wird, auf den Aufwand des Maschinenumbaus oder komplizierter Zufuhrvorrichtungen also verzichtet werden kann.

4.2 Entwicklung spezieller Schleifscheiben

Die ersten speziellen Schleifscheiben, die entwickelt wurden, sind die segmentierten Schleifscheiben. Sie verfügen über einen unterbrochenen Belag, meist durchgehend in Axialrichtung der Schleifscheibe. Patente gehen zurück bis ins Jahr 1925 ⁵². Neben segmentierten findet sich noch die Gruppe innengekühlter Schleifscheiben, welche eine Zufuhr des KSS durch ihren Grundkörper zur Wirkstelle erlauben, ähnlich Hartmetallbohrern mit Innenkühlung. Eine weitere größere Gruppe sind mikrostrukturierte Schleifscheiben, in welche mittels verschiedenster Techniken Strukturen in den Belag eingebracht wurden, deren Dimensionen sich auf der Mikrometerskala bewegen. Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe spezieller Entwicklungen, die sich nicht in die drei vorgenannten Gruppen einordnen lassen. Der Zweck dieser Entwicklungen ist unterschiedlich und ähnliche spezielle Schleifscheiben wurden von verschiedenen Forschern hinsichtlich unterschiedlicher Zielsetzungen untersucht. Daher erfolgt die Einordnung in diesem Unterkapitel nach dem Einsatz der Schleifscheiben und nicht nach deren Gestaltung.

4.2.1 Schleifscheiben mit verbesserter Schleifleistung und/oder optimierter Spannbildung

Die in diesem Kapitel vorgestellten Konzepte zielen auf eine Optimierung des Schleifprozesses ab. Die in Kapitel 3 erläuterten inhärenten Nachteile des Schleifens sollen abgeschwächt, negiert oder kompensiert werden. Das heißt, der hohe Anteil an elastisch-plastischen Verformungen bei der Spannbildung soll reduziert werden. Dies geschieht vornehmlich durch die Reduzierung der Anzahl an Schneiden, entweder durch Unterbrechungen im Schleifbelag (segmentierte und strukturierte Schleifscheiben), oder durch eine drastische Reduzierung der Kornkonzentration bei der Aufbringung der Körner in einem definierten Setzmuster. Eine weitere Methode ist die Manipulation beziehungsweise gezielte Anpassung der Korngeometrien. Die Ansätze lassen sich unterscheiden in:

- segmentierte und strukturierte Schleifscheiben,
- Schleifscheiben mit definiertem Kornsetzmuster,

- mittels Laser hergestellte definierte Schleifbeläge,
- weitere Schleifscheiben mit definierten Schleifbelägen,
- Schleifscheiben für die Trockenzerspannung.

Die Entwicklungen dieser Schleifscheiben zielen entweder auf eine mögliche Steigerung der Schleifleistung oder auf eine Reduktion von Kräften und/oder der thermischen Beeinflussung der Werkstücke ab. Folgend werden die allgemeinen Wirkmechanismen und die dokumentierten Ergebnisse bei der Anwendung dieser Konzepte beschrieben.

Segmentierte und strukturierte Schleifscheiben

Segmentierte oder strukturierte Schleifscheiben verfügen nicht über einen durchgängigen Belag, sondern über Unterbrechungen, die meist periodisch über den Umfang verteilt sind. Schleifen mit solchen Werkzeugen wird daher auch unterbrochenes Schleifen genannt. Solche Schleifscheiben sind, im Gegensatz zu den meisten in Kapitel 4 vorgestellten Spezialanwendungen, sogar am Markt verfügbar. Die Unterbrechungen, deren Anteile an der Gesamtfäche von wenigen bis hin zu 75 Prozent stark variieren, sollen dabei zwei Effekte erzielen:

- die Reduktion der kinematischen Schneiden,
- die Erhöhung des Spanraums.

Die Reduktion der kinematischen Schneiden bedingt automatisch eine Reduktion der aktiven Schneiden. Es kommen weniger Körner mit der Oberfläche in Kontakt; es gibt weniger Körner, die nur Reiben und Pflügen. Damit steigt auch die mittlere Einzelkornspannungsdicke, der Materialabtrag wird effizienter⁴³⁹, beziehungsweise die spezifischen Energien bei der Spanbildung werden reduziert.

Die Vergrößerung des Spanraums führt zu einer Erhöhung der theoretisch möglichen Abtragsraten. Diese sind neben den sonstigen Randbedingungen, wie die maximal möglichen Kräfte die von den Werkzeugen und Maschinen aufgenommen werden können, Steifigkeiten, thermische Begrenzungen, etc., durch den Platz limitiert, der zur Abfuhr der entstehenden Späne vorhanden ist. Weiterhin steht mit einer Erhöhung des Spanraums mehr Volumen für die KSS-Zufuhr zur Verfügung.

Dabei sei erwähnt, dass die Unterbrechungen im Belag, wie sie bei den meisten Konzepten segmentierter Schleifscheiben vorliegen, keine Erhöhung des Spanraums in den aktiven Belagssegmenten mit sich bringen. In den aktiven, unstrukturierten Bereichen ist der Spanraum identisch zu durchgängig belegten Schleifscheiben gleicher Spezifikation. Dennoch bringt diese Erhöhung Vorteile hinsichtlich thermischer Eigenschaften. Durch die Segmentierung werden geringere Werkstücktemperaturen erreicht^{37, 148}, womit geringere Formabweichungen einhergehen³⁶⁴. Die mittlere Temperatur im oberflächennahen Bereich des Werkstücks wird reduziert, da die entstandene Wärme in der Zeit zwischen den Eingriffen zweier Segmente Zeit hat, in das Werkstückinnere zu fließen beziehungsweise in dieser Zeit keine Prozesswärme generiert wird. Dies wurde in Untersuchungen zum Trockenschleifen mit herkömmlichen und segmentierten Schleifscheiben gezeigt. Während es unter Verwendung einer herkömmlichen Schleifscheibe zum Schleifbrand kam, konnte dies beim Einsatz einer segmentierten gleicher Spezifikation und bei gleichen Schnittbedingungen vermieden werden⁶⁶⁰.

Auch wenn aus den Überlegungen folgt, dass durch eine Segmentierung nicht mehr KSS in den aktiven Bereichen der Schleifscheibe vorliegt, da hier der Spanraum identisch zu unsegmentierten Schleifscheiben ist, so ist die KSS-Zufuhr besser als mit herkömmlichen Schleifscheiben. KSS gelangt über externe Düsen in den Bereich zwischen den Segmenten. Die Oberfläche wird daher zwischen dem Eingriff zweier Segmente mit deutlich mehr KSS versorgt, wo sonst keine zusätzliche KSS-Versorgung stattfindet. Auch wenn der Bereich zwischen den Segmenten aufgrund der Fliehkräfte und der Möglichkeit des seitlichen Entweichens des KSS nicht vollständig mit KSS gefüllt ist (auf diesen Aspekt wird in Kapitel 4.2.3 detailliert eingegangen), so gelangt dennoch mehr KSS auf die Oberfläche als bei herkömmlichen Schleifscheiben⁶¹⁷. Je nach Werkstoff wurden dabei Temperaturreduktionen von 20 % bis 80 % erreicht^{216, 334, 372, 423}.

Die Reduktion von Kräften und Leistungen im Prozess steht bei der Entwicklung segmentierter Schleifscheiben im Vordergrund und ist vielfach dokumentiert (siehe zum Beispiel^{461, 462, 512, 617}). So wurden bei gewöhnlichem Stahl 23 % bis 47% geringere Kräfte ermittelt⁴²³ und um mehr als 62 % reduzierte bei kohlenstofffaserverstärkter Keramik³⁷. Weitere Quellen ohne Angabe des zerspannen Werkstoffs berichten eine Reduzierung von 40 % bis 50 %⁶¹⁵.

Für die Herstellung segmentierter Schleifscheiben finden sich die unterschiedlichsten Methoden. Es lassen sich drei grundlegende Verfahren unterscheiden:

- Aufbringen der Segmente auf einen Grundkörper,
- Einbringen der Segmente in eine herkömmliche Schleifscheibe,
- Modifikation der Sinterform bei der Herstellung der Schleifscheibe.

Beim Aufbringen der Segmente auf einen Grundkörper wird der Schleifbelag, teilweise auf einer Unterlage, ähnlich Hohnsteinen, auf einen Grundkörper appliziert (Abbildung 38). Das Aufbringen kann durch Aufsetzen beziehungsweise Einsetzen der Segmente mittels Verschraubungen^{52, 142, 148, 395, 430} oder Verklebungen (aufgrund der geringen Haftkraft beschränkt auf die Feinbearbeitung)^{202, 203, 256, 557, 706} oder einer Kombination von Schrauben und Kleben^{142, 430, 470} geschehen.

Ein Beispiel für diese Herstellungsmethode ist das T-Tool Profil^{611, 612, 614, 615}. Die einzelnen Segmente werden in einen Grundkörper verschraubt; sind die Segmente verschlissen, können sie einfach getauscht werden.

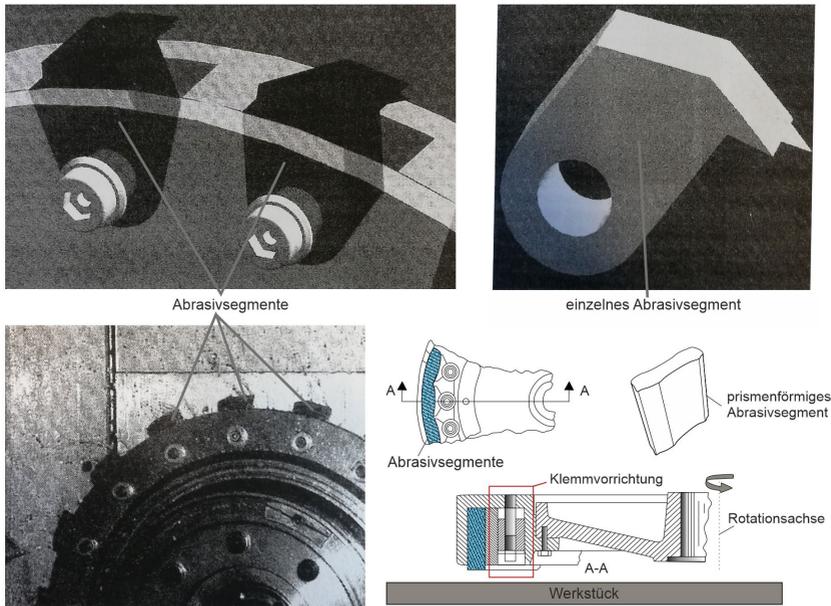


Abbildung 38: Beispiele für das Aufbringen von Segmenten auf einem Grundkörper; oben und unten links nach ⁶¹², unten rechts nach ⁵²

Beim Einbringen der Segmente in eine herkömmliche Schleifscheibe wird die Geometrie einer herkömmlichen Schleifscheibe mittels eines abtragenden Verfahrens modifiziert. Im einfachsten Fall geschieht dies mittels einer Trennscheibe ³⁴⁷ oder über Abrasivstrahlen ⁵⁵³, weit verbreitet ist jedoch das Einbringen über spezielle Abrichtprozesse. Entweder mit einem Einkornabrichter ^{317, 438, 439}, über Abrichtrollen mit ein bis vier Diamanten ^{156, 157}, oder über spezielle crushierende Abrichtprozesse ^{461, 462, 619, 662}. Eine sehr genaue Herstellung der Segmentgeometrie wird durch das Einbringen mittels Laserablation erreicht ^{39-41, 225, 316, 375, 674, 675, 726}. So strukturierten Walter et al. hybridegebundene (Metall-Keramik) cBN Schleifscheiben ^{674, 675}. Die Verwendung eines Ultrakurzpuls-Pikosekundenlasers ermöglichte die präzise Kontrolle der Dimensionen der Strukturen; ein Eindruck vermittelt Abbildung 39, Angaben zu den Mustern finden sich in Abbildung 40.

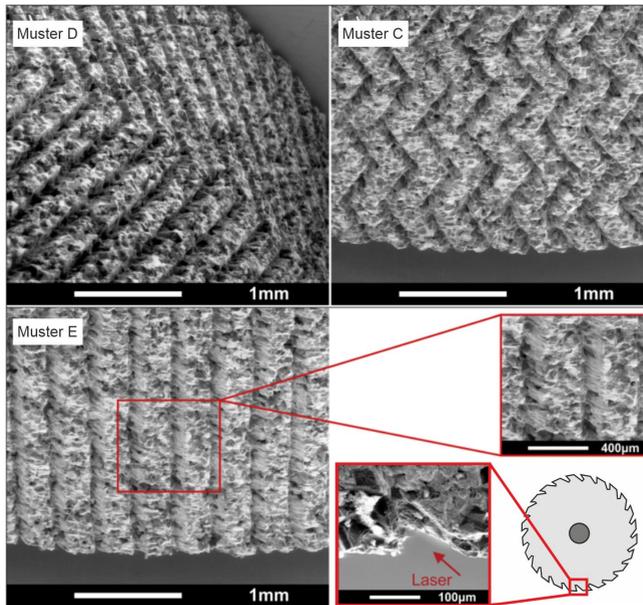


Abbildung 39: Verschiedene mittels Laser hergestellte Belagsmuster; nach ⁶⁷⁴

REM Untersuchungen belegten, dass durch die Laserablation keine thermischen Schäden an der Bindung resultierten. Jedoch führten die Strukturen selbst zu einer Schwächung der Bindung resultierend in eine erhöhte Anzahl an Kornausbrüchen. Dieser scheinbare Nachteil führte jedoch zu einem verbesserten Selbstschärfefeffekt, der stabilere Prozesskräfte in Langzeitversuchen ergab, während bei diesen die unstrukturierte einen 43-prozentigen Anstieg der Prozesskräfte über deren Einsatzzeit verzeichnete.

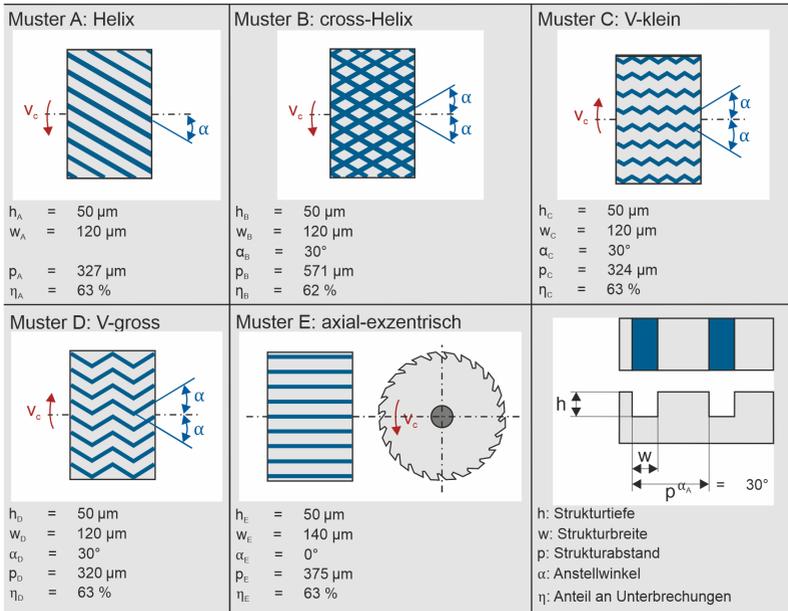
Zuletzt kann die Segmentierung durch Modifikation der Sinterform bereits bei der Herstellung in die Schleifscheibe eingebracht werden ⁶⁶⁰. Die Mehrkosten für die Herstellung segmentierter Schleifscheiben begrenzt sich dann auf den höheren Aufwand bei der Fertigung der Sinterformen, die jedoch wiederverwendet werden können. Eine Sonderform segmentierter Schleifscheiben wurde in ³¹⁷ vorgestellt.

Die Segmentierung wurde hier durch die Verwendung zweier unterschiedlicher Materialien beim Sintern realisiert. Die Sinterform der Schleifscheibe führt zu einer segmentierten Schleifscheibe mit Zwischenräumen. In einer zweiten Sinterform werden die Zwischenräume mit einem porösen, nicht schleiffähigen Material gefüllt, also im Wesentlichen eine hochporöse Bindung ohne Abrasivstoffe. Anschließend wird die Scheibe gesintert und die porösen Zwischenräume werden mit einem Festschmierstoff gefüllt. Mit dieser Schleifscheibe konnten geringere Rauheiten bei der Zerspanung duktiler Materialien (Aluminiumlegierungen, Kupfer und Kupferlegierungen) als mit einer konventionellen erreicht werden; ein Zusetzen der Schleifscheibe wird verhindert. ^{297, 317}

Auf solche Spezialschleifscheiben wird nochmals in Kapitel 4.2.5 eingegangen.

Unabhängig von der Herstellungsmethode zeigen Untersuchungen, dass die Gestaltung der Segmentierung einen Einfluss auf den Prozess hat. Dazu gehört der prozentuale Anteil der Unterbrechungen im Belag und der Anstellwinkel der Segmente (Drehwinkel zur Schleifscheibenachse). Untersuchungen mittels eines Kühlleistungsteststands zeigten, dass der Wärmeübergangskoeffizient α umso höher ist, je höher der prozentuale Anteil an Unterbrechungen im Belag ist (untersuchter Bereich: 0 % bis 18 % Unterbrechungen)⁴⁸⁰. Mit steigendem Anteil an Unterbrechungen geht also ein gesteigertes Vermögen zur Wärmeabfuhr einher. So untersuchten Kwak und Ha segmentierte Schleifscheiben mit 6 %, 11 % und 22 % Belagsunterbrechung im Vergleich zu einer herkömmlichen Schleifscheibe³⁶⁴. Die Temperaturen und Formabweichungen nahmen mit zunehmender Belagsunterbrechung ab, was auf die bessere KSS-Zufuhr aufgrund der Segmente zurückgeführt wurde. Dies belegen auch Untersuchungen zu detektierten Anlasszonen und Barkhausenrauschenamplituden⁶⁵². Weiterhin resultiert ein höherer Anteil an Unterbrechungen in einen effizienteren Materialabtrag wegen höheren Spannungsdicken und in kleinere mittlere Kräfte wegen unterbrochenem Schnitt^{438, 439}. Jedoch beeinflusst der Anteil an Unterbrechungen auch auftretende Schwingungen im Prozess, diesbezüglich sind kleine Anteile günstiger^{653, 660}. Weiterhin zeigten Untersuchungen unter Berücksichtigung von Kräften, der Werkstückrauheit und der resultierenden Randzonenbeeinflussung, dass der Anteil an Belagsunterbrechungen im Bereich der Kontaktzone durch einen entsprechenden Anstellwinkel in Radialrichtung des Belags konstant gehalten werden sollte^{652, 654}. Ein Vergleich der Anstellwinkel 22,5° und 67,5° zeigte für den kleineren Winkel einen geringeren radialen Schleifscheibenverschleiß⁶⁶⁰. Ein Anstellwinkel von 0° führt jedoch zu einem erhöhten Verschleiß^{297, 317}. Dies ist vermutlich auf die stoßartige Belastung bei diesem Winkel zurückzuführen; es sollten daher flache Anstellwinkel größer 0° gewählt werden³²³.

Neben dem Anteil an Belagsunterbrechungen und dem Anstellwinkel hat die Anordnung der Unterbrechungen ebenfalls einen Einfluss auf den Prozess. Hier sind die bereits erwähnten Arbeiten von Walter et al.⁶⁷⁴ zu nennen, bei denen die Schleifscheiben mittels Laserablation segmentiert wurden. Sie untersuchten verschieden strukturierte Schleifscheiben bei konstantem Anteil an Belagsunterbrechung und (bis auf eine Ausnahme) konstantem Anstellwinkel (siehe Abbildung 40). Während zum Beispiel bei der Vorschubgeschwindigkeit 3.000 mm/min und Zustellung 0,06 mm der Unterschied in der Tangentialkraft zwischen Struktur E und der unstrukturierten nur rund 10 % betrug, so betrug er zwischen Muster B und der unstrukturierten rund 30 % und rund 25 % zwischen Muster B und E.



η : Gesamtbelagsfläche / Anteil unstrukturierter Fläche ($\eta = 60 \%$ bedeutet 40% Belagsreduzierung)

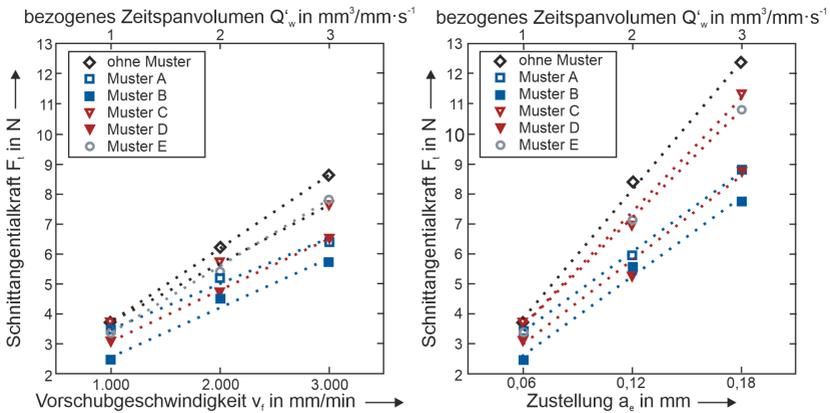


Abbildung 40: Verschiedene untersuchte Strukturierungen und resultierende Schnittkräfte; nach ⁶⁷⁴

Trotz der Reduzierung der stoßartigen Belastung und damit der Schwingungsanregung im Eintrittsbereich der Segmente durch die Wahl eines entsprechenden Anstellwinkels sind die Körner dort höheren Belastungen unterworfen, die in einen erhöhten Verschleiß resultieren ²¹⁶; diese Körner dringen mit hoher Einzelkornzustellung ein, da aufgrund der Unterbrechungen im Belag der Materialabtrag kurzzeitig unterbrochen wird. Die größeren Einzelkornspannungsdicken bedingen wiederum größere Belastungen und damit den höheren Verschleiß ³⁷. Generell sind nicht

nur die Körner im Eintrittsbereich sondern alle Körner der Segmente einem erhöhten Verschleiß unterworfen, da diese die Unterbrechungen im Materialabtrag zwischen den Segmenten kompensieren müssen. Vereinfacht ausgedrückt: je größer der Anteil der Unterbrechungen im Belag, desto höher der Verschleiß der Segmente. Dies drückt sich in einem erhöhten Radialverschleiß im Vergleich zu durchgängig belegten Schleifscheiben aus ^{150, 423, 660}. Das G-Verhältnis, also das Verhältnis von abgetragenem Werkstückvolumen zu verschlissenen Belagsvolumen ist jedoch größer als bei durchgängig belegten Schleifscheiben, da insgesamt weniger Belagsvolumen verschleißt ^{37, 617}. Dies ist wiederum auf den effizienteren Materialabtrag und die geringeren Temperaturen zurückzuführen ⁶¹⁷. Weiterhin resultiert aus der geänderten Spannungssituation eine Änderung in der Verschleißform: die Körner neigen eher zur Kornsplitterung, dem Kornbruch und dem Kornausbruch und weniger in abrasives Abflachen der Körner; es wird ein besserer Selbstschärfeffekt erreicht ³⁷.

Aus der größeren mittleren Einzelkornspannungsdicke bei gegebenen Prozessparametern resultieren jedoch erhöhte Rauheiten bei Verwendung segmentierter Schleifscheiben ^{150, 364, 372, 423, 438, 617, 660}. Dabei gilt: je mehr Unterbrechungen im Belag, desto höher die Rauheit ^{364, 438, 439}. Eine Ausnahme bilden die Ergebnisse von Gavas et al. ²⁰⁷, bei denen geringere Rauheiten mit einer segmentierten Schleifscheibe dokumentiert wurden. Sie setzten eine helixförmig segmentierte (schneckenförmige) Schleifscheibe ein. Die Abstände zwischen den Segmenten betragen 5 mm bei einer Segmentbreite von 5 mm; die Segmenthöhe betrug 3 mm. Bei drei der vier untersuchten Materialien wurde die Rauheit reduziert. Dies wurde neben einer verbesserten Spanabfuhr auf vermindertes Rattern, verminderte Vibrationen und geringere Kräfte zurückgeführt, die jedoch nicht gemessen wurden. Dies suggeriert starke Vibrationen in den Versuchen, was die Qualität der Ergebnisse relativiert. Auch Köklü berichtete geringere Rauheiten bei der Verwendung segmentierter Schleifscheiben ³⁴⁷. Er untersuchte verschiedene Anstellwinkel der Segmente im Vergleich zu einer herkömmlichen Schleifscheibe. Zurückzuführen ist dies wohl auf die geringen Anteile an Unterbrechungen bei diesen Untersuchungen (5 % bis 7 %, siehe Abbildung 41); der Einfluss auf die mittlere Spannungsdicke ist hier gering und es überwiegen die Vorteile der Segmentierung hinsichtlich thermischer Bedingungen (siehe hierzu auch Ergebnisse in Kapitel 4.2.3).

Bis auf diese beiden Ausnahmen dokumentieren Untersuchungen zu Segmentierten stets höhere Rauheiten. Diesen kann durch ein feineres Abrichten begegnet werden. Üblicherweise gehen damit erhöhte thermische Belastungen einher, die jedoch aufgrund des unterbrochenen Schnitts und der besseren KSS-Versorgung kompensiert werden ⁶⁶⁰.



Abbildung 41: Konventionelle, segmentierte Schleifscheiben mit geringer Belagsreduzierung ³⁴⁷

Eine umfangreiche Studie von Mohamed et al. zu konventionellen Schleifscheiben, die mittels Einkornabrichtern abgerichtet wurden, findet sich in ⁴³⁹. Untersucht wurden drei unterschiedlich drallförmig abgerichtete Korundscheiben. Diese unterschieden sich nicht nur im Anteil der Belagsreduzierung η , sondern auch in Breite und Form der Segmentierung, siehe Abbildung 42.

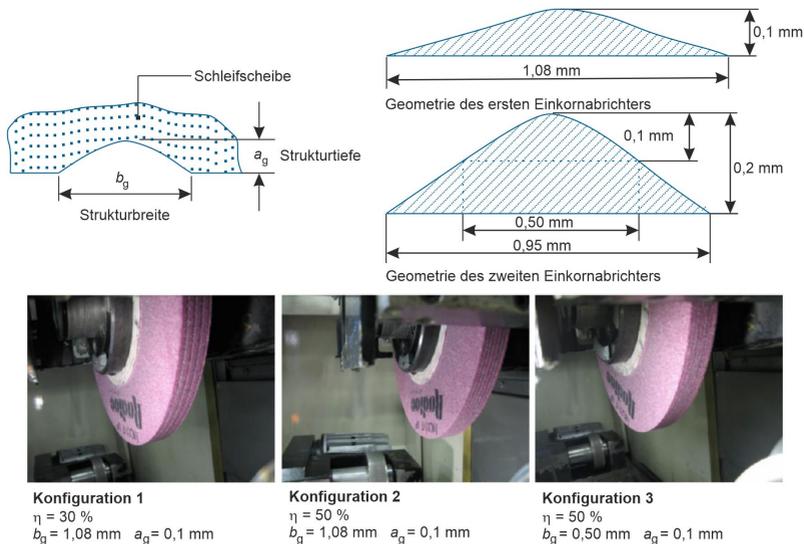


Abbildung 42: Nomenklatur der Segmentierung (oben links), Geometrie der Einkornabrichter (oben rechts) und untersuchte Konfigurationen (unten); nach ⁴³⁹

Die Versuche zeigten, dass jedwede Segmentierung in deutliche Steigerungen der möglichen Schnitttiefen resultierte, bevor es zu Schleifbrand oder Schleifscheibenversagen kam, und auch in geringere benötigte Leistungen im Vergleich zu einer konventionellen Schleifscheibe, siehe

Abbildung 43 links; die zugehörigen Rauheiten sind im rechten Bildteil zu sehen. Weiterhin konnte diesbezüglich das beste Verhalten bei Konfiguration 3 erreicht werden, welcher zwar die gleiche Belagsreduzierung wie Konfiguration 2 aufwies, jedoch geringe Segmentbreiten. Dies zeigt, dass neben der Belagsreduzierung auch die Gestaltung der Segmente einen Einfluss auf das Einsatzverhalten hat. Dies führten die Autoren auf die Kombination der Steigerung der Spannungsdicken und der veränderten KSS-Zufuhr zurück. Diese These wird auch von den Untersuchungen zu Spezialschleifscheiben für eine verbesserte KSS-Zufuhr gestützt, welche in Kapitel 4.2.3 vorgestellt werden.

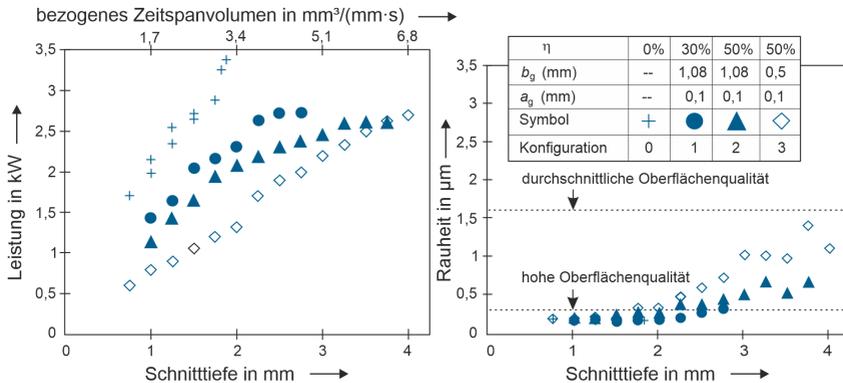


Abbildung 43: Einfluss verschiedener Segmentierungen auf die Leistung und die Rauheit; nach ⁴³⁹

Erwähnenswert sind auch die Untersuchungen von Denkena et al. ^{156, 157, 161} des IFW der Leibniz Universität Hannover. Sie strukturierten konventionelle, keramisch gebundene Schleifscheiben mit Hilfe eines speziellen Abrichtwerkzeugs. Das Besondere sind die Dimensionen der Strukturen. Mit Hilfe des Abrichters wurden eine Vielzahl an Strukturen mit Längen von 3 mm bis 7 mm, Breiten von 0,2 mm bis 0,5 mm und Tiefen von 0,02 mm bis 0,1 mm in die Schleifscheibe eingebracht (Abbildung 44). Die Strukturen sind somit erheblich kleiner als bei gewöhnlichen segmentierten Schleifscheiben, der Anteil an Unterbrechungen hat sich mit 10 %, 18 %, 25 %, und 43 % in ähnlichen Bereichen bewegt. Die Ergebnisse, auch im Vergleich zu unstrukturierten Schleifscheiben, waren wie bei segmentierten Schleifscheiben mit größeren Tiefen der Segmente: je höher der Anteil an Unterbrechungen im Belag, desto geringer die Schleifkräfte und die Schnittleistungen, jedoch auf Kosten einer höheren Oberflächenrauheit und eines höheren Radialverschleißes. Durch die Segmentierungen konnte das Auftreten von Schleifbrand reduziert werden und die Eigenspannungen im Werkstück in Richtung Druck verschoben werden. Neben dem Effekt einer effizienteren Zerspaltung durch die Reduktion der Kornanzahl wurde dies auf eine höhere Menge KSS in der Kontaktzone zurückgeführt. Dies wurde anhand von Messungen mit Hilfe eines Versuchsstandes zum Auffangen und Messen des durch die Kontaktzone beförderten KSS bestätigt. Die Menge an KSS war mit einem Anteil an Unterbrechungen von 25 % ca. 5 % bis 25 % höher als bei der Schleifscheibe mit durchgängigem Belag (je nach gewähltem Vorschub und der Schnittgeschwindigkeit). Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 4.2.3 näher eingegangen. ^{156, 157}

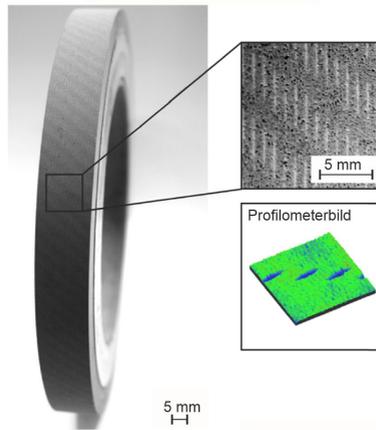


Abbildung 44: Fein strukturierte Schleifscheibe ¹⁵⁶

Bei dem Abrichtwerkzeug, mit welchem die Strukturen in die Schleifscheiben eingebracht wurden, handelte es sich um eine Scheibe, auf der ein bis mehrere Diamanten aufgebracht wurden. Sie wurde auf der Abrichtspindel der Schleifmaschine aufgespannt und die Strukturierung wurde über die Kinematik der Maschine realisiert. ^{156, 157}

Diese Strukturierungsmethode ist damit auf jede Maschine mit Abrichtrolle adaptierbar. Mit einfachsten Mitteln und in kurzer Zeit können so herkömmliche Schleifscheiben in ihrer Leistungsfähigkeit enorm verbessert werden.

Die technologischen Vorteile segmentierter Schleifscheiben gehen mit erhöhten Werkzeugkosten einher. Daher sollten sie nur dort Einsatz finden, wo sich diese Mehrkosten lohnen, also für die Zerspanung teurer oder schwer zerspanbarer Materialien wie Hochleistungskeramik ³⁷², polykristalliner Diamant ⁴ oder Keramikmatrix-Komposite ⁶¹⁷. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Zerspanung duktiler Materialien, bei denen herkömmliche Schleifscheiben zum Zusetzen neigen ³¹⁷. Die Arbeiten von Walter et al. ⁵⁵³ verdeutlichten, dass die Gestaltung der Segmentierung einen erheblichen Einfluss auf den Prozess hat; die Auslegung kann z.B. auf einer Modellierung der thermischen Bedingung in Abhängigkeit der Segmentierung basieren ^{654, 730}.

Schleifscheiben mit definiertem Kornsetzmuster

Schleifscheiben mit definiertem Kornsetzmuster verfolgen das gleiche Ziel wie segmentierte Schleifscheiben: die Reduktion von Prozesskräften und -leistungen beziehungsweise die Optimierung der Spanbildung. Dies soll ebenfalls mit der Reduzierung der Anzahl kinematischer und aktiver Schneiden erreicht werden. Während dies bei segmentierten Schleifscheiben durch eine Unterbrechung des Schleifbelags erreicht wird, wobei die Segmente über einen herkömmlichen, stochastisch geprägten Belag verfügen, wird bei definiert gesetzten Schleifscheiben die Anzahl und Position der Schleifkörner mehr oder weniger gezielt gesteuert. Sie verfügen also über einen durchgängigen Schleifbelag, wobei die Anzahl der Körner sehr stark reduziert ist. Dies resultiert in größere mittlere Spannungsdicken am Einzelkorn und größere Spanräume. Die definierte Verteilung kann zum Beispiel durch eine Maske oder ein Sieb realisiert werden, über

welche die Körner auf die Schleifscheibe gestreut werden²⁵⁸. Definiert gesetzte Schleifscheiben sind stets einlagige Schleifscheiben. Die Auslegung des Setzmusters hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Werkstückrauheiten und sollte simulationsgestützt gewählt werden³⁵⁸.

Eine Reihe von Untersuchungen wurden von Chattopadhyay et al. durchgeführt^{53, 126, 127, 129, 128, 130, 208, 268, 498, 627, 628}. Die Körner wurden mittels Hartlötens im Vakuum auf den Schleifscheibengrundkörper aufgebracht; eine Technologie, bei der die Körner nicht wie bei herkömmlichen einschichtigen Belägen über Formschluss gehalten werden, sondern über eine chemische Bindung zum Korn³³³. Hartlötens bietet höhere Kornhaltekräfte bei gleichzeitig höheren Kornüberständen als galvanisch belegte Schleifscheiben; da die Körner chemisch an den Grundkörper angebunden werden und nicht mechanisch durch die galvanische Bindung gehalten werden (Untersuchungen zum Hartlötens und dessen Eigenschaften finden sich in^{597, 598}). In keinen der Arbeiten ist die Rede von definiert gesetzten Schleifscheiben, es wird immer von hartgelöteten Schleifscheiben gesprochen. So wurde auch bei der Herstellung, im Gegensatz zu späteren Arbeiten anderer Autoren, welche die Idee aufgriffen, nicht auf die strikte Einhaltung der Kornsetzmuster geachtet. Dies zeigt der Vergleich des beabsichtigten mit dem realen Setzmuster in Abbildung 45. Die Körner wurden mittels eines Siebs auf dem Grundkörper verteilt. Den Autoren ging es eher um die Vorteile des Hartlötens im Vergleich zur galvanischen Belegung.

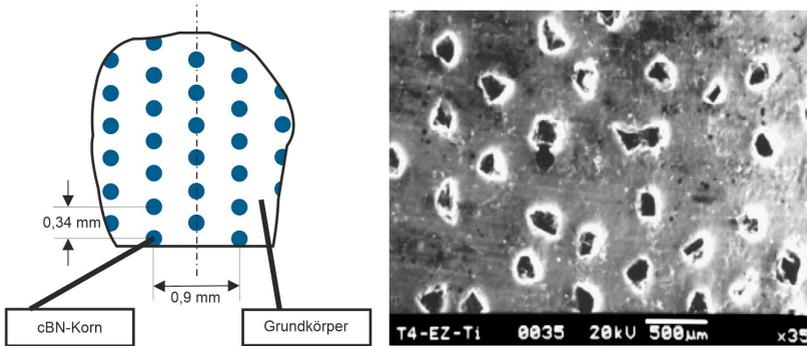


Abbildung 45: Beabsichtigtes (links) und reales (rechts) Setzmuster⁶²⁷

Dennoch sind die Arbeiten zumindest als geistige Vorläufer definiert gesetzter Schleifscheiben zu bezeichnen, da es in den Arbeiten um die gleichen Vorteile ging: mehr Spanraum, weniger kinematische und aktive Schneiden. Weiterhin wurden zum Beispiel in²⁰⁹, zwei verschiedene, definierte Setzmuster mit einer eher stochastisch geprägten Verteilung hartgelöteter Körner verglichen (Abbildung 46).

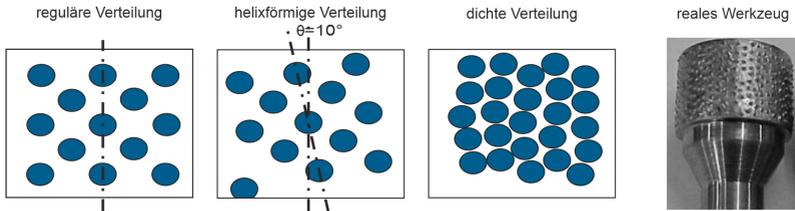


Abbildung 46: Untersuchte Setzmuster und Beispiel eines realen Werkzeugs ²⁰⁹

Bei der Zerspaltung von gehärtetem Wälzlagerstahl im Trockenschnitt konnten leicht geringere Kräfte im Vergleich zu einer stochastisch galvanisch belegten Schleifscheibe erreicht werden ⁴⁹⁸. Weiterhin konnten die hartgelöteten Schleifscheiben in Prozessbereichen verwendet werden, in welchen die galvanischen so stark zusetzten, dass der Prozess unterbrochen werden musste. Die Vorteile des größeren Spanraums kamen hier voll zur Geltung.

In ²⁰⁹ wurde die Problematik angesprochen, dass aufgrund der geringen Anzahl kinematischer Schneiden höhere Rauheiten resultieren und aufgrund der nicht einheitlichen Korngrößen und damit variierenden Kornüberständen der Anteil aktiver Schneiden zu gering ist. Ein touch dressing, also ein sehr feines Abrichten zum Abflachen der Kornspitzen zur Erlangung einheitlicherer Kornüberstände, wie es auch bei stochastisch galvanisch belegten Schleifscheiben zur Verbesserung der Werkstückrauheit zum Einsatz kommt ^{693, 713}, konnte dieses Problem kompensieren ²⁰⁹. Es konnten nahezu die gleichen Rauheiten mit der Schleifscheibe mit definiertem Setzmuster wie bei der dicht belegten erreicht werden; Vorteile bezüglich geringerer Kräfte wurden jedoch nicht erreicht. Die Untersuchungen wurden im Trockenschnitt durchgeführt, womit die Vorteile einer verbesserten KSS-Zufuhr nicht ausgenutzt werden konnten. ²⁰⁹

Die Idee von Chattopadhyay et al. wurde an der ETH Zürich von Burkhard und Rehsteiner aufgegriffen ^{106, 108}, wobei das Ziel das automatisierte definierte Setzen der einzelnen Körner war. Das Setzen von Hand ist eine industriell angewandte Methode für die Herstellung hochgenauer Abrichtwerkzeuge ¹⁰⁶; ist jedoch auf Korngrößen größer D 601 (mittlere Korngröße 600 μm) beschränkt ¹⁰⁶; und vergleichsweise unwirtschaftlich. Über eine piezo-angetriebene Dosiervorrichtung wurden Klebepunkte auf dem Grundkörper in definierten Positionen angebracht ¹⁰⁷ (Abbildung 47). Anschließend wurde der Grundkörper mit den Körnern bestreut und überschüssige Körner abgeschüttelt. Die Körner haften nur an den Klebepunkten und nahmen damit die definierten Positionen ein (bei Korngrößen kleiner 150 μm kam es zu einer Clusterbildung auf den Klebepunkten). Anschließend wurde das Lotmittel auf die Schleifscheibe aufgebracht und das Aktivlöten in einem Vakuumofen durchgeführt. Die Vorteile gegenüber dem galvanischen Belag und des definierten Setzens mit Hartlötungen gegenüber dem stochastischen Hartlöten sahen die Autoren vor allem im zusätzlichen Spanraum (vergleiche Abbildung 47).

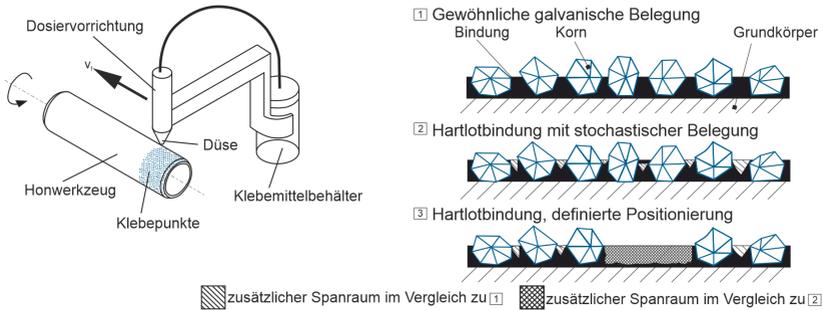


Abbildung 47: Prinzip der Mikrodosiervorrichtung und Vergleich der Spanräume für galvanisch belegte, hartgelötete und hartgelötete mit definierter Positionierung bei Clusterbildung; nach ¹⁰⁸

Beim Vergleich der Standzeit galvanisch belegter und hartgelöteter Honwerkzeuge zeigte sich bei der Konfiguration mit einzelnen Körnern eine ausgeprägte Verschleißneigung, die erzielten Standwege waren geringer. Dies wurde auf die fehlende Abstützwirkung durch benachbarte Körner zurückgeführt. Bei den hartgelöteten Werkzeugen mit Clusterbildung wurden hingegen zehnfach höhere Standzeiten als bei den galvanisch belegten erreicht. Neben der Abstützwirkung benachbarter Körner in den Clustern wurde dies auf den hohen Spanraum und die Vermeidung des Zusetzens des Belags zurückgeführt. ^{106, 108}

Die Arbeiten wurden einige Jahre später von Pinto und Wegener et al. an der ETH Zürich weitergeführt. Ziel war neben der Verbesserung der Genauigkeit der Mikrodosiervorrichtung ⁵⁰⁸ die simulationsgestützte Optimierung des Setzmusters. Entgegen den Ergebnissen von Burkhard wurden Schleifscheiben mit Einzelkornbelegung ohne Clusterbildung untersucht. Basierend auf einer kinematischen Durchdringungsberechnung war das entwickelte Modell in der Lage, Faktoren wie die Kornmorphologie und die Positionsgenauigkeit der Kornplatzierung zu berücksichtigen und die resultierende Werkstückbeschaffenheit zu prognostizieren. Das Modell war ebenfalls in der Lage, den Einfluss von Ungenauigkeiten, resultierend aus der Grundkörpergenauigkeit (Toleranzen) sowie der Aufspannung der Schleifscheibe zu berücksichtigen (maximale erlaubte radiale und axiale Konzentrität). So konnten simulationsgestützt Grenzen bei der Herstellung von Schleifscheiben mit definiertem Setzmuster aufgezeigt werden, bei denen es zum Versagen der Schleifscheiben aufgrund von Kornüberlastungen bei Überschreitung einer kritischen Abtragsrate kam. Generell ergaben sich die in der Einleitung dieses Abschnitts erläuterten Ergebnisse: höhere Rauheiten bei geringeren Tangentialkräften; die Normalkräfte lagen in den gleichen Bereichen wie bei herkömmlich belegten Schleifscheiben (daraus resultieren günstigere Verhältnisse $\mu=FT/FN$, also reduzierte Reibvorgänge). Die Vorteile definiert gesetzter Schleifscheiben zeigten sich insbesondere nach längeren Einsatzzeiten. Während es hier bei den galvanisch belegten Schleifscheiben zu Anhaftungen an den Körnern kam, konnte dies bei den definiert gesetzten Schleifscheiben nicht beobachtet werden. ^{507, 509, 510}

Ding et al. von der Nanjing University of Aeronautics and Astronautics untersuchten ebenfalls hartgelötete Schleifscheiben ^{173, 174, 172, 431, 710}. In den Untersuchungen wurden die Körner in Reihen auf den Werkzeugen angeordnet, die zur Schleifscheibenachse um einen Winkel ge-

dreht wurden (Abbildung 48). Bei der Zerspangung von Ti6Al4V konnten sie Temperaturen unter $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Anmerkung: die Position der Thermoelemente wurde nicht angegeben) und defektfreie Oberflächen bei Zustellungen von $100\text{ }\mu\text{m}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von 500 mm/min erreichen ⁷¹⁰.

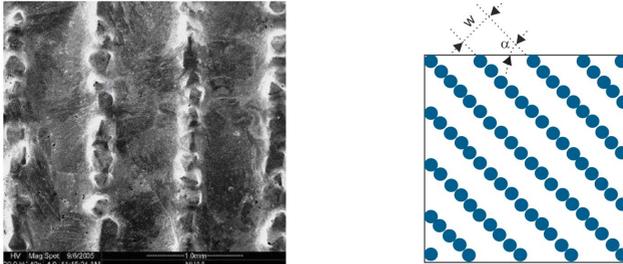


Abbildung 48: Ausschnitt des realen Werkzeugs (links) und zur Schleifscheibenachse gedrehtes Setzmuster (rechts) ⁷¹⁰

In einer weiteren Untersuchung von Ding et al. wurde eine segmentierte, definiert gesetzte Schleifscheibe für die Zerspangung von Nickelbasislegierungen vorgestellt ¹⁷². Diese Legierungen gehören aufgrund ihrer hohen Festigkeit, hohen Warmhärte und hohen Zähigkeit zu den schwerst zerspanbaren Werkstoffen. Insbesondere die schleifende Bearbeitung ist herausfordernd, da die Schleifscheiben schnell zusetzen und die hohen Temperaturen zu einem raschen Verschleiß führen. Die Kombination der Vorteile segmentierter und definiert gesetzter Schleifscheiben sollte diesen Bedingungen entgegen. Wie in Abbildung 49 zu sehen, lag eine Anordnung in Korreihen vor, teilweise mit Clusterbildung. Beim Schleifen (v_s : $17,5\text{ m/s}$ bis 25 m/s ; v_f : 100 mm/min bis 400 mm/min ; a_c : $80\text{ }\mu\text{m}$ bis $200\text{ }\mu\text{m}$; a_p : $4,5\text{ mm}$) des Nickelbasiswerkstoffs K424 bei Zufuhr von 90 l/min Emulsion konnten Hintergrundtemperaturen (vergleiche Abschnitt 3.2) von maximal $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei guter Oberflächenqualität und ohne Beeinflussung der Randzone erreicht werden.

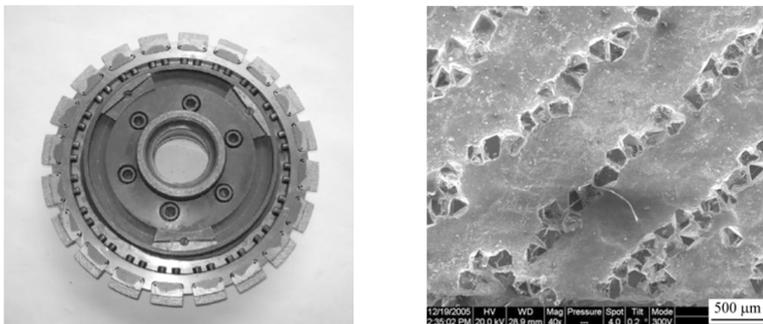


Abbildung 49: Draufsicht auf das reale Werkzeug (links) und REM-Bild des Belags (rechts) ¹⁷²

Weitere Arbeiten zu hartgelöteten Abrasivwerkzeugen für die Zerspangung von Aluminium finden sich in ¹³⁴. Aluminium kann aufgrund seiner Neigung zum Zusetzen problematisch sein,

weshalb hartgelötete Schleifscheiben mit ihrem großen Spanraum besonders geeignet sind. Solche wurden von Li et al. mit einer Anordnung in Kornreihen mit Clusterbildung für die Zerspannung von Hartmetall untersucht³⁷⁶. Okuyama et al. setzen eine Diamantschleifscheibe mit definiertem Kornsetzmuster ein, ebenfalls für die Zerspannung des stark zu Anhaftungen neigenden Aluminiums (industriell reines Aluminium A1050)⁴⁷⁹.

Umfangreiche Untersuchungen mit definiertem Kornsetzmuster wurden am FBK der TU Kaiserslautern durchgeführt^{20, 26, 34, 70, 71, 258, 259, 261, 260, 262, 263}. Ähnlich wie bei den Arbeiten der ETH Zürich stand dabei die simulationsgestützte Optimierung des Setzmusters im Vordergrund. Hierzu wurde eine geometrisch-kinematische Durchdringungsberechnung verwendet, die, basierend auf der modellierten Schleifscheibentopographie, den Materialabtrag als idealen Abtrag simuliert; das bedeutet, Phase I und II des Materialabtrags werden vernachlässigt und jeder Kontakt eines Korns mit dem Werkstück führt zu einem simulierten Materialabtrag. Mit Hilfe eines modifizierten Kienzle-Ansatzes können so auch die Einzelkornkräfte und die Prozesskraft ermittelt werden. In der Simulation werden die verschiedenen existierenden Kornmorphologien sowie die realen Kornverteilungen berücksichtigt (Details zur Simulation finden sich in³¹). So konnte simulationsgestützt der Einfluss der Korngeometrie, der Korngrößenverteilung, sowie der Kornpositionierung auf die resultierende Werkstücktopographie, die Schleifkräfte und damit die Prozessdynamik identifiziert werden. Es wurden erste Kornsetzmuster definiert, welche mit einer Kornkonzentration von ca. 2 % beziehungsweise 5 % eine deutliche Reduzierung der Anzahl aktiver Körner im Vergleich zu herkömmlich stochastisch belegten Schleifscheiben gleicher Korngröße (B301; Kornkonzentration 45 %) aufwiesen (Abbildung 50). Diese ersten Prototypen wurden sehr aufwendig hergestellt. In den Grundkörper wurden NC-gesteuert an die Sollpositionen der Körner kleine Bohrungen eingebracht. Auf die Bohrungen wurde jeweils ein Klebepunkt appliziert, in welchen von Hand je ein Korn gesetzt wurde. Anschließend wurde die Schleifscheibe zur Aufbringung der Bindung in das Galvanikbad gelegt. Während die erste Prototypschleifscheibe aufgrund von Herstellungsfehlern rasch versagte, konnten mit der zweiten Prototypschleifscheibe bezogene Zeitspanvolumina von bis zu $100 \text{ mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ erreicht werden. Die ermittelten Schleifkräfte und –temperaturen waren um 30 % bis 40 % geringer als bei der stochastisch belegten Referenzschleifscheibe. Jedoch kam es gerade bei hohen Zustellungen von 5 mm zu einer starken Gratbildung. Grate lösten sich während des Prozesses und hafteten am Schleifbelag, wodurch es zu einer hohen mechanischen und thermischen Reibbelastung kam, die zum Ausbruch einzelner Körner führte. In der Folge kam es zu einer erhöhten Belastung nachfolgender Körner entlang einer Umfangslinie und schließlich zum Ausbruch kompletter Kornreihen, weshalb die Schleifscheibe nach einem Zerspannungsvolumen von 500.000 mm^3 nicht mehr eingesetzt werden konnte.

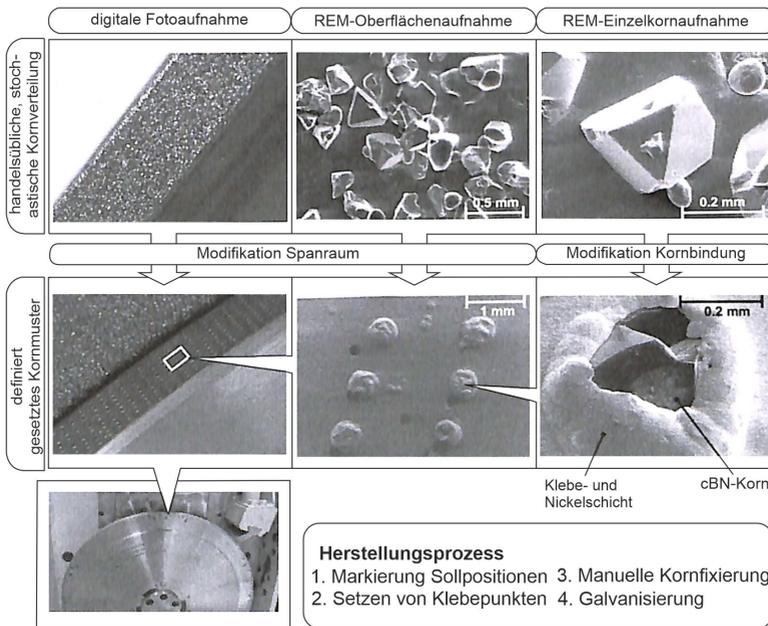


Abbildung 50: Vergleich einer herkömmlich galvanisch belegten und einer definiert gesetzten Schleifscheibe ⁷⁰

Der Gefahr des Ausbrechens ganzer Kornreihen wurde in einer Weiterentwicklung des Konzepts durch eine Schablonentechnik zur Aufbringung der Körner begegnet. Damit ergab sich eine weniger definierte Kornanordnung (vergleiche Abbildung 51), jedoch eine erhebliche Reduzierung des Fertigungsaufwands und eine Steigerung der Robustheit des Werkzeugs. Dies sollte durch die Verdopplung der Kornreihen im Vergleich zu den vorherigen Prototypen erreicht werden. Mit ca. 35.000 Körnern war die Kornanzahl damit deutlich höher als bei den ersten Prototypen mit 5.000 beziehungsweise 8.000, betrug jedoch lediglich 40 % der Anzahl der stochastisch belegten Referenzschleifscheibe. Die Körner der Prototypschleifscheibe wurden mittels Touch-Dressing auf einen gleichmäßigen Kornüberstand abgerichtet. Die Wahl der Abrichthöhe erfolgte simulationsgestützt. Ziel war eine hohe Anzahl kinematischer Schneiden schon mit dem ersten Überschliff. Im Vergleich zur Referenzschleifscheibe konnten bei einem bezogenen Zeitspanvolumen von $70 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ bei Zustellungen von 1 mm bis 4 mm und einer Schnittgeschwindigkeit von 100 m/s deutlich geringere Schnittkräfte (Reduktion um ca. 5 % bis 34 %) und Spindelleistungen (Reduktion um ca. 15 % bis 35 %) erreicht werden; auch die Randzonenbeeinflussung war bei der definiert gesetzten Schleifscheibe geringer. Dem standen deutlich höhere Werkstückrauheiten gegenüber (ca. 33 % größer). Weiterhin konnte mit dieser Schleifscheibe eine Nickelbasislegierung bei einem bezogenen Zeitspanvolumen von $140 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ bearbeitet werden. Der Abrichtprozess führte zwar zu einem stationären Einsatzverhalten ab dem ersten Schliff, reduzierte jedoch auch die Einsatzzeit des Werkzeugs. Ab einem bezogenen Zerspannvolumen von $80.000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ kam es zu Anhaftungen, die

schließlich in das Abplatzen großer Belagbereiche führten. Unterstützt durch simulative Betrachtungen konnte dies auf eine stark steigende Anzahl kinematischer und aktiver Schneiden bei sinkendem Spanraum zurückgeführt werden.

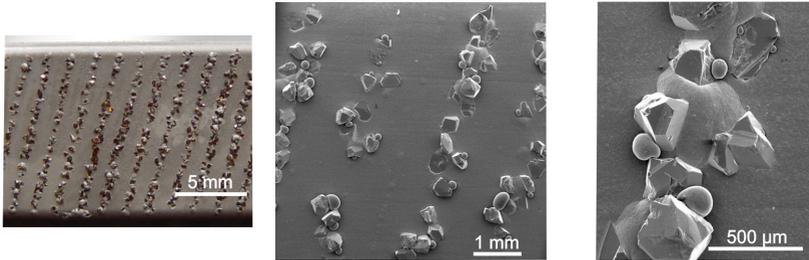


Abbildung 51: Photographie (links) und REM-Bilder (mitte, rechts) der nach dem vereinfachten Verfahren hergestellten Schleifscheibe mit definiertem Setzmuster ²⁵⁸

Die Vor- und Nachteile definiert gesetzter Schleifscheiben resultieren aus der reduzierten Anzahl kinematischer Schneiden. Damit ergeben sich eine Reduzierung des Anteils nur reibender und pflügender Schneiden und gleichzeitig größere Spannungsdicken am Einzelkorn. Größere mittlere Spannungsdicken wiederum bedeuten, dass die energetischen Anteile des Reibens und Pflügens (Phase I und II der Spanbildung) am Einzelkorn geringer sind und damit ein effizienterer Materialabtrag am Einzelkorn erreicht wird. Diese Aspekte führen wiederum zu den geringeren Schnittkräften und –leistungen, sowie günstigeren Randzoneeigenschaften. Weitere Vorteile ergeben sich durch eine bessere KSS-Zufuhr aufgrund des größeren Spanraums. Vor allem bei Werkstoffen wie Aluminium ^{134, 481} oder Titanlegierungen ⁴⁸¹ hat sich diese Technologie als sinnvoll erwiesen, da diese zum Zusetzen neigen und bei Titanlegierungen auch die Temperaturen kritisch sind ⁶²⁷. Dem steht der erhöhte Fertigungsaufwand und resultierend aus den größeren Spannungsdicken beziehungsweise der höheren Einzelkornbelastung höhere Werkstückrauheiten beziehungsweise ein erhöhter Verschleiß gegenüber.

Gerade die aufwendige Herstellung definiert gesetzter Schleifscheiben verhindert eine Marktdurchdringung der Technologie. Eine vereinfachte Variante zur Herstellung stellen Schleifscheiben mit Kornclustern dar ^{389, 716, 718, 717}. Ähnlich wie bei der beschriebenen Schablonentechnik zur Aufbringung der Kornreihen wird auf den Grundkörper eine nichtleitende Maske aufgebracht, die über Aussparungen verfügt. Der Grundkörper wird, wie bei stochastisch belegten Schleifscheiben, mit Körnern bestreut und anschließend galvanisch belegt (Abbildung 52). Anschließend wird die Maske entfernt. Es werden nur diejenigen Bereiche belegt, die von der Maske ausgespart wurden. So können beliebige Größen an Kornclustern erzeugt werden (Abbildung 52). Zur Herstellung solcher Schleifscheiben mit der beschriebenen oder ähnlichen Methoden finden sich einige Patente ^{49, 178, 511, 605, 641, 669, 714} und solche Werkzeuge sind bereits am Markt verfügbar ¹⁸⁵.

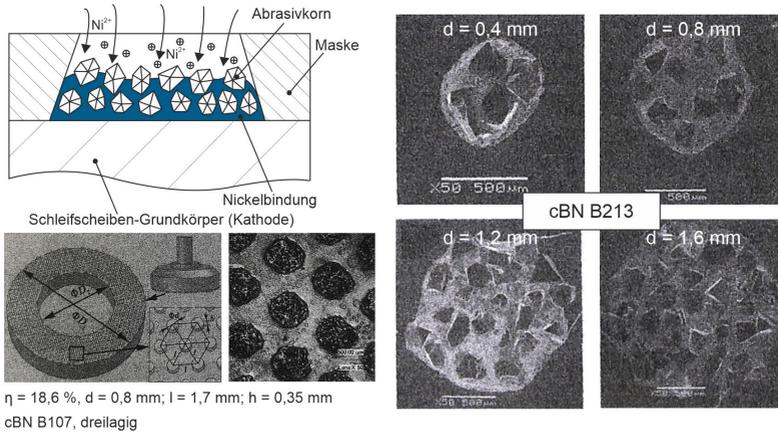


Abbildung 52: Prinzip der Clusterbildung mittels Masken (oben links), beispielhaftes Werkzeug und Nomenklatur (unten links) und einige Cluster mit verschiedenen Durchmessern d (vier Bilder rechts); nach ⁷¹⁸

Mittels Laser hergestellte definierte Schleifbeläge

Die Lasertechnologie ermöglicht die kontaktlose Bearbeitung von Materialien großer Härte. Die Lasermaterialbearbeitung ist ein industriell etabliertes Verfahren zum Beschriften, Schweißen/Löten, zur Oberflächenbehandlung sowie zum Bohren, Schneiden, Strukturieren und Abtragen ⁶⁴. Das Materialspektrum ist dabei nahezu unbegrenzt. Auch die hochharten Stoffe cBN und Diamant lassen sich mit Hilfe der Lasertechnologie bearbeiten ⁵⁰⁶. Erste Anwendungen in der Schleiftechnologie bestanden im Abrichten von Diamant- ⁶⁹⁰ und cBN-Schleifscheiben ⁶⁹² als Alternative zum sehr zeit- und kostenintensiven mechanischen Abrichten. Es folgte das laserunterstützte Schärfen, also das Zurücksetzen von Kunstharzbindungen ⁷⁰⁴, Metallbindungen ^{151, 274} und Metallkeramikhybridbindungen ⁶⁷⁶ hochharter Schleifscheiben. Schließlich wurde die Laserstrukturierung genutzt, um fein segmentierte Schleifscheiben herzustellen, wie bereits ausgeführt.

Mit der wirtschaftlichen Erschließung von Pikosekundenlasern steht eine Technologie zur Verfügung, mit deren Hilfe einzelne Körner gezielt prozesssicher mit hoher Präzision bearbeitet werden können. Dold et al. zeigten, dass Diamantkörner geschritten werden können (vergleiche Abbildung 53), ohne dass es zur Graphitisierung kommt ¹⁷⁶.

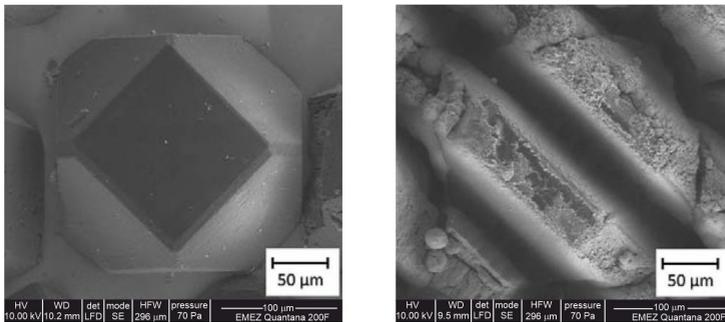


Abbildung 53: Korn vor (links) und nach (rechts) der Laserstrukturierung; nach ¹⁷⁶

Dies wurde auch für die Herstellung spezieller Schleifscheiben ausgenutzt. An der ETH Zürich wurden die Freiwinkel von groben Diamantkörnern mittels eines Pikosekundenlasers variiert ⁶⁷⁹. Im Vergleich zu einem konventionellen Touch-Dressing, bei dem ein durchschnittlicher Freiwinkel von $0,2^\circ$ bei einer Standardabweichung von $0,8^\circ$ erreicht wurde, konnten so deutlich positivere Freiwinkel von durchschnittlich $2,4^\circ$ bei einer Standardabweichung von $1,4^\circ$ erzielt werden (siehe Abbildung 54 a). REM-Aufnahmen zeigen, dass die Laserbearbeitung zu glatten, defektfreien Körnern führt, während das konventionelle mechanische Touch-Dressing Defekte und Ausbrüche nach sich zieht (Abbildung 54 b). Beim Vergleich der Kräfte zeigt sich, dass es zu signifikant geringeren Schleifkräften beim Einsatz der laserabgerichteten Werkzeuge kommt, interessanterweise sowohl für Schleifscheiben mit positiven als auch mit negativen Freiwinkeln (Abbildung 54 c). Dies wurde auf die geringere Beeinflussung durch den Laserabrichtprozess im Vergleich zum mechanischen zurückgeführt, beziehungsweise auf die Defekte der Abrasivkörner beim mechanischen Abrichten, und auch darauf, dass sowohl positive wie auch negative Freiwinkel den Kontaktbereich Abrasivkörner-Werkstück reduzieren (weniger Kornanflächungen). Der Traganteil, welcher mit dem Kontaktbereich korreliert, war bei den laserabgerichteten Schleifscheiben mit positiven beziehungsweise negativen Freiwinkeln mit ca. 0,4 % beziehungsweise 0,5 % deutlich geringer als bei der mechanisch abgerichteten Schleifscheibe mit ca. 1,4 %. Mit steigendem bezogenem Zerspanvolumen glichen sich die Prozesskräfte der verschiedenen Konfigurationen an, siehe Abbildung 54 d). Der Traganteil glich sich ebenfalls an, er sank bei der mechanisch abgerichteten Schleifscheiben nach ca. $10.000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ auf das Niveau der laserabgerichteten. ⁶⁷⁹

Die Ergebnisse belegen somit die Theorien zum Einfluss der Abrichtmethode, also dass das Laserabrichten zu einem besseren Schnittverhalten aufgrund geringer eingebrachter Defekte in die Körner führt, da die Traganteile sich aufgrund von Verschleiß auf identische Niveaus glichen, die Kräfte trotz Annäherung bei den laserabgerichteten geringer blieben.

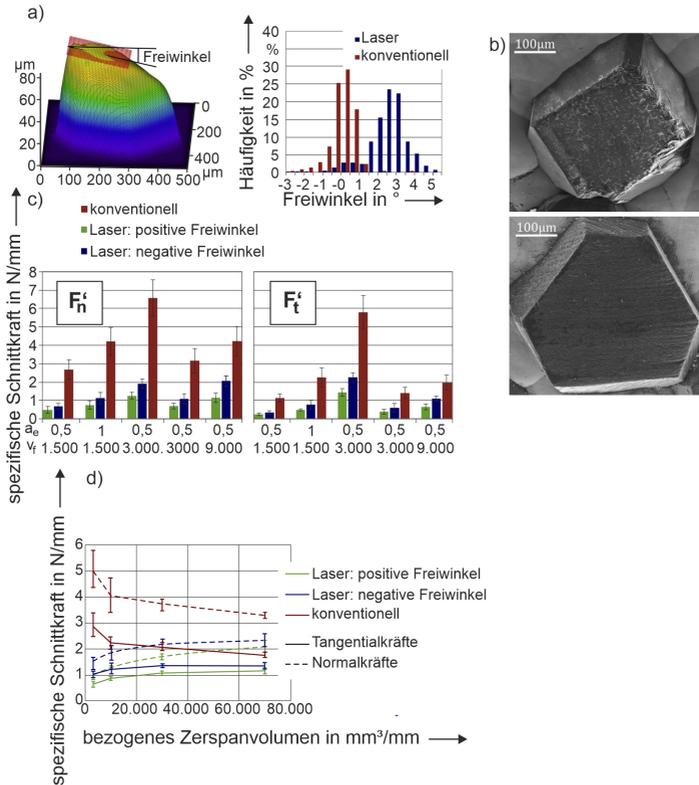


Abbildung 54: a) Verteilung der Freiwinkel nach dem Abrichten, b) links konventionell abgerichtetes Korn, rechts laserabgerichtetes Korn, c) Kräfte in Abhängigkeit der Abrichtbedingungen, d) Kräfte in Abhängigkeit der Abrichtbedingungen bei fortschreitendem Einsatz; nach ⁶⁷⁹

Umfangreiche Untersuchungen zur Herstellung und zum Einsatz laserstrukturierter Abrasivelemente wurden an der University of Nottingham durchgeführt ^{36, 109–112, 492, 733}. Als Basis für die Strukturierung dienen CVD-Dickschichten. Diese sind kommerziell in Dicken von 0,5 mm bis 2,5 mm erhältlich (siehe zum Beispiel ⁵⁹⁹). Neben polykristallinen Dickschichten wurden auch härtere monokristalline untersucht. Damit können Schichten mit maßgeschneiderten Eigenschaften hergestellt werden, da der monokristalline Diamant anisotrop ist und seine mechanischen und physikalischen Eigenschaften von der kristallographischen Ebene abhängen. Mit Hilfe der Laserablation können Strukturen in diese CVD-Dickschichten eingebracht werden, die definierte Größen, identische Höhen (Kornüberstände) und präzise Abstände zueinander aufweisen (siehe Abbildung 55), und dies bei identischer Kristallorientierung. Als einzige Nachbehandlung werden die Substrate oder Werkzeuge zur Entfernung von Rückständen zwei Stunden in Königswasser (37%ige Salzsäure und 65%ige Salpetersäure im Verhältnis 3 zu 1) getaucht und anschließend 15 Minuten in ein Ultraschallbad mit deionisiertem Wasser gelegt.

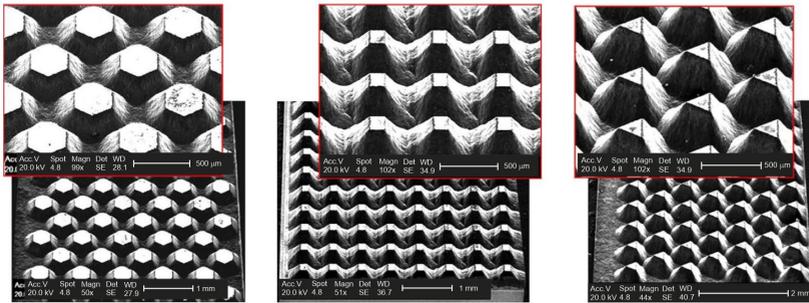


Abbildung 55: Beispielfhafte, mittels Laser hergestellte Abrasivstrukturen ¹¹¹

Mit dieser Methode war es möglich, Schleifbeläge mit regelmäßigen Körnern mit definiertem Span- und Freiwinkel sowie identischen Kornüberständen und -abständen herzustellen (Abbildung 56). Die rechteckigen Abrasivelemente wurden fixiert und eine rotierende Welle über diese geführt, um den Materialabtrag beim Schleifen abzubilden (Zustellung: 2 μm , Vorschub: 300 mm/min, Schnittgeschwindigkeit 20 m/s; Überflutungskühlung). Die Zerspanung von Ti6Al4V mit diesen strukturierten Abrasivelementen (Spanwinkel -32° , Freiwinkel $+4,5^\circ$ und 0°) wurde mit herkömmlich galvanisch belegten verglichen (D46 und D91). Die strukturierten Abrasivelemente mit 0° Freiwinkel zeigten ein gutes Einsatzverhalten, setzten jedoch zu. Dies konnte mit dem positiven Freiwinkel von $4,5^\circ$ fast vollständig vermieden werden, weshalb in den folgenden Untersuchungen nur diese zum Einsatz kamen. Die herkömmlich galvanisch belegten Abrasivelemente setzten deutlich zu, insbesondere bei der kleineren Körnung, die über eine höhere Kornkonzentration verfügte. Weiterhin kam es zu Mikrobrüchen und Ausbrüchen einzelner Körner. Diese Beobachtungen spiegelten sich auch in den Schnittkräften wider. Die strukturierten Abrasivelemente zeigten deutlich geringere Kräfte als die Abrasivelemente mit D46 und auch geringere als die mit D91. Dies wurde auch auf die „Spanflusskorridore“ zurückgeführt, die bei den strukturierten Abrasivelementen vorlagen, also die kontinuierlichen, ununterbrochenen Wege zwischen den eingebrachten Strukturen. Diese liegen bei galvanisch belegten Belägen zwangsläufig nicht vor, da aufgrund ihrer stochastischen Natur immer nach einem gewissen Weg ein Korn vorliegt. Weiterhin war die Oberflächenrauheit deutlich geringer beim strukturierten Abrasivelement ($R_a=0,468 \mu\text{m}$ bis $0,501 \mu\text{m}$) als bei D46 ($R_a=0,763 \mu\text{m}$ bis $0,952 \mu\text{m}$) und D91 ($R_a=1,650 \mu\text{m}$ bis $1,990 \mu\text{m}$), ebenso wie die Welligkeit.

In weiteren Untersuchungen wurden auch komplexere Werkzeuggeometrien und vollständige rotatorische Werkzeuge untersucht, jedoch für die Mikrozerspanung, siehe Abbildung 57. Auch diese Werkzeuge waren herkömmlich galvanisch belegten in Bezug auf die Oberflächenrauheit, die Formhaltigkeit und das Verschleißverhalten überlegen ¹⁰⁹. Weiterhin wurde das Konzept auch auf polykristalline pcBN Dickschichten erweitert, ebenfalls mit deutlich besserem Verschleißverhalten ⁴⁹². Schließlich wurden Untersuchungen zu den Strukturgeometrien durchgeführt ⁷³³, auch zu deren Einfluss auf den Materialabtrag (spröde vs. duktil) ^{36, 112}.

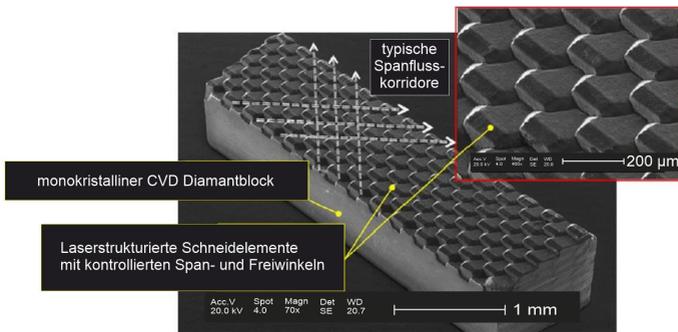


Abbildung 56: Zum Zerspanen eingesetztes, laserstrukturiertes Abrasivelement ¹¹⁰

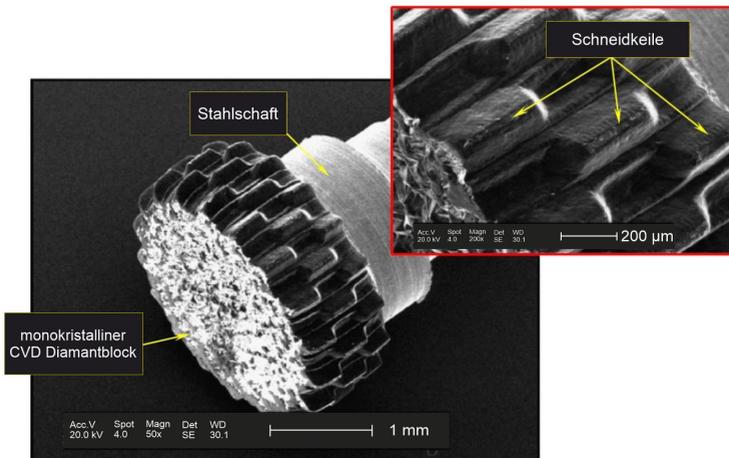


Abbildung 57: Zum Zerspanen eingesetztes, laserstrukturiertes Werkzeug ¹⁰⁹

Fang et al. verfolgten einen ähnlichen Ansatz, strukturierten jedoch anstelle von Dickfilmschichten Hartmetall (WC-CoNi; 14 Gewichtsprozent Co, 14 Gewichtsprozent Ni) ¹⁹¹. Es wurden pyramidenförmige Strukturen in definiertem Setzmuster in ein Werkstück eingebracht, welches anschließend zum Honen verwendet wurde (siehe Abbildung 58). Die Honleisten konnten erfolgreich eingesetzt werden und zeigen das Potential definiert strukturierter Werkzeuge, jedoch sind noch Optimierungen bezüglich deren Verschleiß notwendig, zum Beispiel durch geeignete Beschichtungen.

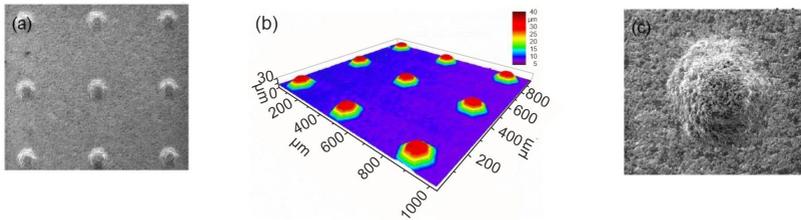


Abbildung 58: REM Bilder der Strukturen ((a) und (b)) und 3D-Vermessung (b); nach ¹⁹¹

Die Untersuchungen zur Herstellung von Schleifscheiben mit definierten Belägen mittels Laserablation weisen ein enormes Potenzial auf. Die Laserablation ist schneller und gezielter und erlaubt noch mehr Freiheitsgrade als andere mechanische oder manuelle Verfahren. Die Arbeiten der ETH Zürich zeigen die Anwendbarkeit für Schleifscheiben in herkömmlichen Dimensionen. Die Herstellung solch dimensionierter Schleifscheiben mit definierten Strukturen in Dickschichten ist bisher noch nicht realisiert, jedoch grundsätzlich technologisch machbar. Durch Anstellen der Proben oder eine 5-Achs-Laserbearbeitung wären so auch Schleifscheiben denkbar, die über positive Spanwinkel verfügen.

Weitere Schleifscheiben mit definierten Schleifbelägen

Eine weitere aus der Forschung bekannte Möglichkeit zur Erzeugung definierter Schleifbeläge ist die Anwendung des funkenerosiven Abtragens ⁶⁴⁶. Hierbei findet der Materialabtrag durch den Überschlag eines Funkens von einer Elektrode zum Werkstück und dem damit einhergehenden Schmelzen und Verdampfen des Materials statt. Die Vorteile sind ähnlich wie bei der Laserbearbeitung, da es sich um ein berührungsloses Fertigungsverfahren mit hoher Auflösung handelt. In Abbildung 59 ist ein mit diesem Verfahren hergestellter Belag aus polykristallinem Diamant dargestellt. Hierbei handelte es sich um eine Abrichtscheibe, die ein besseres Einsatzverhalten zeigte als eine konventionelle.

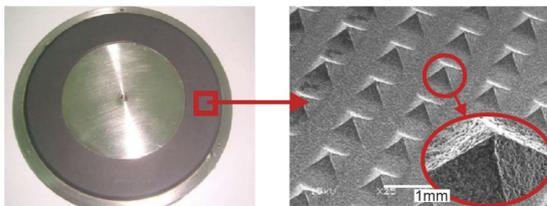


Abbildung 59: Mittels funkenerosivem Abtragen hergestellte Abrichtscheibe mit definiertem Schleifbelag ⁶⁴⁶

In Anlehnung an Methoden der Mikrosystemtechnik wurde in ²⁰⁴ die Möglichkeit untersucht, großflächig definierte Schleifbeläge mittels der Abscheidung von CVD Dickschichten auf zuvor strukturierte Silikonsubstrate herzustellen. Die Abbildungsgenauigkeit und die Möglichkeiten zur Variation der Kornverteilung sind beeindruckend (vergleiche Abbildung 60). Solche Beläge wurden für das Seitenplanschleifen realisiert und erfolgreich für die Zerspanung von Zinn, Messing, Stahl und Aluminiumoxid angewandt.

Die Notwendigkeit der Verwendung verlorener Masken (Silikonsubstrat) und die Beschränkung auf ebene Flächen (Seiten der Schleifscheibe anstelle des Umfangs) verhindern jedoch die Anwendung dieser Methode auf übliche Schleifaufgaben; die Lasertechnologie scheint hier die sinnvollere Alternative.

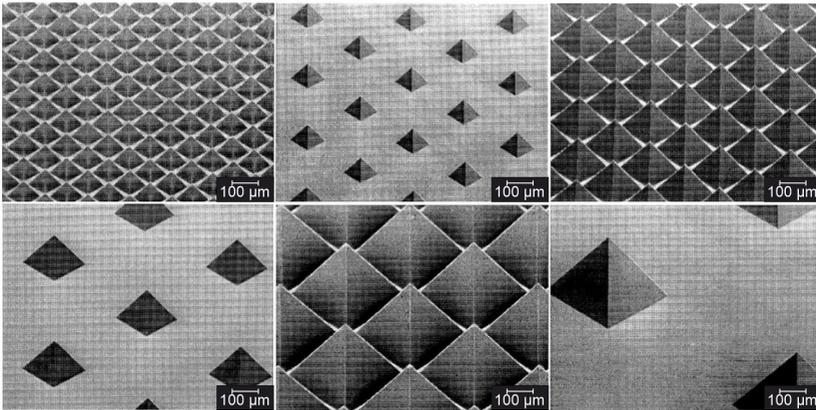


Abbildung 60: Verschiedene CVD Dickschichten ²⁰⁴

Schleifscheiben für die Trockenzerpanung

Wie bereits im Kapitel Grundlagen erläutert, ist bei der Trockenzerpanung mit herkömmlichen Schleifscheiben mit einem raschen Zusetzen und Versagen der Werkzeuge zu rechnen und auch die Werkstückqualität ist in der Regel ungenügend. Schleifscheiben mit optimierter Spanbildung bieten einen effizienteren Prozess mit einem geringen Anteil an elastischen und plastischen Verdrängungsvorgängen. Damit gehen auch reduzierte erzeugte Wärmemengen einher. Dies motivierte einige Autoren, derart optimierte Schleifscheiben auch für die Trockenzerpanung einzusetzen, wobei sowohl segmentierte als auch definiert gesetzte Schleifscheiben untersucht wurden.

Detaillierte Untersuchungen zum Einsatz segmentierter Schleifscheiben für die Trockenzerpanung wurden an der Hochschule Furtwangen von Tawakoli, Rabiey et al., und Azarhoushang et al. durchgeführt ^{38, 512, 513, 621, 623–626, 622}. Sie verwendeten einen Abrichtprozess, um eine herkömmlich stochastisch belegte Schleifscheibe zu strukturieren und damit eine Segmentierte zu erhalten. Das Besondere hierbei ist, dass die Tiefe der Strukturen geringgehalten wurde, von 30 µm bis maximal 500 µm. Der Spanraumgewinn ist daher kleiner als bei anderen segmentierten Schleifscheiben. Da dieser Schleifscheibentyp jedoch ausschließlich zum Trockenschleifen eingesetzt wurde, ist der weiter oben beschriebene Effekt einer erhöhten KSS-Zufuhr durch eine Segmentierung irrelevant. In den Untersuchungen wurde eine symmetrische Reduzierung des Schleifbelags realisiert, der noch überstehende Schleifbelag war rautenförmig (Abbildung 61) und in einer späteren Veröffentlichung spiralförmig wie bei herkömmlichen segmentierten Schleifscheiben ⁵¹³. Die untersuchten Reduzierungen der Schleifbelagsfläche betragen 25 %, 30 %, 50 %, 60 % und 75 %; die Ergebnisse wurden mit einer Schleifscheibe gleichen Typs mit durchgängigem Schleifbelag (0 % Reduzierung) verglichen. Die Ergebnisse

zeigten, dass die Prozesskräfte proportional mit der Belagsreduzierung sinken. Der Effekt der Optimierung der Spanbildung ist somit unabhängig von einer eventuell verbesserten KSS-Zufuhr. Die Schleifkräfte konnten um mehr als 35 % reduziert werden, die spezifischen Schleifenergien um mehr als 40 %, in den neuesten Untersuchungen ³⁸ gar um 60 % respektive mehr als 50 %. Mit diesen Schleifscheiben konnten beim Trockenschleifen günstige Randzoneneigenschaften der Werkstücke erzielt werden beziehungsweise das Auftreten von Schleifbrand konnte zu höheren Abtragsraten verschoben werden (Abbildung 61). Bei einigen Versuchen konnten sogar Druckeigenstressungen in der Randzone erreicht werden. Dennoch blieb der Einsatz für das Trockenschleifen auch hier problematisch. Neben dem höheren Verschleiß segmentierter Schleifscheiben aufgrund der höheren Einzelkornbelastung kam es zum fortschreitenden Zusetzen des Spanraums.

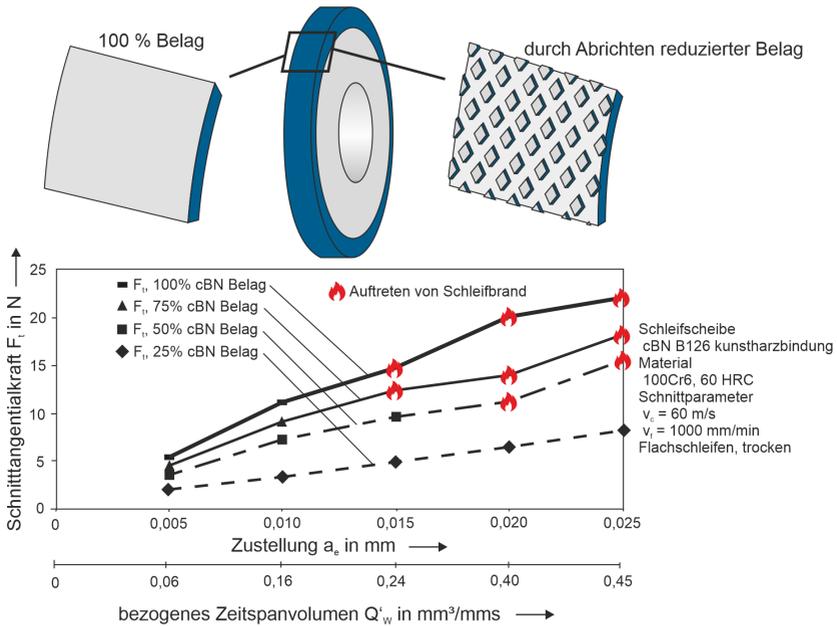


Abbildung 61: Muster der Belagsreduzierung (oben) und Versuchsergebnisse mit verschiedenen Belagsreduzierungen (unten); nach ⁶²⁶ und ⁶²³

Wie oben bereits erwähnt, konnten auch hartgelötete Schleifscheiben in Bereichen im Trockenschnitt eingesetzt werden, in welchen der Prozess bei herkömmlich galvanisch belegten unterbrochen werden musste ⁴⁹⁸. Umfangreiche Untersuchungen zum Einsatz mit definiertem Kornsetzmuster wurden am FBK der TU Kaiserslautern durchgeführt ^{258, 262, 263}. Untersucht wurde das Einsatzverhalten bei konstantem bezogenem Zeitspanvolumen (70 mm³/(mm·s)) und konstanter Schnittgeschwindigkeit (100 m/s) unter Variation von Zustellung (1 mm bis 4 mm) und Vorschubgeschwindigkeit (1.050 mm/min bis 4.200 mm/min) im Gleich- und Gegenlauf. Bedingt durch die Kinematik wurden die Späne im Gleichlauf durch die Kontaktzone zur neu erzeugten Oberfläche transportiert und verschweißten mit dieser. Bei Zustellung größer 1 mm

im Gleichlauf waren die Rauheiten zu groß, um mittels Tastschnittverfahren ermittelt werden zu können. Im Gegenlauf konnte ein stabileres Einsatzverhalten erreicht werden. Jedoch kam es hier bei Zustellungen ab 1 mm zu Anhaftungen auf der Schleifscheibe, die mittels Überschliffen bei geringen Zustellungen wieder entfernt werden mussten. Auch die Randzonenbeeinflussung konnte nur bei geringen Zustellungen im Rahmen gehalten werden. Die Anlasszonen waren hier im gleichen Bereich wie beim Nassschleifen, wenn auch deutlich ausgeprägte Neuhärtungszonen zu verzeichnen waren. Mit steigender Zustellung jedoch kam es zu inakzeptablen Randzonenbeeinflussungen mit Anlasszonen von mehreren Millimeter Dicke und auch Neuhärtungszonen größer 1 mm.

Diese Untersuchungen zeigen, dass Spezialschleifscheiben den Einsatz des Schleifens im Trockenschnitt prinzipiell ermöglichen. Gerade die Arbeiten aus Furtwangen, bei denen weniger aggressive Parameter verwendet wurden, ermöglichen eine ressourcenschonende Anwendung. Fraglich bleibt jedoch, ob dies auch sinnvoll ist. Das Hauptanwendungsfeld des Schleifens ist die Herstellung von Funktionsoberflächen, bei denen die Qualität im Vordergrund steht. Betrachtungen zur Nachhaltigkeit belegen, dass trotz oder gerade wegen des Einsatzes von KSS die Nachhaltigkeit des Schleifens verbessert werden kann. Dies wird in Kapitel 5 näher betrachtet.

4.2.2 Schleifscheiben für die Zerspanung sprödharter Werkstoffe

Um schadungsfreie Oberflächen und Randzonen bei sprödharten Werkstoffen zu erreichen, muss im duktilen Modus geschliffen werden. Dazu muss eine material- und prozessabhängige kritische Spannungsdicke unterschritten werden (siehe Kapitel 3.1). Das einfachste Mittel, um dies zu erreichen, ist die Einhaltung geringster Zustellungen bei geringsten Vorschüben. Die daraus resultierenden sehr geringen Abtragsraten führen zur Unwirtschaftlichkeit des Schleifens und beschränken den Einsatz auf die Bearbeitung teurer, hochpräziser optischer Elemente³⁵². Weiterhin besteht aufgrund der geringen Vorschubgeschwindigkeit die Gefahr der thermischen Schädigung der Werkstücke.

Neben dieser Schnittparameterführung kann der duktile Modus auch durch eine gezielte Auslegung der Schleifscheibenparameter erreicht werden. König und Sinhoff fassten die Anforderungen an Schleifscheiben zum Erreichen des duktilen Modus zusammen³⁵⁵:

- geringe Rundlaufabweichungen,
- minimale Korngröße,
- eine hohe Anzahl aktiver Körner (unabhängig von der Kornkonzentration),
- Verwendung einer Bindung mit hohem Verschleißwiderstand,
- einheitlicher Kornüberstand.

Sie entwickelten einen Abrichtprozess, um genau diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Zhong und Venkatesh griffen diese Überlegungen auf und verwendeten eine teils abgenutzte Schleifscheibe, mit der sie 90 % der Oberfläche im duktilen Modus bearbeiteten. Die hohen Anforderungen der optischen Industrie erfordern jedoch sichere, reproduzierbare Prozesse, die bei diesem Ansatz nicht gegeben sind.

Aus den Überlegungen von König und Sinhoff folgt, dass theoretisch Schleifscheiben mit Korngrößen im Mikrometerbereich bei hohen Korndichten zu wählen sind. Damit geht jedoch die Gefahr eines instabilen Prozessverhaltens⁶⁵ beziehungsweise des praktisch direkten Zusetzens der Scheibe und extrem hoher Kräfte einher⁵⁶². Um dem zu begegnen, werden hohe Anforderungen an die Einsatzvorbereitung der Schleifscheibe gestellt⁵⁶² und es ergibt sich die Notwendigkeit spezieller Abrichtverfahren wie dem elektrolytischen-im-Prozess-Abrichten (siehe Abschnitt 4.1.4). Damit kann ein gleichmäßiger Kornüberstand (unter der Voraussetzung hoher Rundlaufgenauigkeiten) bei gleichzeitig großem Spanraum erreicht werden.

Kanai et al. stellten an Schleifscheiben zum Erreichen des duktilen Modus folgende Anforderungen³⁰³:

- hohe Kontaktsteifigkeit, um die Übertragung von Bewegungsfehlern zu verhindern,
- hoher Kornüberstand, um eine hohe Produktivität und Lebensdauer der Schleifscheibe zu erreichen,
- verschleißbeständiges Bindungssystem, idealerweise metallisch, um Kornausbruch zu vermeiden,
- Beherrschbarkeit der Verteilung der Kornüberstände, mindestens im Bereich der Zustellung im Prozess.

Schleifscheiben mit definiertem Setzmuster, wie in Abschnitt 4.2.1 vorgestellt, scheinen geeignet, diese Anforderungen zu erfüllen. Sie versprechen eine bessere Kontrolle des Spanabtrags, weisen hohe Kornüberstände und Kornhaltekräfte auf und verfügen über große Spanräume. Wie in Arbeiten von⁷³¹ gezeigt und aus der Forderung der Unterschreitung der kritischen Spannungsdicke auch logisch herleitbar, kommt es bei variierenden Kornüberständen zu einem semi-duktilen Modus, bei welchem einige Körner duktil zerspanen, andere, weiter herausragende spröde. Entsprechend müssen, auch bei Verwendung von Schleifscheiben mit definiertem Setzmuster, gleichmäßige Kornüberstände beziehungsweise eine gleichmäßige Hüllkurve realisiert werden.

Am IWT der Universität Bremen wurden Spezialschleifscheiben entwickelt, die diesen Anforderungen genügen^{51, 86, 92, 96, 98, 97, 220, 253, 451, 519, 518, 729}. Tatsächlich wurde die Idee nach Angaben der Autoren inspiriert durch die Untersuchungen mit definiertem Kornsetzmuster und den Überlegungen von Kanai et al. Die Idee hinter den Spezialschleifscheiben war die Verwendung grobkörniger, metallgebundener Schleifscheiben, bei denen mittels eines hochgenauen Abrichtprozesses einheitliche Kornüberstände erreicht wurden. Der Abrichtprozess erfolgte auf einer Ultrapräzisionswerkzeugmaschine mit Achsaufösungen im Nanometerbereich. Weitere Anforderungen sind ein hochgenaues Aufspannen und Wuchten der Schleifscheibe unter Verwendung hochpräzise gefertigter Grundkörper, um Instabilitäten im Prozess und Vibrationen zu vermeiden; Rundlaufabweichungen nach dem Umspannen kleiner 2 µm wurden so noch vor dem Abrichten erreicht. Durch feines Abrichten bei geringen Konditionierscheibendrehzahlen auf der präzisen Maschine wurden die Rundlauffehler weiter minimiert, die Spitzen der Körner gekappt und einheitliche Kornüberstände und Hüllkurven erreicht. Im Anschluss an das mechanische Abrichten erfolgte noch ein elektro-chemisches Abrichten (ELID, siehe Abschnitt 4.1.4) zur weiteren Präzisierung des Abflachens der Körner. Das Ergebnis des Abflachens der verwendeten blockigen, kubisch-oktaedrischen Körner mit Abrichtzustellungen

von 3 μm sind sehr stumpfe Körner mit großer Kontaktfläche (große wear flat area, vergleiche Abschnitt 3.5.3). In späteren Arbeiten wurden die Möglichkeiten eines thermo-chemischen Abrichtens untersucht. Hierzu wurden langsam rotierende Stahlkalotten mit definierter Andruckkraft mit der rotierenden Schleifscheibe in Kontakt gebracht. Durch die entstehende Reibungswärme und den als Katalysator wirkenden Stahl kommt es zu einer Graphitisierung des Diamants, welcher abgetragen wird und somit zu einer Abflachung der Körner führt. Durch das Abstumpfen wird nicht nur ein einheitlicher Kornüberstand erreicht, es gehen auch günstige Prozessbedingungen zum Erlangen des duktilen Modus einher: die großen Kontaktflächen führen zu hohen hydrostatischen Druckspannungen im Kontakt.

Über die Jahre wurden verschiedene solcher Spezialschleifscheiben untersucht, teils mit definiertem Setzmuster, teils stochastisch belegt. Dabei wurden Korngrößen und die Kornanzahl variiert. Die Herstellung der definiert gesetzten Schleifscheiben erfolgte an der ETH Zürich nach dem in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten Verfahren.

Mit allen untersuchten Spezialschleifscheiben konnte durch die Wahl geeigneter Prozessparameter ein duktiler Modus erreicht werden. Rissfreie Oberflächen mit geringer Werkstückrauheit waren die Folge (herab bis zu $R_a=18\text{ nm}$ bei BK7 Borosilikat-Kronglas). Generell wurden mit steigender Abstumpfung und damit steigender Kontaktfläche steigende Normalkräfte und sinkende Werkstückrauheiten und letztlich eine zunehmend duktile Bearbeitung erreicht; nicht zuletzt auch aufgrund der hohen Normalkräfte, die einen hydrostatischen Druckspannungszustand im Werkstückmaterial begünstigen. Die Verwendung definiert gesetzter Schleifscheiben ist dabei keine notwendige Bedingung; auch mit den stochastisch belegten grobkörnigen Spezialschleifscheiben wurde ein duktiler Modus erreicht. Die Vorteile definiert gesetzter Schleifscheiben sind bei dieser Anwendung rein akademischer Natur. Die Kenntnis der genauen Topographie der Schleifscheibe erleichtert das Aufdecken von Wirkzusammenhängen und vereinfacht die Einflussanalyse. Unterschiede zwischen stochastisch belegten und definiert gesetzten Spezialschleifscheiben ergeben sich lediglich, wenn sich die einflussnehmenden Parameter Belegungsart (beeinflusst Standzeit und Einsatzstabilität) und Flächenkorndichte (beeinflusst Kontaktfläche nach dem Abrichten) unterscheiden. Maßgebend ist also der entwickelte hochgenaue Abrichtprozess. Dabei sind definiert gesetzte Schleifscheiben für diese Spezialanwendung eher im Nachteil. Sie verfügen bauartbedingt über weniger aktive Körner und erreichen damit schwieriger hohe Flächenkorndichten und sind aufwendiger in der Herstellung.

Mit diesen in Bremen entwickelten Schleifscheiben stehen somit Schleifwerkzeuge für die Bearbeitung sprödharter Werkstoffe im duktilen Modus zur Verfügung. Die Eignung wurde von anderen Autoren, die das gleiche Konzept untersuchten, ebenfalls bestätigt⁷²¹. Die zeit- und kostenintensiven, dem Schleifen sprödharter Werkstoffe üblicherweise nachgelagerten Prozessschritte Läppen und Polieren können so eingespart werden. Das originelle an diesen Spezialschleifscheiben ist, dass die aus den Wirkmechanismen der duktilen Zerspanung abgeleiteten Richtlinien zur Auslegung der Beläge, nämlich hohe Kornkonzentrationen und möglichst kleine Korngrößen (vergleiche Abschnitt 3.1) genau umgekehrt wurden. Mit diesem innovativen Konzept wurde die eigentliche Anforderung, eine hohe Anzahl aktiver Schneiden, erreicht, ohne die negativen Effekte bei Steigerung der Kornkonzentration und Reduzierung der Korngrößen, also kleine Spanräume und damit wenig Platz für KSS und die Spanabfuhr.

Die resultierenden hohen Normalkräfte können jedoch auch nachteilig sein, denn sie fördern zwar den duktilen Modus aufgrund der damit einhergehenden Begünstigung hydrostatischer Druckspannungen, jedoch besteht auch die Gefahr der Randzonenschädigung bei Verwendung grobkörniger Werkzeuge^{228, 727}. Basierend auf den Untersuchungen von Butler-Smith et al.¹¹³, in welchen Diamantkörner mittels Laserablation strukturiert wurden, untersuchten Zhao und Guo et al.^{226–228} ähnliche Spezialwerkzeuge, wie die in Bremen entwickelten, bei welchen die Diamantkörner zusätzlich laserstrukturiert wurden. Ziel der Untersuchungen war die Reduzierung von Randzonenschädigungen. Die grobkörnigen Schleifscheiben wurden ebenfalls elektrochemisch konditioniert, um einheitliche Kornüberstände zu erreichen. Anschließend wurde ein Nanosekundenlaser auf die Schleifscheibe gerichtet. Während die Schleifscheibe rotierte, wurde der Laser in Axialrichtung bewegt; somit entstand eine drallförmige Spur. Umdrehungsgeschwindigkeit und Vorschub wurden so abgestimmt, dass zwischen den Laserbahnen in Axialrichtung ein Abstand von 30 μm , 70 μm , 90 μm und 150 μm bestand. Die Spurbreite des Lasers betrug 10 μm bis 15 μm . Somit wurden bei der verwendeten Korngröße von 150 μm die Körner teilweise an zufälligen Stellen durchtrennt. Das Prinzip und Aufnahmen durchtrennter Körner sind in Abbildung 62 dargestellt.

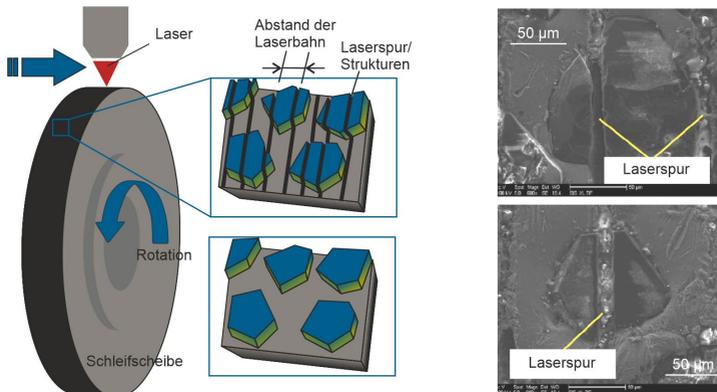


Abbildung 62: Prinzip der Strukturierung mittels Laser (links) und REM-Bilder durchtrennter Körner (rechts); nach²²⁶

Die Oberflächenrauheit konnte mit diesen Schleifscheiben im Vergleich zu nicht laserpräparierten nicht verbessert werden, es trat gar eine Verschlechterung ein. Dies deckt sich mit der Hypothese der hydrostatischen Druckspannungen und der größer werdenden mittleren Spannungsdicke bei zunehmender Strukturierung. Jedoch konnten die angestrebten Verbesserungen hinsichtlich Rissinitiierung in der oberflächennahen Randzone durch Reduzierung der Normalkräfte erreicht werden. Zu deren Ermittlung wurden nach dem in⁷²⁸ vorgestellten Verfahren Gefügeschliffe mit einem Winkel von 135° zwischen geschliffener Oberfläche und Schnittfläche erstellt, poliert und mit Ammoniumhydrogendifluorid angeätzt. Anhand von REM-Aufnahmen wurden so die Tiefe der von der Oberfläche ausgehenden Risse ermittelt. Mittlere Risstiefen von 4,9 μm mit der nicht laserstrukturierten Schleifscheibe konnten mit kleiner werdendem Laserbahnabstand kontinuierlich reduziert werden (2,8 μm bei 150 μm Laserbahnabstand bis 1,1 μm bei 30 μm Laserbahnabstand).

4.2.3 Schleifscheiben für eine verbesserte Kühlschmierstoffzufuhr

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Trockenschleifen zeigen, dass geeignete Schleifscheiben zwar herstellbar sind, das Arbeitsergebnis jedoch nicht den Ansprüchen an die Werkstückqualität genügen kann. Die Kühlung ist von enormer Bedeutung für die Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit des Verfahrens und auch Gegenstand von Entwicklungen zur Optimierung der Werkzeuge. Schleifscheiben, die im Hinblick auf eine Verbesserung der Kühlbedingungen entwickelt wurden, weisen meist geometrische Änderungen des Schleifbelags mit Dimensionen im Millimeterbereich auf. In der Literatur werden solche Schleifscheiben als Schleifscheiben mit einer internen KSS-Zufuhr bezeichnet. In Anlehnung der in ³²³ eingeführten Differenzierung werden diese unterteilt in:

- Zufuhr durch Bohrungen oder Kanäle innerhalb der Schleifscheibe,
- Zufuhr über Zwischenräume in der Schleifbelagtopographie.

Bei der erstgenannten Gruppe erfolgt die KSS-Zufuhr ähnlich wie bei innengekühlten Hartmetallbohrern durch die Schleifscheibe selbst in die Wirkzone. Der KSS wird dabei entweder durch die Fliehkraft oder mittels Pumpen gefördert. Bei der letztgenannten Gruppe erfolgt die KSS-Zufuhr wie bei herkömmlichen Prozessen über externe KSS-Düsen. Die Schleifscheiben verfügen jedoch über Bohrungen im Belag oder Zwischenräume im Belag; der KSS wird zu diesen Zwischenräumen gefördert und gelangt damit ebenfalls direkt in die Wirkzone.

Zufuhr über Bohrungen oder Kanäle innerhalb der Schleifscheibe

Während die Gestaltung der Kühlkanalaustrittsbedingungen beim Bohren Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist ⁴⁴⁷⁻⁴⁴⁹, so ist die Zufuhr über Kanäle innerhalb des Werkzeugs an sich industrieller Standard. Die Kanäle werden bei der Herstellung der Werkzeugrohlinge aus Hartmetall bereits in der Sinterform berücksichtigt, sodass sich die Mehrkosten auf die Modifikationen der Sinterformen beschränken.

Beim Schleifen gibt es zu dieser „echten“ internen KSS-Zufuhr nur wenige Untersuchungen. Dies ist wohl nicht zuletzt auf die erheblichen Kosten bei der Herstellung dieser Werkzeuge zurückzuführen. Ein Einbringen der Kanäle mittels der Sinterform konventioneller Schleifscheiben wäre wohl ebenso möglich wie bei Bohrwerkzeugen; Untersuchungen zu einem solchen Konzept existieren jedoch nicht. Eventuell ist dies auf den damit einhergehenden Stabilitätsverlust zurückzuführen. Veröffentlichte Konzepte zur internen KSS-Zufuhr basieren stets auf der Verwendung metallischer Grundkörper, auf die ein Schleifbelag aufgebracht wird; es handelt sich also um hochharte Schleifscheiben. Die KSS-Kanäle werden mittels Bohren/Laser (gerade Kanäle) oder Fräsen (Freiform-Kanäle) in den Grundkörper eingebracht. Die Zufuhr des KSS erfolgt dann von der Mitte der Scheibe aus durch die Kanäle in die Kontaktzone. Der KSS wird dabei durch die Spindel oder einen gesonderten Zufuhrapparat zur Mitte der Scheibe gebracht. Beide Lösungen erfordern in der Regel Umbauten an bestehenden Schleifmaschinen.

Die erste Studie eines solchen Konzepts findet sich 1940 von Sixt ⁵⁷¹. Ein poröser Schleifbelag wurde auf einen Grundkörper aufgebracht, in welchem acht bogenförmige Kühlkanäle eingebracht waren. Die Zufuhr des KSS erfolgte über die Spindel durch die Kanäle an den Belag; der KSS wurde dann durch den Belag aufgenommen und gelangte so direkt in die Wirkstelle.

Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 23,5 m/s sei die Funkenbildung und die Wärmeentwicklung auf ein Minimum zurückgegangen und die Schliffgüte sei einwandfrei. Bei diesem Beitrag handelte es sich um einen kurzen Beitrag, der keine Versuchsergebnisse darstellte. Eine Folgeveröffentlichung konnte nicht ermittelt werden.

Knapp 45 Jahre später findet sich die nächste Veröffentlichung: in eine galvanisch belegte cBN-Stahlschleifscheibe wurden mittels Laser 50 Bohrungen mit einem Durchmesser von je 0,5 mm eingebracht. Der KSS gelangte über eine Hohlspindel in die Kanäle der Schleifscheibe und durch diese direkt in die Kontaktzone. Diese interne Zufuhr wurde bei 8 l/min mit einer Schleifscheibe verglichen, bei der die Zufuhr über drei Düsen mit insgesamt 47 l/min erfolgte. Sowohl für die Schleifkräfte als auch die Werkstückrauheiten traten trotz der Unterschiede in den Volumenströmen keine signifikanten Unterschiede bei Schnittgeschwindigkeiten von 50 m/s auf. Bei beiden Konzepten kam es ab einem bezogenen Zeitspanvolumen von $8 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ bei der Bearbeitung von 100Cr6 zu Schleifbrand.³⁹⁶

Die gleiche Schleifscheibe wurde am gleichen Institut in einer späteren Veröffentlichung erneut vorgestellt. Beim Vergleichsprozess wurde das KSS-Zufuhrvolumen auf 100 l/min erhöht, bei der Innenkühlung wurden wieder 8 l/min gefördert. Wie bereits in³⁹⁶ gaben die Autoren an, dass die Schleiftangentialkräfte und die Werkstückrauheiten bei beiden Methoden gleich waren, die Normalkraft war hier jedoch bei der Innenkühlung um 40 % geringer. Die Autoren geben hierzu keinen Grund an (*Anmerkung: es lässt sich vermuten, dass höhere hydrodynamische Drücke aufgrund der hohen Zufuhrmengen an KSS bei der konventionellen Methode vorlagen*). Bei beiden Methoden wurden weiterhin keine Zusetzungen des Schleifbelags und keine thermische Schädigung der geschliffenen Werkstücke beobachtet.⁶⁹¹

Ein ähnliches Konzept wie das von Sixt wurde von Klocke et al.³³⁹ und Koch³⁴⁶ vorgestellt. Auch hier wurde der KSS durch im Grundkörper verlaufende Bohrungen zum porösen Belag fliehkraftunterstützt geführt. Bei Schnittgeschwindigkeiten von 100 m/s und bezogenem Zeitspanvolumen von $10 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$ erreichten sie die gleichen Werkstückrauheiten bei interner Zufuhr von 3 l/min wie bei externer Zufuhr von 33 l/min. Nitalätzungen belegten, dass die Randzone nicht negativ beeinflusst wurde. Sie wiesen dabei auf die Schwierigkeit hin, dass die Poren im Belag so groß gewählt werden müssen, dass sie miteinander verbunden sind, um die Förderung des KSS durch den Belag an die Wirkstelle zu ermöglichen.

Martens et al. untersuchten eine aufwendige Konstruktion, bei welcher der KSS über einen Zufuhrapparat in Form eines die Schleifscheibe umhüllenden Gehäuses erfolgte, welches dem beim Tiefbohren ähnelt, siehe Abbildung 63⁴²⁰. Es wird leider nicht klar, ob der KSS-Austritt, welcher über Bohrungen erfolgt, direkt im Belag oder unmittelbar daneben erfolgt. Bei niedrigen, nicht näher spezifizierten Schnittgeschwindigkeiten, seien die Tangentialkräfte bei Innenkühlung höher als bei externer Kühlung, bei hohen Schnittgeschwindigkeiten sei es umgekehrt. Die Vorschubgeschwindigkeiten bis zum Auftreten von Schleifbrand konnten im Vergleich zu einer externen Kühlung von 40 mm/min auf 90 mm/min gesteigert werden.

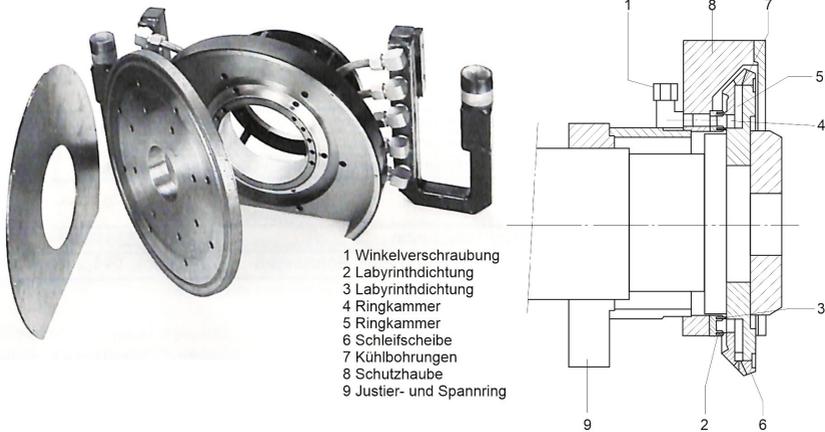


Abbildung 63: Konstruktion eines Zufuhrapparats einer Schleifscheibe mit Innenkühlung nach ⁴²⁰

Untersuchungen zur Zufuhr über eine Hohlspindel in Bohrungen im Grundkörper einer galvanisch belegten cBN-Schleifscheibe wurden auch von Gao et al. durchgeführt. Das besondere hierbei war, dass sie anstelle eines konventionellen KSS auf -15 °C temperiertes CO_2 Gas förderten. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 19 m/s konnte die „Schleiftemperatur“ dabei im Vergleich zum Einsatz der Schleifscheibe ohne KSS von 260 °C auf 185 °C reduziert werden. ²⁰⁶ (Anmerkung: Leider bleibt unklar, wo genau diese Temperaturen ermittelt wurden)

Sieniawski und Nadolny untersuchten Schleifscheiben, in welchen der KSS von der Mitte über gleichmäßig über den Umfang verteilte Kanäle zu Öffnungen im Schleifbelag direkt in die Kontaktzone gelangte ^{563,564}. Sie untersuchten drei verschiedene Schleifscheiben mit Innenkühlung, eine mit 18 Kanälen in einer Reihe, eine mit 36 Kanälen in zwei Reihen und eine mit 54 Kanälen in drei Reihen (Abbildung 64).

Alle drei Schleifscheiben wurden jeweils bei einer KSS-Zufuhr von $0,5\text{ l/min}$ betrieben, wobei der KSS zentral in alle Kanäle geleitet wurde. Weiterhin wurden Versuche mit einer Blende durchgeführt, bei der der KSS nur zu den Kanälen geleitet wurde, die sich im Eingriff beziehungsweise im Bereich des Werkstücks befinden (ebenfalls bei $0,5\text{ l/min}$). Alle Konfigurationen wurden mit einer herkömmlichen Schleifscheibe bei externer Zufuhr mit 5 l/min verglichen. Die resultierenden Eigenspannungsverläufe lagen bis auf den ersten Messpunkt $5\text{ }\mu\text{m}$ unter der Oberfläche bei der Konfiguration mit 54 Kanälen und Beschränkung des Austritts auf den Kontaktbereich im Zugbereich. Weiterhin ergaben sich bis auf die genannte Konfiguration bei allen untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten tiefer reichende Zugeigenspannungen bei Innenkühlung als bei externer Zufuhr.

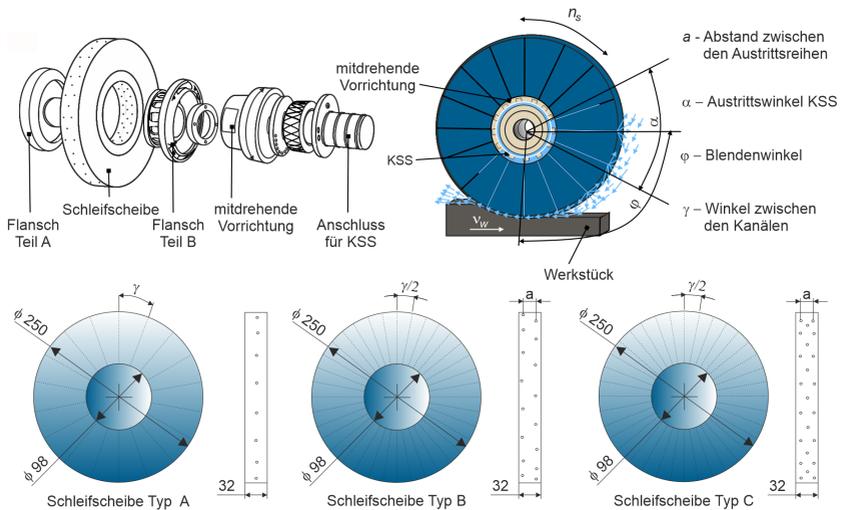


Abbildung 64: Prinzipskizzen zum Aufbau der Schleifscheiben (oben) und untersuchte Konfigurationen (unten); nach ⁵⁶⁴

Mehr als diese wenigen Untersuchungen finden sich zu rein interner Zufuhr bei Austritt des KSS direkt durch den Schleifbelag ähnlich innengekühlten Bohrern nicht. Die Ergebnisdarstellung fällt relativ knapp aus und die Wirkmechanismen werden nicht beleuchtet. Ausführliche Untersuchungen zu innengekühlten Schleifscheiben wurden am FBK der TU Kaiserslautern durchgeführt ^{32, 323, 329, 330, 332}. Bei diesen Untersuchungen erfolgte die Auslegung der Kanäle simulationsgestützt unter Berücksichtigung fluiddynamischer Aspekte. Die Auslegung der Kanäle erfolgte in Anlehnung an Zentrifugalpumpen, gestützt durch Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen. Die Simulationen basierten auf den Navier-Stokes Gleichungen, ein gekoppeltes System nicht-linearer Differentialgleichungen, die das Verhalten Newtonscher Fluide beschreiben. Als Eingangsgrößen für die Auslegung von Zentrifugalpumpen dienen gewöhnlich die gewünschte Förderhöhe und die Durchflussrate. Dementsprechend wird der Laufradtyp, zum Beispiel radiale oder axiale Laufradform, gewählt und die Dimensionen des Laufrads und die benötigte Umdrehungsgeschwindigkeit wird ermittelt ^{223, 581}. Bei der innengekühlten Schleifscheibe waren die Eingangsparameter der Schleifscheibendurchmesser, die gewünschten Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten von bis zu 100 m/s und der Querschnitt der Kanäle. Letzterer wurde unter Berücksichtigung sowohl der Herstellbarkeit mittels Fräsen als auch einer gleichmäßigen und ausreichenden Versorgung der Kontaktzone mit KSS definiert. Mit diesen Eingangsgrößen folgte dann die CFD-gestützte hydraulische Auslegung der Kanäle. Dabei wurde ein stoßfreier Eintritt vorausgesetzt. Das heißt, der Strömungswinkel unter Annahme einer tangentialen Anströmung am Austritt der Kanäle β_2 muss dem Strömungswinkel am Eintritt β_1 entsprechen (vergleiche Abbildung 65). Der Eintrittswinkel hängt vom KSS-Volumenstrom, dem Querschnitt der Kanäle und der Umdrehungsgeschwindigkeit ab. Die notwendige Aussparung zur Aufnahme der Schleifscheibe auf der Spindel wurde mit einem Impeller abgedeckt, der nach dem gleichen Prinzip ausgelegt wurde.

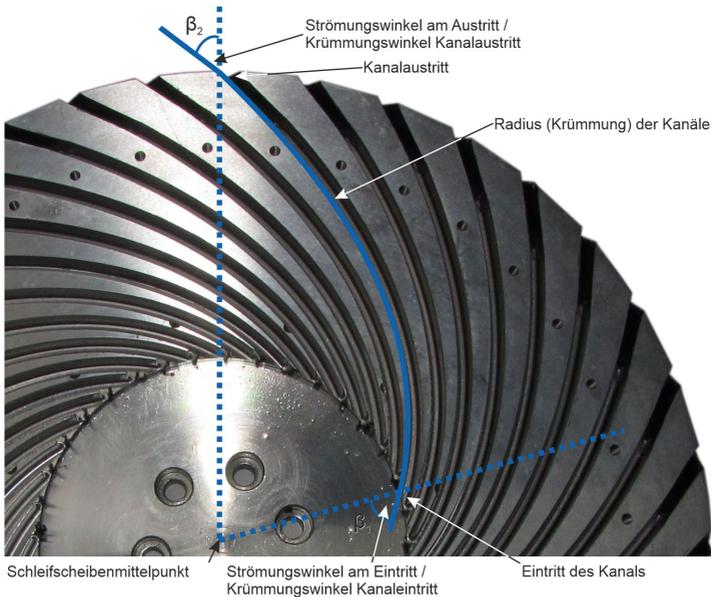


Abbildung 65: Hydraulische Auslegung der Kühlkanäle ³²³

Ein äußerer Deckel wurde fest mit dem Grundkörper verschraubt und schloss so die Kanäle ab. Die galvanische cBN-Belegung erfolgte unter Aussparung der Kühlkanäle über die gesamte Breite des Grundkörpers und des äußeren Deckels. Ein abnehmbarer innerer Deckel verfügte über einen Anschluss der KSS-Zuleitung. Die KSS-Versorgung erfolgte zentral zur Mitte der Schleifscheibe über einen externen Zufuhrapparat (Abbildung 66).

Diese hydraulisch optimierte Schleifscheibe verfügte über 36 gleichmäßig über den Umfang verteilte Kühlkanalausstritte. Der KSS wurde zu allen Kanälen gleichzeitig gefördert und trat frei am Umfang der Schleifscheibe aus. Die Untersuchungen wurden mit einem Volumenstrom durch die Kanäle von 300 l/min durchgeführt, resultierend in einen Volumenstrom von 8,33 l/min pro Kanal. Geschliffen wurden Werkstücke aus vergütetem 42CrMo4V (55 HRC \pm 2 HRC) mit einer Breite von 20 mm; die Werkstücke deckten die gesamten Austrittsöffnungen der Kanäle ab, die eine Höhe von 14,5 mm aufwiesen.

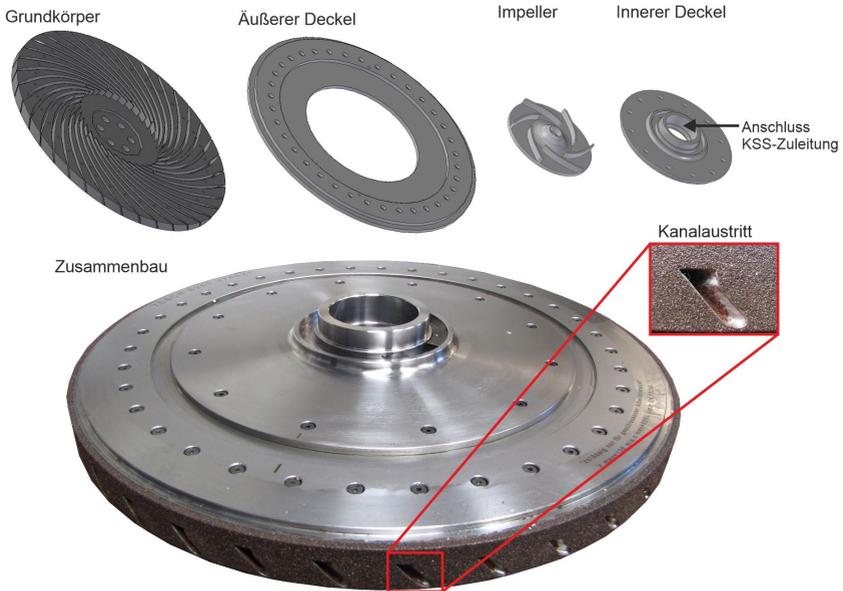


Abbildung 66: Komponenten der innengekühlten Schleifscheibe und Zusammenbau ³²⁹

Das Einsatzverhalten der innengekühlten Schleifscheibe (IKS) wurde einer herkömmlich galvanisch belegten hochharten Referenzschleifscheibe (HHS) gleichen Belags gegenübergestellt (cBN; B251; Kornkonzentration 0,2 Karat/cm²). Die Kühlung erfolgte bei dieser Schleifscheibe über eine externe Freistrahldüse (FSD) mit 105 l/min; zusätzlich wurde eine Reinigungsdüse oberhalb der Schleifscheibe angebracht, die ebenfalls mit 105 l/min betrieben wurde. Die Einstellung der Freistrahldüse wurde nach optimalen Bedingungen vorgenommen (vergleiche Kapitel 3.4):

- Anstellwinkel 11°,
- vertikaler Abstand zur Kontaktzone 4,8 mm; horizontaler Abstand 100 mm,
- Austrittsbreite 22 mm; zentriert zum Werkstück mit der Breite 20 mm,
- Austrittsquerschnitt 28,6 mm², resultierend in eine KSS-Austrittsgeschwindigkeit von 61,2 m/s.

Mit diesen optimalen Düseinstellungen sollte ein objektiver Vergleich ermöglicht werden. Neben der reinen Innenkühlung wurde die IKS in einer zweiten Versuchsreihe zusätzlich bei externer Kühlung betrieben. Dabei wurde die gleiche Freistrahldüse mit den gleichen Einstellparametern verwendet wie bei der Referenzschleifscheibe. Verglichen wurden der KSS-Druck im Schmierpalt mittels eines Drucksensors, die Schleifkräfte, die spezifische Schleifenergie, welche über die Spindelleistung berechnet wurde, die Werkstückrauheiten und die Randzonenbeeinflussung der geschliffenen Werkstücke.

Beim gemessenen Druck im Schmierpalt ergaben sich deutliche Unterschiede in den drei Konfigurationen. Schnittparameterunabhängig lag der Druck bei der IKS bei ca. 3,5 bar, bei Verwendung der zusätzlichen externen Zufuhr bei ca. 8 bar und bei der HHS Referenzschleifscheibe bei 20 bar. Der Druck im Schmierpalt korreliert direkt mit der Geschwindigkeit des KSS. Die rechnerische Austrittsgeschwindigkeit des KSS aus einem Kanal der IKS betrug 2,1 m/s. Dies begründet die wesentlich geringeren hydrodynamischen Drücke im Vergleich zur HHS mit Freistrahldüse bei einer Austrittsgeschwindigkeit von 61,2 m/s, jedoch nicht die deutlich geringeren Drücke bei der IKS bei zusätzlicher externer KSS-Zufuhr mit der gleichen Freistrahldüse. Zurückgeführt wurde dies auf die Unterschiede in der Makrotopographie der beiden Schleifscheiben. Bei der HHS mit FSD gelangt der KSS zu den Seiten des Werkstücks und in die Kontaktzone. In Verbindung mit der hohen KSS-Austrittsgeschwindigkeit ergibt sich der gemessene hohe hydrodynamische Druck. Bei der IKS mit FSD wird der KSS zwar ebenfalls zu den Seiten des Werkstücks und zur Kontaktzone gefördert, in den Kanälen entsteht bei den untersuchten hohen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten jedoch aufgrund der vergleichsweise geringen Mengen an KSS pro Kanal ein KSS-Luft-Gemisch. Daher herrscht in den Kanälen ein geringer Druck, belegt durch die geringen gemessenen hydrodynamischen Drücke im Schmierpalt bei rein interner Zufuhr; der von der FSD geförderte KSS kann in die Kanäle entweichen (Abbildung 67).

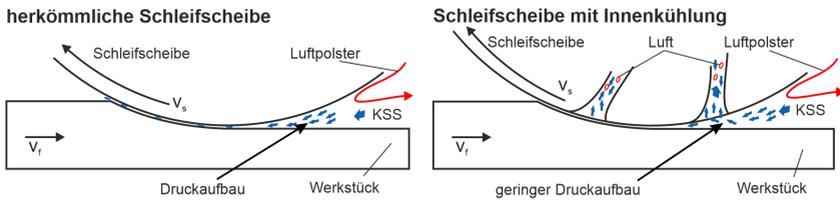


Abbildung 67: Druckverhältnisse im Schleifpalt bei herkömmlicher Kühlung und bei Innenkühlung ³²³

Bei rein interner Zufuhr lagen fast bei allen Parameterkombinationen die geringsten Schnittkräfte und spezifischen Schleifenergien vor. Die größten Schnittkräfte und spezifischen Schleifenergien lagen bei der Kombination aus interner und externer Zufuhr vor. Dies wurde auf eine zusätzliche Anregung durch die externe Zufuhr zurückgeführt. Der in die Kanäle im Bereich des Schmierpaltens gelangende KSS führt zu einer Unwucht aufgrund der ungleichmäßigen Masseverteilung.

Bezüglich der Werkstückrauheiten ergaben sich nur geringe Unterschiede zwischen den drei untersuchten Konfigurationen. In der Tendenz ergaben sich jedoch die höchsten Werte bei rein interner Zufuhr und die geringsten bei der Referenzschleifscheibe. Im Mittel waren die Werte 23 % größer als bei der Referenz und 11 % größer bei der Kombination aus interner und externer Zufuhr.

Deutliche Unterschiede ergaben sich bei der Randzonenbeeinflussung der Werkstücke. Ermittelt wurde die Tiefe der Neuhärtungszonen und der gesamten Randzonenbeeinflussung (Tiefe Neuhärtungs- plus Anlasszonen). Die IKS führte zu den größten Neuhärtungszonen und den größten Tiefen der Randzonenbeeinflussung. Die besten Ergebnisse wurden mit der Referenz-

schleifscheibe erzielt (Abbildung 68). Insbesondere niedrige Vorschubgeschwindigkeiten führten beim Einsatz der IKS zu deutlich größeren Randzonenbeeinflussungen. Niedrige Vorschubgeschwindigkeiten sind mit hohen Wärmeeinwirkzeiten verbunden. Bei ungenügender Kühlung führte dies entsprechend zu größeren Wärmeeindringtiefen, resultierend in die gemessenen größeren Randzonenbeeinflussungen. Zunehmende Vorschubgeschwindigkeiten, also abnehmende Wärmeeinwirkzeiten, führten zur Annäherung der Verläufe der drei Konfigurationen, jedoch weiterhin mit deutlichen Unterschieden untereinander.

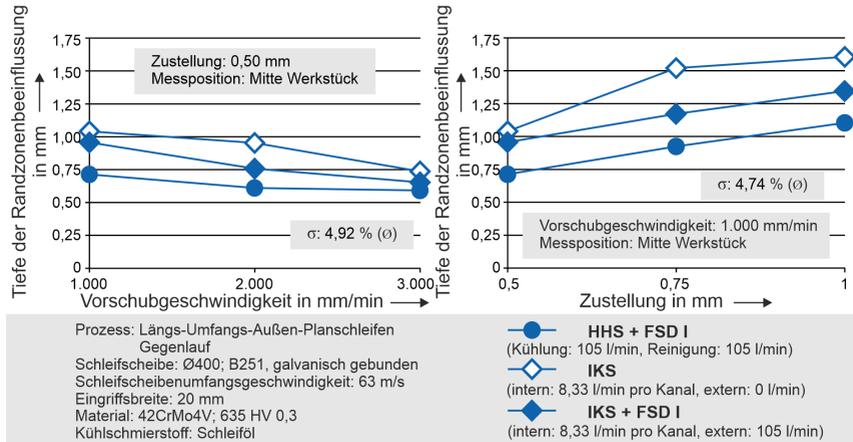


Abbildung 68: Tiefe der Randzonenbeeinflussung bei Innenkühlung mit und ohne zusätzliche externe Kühlung im Vergleich zu einer herkömmlichen Schleifscheibe mit externer Kühlung; nach ³²³

Die schlechte Kühlwirkung der reinen Innenkühlung wurde auf eine ungenügende Versorgung von Kontaktzone und Werkstück mit KSS zurückgeführt. Zum einen bildete sich ein Ölnebel in den Kanälen und zum anderen konnte der KSS zu den nicht im Eingriff befindlichen Kanälen frei abströmen. Der Ölnebel bei geringem Druck führte zu einer Herabsetzung des Siedepunkts des KSS. Dieser wurde überschlägig zu 400 °C berechnet. Die Neuhärtungszonen belegten, dass diese Temperaturen im Kontakt erreicht wurden. Der KSS verdampfte beziehungsweise es kam zum Filmsieden. Die Wärmeabfuhr durch erzwungene Konvektion und das Vermögen des KSS zum Eindringen in den Bereich zwischen zwei Auslässen, in dem das Material abgetragen wird, wurde damit stark reduziert. Der zweite Aspekt, das freie Abströmen des KSS durch die nicht im Eingriff befindlichen Kanäle, führte dazu, dass der KSS genau dort auströme und nicht im Kontakt. Beide Aspekte wurden durch die geringen hydrodynamischen Drücke im Schmierpalt belegt. Die geringen Mengen an KSS, die überhaupt zum Werkstück gelangen können, bei 8,33 l/min pro Kanal ca. 16 l/min bis 25 l/min, führten zu einer ungenügenden Überflutungskühlung, also der Kühlung des Werkstückvolumens außerhalb der Kontaktzone. Dies zeigte sich vor allem in den Versuchen mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 1.000 mm/min und steigender Zustellung. Die Wärmeeinwirkzeiten waren hier konstant, aufgrund der steigenden Zustellung stieg die erzeugte und damit die in das Werkstück eingebrachte Wärmemenge und die Relevanz der Überflutungskühlung zur Abfuhr dieser Wärme nahm zu.

Das schlechtere Einsatzverhalten der IKS mit zusätzlicher externer Zufuhr wurde mit den Unterschieden in der Makrotopographie der Schleifscheiben erklärt. Der KSS staute sich nicht vor der Kontaktzone, sondern gelangte in die mit Ölnebel gefüllten Kanäle (siehe Abbildung 67). Bei der Referenzschleifscheibe herrschte vor der Kontaktzone ein hoher hydrodynamischer Druck, der den Siedepunkt des KSS heraufsetzte und das Mitschleppen von KSS in die Kontaktzone erleichterte. Positiv wirkte sich die zusätzliche Freistrahldüse bei Innenkühlung auf die Überflutungskühlung aus. Gerade bei geringen Wärmeeinwirkzeiten und steigender eingebrachter Wärmemenge wurde eine deutliche Reduzierung der Neuhärtungszonen erreicht.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Innenkühlung im Gegensatz zum Bohren nicht sinnvoll scheint. Beim Schleifen ist der Aufbau eines hohen Drucks an den Kanalausstritten im Schmier-spalt von zentraler Bedeutung, um das Eindringen des KSS in die Kontaktzone zu ermöglichen. Denkbar wären mechatronische Werkzeuge, die den Austritt des KSS auf den Bereich des Kontakts beschränken, um so einen Druckaufbau zu ermöglichen. Angesichts der hohen Kosten und des komplizierten Aufbaus, die hierbei erforderlich wären, ist eine solche Lösung in Frage zu stellen. Die technisch einfachere Lösung im Vergleich zur echten Innenkühlung und hinsichtlich der Ergebnisse auch wesentlich vielversprechendere stellen die im Folgenden vorgestellten Konzepte dar.

Zufuhr über Zwischenräume in der Schleifbelagstopographie

Die Konzepte zur Zufuhr des KSS über Zwischenräume im Belag ähneln sehr segmentierten Schleifscheiben. Der Unterschied besteht darin, dass die Auslegung der Schleifscheibe nicht unter dem Gesichtspunkt einer verbesserten Spanbildung erfolgte, sondern einer optimierten KSS-Zufuhr. Damit ergeben sich Unterschiede in der Gestaltung der Segmente und den Grundkörpern. Die in der Literatur dokumentierten Konzepte unterscheiden sich in der Gestaltung und Funktionsweise erheblich voneinander und werden folgend erläutert.

Die vergleichsweise einfachste Variante findet sich in Arbeiten der School of Mechanical Engineering and Automation aus China^{377, 378, 556}. Sie untersuchten Topfschleifscheiben, die über KSS-Einlässe an der Oberseite des Grundkörpers verfügten und deren Belag segmentiert war (Abbildung 69). Diese Einlässe wurden so gestaltet, dass der KSS nur zur Oberfläche gefördert werden muss und die Schleifscheibe ihn dann durch den aus der Rotation entstehenden Unterdruck einsaugt, da sie wie eine Axialpumpe agiert. Das interessante bei diesen Untersuchungen ist, dass sie das Einsatzverhalten dieser „einsaugenden“ Schleifscheibe mit einer gleich segmentierten Schleifscheibe mit herkömmlicher Zufuhr verglichen. Damit konnten Sie den Effekt der internen Zufuhr unabhängig von der Segmentierung untersuchen. Die Temperaturen konnten dabei um gut die Hälfte reduziert werden und die Vorschubgeschwindigkeiten gesteigert werden. So waren die Temperaturen bei einem Vorschub von 3.000 mm/min identisch zu denen bei 1.000 mm/min bei externer Zufuhr. Außerdem konnte das Schleifverhältnis verdreifacht werden.

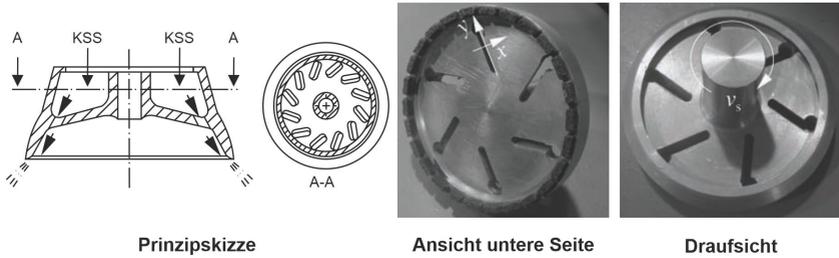


Abbildung 69: Prinzipskizze und Bilder des realen Werkzeugs; nach ⁵⁵⁶ und ³⁷⁸

Eine weitere konstruktiv einfache Variante wurde von Nadolny, Plichta und Al-Obaidi ^{453-455, 457, 456} für das vergleichsweise schwierig mit KSS zu versorgende Innenrundschleifen untersucht. Es wurde ein Spindelbaum verwendet, bei welchem der KSS über eine Hohlspindel zwischen zwei Schleifscheiben über Bohrungen in eine Ringnut gefördert wird (Abbildung 70). Die beiden Schleifscheiben, zwischen denen der KSS austritt, unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und integrieren das Schruppen (grobe Schleifscheibe) und Schlichten (feine Schleifscheibe) in einer Aufspannung.

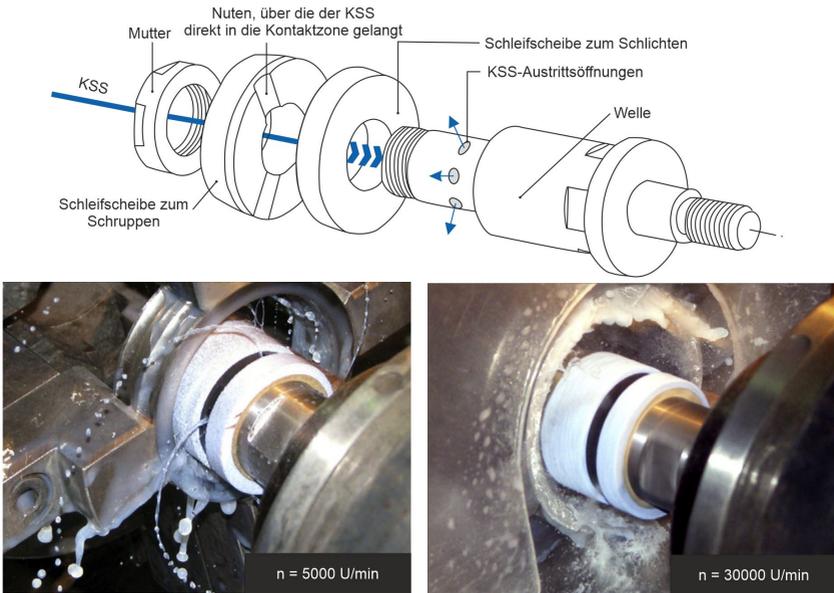


Abbildung 70: Prinzipskizze der internen Zufuhr (oben) und Bilder aus dem Betrieb (unten); nach ⁴⁵³

Weiterhin wurden in einigen Versuchen in die grobe Schleifscheibe Mikrokerben mittels eines Einkornabrichters eingebracht. Das Volumen dieser Mikrokerben betrug $0,198 \text{ mm}^3$ pro mm^2 Schleifscheibenoberfläche. Verglichen wurden Schleifscheiben bei konventioneller Zufuhr ohne und mit Mikrokerben mit interner Zufuhr ohne und mit Mikrokerben (Abbildung 71). Von

links nach rechts ergaben sich deutlich abnehmende Schleifleistungen und leicht abnehmende Werkstückrauheiten. Dies wurde auf eine effizientere KSS-Versorgung und eine bessere Spanabfuhr zurückgeführt.

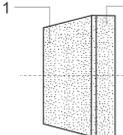
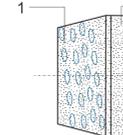
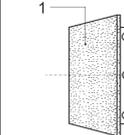
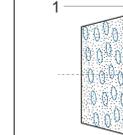
Beschreibung	Schleifscheibe mit Schrupp- und Schlichtbereich	Schleifscheibe mit Schrupp- und Schlichtbereich und zusätzlichen Mikrokerben	Schleifscheibe mit Schrupp- und Schlichtbereich und Innenkühlung	Schleifscheibe mit Schrupp- und Schlichtbereich und zusätzlichen Mikrokerben und Innenkühlung
Prinzipskizze				
Abnehmende Rauheit und abnehmende Schleifleistung 				
1: Schruppschleifscheibe; 2: Schlichtschleifscheibe				

Abbildung 71: Verschiedenen untersuchte Modifikationen; nach ⁴⁵⁴

Tawakoli entwickelte für das in Kapitel 4.2.1 beschriebene T-Tool Profil einen Zufuhrapparat, bei dem der KSS in eine umlaufende Ringnut gefördert wurde ^{613, 612}. Über Bohrungen in dieser Ringnut gelangt der KSS aufgrund der Fliehkraft zwischen die Segmente direkt in die Kontaktzone (Abbildung 72). Bei recht moderaten bezogenen Zeitspannvolumina bis maximal $3,33 \text{ mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ und Schnittgeschwindigkeiten von 80 m/s bis 140 m/s konnte bei einer KSS-Zufuhr von lediglich 9 l/min ein stabiler Prozess mit geringen Schnittkräften ohne thermische Schädigung erreicht werden.

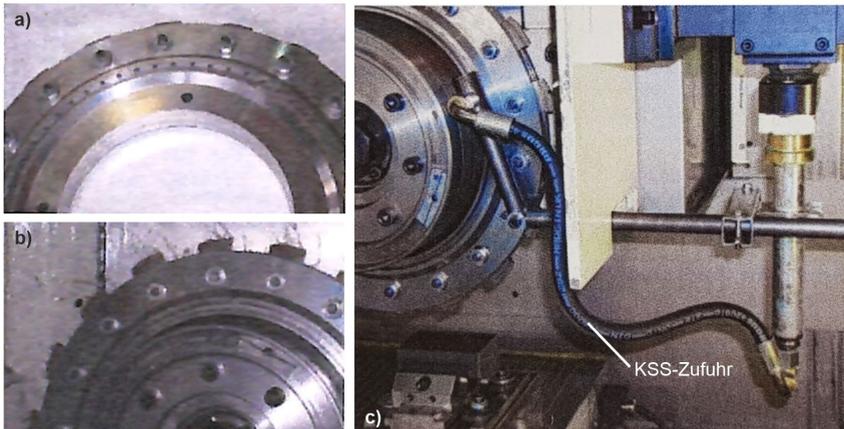


Abbildung 72: a) T-Tool Schleifscheibe b) Schleifscheibe montiert mit Flansch c) KSS-Zufuhrapparat; nach ⁶¹²

Der wohl bekannteste und vielzitierteste Vertreter einer Zufuhr des KSS zwischen Segmente geht auf Arbeiten des Mechanical Engineering Laboratory in Japan in den frühen 90er Jahren zurück ^{517, 600, 601} und wurde an der School of Aerospace in Australien von Nguyen und Zhang

weiterentwickelt⁴⁶⁵⁻⁴⁶⁸. Die Schleifscheibe ähnelt einem Zahnrad mit steilen Flanken, der KSS wird in eine umlaufende Ringnut gefördert und tritt über in den Grundkörper eingebrachte Düsen am Schleifscheibenumfang aus (Abbildung 73). In den frühen Arbeiten von Suto et al. wurde der KSS mittels konventioneller Düsen an die Ringnut gefördert; in den späteren Arbeiten von Nguyen und Zhang über eine spezielle Vorrichtung, womit der Austritt des KSS auf einen engeren Bereich begrenzt wurde, und der KSS damit gezielter genutzt werden kann (Abbildung 73 oben rechts und unten).

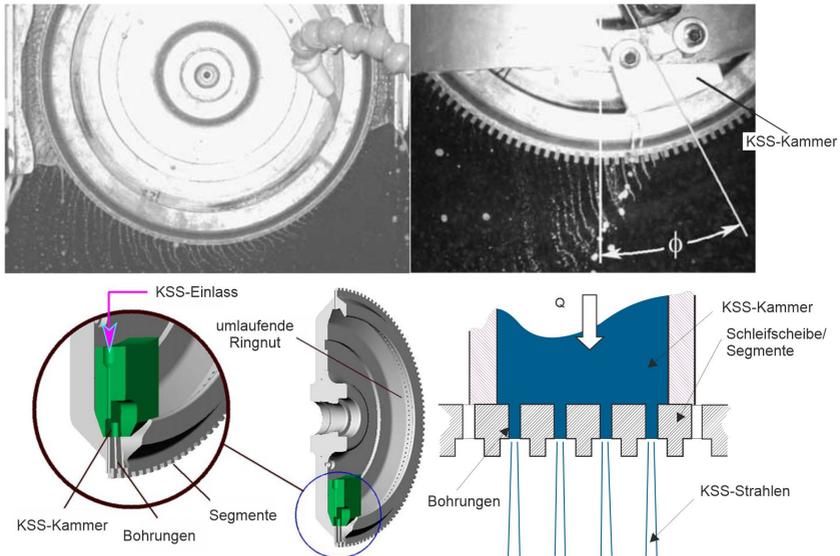


Abbildung 73: Einfache Zufuhr über externe Düse (oben links); auf einen schmaleren Bereich begrenzte Zufuhr mittels Zufuhrapparat (oben rechts, Prinzipskizzen unten); nach⁴⁶⁶ und⁴⁶⁷

Beim Vergleich bei einer internen KSS-Zufuhr von 4,8 l/min zu einer herkömmlichen Schleifscheibe bei externer Zufuhr, ebenfalls mit 4,8 l/min, ergaben sich bei einer Schnittgeschwindigkeit von 23 m/s, einer Vorschubgeschwindigkeit von 400 mm/min und Schnitttiefen von 10 bis 50 μm geringere Kräfte und spezifische Energien bei Innenkühlung; bei 45 μm Zustellung kam es bei externer Zufuhr gar zum Schleifbrand. Die Steigerung des KSS-Volumenstroms bei externer KSS-Zufuhr auf 14,5 l/min verhinderte Schleifbrand und führte zu geringeren Kräften und Energien, jedoch waren diese weiterhin höher als bei interner Zufuhr. Dies wurde auf eine effektivere Kühlung und einem geringeren Anteil an Reiben und Pflügen bei der Spanbildung zurückgeführt (der Effekt der effizienteren Spanbildung bei segmentierten Schleifscheiben wurde ausführlich in Abschnitt 4.2.1 beschrieben). Bestätigt wurden diese Überlegungen durch den Vergleich der Eigenspannungsverläufe zwischen interner Zufuhr bei 4,8 l/min und externer bei 14,5 l/min: die höheren spezifischen Energien bei externer Zufuhr beziehungsweise der höhere Anteil plastischer Verformung führte zu höheren Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich. Aufgrund thermischer Wirkungen gehen diese jedoch rasch in Zugeigenspan-

nungen über. Die geringeren Druckeigenspannungen bei interner Zufuhr konnten aufgrund geringerer thermischer Einwirkungen in eine größere Tiefe des Werkstücks eingebracht werden und es lagen über den gesamten Messbereich von 325 μm nur geringste Zugeigenspannungen vor.⁴⁶⁵

Weitere Arbeiten finden sich von Sun et al. und Fu et al., die von den Arbeiten von Suto et al. inspiriert wurden und nach eigenen Angaben eine ähnlich geformte Schleifscheibe verwendeten, jedoch zum Ziel hatten, deutlich höhere KSS-Austrittsgeschwindigkeiten zu erreichen^{201, 596}. Sie untersuchen aufwendig gestaltete Schleifscheiben, bei der der KSS über eine Hohlspindel in eine Kammer gefördert wurde und von dort an KSS-Düsen zwischen dem Belag gelangte. Die Schnittgeschwindigkeit war auf 20 m/s beschränkt. Bei Konzept A konnte der KSS auf dem gesamten Umfang frei ausströmen, bei Konzept B wurde die Zufuhr auf die im Eingriff befindlichen Kanäle begrenzt. Die KSS-Austrittsgeschwindigkeit konnte so für das zweite Konzept von 15 m/s auf 110 m/s gesteigert werden. Bei der Zerspanung einer TC4 Titanlegierung konnte die maximale Zustellung, ab der es zum Schleifbrand kam, im Vergleich zur externen Zufuhr über Düsen bei Konzept A von 1 mm auf 1,5 mm erhöht werden. Bei Konzept B kam es bis 2,5 mm nicht zu Schleifbrand. Ebenso konnten die „Schleiftemperaturen“ (*Anmerkung: genauer Ort der Messung wurde nicht spezifiziert*) reduziert werden. Bei einer Zustellung von 1,2 mm von 800 °C bei konventioneller externer Zufuhr auf rund 110 °C bei Konzept A und etwa 65 °C bei Konzept B. Bei 1,5 mm Zustellung stieg die Temperatur bei Konzept A auf ca. 550 °C, bei Konzept B lediglich auf 100 °C. Die Komplexität des Aufbaus dieser Konzepte kann den Zeichnungen in Abbildung 74 entnommen werden.

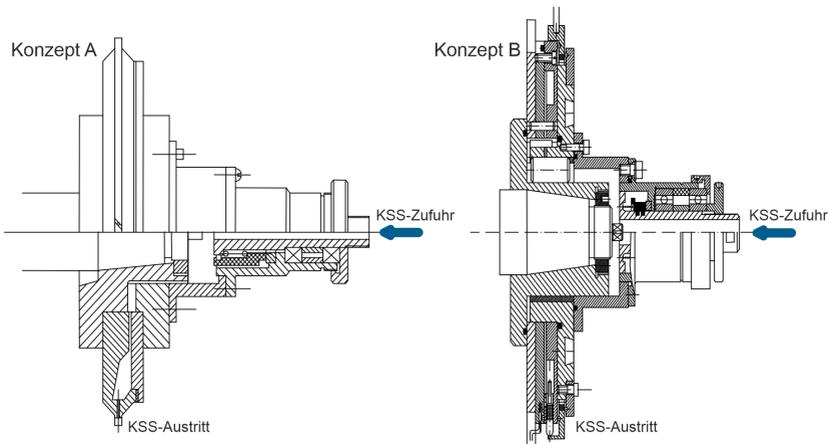


Abbildung 74: Zwei Konzepte zur Zufuhr des KSS über Zwischenräume im Schleifbelag, Konzept A mit freiem Austritt am gesamten Umfang, Konzept B mit auf einen kleinen Bereich begrenzten Austritt; nach²⁰¹

Peng et al. stellten eine Schleifscheibe vor, bei welcher der KSS unter Druck zu Bohrungen am Schleifbelag gefördert wurde⁵⁰³. Dieses Konzept zeichnet sich durch mehrere Besonderheiten aus. Die Auslegung der Bohrungsdurchmesser und des anzulegenden Drucks erfolgte mit Hilfe von CFD-Simulationen; die simulationsgestützt optimierte Konfiguration wurde anhand eines 3D-gedruckten Prototyps aus Polytetrafluorethylen validiert; der Schleifbelag war nicht

stochastisch, sondern definiert gesetzt. Die prototypisch ausgelegte Schleifscheibe verfügte über 18 Bohrungen mit einem Durchmesser von 2 mm, die symmetrisch auf der Unterseite der Topfschleifscheibe ($D=150$ mm) verteilt waren (Abbildung 75). Das Kornsetzmuster wurde ebenfalls simulationsgestützt ausgelegt und ein Muster mit einem Abstand von Korn zu Korn von 1 mm in horizontaler und 0,2 mm in vertikaler Richtung bei einer Korngröße von 160 μm bis 200 μm gewählt. Die Schleifscheibe wurde bei interner und bei externer Zufuhr beim Schleifen einer Nickelbasislegierung untersucht. Bei interner Zufuhr konnten geringere Werkstücktemperaturen, geringere Rauheiten und bessere optisch bewertete Oberflächenmorphologien als bei externer Zufuhr erreicht werden. Bei Steigerung des Zufuhrdrucks des KSS ergaben sich sowohl für die interne als auch für die externe Zufuhr bessere Ergebnisse.⁵⁰³

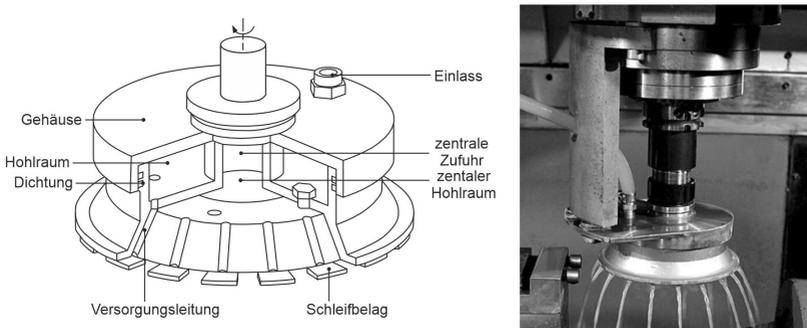


Abbildung 75: Prinzipskizze (links) und reales Werkzeug ohne Rotation (rechts); nach⁵⁰³

Die Ergebnisse zeigen, dass Schleifscheiben mit Zufuhr des KSS über Zwischenräume im Schleifbelag die sinnvollere Alternative zu rein interner Zufuhr darstellen. Sie sind technologisch weniger aufwendig und es konnten auch in mehr Fällen positive Ergebnisse erzielt werden. Es bleibt jedoch fraglich, ob der technologische Aufwand tatsächlich gerechtfertigt ist. Vergleiche zur externen Zufuhr mit optimalen Düsenparametern würden hierüber Aufschluss geben.

Zufuhr über Nuten im Schleifbelag mittels herkömmlicher Düsen

Ein weiteres Konzept zur Verbesserung der KSS-Zufuhr, welches sich nicht eindeutig in die vorgestellten Kategorien einordnen lässt, wurde am FBK der TU Kaiserslautern entwickelt^{30, 322, 323, 325}. Den Entwicklungen lag eine einfache Frage zugrunde: wie kann die Menge an KSS in der Kontaktzone erhöht werden und gleichzeitig ein hoher hydrodynamischer Druck gewährleistet werden? Diese Überlegungen gingen auf die Ergebnisse zum Einsatz der innengekühlten Schleifscheibe zurück, die weiter oben in diesem Abschnitt erläutert wurden, und auch auf Untersuchungen zu verschiedenen Freistrah- und Schuhdüsen bei unterschiedlichen Volumenströmen (siehe hierzu³²⁸). Diese Ergebnisse zeigten, dass hohe in die Kontaktzone eingebrachte Mengen an KSS im Vergleich zu hohen Überflutungsmengen bezüglich der Reduktion resultierender Randzonenschädigungen maßgebend sind, der KSS dabei jedoch unter einem ausreichend hohen Druck stehen muss, da es sonst zum Verdampfen und einem schlechten Wärmeübergang kommen kann. Die Lösung bestand im Einbringen von Nuten auf den Grundkörper einer galvanisch belegten cBN-Schleifscheibe, deren Tiefe geringgehalten wurde und die auf

die Werkstückbreite begrenzt waren, um ein Entweichen des KSS aus der Kontaktzone heraus zu verhindern.

Die benötigte Anzahl an Nuten und deren Volumen wurde mit der Anforderung berechnet, dass 5 l/min bis 10 l/min in die Kontaktzone gefördert werden sollen. Diese Menge wiederum ging auf Überlegungen zurück, wie viel Öl für eine vollständige Wärmeabfuhr bei einer eingebrachten Wärmemenge von 10 kW notwendig ist. Entsprechend wurden 70 Nuten jeweils um 0,25 mm überlappend bezogen auf die Mittelachse der Schleifscheibe angeordnet, um eine möglichst gleichmäßige Kornkonzentration quer zu dieser Achse zu erreichen (Abbildung 76). Mit einer Höhe von 9 mm, einer Breite von 3 mm und einer Tiefe von 4 mm (durch die Herstellung mittels eines Kugelfräasers ergab sich eine abgerundete Form) ergab sich rechnerisch bei der untersuchten Schnittgeschwindigkeit von 63 m/s ein durch die Nuten in die Kontaktzone geförderter KSS-Volumenstrom von 11,23 l/min.

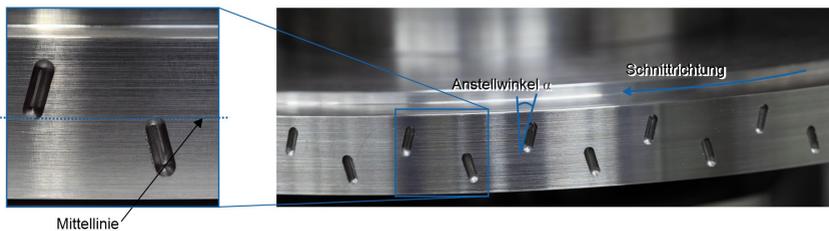
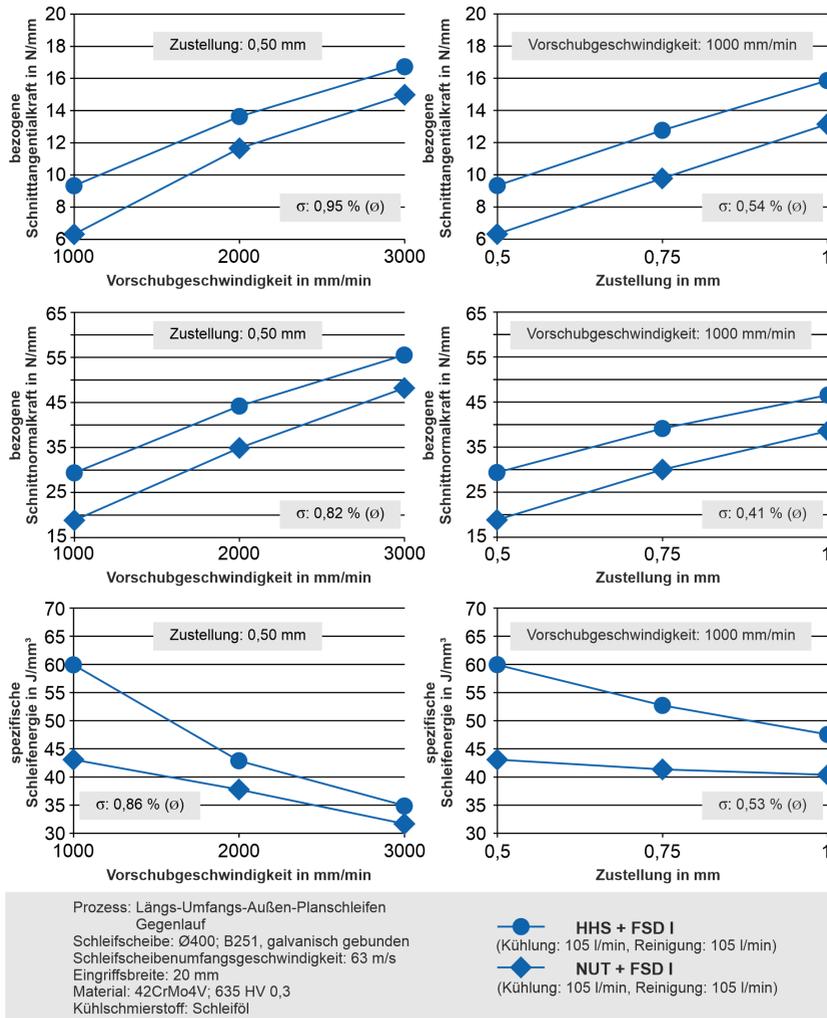


Abbildung 76: Anordnung der Nuten im Schleifscheiben-Grundkörper³²³

Diese Schleifscheibe wurde mit einer herkömmlichen gleichen Belags verglichen, wobei die Kühlbedingungen identisch gewählt wurden. Eine Reinigungsdüse und eine Freistrahldüse wurden mit den gleichen Volumenströmen (jeweils 105 l/min) und der gleichen Positionierung verwendet. Werkstücke aus vergütetem 42CrMo4V (55 ± 2 HRC) mit einer Breite von 20 mm wurde plangeschliffen. Die Werkstücke wurden zu den Schleifscheiben axial zentriert. Die Nuten deckten eine Breite von 17,5 mm ab, somit wurden diese durch die Werkstücke verschlossen. Der resultierende hydrodynamische Druck im Schmierpalt war geringer als bei der Referenzschleifscheibe. Dies kann auf den Druckverlust durch das Befüllen der Nuten zurückgeführt werden. Im Vergleich zur Innenkühlung konnten mit 14 bar jedoch hohe Drücke erreicht werden. Bei den Schnittkräften und auch bei den spezifischen Energien konnten deutlich geringere Beträge mit der genuteten Schleifscheibe erreicht werden. Die Beträge sind bei der genuteten Schleifscheibe 9 % bis 35 % geringer, im Schnitt 19 %. Die höchsten Reduzierungen liegen bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten (große Wärmeeinwirkzeiten) vor. Diese Reduzierungen können teilweise auf die mit den Nuten einhergehende Belagsreduzierung zurückgeführt werden. Damit ergeben sich eine geringere Anzahl aktiver und kinematischer Schneiden, auf die bei segmentierten Schleifscheiben abgezielt wird (vergleiche Abschnitt 4.2.1). Bezogen auf den Eingriffsbereich betrug die Belagsreduzierung jedoch lediglich 7 %, womit die deutlich höhere Reduzierung in den Prozessgrößen nicht allein begründet werden konnte. Dies wurde auch durch die nahezu identische Werkstückrauheit bestätigt. Vielmehr ist von einer Verbesserung der Schmier- und Abtragsbedingungen aufgrund einer verbesserten Versorgung mit KSS auszugehen. Dies wurde durch die Ergebnisse zur Randzonenbeeinflussung bestätigt (Abbil-

dung 77). Der über die Nuten zusätzlich in die Kontaktzone eingebrachte KSS führte zu deutlichen Reduzierungen der Randzonenbeeinflussung in der Mitte und den Randbereichen der Werkstücke; Neuhärtungszonen konnten komplett vermieden werden. Im Bereich der Mitten der Werkstücke, in welchem der Kontaktzonenvolumenstrom für die Kühlung im Vergleich zur Überflutungswirkung dominiert, konnten bis auf die Parameterkombination mit maximalem Vorschub, also minimaler Wärmeeinwirkzeit, Randzonenbeeinflussungen komplett vermieden werden. Bei der Betrachtung der Randzonenbeeinflussung in den Randbereichen der Werkstücke fällt auf, dass sich die Werte der beiden Schleifscheiben mit steigender Vorschubgeschwindigkeit einander annäherten, wobei die Werte bei der genuteten weiterhin geringer ausfielen und Neuhärtungszonen komplett vermieden werden konnten. Die steigende Randzonenbeeinflussung in den Randbereichen und bei steigender Vorschubgeschwindigkeit ist auf zwei Sachverhalte zurückzuführen. Zunächst war auch in den Randbereichen beziehungsweise an den Seiten der Werkstücke nicht mehr KSS vorhanden, die Überflutungswirkung war aufgrund identischer Düsenkonfigurationen identisch. Weiterhin geht mit steigender Vorschubgeschwindigkeit eine geringere Prozesszeit einher und das Vermögen des KSS, die Prozesswärme abzuführen, sinkt.

Dennoch konnte insgesamt durch den über die Nuten zusätzlich eingebrachten KSS ein optimierter Prozess erreicht werden. Der konstruktive Aufwand für diese Spezialschleifscheibe beschränkt sich auf einen zusätzlichen, fräsenden Bearbeitungsschritt bei der Grundkörperherstellung.

Abbildung 77: Vergleich der Randzonenbeeinflussung von konventioneller und genuteter Schleifscheibe; nach ³²³

4.2.4 Schleifscheiben für die Strukturierung von Oberflächen

Die Strukturierung von Oberflächen ist ein intensiv beforschtes Thema. Basierend zum Beispiel auf Vorbildern aus der Natur ⁴¹⁵ wie etwa die Haut eines Hais, Lotusblüten oder Gecko-Füßen, werden Oberflächen strukturiert, um Verbesserungen beim Bauteileinsatz oder funktionale Systeme zu erhalten. Bereits etablierte industrielle Anwendungen sind die Verbesserung des Übertragungsverhaltens (Wärmeübertragung) sowie Mikrofluidiken und Bio-Diagnosegeräte (Blutdiagnose, Elektrophoresesysteme) ¹⁰⁵. Die eingängigste und ebenfalls viel untersuchte Anwen-

dung strukturierter Oberflächen ist die Verbesserung des Reib- und Schmierverhaltens gleitender Oberflächen¹⁴⁴. Durch die Strukturen wird die Menge an Schmiermittel im Kontakt erhöht und der Reibverschleiß reduziert. Nicht zuletzt aufgrund steigender Leistungsdichten technischer Systeme sind solche Strukturen immer wichtiger für einen störungsfreien Einsatz von Tribosystemen¹⁵⁹.

Aufgrund der meist geringen Dimensionen der Strukturen ist deren Fertigung traditionell ein Gebiet der Mikrostrukturtechnik. Häufig verwendete abtragende Verfahren sind Mikroschleifen mit kleinsten Werkzeugen (siehe zum Beispiel¹³⁶) oder mit Dicing-Blades (siehe zum Beispiel¹⁴⁵), die UP-Bearbeitung mit Diamantschneiden (siehe zum Beispiel⁹⁵) oder die Laserbearbeitung (siehe zum Beispiel¹⁵). All diese klassischen Mikrostrukturierungsverfahren sind mit relativ geringen Abtragsraten beziehungsweise langen Prozesszeiten verbunden und sind teilweise Einschränkungen unterworfen. So ist die UP-Bearbeitung mittels Diamant nicht in Stahlwerkstoffen möglich und die Laserbearbeitung geht häufig mit Randzonenschädigungen einher. Die Mikrostrukturierung mittels Schleifen verspricht die Möglichkeit kurzer Prozesszeiten und die Ausweitung des Materialspektrums. So stellten Uhlmann et al.^{650, 651} einen kinematisch modulierten Schleifprozess zur Oberflächenstrukturierung vor. Auf einer 5-Achs-Maschine wurde die Schleifscheibe beim Außenrund-Einsteichschleifen von Zahnrädern und Wälzlagern zusätzlich zu den üblichen Bewegungen quer zur Vorschubrichtung mit geringer Frequenz im einstelligen Herzbereich angeregt. Durch diese Überlagerung wurde anstelle der üblichen, in Vorschubrichtung gerichteten Schleifriefen, eine wellenförmige Struktur geschliffen (Abbildung 78). Diese Strukturen in Hartmetall wiesen bessere Eigenschaften hinsichtlich profilhafter Rauheitsparameter und Reibkoeffizienten auf⁶⁵⁰.

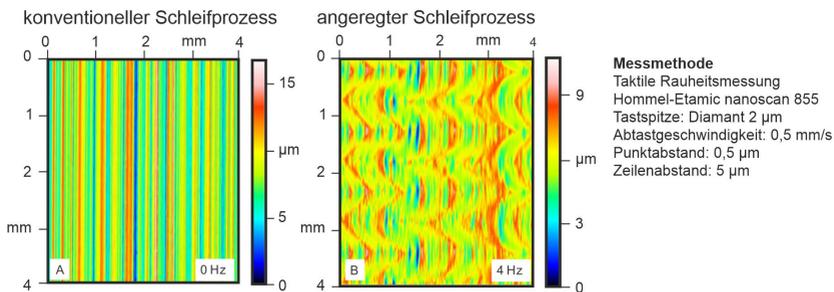
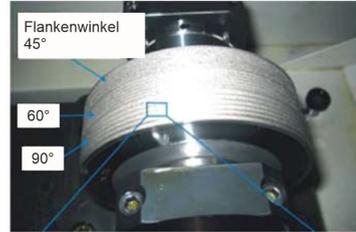
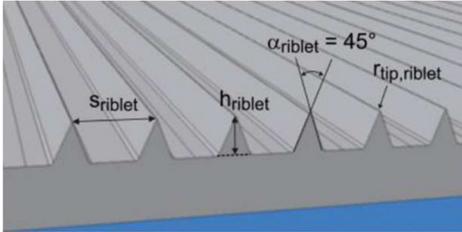


Abbildung 78: Vergleich einer konventionell geschliffenen Oberfläche und einer mittels Anregung geschliffenen Oberfläche; nach⁶⁵¹

Die mit dieser Methode herstellbaren Strukturen sind jedoch sehr speziell und in ihrer Geometrie stark eingeschränkt. In der Literatur finden sich einige wenige Arbeiten zu Spezialschleifscheiben zur Mikrostrukturierung, die ein breiteres Spektrum herstellbarer Geometrien aufweisen. Da die Werkzeuge und deren Möglichkeiten sich erheblich voneinander unterscheiden, werden die verschiedenen Konzepte folgend einzeln vorgestellt. Allen Konzepten gemein ist die Abbildung des Profils der Schleifscheibe auf das Werkstück.

Denkena et al.^{158, 160, 165, 167, 168, 269} entwickelten Profil-Spezialschleifscheiben mittels eines speziellen Abrichtprozesses. Die Schleifscheiben wurden zur Herstellung von Riblets verwendet.

Riblets sind der Haut von Haien nachempfunden und dienen zur Reduktion von Reibung und Turbulenzen luft- oder flüssigkeitsbestömter Bauteile wie Rotorblättern von Turbinen oder der Außenhaut von Fluggeräten^{373, 471, 602, 672}. Je nach Anwendung sind diese Riblets unterschiedlich zu dimensionieren, wobei die Breite eines solchen Riblets etwa im Bereich von 100 μm liegt und deren Höhe etwa der Hälfte dessen (Abbildung 79 links). Weiterhin haben Untersuchungen gezeigt, dass die Abstumpfung der Spitzen der Riblets zu einem deutlich verminderten Effekt der Turbulenzreduzierung führt.



Ideale Riblet Geometrien für industrielle Anwendungen

Riblet Breite:	s_{riblet}
Riblet Höhe:	h_{riblet}
Riblet Spitzenwinkel:	$\alpha_{\text{riblet}} = 45^\circ$
Riblet Spitzenradius:	$r_{\text{tip,riblet}} = 0,02 s_{\text{riblet}}$
Riblet Aspektverhältnisse	$a_{\text{riblet}} = h_{\text{riblet}} / s_{\text{riblet}} = 0,5$

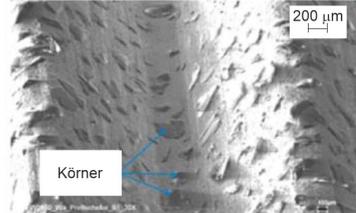


Abbildung 79: Nomenklatur und Angaben zu einer Riblet-Geometrie (links), Abrichtrolle zur Herstellung profilierter Schleifscheiben zur Herstellung von Riblet-Geometrien (rechts); nach¹⁶⁵ und¹⁶⁷

Es ergeben sich also hohe Anforderungen an die Genauigkeit bei der Herstellung der Riblet-Strukturen. Um das Schleifen als wesentlich effizienteres Verfahren als die in der Einleitung dieses Abschnitts genannten Verfahren für diese Aufgabe einsetzen zu können, wurde ein spezieller Abrichtprozess mit einer Diamantprofilrolle (Abbildung 79 rechts) entwickelt, um effizient und hochgenau die Ribletstrukturen im Negativ auf der keramisch gebundenen Schleifscheibe abzubilden. Die hergestellten Riblets wiesen zwar eine starke Gratbildung an den Spitzen auf, die Grate konnten jedoch durch ein zusätzliches Ausfunken fast vollständig abgetragen werden; die erreichten Spitzenradien lagen bei etwa 1 μm , Ribletbreiten von 60 μm bis 120 μm konnten in hoher Qualität hergestellt werden. Die schleifend hergestellten Riblets führten zu einer Reduktion der Reibung von etwa 4 %. Um die Qualität der Riblets zu gewährleisten, muss die Schleifscheibe regelmäßig abgerichtet werden. Um diesen zeit- und kostenintensiven Schritt zu reduzieren, entwickelten sie in einer jüngeren Veröffentlichung eine selbstschärfende Schleifscheibe, die nach dem Prinzip von Biber- beziehungsweise Rattenzähnen funktioniert. Diese schärfen sich selbst, da sie über einen weichen und harten Schmelz verfügen; bei Benutzung wird der weiche Schmelz abgetragen und exponiert damit den härteren, dünnen Schmelz, der Zahn bleibt damit scharf. Die Schleifscheibe wurde aus mehreren Lagen aufgebaut, um diesen Effekt zu erreichen. Die Lagen sind einerseits aus weichem Material und andererseits aus

dem abrasivem Material. Mit diesem Konzept konnten Riblets mit einer Höhe von $50\ \mu\text{m}$ hergestellt werden, bei einer Reduzierung der Abrichtzeiten um 95% .^{158, 160, 165, 167, 168, 269}

Wu et al. erweiterten das in Abschnitt 4.2.2 vorgestellte Schleifscheibenkonzept zur Zerspaltung sprödharter Werkstoffe im duktilen Modus, um Oberflächen zu strukturieren⁷⁰². Sie verwendeten erneut einen Nanosekundenlaser, um die Diamanten auf der Schleifscheibe abzurichten. Konkret laserten sie Gräben in den Schleifscheibenumfang, wobei die Körner zuvor, ebenfalls mittels Laser, auf einen einheitlichen Kornüberstand abgeflacht wurden. Die Breite der Gräben betrug $100\ \mu\text{m}$, deren Tiefe $5\ \mu\text{m}$ bis $30\ \mu\text{m}$ und die Breite der übrig gebliebenen Abrasivstege $200\ \mu\text{m}$. Entsprechend konnten Stege mit einer Breite von $100\ \mu\text{m}$ oder, durch Drehen des Werkstücks um 90° in einem zweiten Durchgang, Vierecke mit einer Kantenlänge von $100\ \mu\text{m}$ in WC und BK7 Borosilikat-Kronglas bei Formabweichungen kleiner 3% geschliffen werden (Abbildung 80). Die optische Bewertung und die erzielten Rauheiten von $R_a=20\ \text{nm}$ belegen das Erreichen des duktilen Modus.

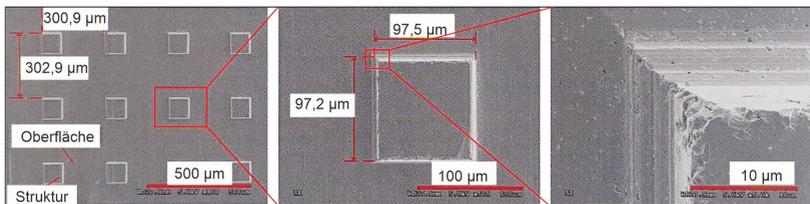


Abbildung 80: In WC geschliffene Strukturen; nach⁷⁰²

Stepien untersuchte die Möglichkeiten helixförmig abgerichteter Schleifscheiben^{588–592}. Die Helixstruktur wurde mittels eines Abrichtprozesses in konventionelle, keramisch gebundene Korundschleifscheiben eingebracht; dabei wurden einzelhelixförmige und doppelhelixförmige Spezialwerkzeuge untersucht. Die Strukturierung erfolgt zweistufig. Zunächst wird die Oberfläche des Werkstücks mit der Spezialschleifscheibe unter üblichen Bedingungen geschliffen. Durch die Helixstruktur ist dabei ein reduzierter Belagsanteil an der Zerspaltung beteiligt, ähnlich wie bei segmentierten Schleifscheiben (vergleiche Abschnitt 4.2.1). Der zweite Schritt, die eigentliche Strukturierung, wird bei erhöhten Vorschubgeschwindigkeiten beziehungsweise bei geringen, dem Schleifen unüblichen Geschwindigkeitsverhältnissen von Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit zu Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt. Damit wird das Schleifscheibenprofil im Werkstück abgebildet. Die geringen Geschwindigkeitsverhältnisse sind notwendig, um die Überlagerung durch mehrere Schleifscheibenumdrehungen zu verhindern, womit man wieder eine übliche, stochastisch geprägte geschliffene Oberfläche erhalten würde. Die mögliche Geometrievielfalt an Strukturen ist zwar durch die Gestaltung der Helix auf der Schleifscheibe beschränkt, durch mehrmaliges Überfahren des Werkstücks bei der Strukturierung, entweder versetzt zum vorherigen Überlauf oder durch Richtungsumkehr, können jedoch auch weitere Strukturen hergestellt werden. Abbildung 81 zeigt Strukturen, die mit einzelhelixförmigen Spezialschleifscheiben bei einem (a) und bei zwei (b) Überläufen hergestellt werden können, sowie eine mit Doppelhelixform generierte Struktur (c). Somit ergeben sich auf dem Werkstück Oberflächenbereiche, deren Charakteristika herkömmlich geschliffenen ent-

sprechen, also stochastisch geprägt sind, und die strukturierten Bereiche, die eher deterministischer Natur sind. Untersuchungen dieser deterministischen Strukturen zeigen, dass die strukturierten Bereiche beziehungsweise deren Oberflächenprofil höheren Schwankungen unterworfen sind als die stochastisch geprägten. Dies ist auf Unterschiede in den Kornformen zurückzuführen, die im Werkstück abgebildet werden, was anhand kinematischer Simulationen bestätigt wurde.

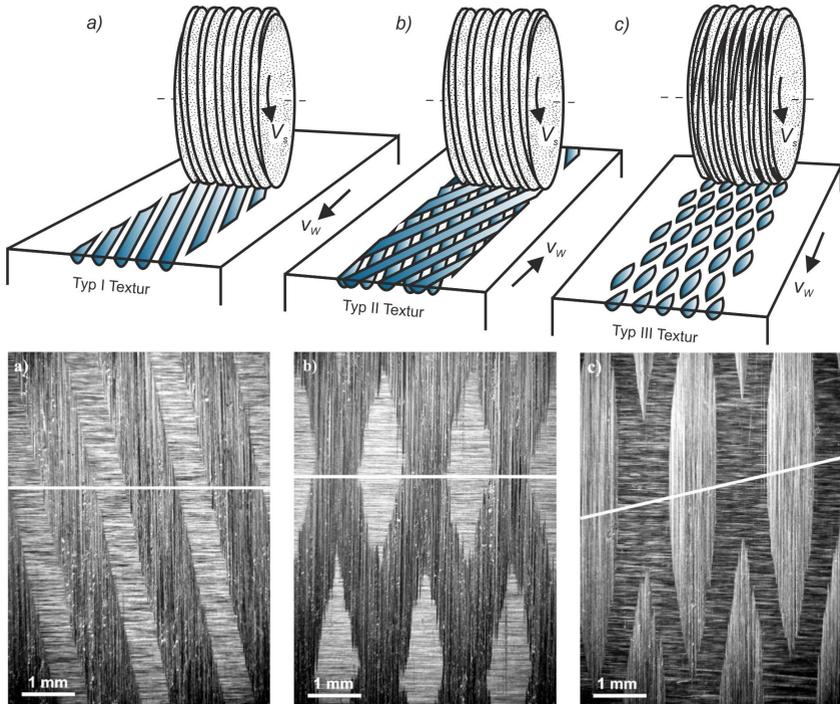


Abbildung 81: Prinzipskizzen der Prozesse und der Kinematik (oben) und Bilder geschliffener Strukturen (unten); nach ⁵⁹²

Oliveira et al. und da Silva et al. entwickelten einen flexiblen Abrichtprozess zur Herstellung von Spezialschleifscheiben, mit denen fast beliebige Muster beim Außenrundscheifen hergestellt werden können ^{66, 367, 482, 566–568}. Das Prinzip dieser Spezialschleifscheiben ist ähnlich dem vorher vorgestellten Konzept: die Schleifscheibe wird profiliert und im Prozess wird das Profil der Schleifscheibe auf das Werkstück übertragen. Die Profilierung wird mittels eines Einkornabrichters durchgeführt. Der Abrichter wird mit einem Hub von $5\ \mu\text{m}$ bis $25\ \mu\text{m}$ über einen Piezoaktor angeregt und generiert so das gewünschte Profil. Die Steuerungsdaten werden mit Hilfe einer selbstentwickelten Software generiert, deren Eingangsdaten die gewünschte Struktur, die Geometrie des Abrichtdiamanten und die Abrichtparameter Schnittgeschwindigkeit und Überdeckungsgrad sind. Die gewünschte Struktur kann sogar in Form eines Schwarzweißbildes vorgegeben werden (Abbildung 82 links). Der Abrichtprozess wird mit Hilfe eines in separaten

Arbeiten entwickelten Sensorkonzepts über Körperschall überwacht und visualisiert^{483, 484}. Die Übertragung des Schleifscheibenprofils auf das Werkstück wird durch das Einstellen ganzzahliger Geschwindigkeitsverhältnisse beim Außenrundschleifen erreicht. Das Geschwindigkeitsverhältnis entscheidet über die Skalierung der Strukturen. Höhere Geschwindigkeitsverhältnisse führen zu einer Vergrößerung der Abbildung der Strukturen in Umfangsrichtung (Abbildung 82 rechts). Die Dimensionen der Struktur in Axialrichtung können im Prozess nicht beeinflusst werden. Durch die ganzzahligen Geschwindigkeitsverhältnisse findet die Übertragung der Struktur der Schleifscheibe auf das Werkstück quasi in einem formgebenden Prozess statt. Gewöhnlich werden beim Außenrundschleifen ganzzahlige Geschwindigkeitsverhältnisse vermieden, da hierbei Rundlauffehler und Unwuchten im Prozess auf das Werkstück übertragen werden. Durch ungerade Geschwindigkeitsverhältnisse werden diese durch die Glättung der Hüllkurve und damit des Werkstücks kompensiert. Für diesen Spezialprozess würden dabei jedoch anstelle der Strukturen übliche, stochastisch geprägte Schliiffbilder entstehen. Somit ergeben sich erhöhte Anforderungen an das Aufspannen und Abrichten der Schleifscheibe bei diesem Konzept. Die seit 2012 bestehende Kooperation mit Thyssen Krupp zur Herstellung tribologisch optimierter Kurbelwellen zeigt jedoch, dass diese Anwendung industriell einsetzbar ist.

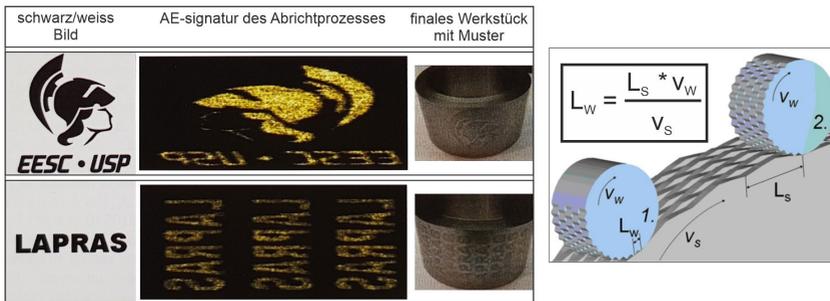


Abbildung 82: Möglichkeiten der Strukturen (links) und Prinzip der Übertragung der Strukturen auf das Werkstück in Abhängigkeit der Geschwindigkeiten (rechts); nach⁴⁸² und⁶⁶

Zuletzt wurde ein Konzept zur Herstellung von mikrostrukturierten Oberflächen mittels Schleifen am FBK der TU Kaiserslautern entwickelt^{66, 324, 326, 327, 567}. Hierbei wurde die bereits in Abschnitt 4.2.1 vorgestellte Schleifscheibe mit definiertem Kornsetzmuster weiterentwickelt. Durch die Kenntnis der Position jedes einzelnen Kornes in Verbindung mit der Kontrolle der Prozesskinematik (Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit, Werkstückgeschwindigkeit, Zustellung) kann der Materialabtrag jedes einzelnen Kornes analytisch vorhergesagt werden. Dies ermöglicht die Erzeugung deterministischer Strukturen auf Oberflächen. Die Strukturen setzen sich aus den Ritzspuren der Einzelkörner zusammen, es handelt sich also um eine Ansammlung von Einkornritzen. Die Breite und das Profil eines Ritzes sind durch das jeweilige sie erzeugende Korn vorgegeben, die Länge und Anordnung der Ritze durch die Wahl der Kinematik. Mit der Wahl des Setzmusters ergeben sich somit gewisse Beschränkungen in der möglichen Strukturvielfalt, die Ergebnisse zeigen jedoch, dass durch die Variation der Kinematik auch mit einem einzigen Setzmuster eine große Vielfalt an Strukturen herstellbar ist.

Voraussetzung für die Herstellung der Strukturen ist auch bei diesem Konzept, dass hohe Werkstückgeschwindigkeiten oder geringe Geschwindigkeitsverhältnisse verwendet werden, um ein Überlappen der Ritzspuren zu verhindern, da dies von Nachteil bezüglich der tribologischen Eigenschaften sein kann. Weiterhin ergeben sich durch Unterschiede in den Kornüberständen Abweichungen in der resultierenden Ritztiefe. Um dies zu verhindern, wurde die Schleifscheibe einem Touch-dressing Abrichtprozess mit einer angetriebenen Diamantrolle unterzogen. Bei sehr geringen Abrichtvorschüben und -zustellungen wurde ein einheitlicher Kornüberstand von $50\ \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $3\ \mu\text{m}$ erreicht.

Mit diesen Spezialschleifscheiben wurden Strukturen in unterschiedlichen Materialien hergestellt. Untersucht wurden der niedrig legierte Baustahl 1.0037 (ca. 200 HV 0,3), cp-Titan Grade 2 (cp: commercially pure; ca. 180 HV 0,3) und der Vergütungsstahl 1.7225 (ca. 635 HV 0,3). Der Prozess und die Qualität der Strukturen wurden anhand des Abtrageeffizienzverhältnisses und der mittleren Grathöhe bewertet (siehe Abbildung 83). Das (Abtrags-)Effizienzverhältnis ergibt sich aus dem Verhältnis von erreichter Schnitttiefe (entspricht der Ritztiefe) zur Einzelkornzustellung. Effizienzverhältnisse kleiner eins ergeben sich aus dem elastischen Materialverhalten (Phase I der Spanbildung, siehe Abschnitt 3.1) und plastischen Verformungen (in Phase II und III der Spanbildung). Plastische Verformungen liegen in Form von Materialverdrängungen zu den Seiten des Korns, was zur Bildung von Graten führt, und in Form von Materialfluss unter dem Korn vor. Weiterhin beeinflusst die Steifigkeit des Aufbaus das Effizienzverhältnis. Als Folge der Prozesskräfte kommt es zu Verlagerungen, die die erreichte Ritztiefe reduzieren. Die Ergebnisse zeigen, dass das Effizienzverhältnis umso höher ist, je weicher das Material ist. Dies ist auf sinkende Fließgrenzen und damit geringere Schnitttensatztiefen zurückzuführen. Die resultierende mittlere Grathöhe verhält sich genau umgekehrt. Während bei dem weichen cp-Titan bei einer beispielhaften Struktur mittlere Grathöhen von $6,72\ \mu\text{m}$ bei einer Zustellung von $4\ \mu\text{m}$ vorlagen, konnte bei der gleichen Kinematik kein Grat beim Vergütungsstahl detektiert werden. Dies deckt sich mit frühen Grundlagenversuchen, welche ergaben, dass der Grat umso höher ist, je weicher das Material und je geringer die Schnittgeschwindigkeit ist (siehe hierzu ^{114, 535}).

Trotz der sehr geringen untersuchten Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten kleiner $2\ \text{m/s}$ konnte für den Strukturierungsprozess ein sehr effizienter Materialabtrag erreicht werden. Bei mittleren Ritztiefen ab ca. $3\ \mu\text{m}$ wurden spezifische Energien kleiner $10\ \text{J/mm}^3$ erreicht, wesentlich geringere Werte als beim herkömmlichen Schleifen. Dies konnte auf die vergleichsweise großen Spannungsdicken zurückgeführt werden und darauf, dass es keine Körner gab, die nur Reiben und Pflügen, wie es sonst beim Schleifen der Fall ist.

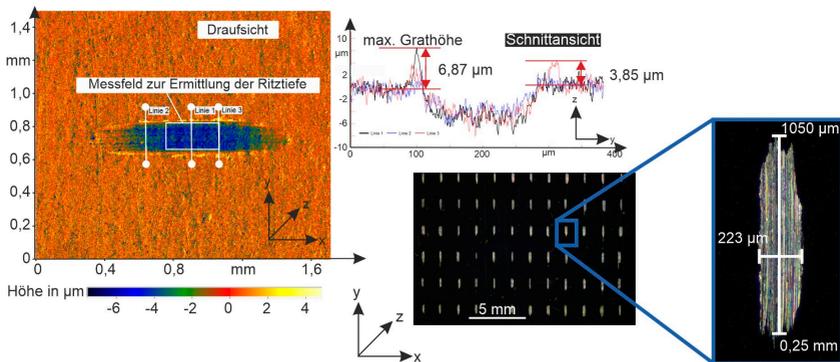


Abbildung 83: Vermessung der Grateigenschaften und der Ritztiefe (oben links) und Ritzmuster und einzelner Ritz (unten rechts); nach ³²⁴

4.2.5 Weitere Spezialentwicklungen

In diesem Abschnitt werden noch einige Schleifscheiben vorgestellt, die sich nicht in die vorherigen Kategorien einordnen lassen.

Schleifscheibe mit passiver Kühlung

Chen und He et al. entwickelten eine Schleifscheibe, deren Grundkörper über eine Art interne Kühlung verfügt ^{132, 247}. Das Prinzip beruht auf Untersuchungen von Judd et al., die eine Hohlspindel mit passiver Kühlung (Wärmerohr) für Antriebsspindeln in Werkzeugmaschinen entwickelten ³⁰², das Prinzip ist aus zahlreichen Anwendungen wie zum Beispiel Spritzgießen oder der PC-Kühlung bekannt, es beruht auf der Kühlung durch Umwandlung der zugeführten Energie in Verdampfungswärme eines Fluids im Rohr und anschließender Kondensation des Fluids und wiederum Verdampfen. Damit das Fluid kondensiert, muss der Dampf Energie an seine Umgebung beziehungsweise das Rohr abgeben; dies kann durch eine externe Kühlung beschleunigt werden.

Der Übertrag auf die Schleifscheibe stellt also eine sich selbst kühlende Schleifscheibe dar; nicht der Prozess wird gekühlt, sondern die Wärmeabfuhr aus dem Prozess über den Schleifbelag und den Grundkörper der Schleifscheibe wird verstärkt. Im Vergleich zu einem Trockenschliff mit konventioneller Schleifscheibe konnten mit dieser Technologie deutlich geringere Werkstücktemperaturen erreicht werden. ^{132, 247}

Schleifscheiben mit Feststoffschmierung

Eine weitere Entwicklung von Spezialschleifscheiben stellen mit Festkühlschmierstoffen imprägnierte Schleifscheiben dar. Festschmierstoffe sind zum Beispiel Molybdänsulfid, Graphit, PTFE, weiche Metalle oder Polymere ^{200, 436}. Die Vorteile von Festschmierstoffen liegen in ihrer hohen Widerstandsfähigkeit, was sie für den Einsatz als Schmierstoffe in Raumfahrtanwendungen ⁴³⁶ oder bei hohen Temperaturen ^{12, 572} befähigt. Sie wurden auch als Kühlschmierstoffe oder als Zugabe in KSS (Nanopartikel) für das Schleifen eingesetzt ^{9, 175, 469, 499, 550}.

Bei den Spezialschleifscheiben wird die Festschmierung entweder als „sandwich“-wheel ausgeführt, bei der die Lücken einer segmentierten Schleifscheibe mit Festschmierstoff gefüllt werden^{422, 551–553} (Abbildung 84), die Festschmierstoffpartikel werden vor dem Pressen und Sintern in die Schleifscheibenmaterialmischung gegeben^{515, 570, 647} oder die Schleifscheibe wird in den Festschmierstoffpartikeln getränkt^{289, 458, 698}.

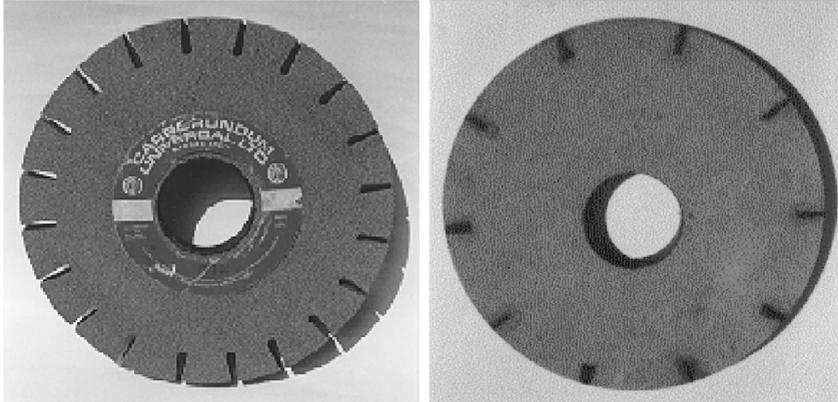


Abbildung 84: Schleifscheibe mit 20 Unterbrechungen ohne Festschmierstoff (links) und „sandwich“-wheel mit 10 Unterbrechungen mit Festschmierstofffüllung (rechts); nach⁵⁵³

In den Versuchen von Shaji und Radhakrishnan mit segmentierten Schleifscheiben, deren Lücken mit Festschmierstoff gefüllt waren, konnten, je nach gewähltem Festschmierstoff, geringere Kräfte und Rauheiten als mit Standardschleifscheiben im Trockenschliff und bei konventioneller Kühlung mit Standardschleifscheiben erreicht werden^{551–553}. Jedoch war das Zusetzen der Schleifscheiben aufgrund der fehlenden Spülwirkung des KSS und der inhärenten Eigenschaften der Schmierneigung der Festschmierstoffe selbst ein Problem, was mit fortwährendem Schnittweg zu einer Erhöhung der Kräfte und Schleifenergien führte. Dies konnte mit Hilfe von Abrichtzyklen vermieden werden, jedoch auf Kosten eines höheren Schleifscheibenverschleißes, der ohnehin schon höher war als bei den konventionellen Schleifscheiben – selbst im Trockenschliff. Als weiteres Problem werden die hohen Temperaturen beim Sintern der Schleifscheiben angeführt, bei welchen der Festschmierstoff reagiert beziehungsweise oxidiert (*Anmerkung: wie sich dies im Verhalten der Schleifscheiben widerspiegelte, wurde nicht ausgeführt*).

Ähnliche Ergebnisse wurden von Tsai und Jian berichtet, die den Festschmierstoff in die Schleifscheibenmaterialmischung vor dem Sintern gaben⁶⁴⁷. Sie verglichen solche Schleifscheiben mit Graphitbeimischungen von 0,1 bis 5 Gewichtsprozent mit Schleifscheiben ohne Festschmierstoffbeimischung. Alle Scheiben wurden trocken und mit Minimalmengenschmierung eingesetzt (90 ml/h). Obwohl die Festschmierstoffbeimischung geringere Kräfte, Temperaturen und Rauheiten zur Folge hatte, sollte der Massenanteil unter 0,5 % gehalten werden, da sonst mit einem erhöhten Schleifscheibenverschleiß gerechnet werden muss (unterhalb 0,5 % war er geringer als bei der konventionellen Schleifscheibe).

In den Arbeiten von Ravuri et al. wurden ebenfalls Schleifscheiben mit Graphitbeimischungen vor dem Sintern untersucht ⁵¹⁵. Variiert wurden die Größen der Graphitpartikel und die Gewichtsprozentage (0,25 % bis 4 %). Genau wie bei den Arbeiten von Tsai und Jian konnten geringere Kräfte und Rauheiten erreicht werden und teilweise höherer oder geringerer Schleifscheibenverschleiß als bei der konventionellen Schleifscheibe. Geschliffen wurde Inconel 718 ohne KSS.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entwicklung von Schleifscheiben mit integrierter Feststoffschmierung das Potential bietet, den Einsatz bei der Trockenbearbeitung oder bei Minimalmengenschmierung zu verbessern. Für den Einsatz bei Überflutungskühlungen, wozu keine Ergebnisse existieren, ist deren Einsatz vermutlich weniger interessant; die Mehrkosten für deren Herstellung übersteigen hier vermutlich den technologischen Nutzen. Die wenige verfügbare Literatur zeigt weiterhin, dass die Art des Festschmierstoffs, dessen Größe und Massenanteil schon bei kleinen Variationen große Auswirkungen auf den Prozess haben kann. Weitere Forschung ist hier notwendig, um das Potential dieses Ansatzes zu klären.

5 Nachhaltigkeitsbetrachtungen

Der Einsatz von Schleifscheiben für Spezialanwendungen oder die Entwicklung von Spezialschleifscheiben zielen letzten Endes immer darauf ab, den Prozess oder das Prozessergebnis über den aktuellen Stand der Technik hinaus zu verbessern. Verbessern bedeutet im technologischen Zusammenhang eine Steigerung der Produktivität (Prozess) oder der Qualität (Prozessergebnis). Doch wann lohnt sich eine solche Verbesserung? Oft erfordert eine Änderung eine Investition und diese muss sich letzten Endes wieder amortisieren. Jedoch ist die Beantwortung der Frage, ab wann sich eine Investition lohnt, nicht immer einfach. Neben der rein monetären Betrachtung rückt in den letzten Jahren die Dimension der Nachhaltigkeit immer mehr in den Fokus. Dies ist auf eine zunehmende Ressourcenverknappung und den Einfluss der Industrie auf das Klima zurückzuführen. Die Nachhaltigkeit hat traditionell die drei Säulen Ökonomie, Umwelt und Gesellschaft und muss immer die einzelnen Säulen und deren Wechselwirkungen berücksichtigen. In ihrem Buch über die Nachhaltigkeit von Schleifscheiben³⁸¹ zitierte Linke aus dem Bericht der Fraunhofer Gesellschaft zur „Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion“¹⁹⁹: „An die Stelle von ‚maximaler Gewinn aus minimalem Kapital‘ muss ‚maximaler Gewinn aus minimalen Ressourcen‘ treten“. Damit haben Hersteller, wie Linke weiter ausführt, eine Verantwortung zum schonenden Einsatz von Ressourcen im Hinblick auf den gesamten Lebenszyklus eines Produkts unter dem steigenden Druck gesetzlicher Vorgaben, die ebenfalls eine Ressourcen- und Umweltschonung zum Ziel haben. Selbst die Kunden, so führte Linke aus, verlangen mehr und mehr „grüne“ Produkte, und damit eine nachhaltige Produktion.

Ziel dieses Kapitels ist es, neben den Ausführungen zu den technologischen Aspekten des Einsatzes von Schleifscheiben für Spezialanwendungen (Kapitel 4.1) und von Spezialschleifscheiben (Kapitel 4.2) deren Aspekte in Bezug auf die Nachhaltigkeit zu erörtern. Problematisch ist dabei, dass die Nachhaltigkeit unter Berücksichtigung des kompletten Lebenszyklus sowohl der Schleifscheibe als auch des Produkts und allen zugehörigen Produktionsfaktoren stattfinden sollte. Dies fängt bei der Förderung von Rohstoffen an, geht über deren Produktion und Verarbeitung, der Montage von Zwischenprodukten, dem Vertrieb und der Nutzung von Produkten hin zur Wiederaufbereitung oder Entsorgung²⁴⁶.

Eine vollständige Betrachtung des Lebenszyklus von Schleifscheiben, oder anderen Werkzeugen der Fertigungstechnik, und deren Einsatz sowie dem Einfluss auf die erzeugten Produkte ist kaum möglich. Zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Fertigungsprozessen hat sich die Betrachtung des Energiekonsums beziehungsweise der spezifischen Energie, also der benötigten Energie zum Abtrag eines Materialvolumens, durchgesetzt¹⁴⁹. Jedoch ist dies nicht ausreichend, da Schleifen zwar hohe spezifische Energien bedingt, dabei aber gleichzeitig hohe Oberflächengüten und damit eine hohe Funktionalität der hergestellten Produkte gewährleistet³⁸²; diese Zusammenhänge wurden ausführlich in Abschnitt 3.2 behandelt. Es ist daher notwendig, auch die durch Schleifen hergestellten Produkte und deren Einsatz in die energetische Betrachtung mit einzubeziehen.

In den folgenden Kapiteln wird auf diese produktorientierte Nachhaltigkeitsbetrachtung des Schleifens und die Betrachtung des Energiegehalts von Schleifscheiben näher eingegangen. Abschließend werden die in Kapitel 4 vorgestellten Konzepte hinsichtlich deren Nachhaltigkeit bewertet.

5.1 Produktorientierte Betrachtung

Die Nachhaltigkeit betrifft alle Aspekte, die sich auf die Ökonomie, die Umwelt und die Gesellschaft auswirken. Somit sind neben dem Prozess selbst insbesondere die mittels Schleifen hergestellten Produkte in Nachhaltigkeitsbetrachtungen bei der Bewertung mit einzubeziehen, die sich auf alle diese Aspekte auswirken. Bei der Herstellung der Produkte sind der Energiegehalt, der für die Gewinnung und Verarbeitung der Grundrohstoffe benötigt wird, sowie der Energiegehalt, der für die eigentliche Produktherstellung benötigt wird, sei es mittels Schleifen oder eines anderen Prozesses, zu ermitteln. Dieser Energiegehalt wird als graue Energie bezeichnet. Betrachtet man diese graue Energie, so wird Schleifen aufgrund der hohen spezifischen Energien im Vergleich zu anderen spanabhebenden Herstellungsprozessen (siehe Abschnitt 3.2) stets schlechter abschneiden. Betrachtet man jedoch auch die Auswirkungen des Bearbeitungsprozesses auf den Energieverbrauch der Produkte während deren Einsatzes, so ergibt sich ein anderes Bild. Am FBK der TU Kaiserslautern wurden drei Kategorien identifiziert, in welche sich mittels Schleifen hergestellte Produkte einordnen lassen^{21, 27, 33}:

- geringe graue Energie, hoher Energieverbrauch im Einsatz,
- hohe graue Energie, geringer oder kein Energieverbrauch im Einsatz,
- energieerzeugende Produkte.

Dabei werden die Unterschiede in der grauen Energie und der Energieverbrauch beziehungsweise die Energiegewinnung während des Produkteinsatzes betrachtet. Vernachlässigt wird der Aspekt der Wiederverwertung und der Entsorgung, da der Schleifprozess hierauf keinen Einfluss hat und somit Änderungen des Prozesses oder der Schleifscheibe ebenfalls nicht.

Im Folgenden werden die in^{21, 27, 33} definierten Produkttypen näher vorgestellt.

Geringe graue Energie, hoher Energieverbrauch im Einsatz – Produkttyp I

Für diesen Produkttyp werden geringe Energien zur Herstellung im Vergleich zur Energie benötigt, die diese im Einsatz verbrauchen, siehe Abbildung 85. Beispiele hierfür sind Lager, Kupplungen, Rotoren oder generell alle gleitenden Teile/Produkte.

Bei diesen Produkten ist es möglich, durch einen zusätzlichen Aufwand bei deren Fertigung den Energieverbrauch über den gesamten Produkteinsatz zu reduzieren. Es ist sogar so, dass eine Reduktion der grauen Energie über Optimierungen am Prozess kontraproduktiv sein können, da diese erstens nur geringfügig den Energieverbrauch des Produkts über den gesamten Lebenszyklus beeinflussen und zweitens eine Änderung des Prozesses hinsichtlich der Reduktion der spezifischen Energie meist mit einer Vergrößerung der Spannungsdicken und damit einer Vergrößerung der Rauheit einhergeht. Das Ziel der Optimierungen bei diesem Produkttyp sollte daher die Verbesserung der Eigenschaften für den späteren Produkteinsatz sein. Dies kann durch die Optimierung der tribologischen Eigenschaften erreicht werden, also reduzierte Rauheiten oder bessere Schmiereigenschaften. Neben einem geringeren Energieverbrauch durch den zusätzlichen Aufwand kann auch eine Verlängerung der Lebensdauer einen positiven Effekt auf die Energiebilanz über den gesamten Lebenszyklus bedeuten.

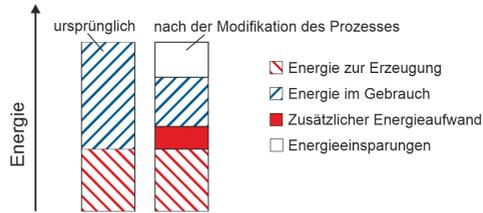


Abbildung 85: Darstellung der Energieanteile bei Produkttyp I

Als Erweiterung zu den Ausführungen in ^{21, 27, 33} lassen sich durch Schleifen hergestellte Werkzeuge nennen. Diese verbrauchen zwar nicht selbst Energie, aber ihr Einsatz geht mit einem Energieverbrauch einher. Durch einen zusätzlichen Aufwand bei deren Herstellung können diese so optimiert werden, dass sie in ihrem Einsatz effizienter werden und damit weniger Energie verbraucht wird. So kann das Polieren der Spannut von Wendelbohrern für die Aluminiumbearbeitung dazu führen, dass im Einsatz der Werkzeuge der Spanfluss durch eine Reibungsreduktion verbessert wird; weniger Reibung resultiert in geringere Prozesskräfte und damit in die Einsparung von Energie.

Hohe graue Energie, geringer oder kein Energieverbrauch im Einsatz – Produkttyp II

Bei diesem Produkttyp übersteigt der Anteil der grauen Energie über den gesamten Lebenszyklus des Produkts dessen Verbrauch im Einsatz (Abbildung 86). Beispiele sind Wafer, Fliesen, Linsen und generell optische Komponenten. Reduziert man den benötigten Energieaufwand bei deren Herstellung, so erzielt man gleichzeitig einen positiven Einfluss auf deren gesamten Lebenszyklus. Dazu kann der Prozess verbessert werden, zum Beispiel durch die Erreichung höherer Abtragsraten durch eine zielgerichtete KSS-Zufuhr, oder die Werkzeuge zur Herstellung der Produkte können optimiert werden. Da bei den genannten Produkttypen, deren Oberflächeneigenschaften ihr wichtigstes Merkmal ist, dürfen diese bei einer Änderung im Herstellungsprozess nicht negativ beeinflusst werden.

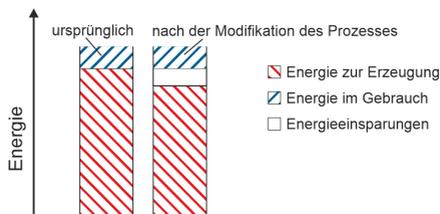


Abbildung 86: Darstellung der Energieanteile bei Produkttyp II

Eine weitere Klasse von Produkten, die unter Typ II eingeordnet sind, sind solche, die schleifend bearbeitet werden aber bei denen Änderungen in den tribologischen Eigenschaften der bearbeiteten Bereiche keine Vor- oder Nachteile im Einsatz bringen. Dies trifft auf alle Produkte oder Teile eines Produkts zu, die mittels Hochleistungsschleifen bearbeitet werden, bei denen also das Ziel ein hoher Materialabtrag ist. Dies ist beispielsweise bei der Entfernung von

Stützstrukturen additiv gefertigter Bauteile der Fall, bei der Entfernung von Schlacke und Zunderschichten geschmiedeter Teile oder allgemein bei Trennvorgängen. Hier steht die Produktivität bei der Bearbeitung im Vordergrund und Randzoneigenschaften als Folge der Bearbeitung sind häufig nicht relevant. Jedwede Maßnahmen zur Steigerung der Produktivität, seien sie prozess- oder werkzeugseitig, sind dabei hinsichtlich der Energiebilanz von Vorteil, da sie mit geringeren grauen Energien einhergehen. Beachtet werden muss bei dieser zweiten Kategorie von Produkttyp II jedoch, dass diese meist auch mit Verfahren der geometrisch bestimmten Zerspanung bearbeitet werden können – und dies in der Regel bei geringeren spezifischen Energien.

Energieerzeugende Produkte – Produkttyp III

Dieser Produkttyp nimmt eine Sonderstellung ein. Produkte dieser Kategorie erzeugen Energie während ihres Einsatzes, resultierend in eine positive Energiebilanz über ihren Lebenszyklus (siehe Abbildung 87). Beispiele sind Windkraftanlagen oder Verbrennungskraftmotoren. Alle Maßnahmen, die zu einem höheren Wirkungsgrad der Produkte im Einsatz führen oder deren Lebensdauer verlängern, sind anzustreben. Ähnlich wie bei Produkttyp I lohnt sich hier also oft ein erhöhter Aufwand bei der Herstellung. Der Wirkungsgrad hängt häufig von der Oberflächenmorphologie (Rauheit, Oberflächenbeschaffenheit, Randzoneigenschaften) aktiver Teile ab, die daher verbessert werden sollte. Selbst wenn der Wirkungsgrad dabei nicht verbessert wird, so ist bei einer Verbesserung der Rauheit von reduzierter Reibung und damit längerer Lebensdauer auszugehen. Eine längere Lebensdauer bedeutet mehr generierte Energie und damit eine verbesserte Nachhaltigkeit.

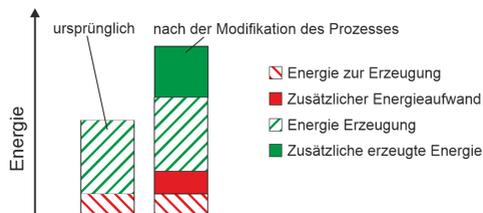


Abbildung 87: Darstellung der Energieanteile bei Produkttyp III

Fallstudien zu den Produkttypen

In ^{21, 27, 33} wurden basierend auf Literaturrecherchen und Beispielrechnungen Fallstudien zu den einzelnen Produkttypen vorgestellt, die den Einfluss der abrasiven Bearbeitung auf die Nachhaltigkeit verdeutlichen. Diese werden hier in verkürzter Form erläutert. Zur Vertiefung sei auf die zuvor genannten Literaturstellen verwiesen.

Zu Produkttyp I fanden sich Untersuchungen zum Einfluss der Rauheit von Getriebeteilen in Kupplungen. Durch eine Reduzierung der Oberflächenrauheit von $R_q = 0,62 \mu\text{m}$ auf $0,10 \mu\text{m}$ konnte der Leistungsverlust um ca. 50 % reduziert werden ⁶³².

Bei der Bearbeitung von Fliesen – Produkttyp II konnte simulationsgestützt die Bearbeitungszeit unter Beibehaltung der Bearbeitungsqualität minimiert werden ⁵⁸⁰. Mit der reduzierten Bearbeitungsdauer durch eine Bahnoptimierung wird ein geringerer zur Herstellung erforderlicher Energieeinsatz erreicht.

Für Produkttyp III wurde eine Beispielrechnung für Windkraftanlagen angestellt, basierend auf den Messwerten zur schleifenden Bearbeitung eines Windkraftanlagenlagers mit einem Durchmesser von 3 m. Der Energieverbrauch hierfür betrug 0,96 MJ (Angaben einer Firma, die Wälzlager für Windkraftanlagen herstellt; laut ³³). Nimmt man nun an, dass durch einen zusätzlichen Aufwand im Schleifprozess der Energieverbrauch auf 1,20 MJ erhöht wird (25 % mehr Energie) und somit aufgrund verbesserter tribologischer Eigenschaften der Wirkungsgrad der Windkraftanlage um 0,002 % steigt, so lässt sich ein Energiezugewinn einer 5 MW Windkraftanlage mit 12 Stunden Betrieb pro Tag bei 300 Tagen Betrieb pro Jahr von 1.296 MJ pro Jahr erreichen. Die zusätzliche Investition an Energie in den Schleifprozess von 0,24 MJ zahlt sich also in einem Jahr 5.400-fach aus.

5.2 Spezifischer Energiegehalt von Schleifscheiben

Am FBK der TU Kaiserslautern, teilweise in Kooperation mit der University of California at Davis, wurden Studien zur Ermittlung der grauen Energie von Schleifscheiben durchgeführt ^{27, 29, 33, 331}. Dabei wurde der Energiegehalt einerseits basierend auf Literaturwerten ermittelt (Abbildung 88 links) und andererseits in Kooperation mit einem Schleifscheibenhersteller basierend auf Messungen im Unternehmen (Abbildung 88 rechts).

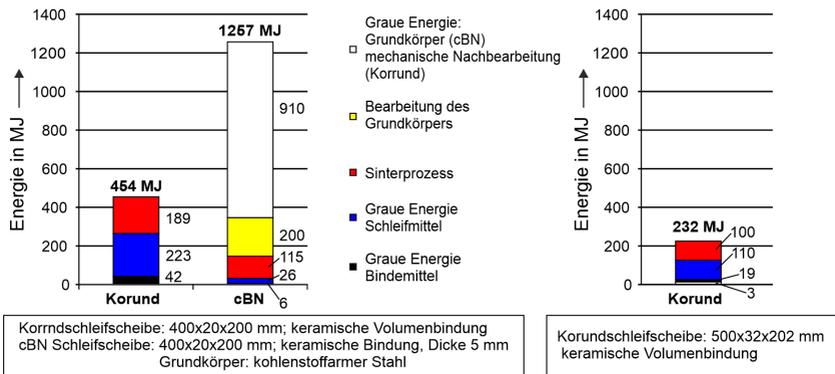


Abbildung 88: Spezifischer Energiegehalt von Schleifscheiben basierend auf Literaturwerten (links) und realen Messungen (rechts); nach ³³

Zur Bestimmung des Energiegehalts beim Schleifscheibenhersteller wurde zunächst die Prozesskette analysiert und die energieintensiven Schritte identifiziert. Neben der eigentlichen Herstellung der Schleifscheibe mit seinen energieintensiven Schritten Mischen/Sieben der Ausgangsmaterialien (0,06 MJ), Pressen zum Grünling (1,56 MJ), Trocknen des Grünlings zum Austreiben der Klebmittel (0,54 MJ), Brennen im Ofen (100,22 MJ) und finale Geometrieerzeugung durch Drehen und Fräsen (0,85 MJ) trägt die Herstellung der Ausgangsstoffe enorm zur grauen Energie bei (128,80 MJ). Diese wurden mit Hilfe von Datenbankenwerten basierend auf dem realen Verbrauch der Materialien (Kornmaterial, Bindungsmaterial, Nebenprodukte wie Wasser oder Klebmittel) bei der Herstellung ermittelt. Transportvorgänge zur Anlieferung des Materials wurden vernachlässigt, da sich aufgrund der großen Mengen, die mit einem Lkw oder Zug angeliefert werden, nur geringste Energiemengen pro Kilogramm ergeben.

Der Vergleich konventioneller und hochharter Schleifscheiben (Abbildung 88 links) ergab den fast dreifachen Energiegehalt für die hochharten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Hauptteil der Energie auf den Grundkörper zurückzuführen ist. Dieser kann wiederverwendet werden, womit sich aufgrund der geringeren grauen Energie der Bindung über die Einsatzzeit ein geringerer Energiebedarf pro Schleifscheibe ergibt. Weiterhin erreichen Hochharte wesentlich größere G-Verhältnisse, teilweise das 1.000-fache von Konventionellen, womit sich der höhere spezifische Energiebedarf stark relativiert.

In einer weiteren Studie des FBK der TU Kaiserslautern wurde auch der Energiegehalt eines Hartmetallfräasers ermittelt, in diesem Falle durch Messungen der benötigten Energien für die schleifende Geometrieerzeugung, die Schneidkantenpräparation mittels Gleitschleppscheifen, die Reinigung sowie die Beschichtung mittels PVD-Verfahren. Weiterhin wurden die Werte für die Herstellung des Werkzeugrohlings basierend auf Information aus Datenbanken und den Untersuchungen von Karpuschewski et al.³⁰⁷ ermittelt. Die Geometrieerzeugung, also die Bearbeitung eines zylindrischen Rohlings zu einem Fräser, fand auf der lehrstuhleigenen Werkzeugschleifmaschine statt, die Schneidkantenpräparation in einer Gleitschleppanlage eines Werkzeugherstellers mit einer Kapazität von 24 Werkzeugen. Der Energieverbrauch für die Beschichtung wurde auf einer lehrstuhleigenen PVD-Beschichtungsanlage mit einer Aufnahmekapazität von 120 Werkzeugen vorgenommen. Die graue Energie des Rohlings wurde analog zur Schleifscheibe anhand von Datenbankwerten ermittelt. Insgesamt ergab sich eine graue Energie von 17,76 MJ.³³¹

Um die verschiedenen Energiegehalte einordnen zu können, wurde in der Studie³³¹ basierend auf Versuchsergebnissen anderer Wissenschaftler zum Verschleiß von Korund-Schleifscheiben bei der Bearbeitung von Inconel 718⁵⁴ und dem zerspanbaren Volumen beim Fräsen von Inconel 718 mit beschichteten Hartmetallwerkzeugen⁴⁴⁴ die jeweilige benötigte graue Energie der Werkzeuge sowie die Bearbeitungszeit für die Zerspanung von 20.105 cm³ Inconel 718 berechnet (Abbildung 89). Wie in der Abbildung zu sehen, ist die durch den Verbrauch der Schleifscheibe benötigte graue Energie deutlich geringer als für die Fräswerkzeuge, selbst unter Berücksichtigung eines viermaligen Nachschleifens der Fräser nach dem Einsatz.

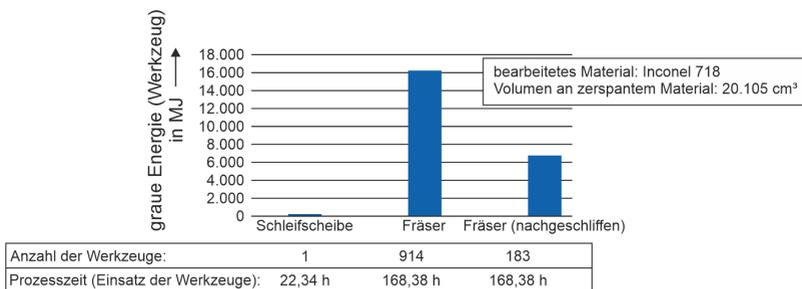


Abbildung 89: Benötigte graue Energie der Werkzeuge beim Schleifen beziehungsweise Fräsen von 20.105 cm³ Inconel 718; nach³³¹

Bezieht man nun die graue Energie der Werkzeuge auf das Materialvolumen, welches sie zerspannen können (graue Energie eines Werkzeugs geteilt durch das Materialvolumen, welches

bis Standzeitende zerspannt werden kann), so ergibt sich im Falle von Inconel 718 eine spezifische graue Energie von $11,54 \text{ J/mm}^3$ für die Schleifscheibe und 336 J/mm^3 für den 4-fach nachgeschliffenen Fräser. Nun ist noch die spezifische Energie zu berücksichtigen, also die Energie, welche bei der Zerspanung pro Werkstoffvolumen aufgewendet werden muss. Diese beträgt beim Schleifen für den betrachteten Fall 32 J/mm^3 ⁵⁴. Beim Fräsen sind die spezifischen Energien viel geringer, etwa zwischen 2 J/mm^3 und 10 J/mm^3 . Damit ergeben sich in der Addition für das Schleifen 44 J/mm^3 und für das Fräsen etwa 340 J/mm^3 unter Berücksichtigung der spezifischen grauen Energie der Werkzeuge und der spezifischen Energie im Prozess. Damit ist Schleifen, entgegen der üblich angenommenen Doktrin, unter Berücksichtigung der Werkzeuge ein deutlich energieschonenderer Prozess.

Für eine abschließende Bewertung sind natürlich alle hierbei vernachlässigten Faktoren zu berücksichtigen. So wurden in dieser Betrachtung Nebenaggregate wie Lüftungen und KSS-Systeme außer Acht gelassen, die beim Schleifen in der Regel größer dimensioniert sind als beim Fräsen. Weiterhin wurden bei beiden Verfahren unterschiedliche Rauheiten und Werkstückgenauigkeiten erzielt; für eine abschließende Bewertung sollten Prozessparameter gefahren werden, die zum möglichst gleichen Prozessergebnis führen. Hierdurch würden sich die spezifischen Energien wohl nochmal etwas ändern. Zuletzt wurden, wie bereits erwähnt, Abricht- und Umspannvorgänge vernachlässigt. Abrichtvorgänge führen einerseits zu einem höheren Verbrauch der Schleifscheibe und damit zu einer Reduzierung des möglichen Zerspanvolumens (höhere spezifische graue Energien), und andererseits zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs (benötigte Energie zum Abrichten). Dies wurde von Linke und Overcash untersucht³⁸³; Abbildung 90 verdeutlicht den Einfluss von Leerzeiten und Abrichtzyklen auf den Energieverbrauch. Nach der Studie kommen jedoch 914 Werkzeugwechsel beim Fräsen auf einen Werkzeugwechsel beim Schleifen. Neben den Stillstandzeiten beim Wechsel selbst kommen hier auch Energieverluste durch das Einmessen der Werkzeuge zum Tragen. Selbst unter Berücksichtigung des zusätzlichen Schleifscheibenverschleißes und damit der Reduktion an zerspanbarem Volumen pro Schleifscheibe (höhere spezifische graue Energien) und somit auch der benötigten Werkzeugwechsel von Fräsern pro Schleifscheibe ist hier von einem deutlichen energetischen Vorteil beim Schleifen auszugehen.

Zuletzt ist der Aspekt der Rohstoffe zu vertiefen. Energetisch sind diese zwar schon bei der Herstellung der Werkstücke berücksichtigt, jedoch werden für die Herstellung von Hartmetall Wolfram und Cobalt benötigt, deren Verfügbarkeit wesentlich begrenzter ist als die von Aluminium, welches für die Herstellung von Korundschleifscheiben hauptsächlich benötigt wird. Insbesondere die zunehmende Elektromobilität und das für die Batterien benötigte Cobalt lässt eine weitere Verschlechterung in der Verfügbarkeit erwarten; weiterhin sind die Hauptvorkommen von Cobalt im Kongo zu finden; der Abbau erfolgt hier unter widrigen Bedingungen. Schließlich wurde der Energieaufwand für die Entsorgung der Werkzeuge vernachlässigt. Im betrachteten Beispiel muss eine Schleifscheibe oder 183 Fräser entsorgt werden. Somit würde die detaillierte Betrachtung der Rohstoffe auch zugunsten des Schleifens ausfallen.

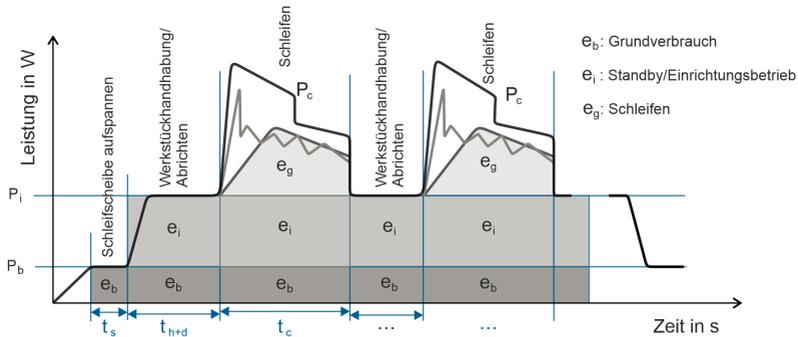


Abbildung 90: Vereinfachte Darstellung des Energieverbrauchs beim Schleifen; nach ³⁸³

Fazit zur Nachhaltigkeit von Schleifscheiben

Schleifen wird traditionell als energieintensives Verfahren angesehen. Die spezifischen Energien sind um ein bis zwei Größenordnungen höher als bei Verfahren der geometrisch bestimmten Zerspanung. Bezieht man jedoch die grauen Energien der Werkzeuge und das mit den Werkzeugen zerspanbare Materialvolumen mit ein (spezifische graue Energie), so ändert sich die Energiebilanz zugunsten des Schleifens. Im konkreten Beispiel waren die kumulierten spezifischen grauen Energien und spezifischen Energien bei der Herstellung der Bauteile beim Fräsen um fast das Achtefache höher als beim Schleifen. Trotz einiger Vernachlässigungen, die teilweise zugunsten des Schleifens, teilweise zu Gunsten des FräSENS ausfallen, zeigt dies, dass die Schleifscheiben selbst einen wesentlichen, bisher stark vernachlässigten Aspekt in der Energiebilanz und der Nachhaltigkeit des Schleifens darstellen.

5.3 Nachhaltigkeitsbetrachtung von Spezialanwendungen

Wie im vorigen Kapitel ausgeführt, können Schleifscheiben im positiven Sinne zur Energiebilanz des Schleifens beitragen. In diesem Kapitel wird diskutiert, wie sich die in Kapitel 4 vorgestellten Spezialanwendungen diesbezüglich einordnen lassen.

5.3.1 Herkömmliche Schleifscheiben für Spezialanwendungen

Die Bewertung der Nachhaltigkeit herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialanwendungen wird durch die Tatsache erleichtert, dass die graue Energie der Schleifscheiben die gleiche ist wie für traditionelle Anwendungen. Die Nachhaltigkeit hängt somit nur vom zusätzlichen Aufwand im Prozess und der Steigerung der Nachhaltigkeit der bearbeiteten Produkte ab.

Schleifhärten

Beim Schleifhärten wird ein zusätzlicher Bearbeitungsschritt in der Maschine vorgenommen. Die Folge ist also ein erhöhter Energiebedarf. Es werden keine zusätzlichen Vorrichtungen oder Anlagen benötigt. Produkte, die hiermit bearbeitet werden, sind zum Beispiel Wälzlager oder Führungen, die ohnehin einer Wärmebehandlung vor dem Einsatz unterzogen werden. Wie bereits ausgeführt, sind diese schwer in die Prozesskette zu integrieren und mit hohen Kosten

sowie zusätzlichem Transport und Handling verbunden; das Schleifhärten als Substitution steigert somit die Nachhaltigkeit der gesamten Prozesskette, da der zusätzliche Bearbeitungsschritt einen anderen, technologisch und energetisch aufwendigeren substituiert. Weiterhin sind die bearbeiteten Produkte Typ I zuzuordnen. Der zusätzliche Aufwand zahlt sich durch eine längere Lebensdauer der Produkte und somit einer Verbesserung der Energiebilanz aus.

Im weiteren Sinne könnten auch Produkte des Typs III bearbeitet werden. Die Verbesserung der Randzoneneigenschaften könnten zu einer höheren Lebensdauer führen und damit zu mehr erzeugter Energie über den Lebenszyklus. Jedoch ist bei diesem Produkttyp wie erläutert eine Energieeinsparung nicht sinnvoll; so könnten konkurrierende, energieintensivere Härteverfahren eventuell zu noch besseren Eigenschaften führen. Der Fokus des Schleifhärtens liegt jedoch auf einer Energieeinsparung.

Verfestigung durch Größeneffekt

Bei der Verfestigung der Randschicht unter Ausnutzung des Größeneffektes handelt es sich wie beim Schleifhärten um einen zusätzlichen Bearbeitungsschritt in der Maschine, der ebenfalls eine ansonsten nachgelagerte Behandlung substituieren soll. Auch hier werden keine zusätzlichen Anlagen oder Vorrichtungen benötigt. Entsprechend gelten die gleichen Überlegungen: es kann eine bessere Energiebilanz durch die Substitution nachgelagerter Oberflächenverfestigungsverfahren erreicht werden und/oder durch längere Lebensdauern der Produkte des Typs I.

Schneidkantenpräparation

Die Schneidkantenpräparation dient zur Leistungssteigerung geschliffener Werkzeuge für die definierte Zerspanung. Nach der erweiterten Definition sind diese Produkttyp I zuzuordnen. Die Schneidkantenpräparation als zusätzlicher Bearbeitungsschritt nach der Erzeugung der Makrogeometrie erfordert nur wenige Sekunden und ersetzt nachgelagerte Präparationsverfahren, die zusätzliches Handling und Transport erfordern. Die Präparation erfolgt mit handelsüblichen Polierscheiben, es werden keine weiteren Vorrichtungen oder Anlagen benötigt. Somit trägt die Schneidkantenpräparation als Substitution nachgelagerter Prozesse zur Nachhaltigkeit bei. In seiner Dissertationsschrift belegte Effgen darüber hinaus, dass das Verfahren wirtschaftlicher ist als das industriell weit verbreitete Schleppscheifen¹⁸⁰. Aus Produktsicht ist der positive Einfluss der Präparation unstrittig. Sie verlängert die Lebensdauer und Produktivität der Werkzeuge und somit deren Nachhaltigkeit.

Electrolytic in-Process dressing (ELID) Schleifen

Beim ELID, dem elektrolytischen Abrichten im Prozess, wird die Schleifscheibe nicht wie sonst prozessintermittierend, sondern stetig im Prozess abgerichtet. Die Folge ist ein höherer Verschleiß der Schleifscheibe. Ebenfalls werden zusätzliche Vorrichtungen und Anlagen in der Maschine benötigt. Diese beiden Faktoren führen zu einer Verschlechterung der Nachhaltigkeit. Es werden Produkttypen der Kategorie II bearbeitet, bei denen eine höhere Nachhaltigkeit durch die Reduzierung der Aufwände während des Schleifens erreicht werden, hier wird der Aufwand erhöht.

Andererseits können spiegelnde Oberflächen mit Rauheiten im Nanometerbereich hergestellt werden, als Konkurrenz zum Ultrapräzisionsdrehen. Die Arbeiten belegen weiterhin die Defektfreiheit der bearbeiteten sprödharten Werkstoffe. Damit sind Bearbeitungen möglich, die

ohne die ELID-Technologie mittels Schleifen nicht realisierbar sind. Zur abschließenden Bewertung ist daher ein Vergleich der Prozesse UP-Drehen und ELID-Schleifen notwendig.

Interne KSS-Zufuhr durch poröse Schleifscheiben

Für die Zufuhr von KSS durch den porösen Belag sind maschinenseitige Modifikationen oder Sondermaschinen mit Hohlspindeln notwendig. Neue Anwendungsfelder können mit diesem Sonderverfahren nicht erschlossen werden. Das Verfahren eignet sich als Konkurrenz zur Trockenbearbeitung oder als Möglichkeit zur Einsparung von Kühlschmierstoffen. Damit eignet es sich jedoch nicht für die Herstellung von Produkttypen II, bei denen im Allgemeinen hohe Qualitätsanforderungen gelten oder eine Steigerung der Produktivität der Nachhaltigkeit förderlich ist. Somit kommt es für die Produkttypen I und III in Frage, bei denen sich jedoch ein erhöhter Aufwand im Prozess im Sinne einer erhöhten Energieeinbringung zur Steigerung der Einsatzfähigkeiten und -qualitäten der Produkte lohnen würde. Hinsichtlich der Nachhaltigkeit sollte diese Methode daher nicht weiterverfolgt werden.

5.3.2 Spezialschleifscheiben

Die Bewertung der Nachhaltigkeit von Spezialschleifscheiben ist schwieriger als die herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialanwendungen, da hier in fast allen Fällen eine Erhöhung der grauen Energie der Schleifscheibe vorliegt. Somit sind hier neben eventuellen Änderungen der Aufwände im Prozess und den Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit der bearbeiteten Produkte auch die Änderung der grauen Energie der Schleifscheibe in der Energiebilanz zu berücksichtigen. Dabei ist jedoch auch zu beachten, wie in Kapitel 5.2 ausgeführt, dass der Anteil der grauen Energie der Werkzeuge an der grauen Energie der Produkte vergleichsweise gering ist.

Optimierte Schleifbeläge – segmentierte Schleifscheiben

Die quantitativ am stärksten beforschten Spezialschleifscheiben sind die segmentierten Schleifscheiben. Entsprechend hoch sind auch die bekannten Varianten in der Gestalt und auch in der Herstellungsmethode. Die Bewertung der grauen Energie der Schleifscheiben erfolgt nach den drei grundsätzlich zu unterscheidenden Herstellungsmethoden:

- Aufbringen der Segmente auf einen Grundkörper,
- Einbringen der Segmente in eine herkömmliche Schleifscheibe,
- Modifikation der Sinterform bei der Herstellung der Schleifscheibe.

Das Aufbringen der Segmente auf einen Grundkörper ist hochharten Schleifscheiben vorbehalten. Das Aufbringen erfordert einen hohen Aufwand im Handling, der Zeit und den Materialien. Oft sind aufwendige Grundkörper aus Stahl nötig, die mittels Drehen und Fräsen sowie Gewindegewindeschneiden über das Maß des üblichen Aufwands der Vorbereitung hinaus bearbeitet werden müssen. Dieser Schritt der Schleifscheibenherstellung trägt ohnehin schon wesentlich zum Energiegehalt bei (vergleiche Abbildung 88). Entsprechend resultieren höhere graue Energien.

Das Einbringen der Segmente in herkömmliche Schleifscheiben, seien sie konventionelle oder hochharte Schleifscheiben, erfolgt als finaler Bearbeitungsschritt nach der Schleifscheibenherstellung. Am weitesten verbreitet ist die Einbringung mittels spezieller Abrichtprozesse. Abrichtprozesse erfordern einerseits zusätzliche Werkzeuge (Abrichter), die somit zur Erhöhung

der grauen Energie beitragen, und weiterhin erfolgt das Abrichten auf den energieintensiven Schleifmaschinen und erhöht deren nicht-produktive, energieverbrauchende Zeiten.

Die Modifikation der Sinterform stellt die elegante Lösung zur Herstellung segmentierter Schleifscheiben dar. Die Steigerung der grauen Energie beschränkt sich auf den erhöhten Aufwand bei der Herstellung der Sinterformen. Diese sind üblicherweise rotationssymmetrisch und müssen daher für die Segmentierung zusätzlich noch fräsend bearbeitet werden. Da die Sinterformen häufig wiederverwendet werden können, verteilt sich die Erhöhung der grauen Energie durch diesen zusätzlichen Bearbeitungsschritt auf mehrere Schleifscheiben und ist damit pro Schleifscheibe geringer. Die graue Energie derart hergestellter segmentierter Schleifscheiben ist damit nur unwesentlich höher als diejenige herkömmlicher Schleifscheiben.

Hinsichtlich des Einsatzverhaltens belegen die Untersuchungen, dass mit segmentierten Schleifscheiben höhere G-Verhältnisse und ein besserer Selbstschärfeffekt erreicht wird. Weiterhin wird ein effizienterer Materialabtrag erreicht, die spezifischen Energien im Prozess werden also reduziert. Im Einsatz führen segmentierte Schleifscheiben trotz der Belagsreduzierung also zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit.

Für die Produkttypen I und III, bei denen ein zusätzlicher Aufwand im Prozess zur Verbesserung der Produkteigenschaften dient, ist der Einsatz segmentierter Schleifscheiben nicht sinnvoll. Der erhöhte graue Energiebedarf segmentierter Schleifscheiben zielt nicht auf die Verbesserung der Produkteigenschaften ab, sondern auf die Erhöhung der Produktivität beziehungsweise der Energieeffizienz des Schleifprozesses. Weiterhin ist die Folge der Segmentierung eine Steigerung der Werkstückrauheit. Dies schließt den Einsatz hinsichtlich der Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit aus. Somit sind segmentierte Schleifscheiben auch nicht für optische Komponenten des Produkttyps II geeignet. Es verbleiben Produkte des Produkttyps II, bei denen die Oberflächenbeschaffenheit sekundär ist und bei denen eine Steigerung der Produktivität zur Steigerung der Nachhaltigkeit beiträgt. Dies gilt jedoch nur, wenn die Steigerung der grauen Energie bei der Herstellung der Schleifscheiben die Reduzierung des Energieaufwands in der Fertigung der Produkte rechtfertigt, in diesem Falle durch eine Reduktion der spezifischen Energie. Dies muss im Einzelfall geprüft werden; lediglich die mittels der Modifikation der Sinterform hergestellten segmentierten Schleifscheiben können hier als neutral klassifiziert werden.

Optimierte Schleifbeläge – definiert gesetzte Schleifscheiben

Schleifscheiben mit definiertem Setzmuster sind sehr aufwendig in ihrer Herstellung. Bei vereinfachten Varianten wird mit Masken und Schablonen zur Aufbringung der Körner gearbeitet – jedoch liegt hier nur eine definierte Anordnung der Kornanhäufungen vor. Sollen die Körner tatsächlich in definierten Mustern mit definierten Abständen vorliegen, um die technologischen Potentiale voll auszuschöpfen, müssen die Sollpositionen CNC-gesteuert angefahren werden, mit Klebepunkten versehen werden und die Körner auf diese Klebepunkte gesetzt werden. Der Einfluss auf die graue Energie der Schleifscheibe ist hoch.

Der Einsatz der Schleifscheiben geht mit einer deutlichen Reduzierung der spezifischen Energien einher. Weiterhin werden geringere Temperaturen und damit geringere Randzonenschädigungen erreicht. Dies jedoch auf Kosten der Standzeit der Schleifscheiben und auch der Ober-

flächenrauheit. Die höheren grauen Energien der Schleifscheiben bei gleichzeitig höherem Verschleiß müssen also durch geringere spezifische Energien amortisiert werden. Dies ist sicher nur bei hohen Zeitspanvolumen der Fall; die vorgestellten technologischen Ergebnisse lassen dies jedoch erwarten.

Für die Produkttypen gilt weitgehend das Gleiche wie bei der Betrachtung segmentierter Schleifscheiben. Es können zwar Randzoneneigenschaften der Produkte verbessert werden, jedoch auf Kosten der Oberflächenbeschaffenheit. Der Einsatz ist bei solchen Produkten sinnvoll, bei denen die Oberflächenbeschaffenheit sekundär ist, und eine hohe Produktivität im Vordergrund steht, also die nicht optischen Komponenten des Produkttyps II. Auch hier ist im Einzelfall zu prüfen, ob die erhöhten grauen Energien der Schleifscheiben durch die geringeren spezifischen Energien bei der Herstellung der Produkte kompensiert werden; vermutlich fällt diese Betrachtung häufig negativ aus.

Optimierte Schleifbeläge – definierte Strukturen mittels Laser

Entweder werden herkömmliche hochharte Schleifbeläge modifiziert oder es werden Dickschichten aus Diamant strukturiert. In beiden Fällen sind die grauen Energien vor der Laserbearbeitung mit herkömmlichen Schleifscheiben vergleichbar, die Steigerung der grauen Energie resultiert aus der Verwendung der Laser zur Manipulation des Schleifbelags. Im Falle der Bearbeitung herkömmlicher Schleifscheiben werden die, auch bei herkömmlichen Schleifscheiben notwendigen, zeit- und kostenintensiven mechanischen Abrichtverfahren ersetzt, technologisch eindeutig ein Vorteil. Energetisch dürfte sich die graue Energie ebenfalls nicht signifikant erhöhen, da die mechanischen Abrichtprozesse einerseits verschleißende Werkzeuge mit hohen grauen Energien benötigen und andererseits auf den energieintensiven Schleifmaschinen stattfinden (die benötigten Laserleistungen sind deutlich geringer als die benötigten Schleifspindelleistungen). Hinsichtlich der Bearbeitung der Dickschichten fehlt ein Vergleich, es handelt sich um ein technologisches Alleinstellungsmerkmal. Jedoch ist hier unstrittig eine Erhöhung der grauen Energie die Folge.

Mittels Laser präparierte Schleifscheiben weisen ein enormes technologisches Potential auf. Die Möglichkeit, definierte Korngeometrien aus harten Diamantschichten herzustellen, lässt eine Optimierung des Materialabtrags zu. Weniger Reiben und Pflügen, ein effizienterer Materialabtrag mit geringeren spezifischen Energien bei gleichzeitig hoher Oberflächengüte sind denkbar, wenn auch noch nicht makroskalig realisiert.

Mit Blick auf die Produkte sind mittels Laser optimierte, maßgeschneiderte Schleifbeläge für alle Produkttypen geeignet. Bei den Produkttypen I und III können durch die Belagsoptimierung die Eigenschaften der Produkte (Rauheit, Randzoneneigenschaften) verbessert werden und somit deren Energiebilanz, unter Umständen sogar bei einer gleichzeitigen Reduzierung der Energieaufwände in der Herstellung. Für beide Klassen der Produkttypen II, optische Komponenten und Produkte, bei denen die Produktivität der Herstellung im Vordergrund steht, können mittels Laser strukturierte Schleifscheiben ebenfalls zur Steigerung der Nachhaltigkeit beitragen. Entweder durch die Reduktion der Aufwände im Prozess aufgrund geringeren Anteils Reibens und Pflügens bei gleichbleibender Oberflächenqualität oder durch die Steigerung der Produktivität bei eventuell sinkender Oberflächenqualität – je nach Auslegung der Strukturierung des Belags.

Optimierte Schleifbeläge – Schleifscheiben für die Trockenzerspanung

Um den hohen Anforderungen des Trockenschleifens gerecht zu werden, wurden Schleifscheiben mit herkömmlichem Schleifbelag mittels Abrichten so strukturiert, dass eine Belagsreduzierung vorlag oder es kamen die bereits diskutierten definiert gesetzten Schleifscheiben zum Einsatz. Die graue Energie der Schleifscheiben wurde somit erhöht.

Im Prozess lagen einerseits geringere spezifische Energien vor und andererseits konnten die Prozessgrenzen erweitert werden. Dennoch lag auch hier ein erhöhter Schleifscheibenverschleiß vor und es kam zu Zusetzungen des Belags.

Für die Produkttypen I und III sowie optische Komponenten der Kategorie II kommt das Trockenschleifen als Alternative zur Nassbearbeitung nicht in Frage, da eine Verschlechterung des Einsatzverhaltens der Produkte die Folge ist. Somit verbleiben solche Produkte, bei denen die Produktivität im Vordergrund steht. Diese ist jedoch geringer als bei der Nassbearbeitung und dies trotz höherer grauer Energie der Schleifscheiben für die Trockenbearbeitung. Somit ist die Entwicklung von Spezialschleifscheiben für die Trockenbearbeitung hinsichtlich der Nachhaltigkeit nicht sinnvoll.

Schleifscheiben für die Zerspanung sprödharter Werkstoffe

Schleifscheiben für die Zerspanung sprödharter Werkstoffe sind grobkörnige, meist definiert gesetzte Schleifscheiben, die elektrochemisch abgerichtet werden. Damit einher geht eine deutliche Steigerung der grauen Energie. Die Bewertung des Einsatzverhaltens hinsichtlich spezifischer Energien im Vergleich zu herkömmlichen Schleifscheiben ist nicht möglich. Mit den Spezialverfahren wird die garantierte defektfreie Bearbeitung sprödharter Werkstoffe aufgrund der Eliminierung der stochastischen Natur des Schleifens überhaupt erst ermöglicht.

Die Überlegungen zur Nachhaltigkeit solcher Schleifscheiben ergeben sich daher analog zu denen des ELID-Schleifens. Die Schleifscheiben werden für die Bearbeitung optischer Komponenten des Produkttyps II eingesetzt, bei denen eine Reduktion der Aufwände hinsichtlich der Nachhaltigkeit sinnvoll ist. Hier werden die Aufwände erhöht. Es ergeben sich jedoch Möglichkeiten bezüglich der Qualität, die mit herkömmlichen Schleifscheiben nicht erschlossen werden können. Damit können die sonst üblichen, dem Schleifen nachgelagerten Prozesse Läppen und Polieren, substituiert werden. Diese sind energetisch ungünstiger, die spezifischen Energien sind hoch. Somit wird letztlich die graue Energie der Produkte reduziert, ganz im Sinne der Produktkategorie II.

Optimierte KSS-Zufuhr – Bohrungen oder Kanäle innerhalb der Schleifscheibe

Schleifscheiben mit interner Zufuhr erfordern einen erheblichen Mehraufwand in deren Fertigung, resultierend in eine deutliche Steigerung der grauen Energie. Die spezifischen Energien im Prozess sind ebenfalls höher, da die Förderung des KSS mit höheren Aufwänden verbunden ist als bei externer Zufuhr. Die Prozessergebnisse werden durch die interne Zufuhr ebenfalls nicht oder nur geringfügig verbessert – in manchen Fällen gar verschlechtert. Hinsichtlich der Nachhaltigkeit ist die Entwicklung von Schleifscheiben mit interner KSS-Zufuhr nicht sinnvoll.

Optimierte KSS-Zufuhr – Zwischenräume im Belag

Schleifscheiben mit einer KSS-Zufuhr über Zwischenräume im Schleifbelag sind technologisch einfacher und damit auch energetisch günstiger herzustellen als solche mit rein interner KSS-Zufuhr. Jedoch sind die Modifikationen der Grundkörper oder notwendige zusätzliche Vorrichtungen an den Schleifscheiben auch hier mit einer Erhöhung der grauen Energie verbunden.

In der Literatur sind mehr Ergebnisse und Vergleiche zur externen Zufuhr zu finden als bei rein interner Zufuhr, die bessere Ergebnisse mit diesen Schleifscheiben hinsichtlich Temperaturen und Kräften belegen.

Hinsichtlich der Produkttypen ergeben sich die gleichen Überlegungen wie bei segmentierten Schleifscheiben, die im Aufbau und den Zerspanmechanismen sehr ähnlich sind. Das heißt, die höhere Produktivität geht auf Kosten der Oberflächenbeschaffenheit; der Einsatz für die Produkttypen I und III ist daher nicht sinnvoll, ebenso für die Kategorie der optischen Komponenten des Produkttyps II. Für thermisch kritische Prozesse und die Steigerung der Produktivität bei der Hochleistungsbearbeitung sind diese Spezialschleifscheiben hingegen prinzipiell geeignet, also für die zweite Kategorie des Produkttyps II. Jedoch ist zu beachten, dass mit einer Steigerung der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit, wie sie zur Steigerung der Produktivität notwendig ist, einige Ansätze nicht mehr geeignet sind, da die Schwierigkeit der KSS-Versorgung mit steigender Geschwindigkeit zunimmt. Zusammenfassend ist die Nachhaltigkeit der Zufuhr des KSS über Zwischenräume im Schleifbelag im Einzelfall zu prüfen; eine eindeutig positive Aussage ist nicht möglich.

Optimierte KSS-Zufuhr – Zufuhr in Nuten mittels externer Düsen

Bei der Zufuhr in Nuten mittels externer Düsen besteht die Steigerung der grauen Energie einzig und allein in der Einbringung der Nuten in den Grundkörper mittels Fräsen. Dies bedeutet einen zusätzlichen Schritt in der mechanischen Bearbeitung des Grundkörpers hochharter Schleifscheiben. Zusätzliche oder geänderte Vorrichtungen für den Betrieb sind nicht notwendig.

Im Prozess führt der Einsatz genuteter Schleifscheiben zu einer signifikanten Leistungssteigerung hinsichtlich möglicher Abtragsraten ohne Randzonenschädigung bei gleichzeitig deutlich geringeren spezifischen Energien (bis zu 28 % geringer). Weiterhin konnten geringere gemittelte Rautiefen trotz leicht höheren arithmetischen Rautiefen (wenige Prozent) erzielt werden. Somit ist also die Gesamtrauheit etwas höher, es wird jedoch ein gleichmäßigeres Oberflächenprofil erreicht. Aus den geringeren Temperaturen im Prozess ist weiterhin eine Steigerung der Standzeit der Schleifscheiben zu erwarten, resultierend in geringere spezifische graue Energien.

Genutete Schleifscheiben können somit zur Steigerung der Nachhaltigkeit beider Kategorien von Produkttyp II eingesetzt werden. Die Erhöhung der grauen Energie der Schleifscheibe kann aufgrund der signifikanten Reduzierung der spezifischen Energie im Prozess bei gleichzeitig geringeren spezifischen grauen Energien überkompensiert werden und damit insgesamt eine Reduzierung der grauen Energie der Produkttypen II (optische Komponenten) erreicht werden. Weiterhin sind deutliche Steigerungen der Produktivität ohne negative Beeinflussung der Randzone möglich (günstig für die zweite Kategorie von Produkttyp II).

Schleifscheiben für die Strukturierung von Oberflächen

Schleifscheiben für die Strukturierung von Oberflächen können in profilierte und definiert gesetzte Schleifscheiben unterteilt werden. Profilierte Schleifscheiben sind recht einfach in ihrer Herstellung. Sie erfordern einen Abrichtprozess, der meist ohnehin durchgeführt werden muss. Die Steigerung der grauen Energie ist hierbei die Folge des höheren Verbrauchs an Bindungsmaterial. Definiert gesetzte Schleifscheiben sind, wie oben ausgeführt, sehr aufwendig in der Herstellung, die Steigerung der grauen Energie ist signifikant.

Die Strukturierung von Oberflächen stellt einen zusätzlichen Bearbeitungsschritt dar und somit eine Steigerung der grauen Energie. Konkurrierende Verfahren für diese spezielle Bearbeitung sind Mikrobearbeitungsverfahren, die nochmal höhere spezifische Energien erfordern und bei denen wesentlich längere Prozesszeiten die Folge sind, ebenfalls resultierend in höhere graue Energien.

Produkte, deren Oberflächen strukturiert werden, gehören zu den Produkttypen I und III. Durch die Strukturierung kann der Energieverbrauch reduziert werden (Produkttyp I) oder der Wirkungsgrad gesteigert und damit die Menge an erzeugter Energie erhöht werden (Produkttyp III). Der zusätzliche Energieaufwand bei der Herstellung und dem Einsatz der Schleifscheiben kann also zu einer Erhöhung der Nachhaltigkeit der Produkte beitragen. Die höhere Effizienz des Schleifens im Vergleich zu konkurrierenden Verfahren der Mikrostrukturierung kann gleichzeitig zu einem reduzierten Energieaufwand bei der notwendigen Erzeugung solcher Mikrostrukturen führen.

Schleifscheiben mit passiver Kühlung

Schleifscheiben mit passiver Kühlung erfordern einen Umbau der Schleifmaschine beziehungsweise Sondervorrichtungen. Sie tragen somit zur Erhöhung der grauen Energie bei.

Die spezifische Energie des Prozesses wird insofern reduziert, als dass die passive Kühlung weniger Energie benötigt als eine externe Überflutungskühlung. Jedoch sind die Prozessergebnisse hinsichtlich der Produktqualitäten schlechter als bei einer Überflutungskühlung. Im Vergleich zu einer Trockenbearbeitung werden bessere Produktqualitäten erreicht, jedoch sind hier die spezifischen Energien höher.

Aufgrund schlechteren Einsatzverhaltens als bei einer Überflutungskühlung und Problemen mit der Spanabfuhr kommen Schleifscheiben mit passiver Kühlung nicht für die Produkttypen I und III Frage, ebenso wenig für optische Komponenten des Produkttyps II. Für Anwendungen, in denen die Produktivität im Vordergrund steht (zweite Kategorie des Produkttyps II) sind sie ebenfalls nicht sinnvoll, da eine externe Überflutungskühlung eine höhere Produktivität gewährleistet. Unter Aspekten der Nachhaltigkeit ist die Verfolgung dieses Ansatzes daher nicht sinnvoll.

Schleifscheiben mit Festschmierstoffkühlung

Die drei Arten der Herstellung von Schleifscheiben mit Feststoffschmierung, das Auffüllen von segmentierten Schleifscheiben, das Tränken der Schleifscheibe in Festschmierstoffpartikeln sowie die Zugabe der Festschmierstoffpartikel beim Pressen der Grünlinge, resultieren in einer Änderung der grauen Energie der Schleifscheibe. Das Auffüllen der Segmente und das Tränken führen zu einer Steigerung der grauen Energie. Das Zumischen der Partikel in den Grünling

stellt die nachhaltigste Alternative dar. Die Änderung der grauen Energie besteht hier in der Substitution des Festschmierstoffs mit herkömmlichen Komponenten des Belags und kann je nach Werkstoff gar zu einer Reduzierung der grauen Energie führen.

Im Prozess treffen die gleichen Überlegungen zu wie bei den Schleifscheiben mit passiver Kühlung. Die Festschmierstoffkühlung ist eine Alternative zur Trockenbearbeitung oder der Minimalmengenschmierung, kann hinsichtlich der Produktivität und der Produktqualität jedoch nicht mit externer Überflutungskühlung konkurrieren.

Hinsichtlich der Bewertung der Nachhaltigkeit gelten daher ebenfalls die gleichen Überlegungen. Sie führen nicht zu effizienteren Produkttypen I und III, können die Qualitätsanforderungen optischer Komponenten des Produkttyps II nicht erfüllen und die Produktivität kann im Vergleich zur Nassbearbeitung nicht gesteigert werden. Das Konzept ist nicht nachhaltig.

5.4 Fazit zur Nachhaltigkeit von Spezialanwendungen

Die Bewertung der Nachhaltigkeit der in Kapitel 4 vorgestellten Spezialanwendungen erfolgte unter Berücksichtigung der jeweiligen technologischen Möglichkeiten und Vorteile und unter Einbeziehung energetischer Betrachtungen.

Für die Gruppe der Anwendung herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialanwendungen ergaben sich uneingeschränkt positive Empfehlungen für das Schleifhärten, die Verfestigung unter Ausnutzung des Größeneffekts und die Schneidkantenpräparation mittels Schleifen. Eine positive Empfehlung mit leichten Vorbehalten erhielt das ELID-Schleifen sprödharter Werkstoffe. Keine Empfehlung erhielt die interne KSS-Zufuhr durch poröse Schleifscheiben.

Aus der Gruppe der Entwicklung von Spezialschleifscheiben erhielten uneingeschränkt positive Empfehlungen die Optimierung von Schleifbelägen mittels Laser und die Spezialschleifscheiben für die Mikrostrukturierung von Oberflächen. Positive Empfehlungen erhielten die Schleifscheiben für die Bearbeitung sprödharter Werkstoffe und genutete Schleifscheiben zur Verbesserung der KSS-Zufuhr. Nur eingeschränkte Empfehlungen erhielten die Schleifscheiben mit optimierten Schleifbelägen durch Segmentierungen und die KSS-Zufuhr über Zwischenräume im Schleifbelag. Eher negativ fiel die Bewertung definiert gesetzter Schleifscheiben aus. Klar negative Bewertungen ergaben sich bei den Schleifscheiben für die Trockenbearbeitung, der internen KSS-Zufuhr, Schleifscheiben mit passiver Kühlung und solchen mit imprägnierten Festschmierstoffen.

Bei der Bewertung zeigte sich, dass viele der Ansätze auf eine höhere Produktivität des Schleifens abzielen, also auf die Verbesserung des Hochleistungsschleifens. Die hierbei erzeugten Produkte gehören zur zweiten Kategorie von Produkttyp II und bilden daher eine Minderheit durch Schleifen bearbeiteter Produkte. Solche Produkte sind in der Regel günstiger und nachhaltiger durch Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide zu bearbeiten. Zukünftige Spezialentwicklungen sollten sich daher auf die klassischen Produkte die mittels Schleifen hergestellt werden konzentrieren, also die Produkttypen I und III. Wobei hier keine Verbesserung des Schleifprozesses, sondern eine Verbesserung der Produkteigenschaften angestrebt werden sollte.

6 Zusammenfassende Bewertung und Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Schleifwerkzeuge unterscheiden sich in ihrem Aufbau grundlegend von konkurrierenden Werkzeugen der geometrisch bestimmten Zerspanung. Anstelle einer definierten, meist einstelligen Anzahl an Schneiden verfügen sie über eine sehr hohe, in üblichen Dimensionen leicht 4 bis 5-stellige Anzahl an Schneiden. Neben der Anzahl sind auch die Geometrie und Lage der Schneiden nicht definiert und sie kommen regellos zum Einsatz.

Am Markt existiert eine schier unendliche Anzahl verschiedenster Schleifscheibentypen, die sich hinsichtlich Kornarten, Kornformen, Kornkonzentrationen und Bindungstypen, um nur einige Eigenschaften zu nennen, entweder nur geringfügig oder auch stark voneinander unterscheiden. Die Auslegung und Auswahl von Schleifwerkzeugen für eine Bearbeitungsaufgabe sind die Aufgaben des Schleifscheibenherstellers und entscheiden über seine Wettbewerbsfähigkeit. Trotz dieser hohen Anzahl unterschiedlichster Schleifscheiben ist der Grundaufbau aller Schleifscheiben gleich. Konventionelle Schleifscheiben bestehen vollständig aus einem Schleifbelag, hochharte oder Hochleistungsschleifscheiben verfügen über einen Grundkörper, auf dem der Schleifbelag aufgebracht ist. Er setzt sich aus den stochastisch in der Bindung verteilten Körnern zusammen. Ziel der Anwendung dieser herkömmlichen Schleifscheiben ist die Realisierung eines Materialabtrags beziehungsweise die Erzeugung einer definierten Geometrie der Werkstücke und die Erzeugung der Werkstückoberfläche.

In dieser Schrift wurden Ansätze vorgestellt, die über diesen herkömmlichen Einsatz des Schleifens hinausgehen oder auf eine signifikante Verbesserung des Einsatzverhaltens von Schleifscheiben durch unkonventionelle Modifikationen derselben abzielen. Dies umfasst sowohl den Einsatz herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialanwendungen als auch die Entwicklung von Spezialschleifscheiben, die sich teilweise stark von herkömmlichen Schleifscheiben unterscheiden.

Für den Einsatz herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialanwendungen konnten fünf verschiedene Gebiete identifiziert werden:

- thermisches Schleifhärten,
- Ausnutzen des Größeneffektes für das Härten durch Verfestigung der Werkstückoberfläche,
- gezielte Schneidkantenpräparation,
- Zerspanung sprödharter Werkstoffe mittels speziellem Abrichtverfahren,
- interne KSS-Zufuhr durch einen porösen Belag.

Bei der Entwicklung von Spezialschleifscheiben konnten vier wesentliche Gebiete unterschieden werden; bei einigen wurde eine Untergliederung vorgenommen:

- Schleifscheiben mit verbesserter oder optimierter Spanbildung
 - segmentierte und strukturierte Schleifscheiben
 - Schleifscheiben mit definiertem Kornsetzmuster
 - mittels Laser hergestellte definierte Schleifbeläge

- Schleifscheiben für die Trockenzerspanung
- Schleifscheiben für die Zerspanung sprödharter Werkstoffe
- Schleifscheiben für eine verbesserte KSS-Zufuhr
 - Zufuhr über Bohrungen oder Kanäle innerhalb der Schleifscheibe
 - Zufuhr über Zwischenräume in der Schleifbelagstopographie
 - Zufuhr über Nuten im Schleifbelag mittels herkömmlicher Düsen
- Schleifscheiben für die Strukturierung von Oberflächen

Zunächst erfolgte eine technologische Bewertung der Ansätze, basierend auf der verfügbaren Literatur. Dabei wurden die Möglichkeiten und Grenzen der jeweiligen Ansätze aufgezeigt. Die meisten zeigten interessante, oft vielversprechende Ergebnisse. Nur wenige wurden aufgrund der Publikationslage negativ bewertet. Dies liegt wohl nicht zuletzt darin begründet, dass nicht erfolgreiche Forschung leider oft nicht veröffentlicht wird.

Die meisten Ansätze sind also technologisch interessant. Dennoch finden sich fast alle der vorgestellten Entwicklungen nur in der Forschung, denn industrielle Anwendungen sind nur wenige bekannt. Dies mag zwar auch daran liegen, dass die Schleifscheibenindustrie recht konservativ ist. Die breite Anzahl verfügbarer, technologisch interessanter Ansätze ist jedoch so hoch, dass eine Markteinführung zumindest in einigen Fällen zu erwarten wäre. Somit müssen neben den technologischen Aspekten auch andere Faktoren eine Rolle spielen.

Um dies näher zu beleuchten, wurde eine Bewertung der Nachhaltigkeit der einzelnen Ansätze vorgenommen. Für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Fertigungsprozessen hat sich die Betrachtung der energetischen Aspekte durchgesetzt. Der Energiekonsum wird dabei anhand der spezifischen Energie ermittelt, der benötigten Energie zum Abtrag eines Materialvolumens. Generell sind die spezifischen Energien beim Schleifen sehr hoch. Bei der geometrisch bestimmten Zerspanung liegen typische Werte im Bereich 2 J/mm^3 bis 10 J/mm^3 , beim Schleifen im Bereich 10 J/mm^3 bis 200 J/mm^3 , begründet durch die hohen Anteile an Reibung und plastischer Verformung. Zunächst erscheint das Schleifen daher recht negativ. Jedoch muss beachtet werden, dass die spezifische Energie in der Fertigung umgekehrt proportional zur erreichbaren Oberflächengüte ist. Zur Bewertung der Nachhaltigkeit müssen die zu bearbeitenden Produkte daher mit einbezogen werden. Bei den Produkten wird wiederum die Energie ermittelt, die für deren Herstellung benötigt wird, die graue Energie. Darüber hinaus ist zu beachten, was mit den Produkten nach ihrer Fertigung passiert, also welchen Energieverbrauch deren Einsatz nach sich zieht und auch welchen Einfluss Schleifen hierauf nehmen kann. So können durch Schleifen tribologisch günstige Oberflächen generiert werden, die in reduzierte Reibung im Betrieb der Produkte führen können und somit letztlich zu Energieeinsparungen. Diese Aspekte wurden in der Bewertung der Nachhaltigkeit der Spezialanwendungen berücksichtigt.

Zunächst wurden die Produkte, die mittels Schleifen bearbeitet werden, in drei verschiedene Produkttypen eingeordnet:

- **Produkttyp I: geringe graue Energie, hoher Energieverbrauch im Einsatz**
Bei diesen Produkten kann durch einen zusätzlichen Aufwand in der Fertigung eine positive Energiebilanz über deren gesamte Lebensdauer erreicht werden. Beispiele sind Lager oder Kupplungen.
- **Produkttyp II: hohe graue Energie, geringer oder kein Energieverbrauch im Einsatz**
Bei diesen Produkten kann in der Regel durch Einsparungen bei deren Fertigung eine positive Bilanz über die Lebenszeit erreicht werden. Beispiele sind optische Komponenten. Weiterhin zählen solche Fälle zu dieser Kategorie, bei denen hohe Abtragsraten in der Fertigung gewünscht sind, beispielsweise die Entfernung von Stützstrukturen additiv gefertigter Produkte.
- **Produkttyp III: energieerzeugende Produkte**
Der Einsatz dieser Produkte geht mit einem Energiegewinn einher. Trotz der benötigten grauen Energie der Produkte geht eine positive Energiebilanz durch deren Einsatz einher. Beispiel sind Windkraftanlagen.

Es wurde untersucht, für welche Produkttypen die jeweiligen Spezialanwendungen infrage kommen und inwiefern die Energiebilanz der Produkte positiv beeinflusst werden kann. Dabei wurde auch der zusätzliche energetische Aufwand der Spezialanwendungen im Vergleich zur herkömmlichen Herstellung berücksichtigt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 91 graphisch zusammengefasst.

Die Analyse zeigte, dass einige der Spezialanwendungen trotz technologischer Vorteile hinsichtlich der Nachhaltigkeit der hierbei bearbeiteten Produkte nicht sinnvoll sind. Die Entwicklung von Spezialschleifscheiben erfordert einen zusätzlichen Energieaufwand, der sich nur durch eine positive Gesamtbilanz der hergestellten Produkte lohnt. Viele der Entwicklungen zielen jedoch auf eine Erhöhung der Produktivität ab. Dies ist nur für die zweite Kategorie von Produkttyp II von Nutzen, eine Kategorie, deren Produkte häufig nachhaltiger mittels Verfahren der geometrisch bestimmten Zerspanung bearbeitet werden können. Die Abwägung der erhöhten grauen Energie der Schleifscheiben gegen die vermeintliche Reduzierung der grauen Energie hergestellter Produkte ist damit eher fraglich. Die Verfolgung von Spezialanwendungen, die lediglich auf eine Erhöhung der Produktivität abzielen, in der Regel aufgrund der Mechanismen der Spanbildung einhergehend mit einer Reduzierung der Oberflächenqualität, kann daher nicht empfohlen werden.

Es gibt jedoch auch einige Spezialanwendungen, die vorbehaltlos als nachhaltig eingestuft werden können. In der Gruppe der Anwendungen herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialanwendungen waren dies das Schleifhärten und die Verfestigung unter Ausnutzung des Größeneffekts. Beide Verfahren substituieren sonst dem Schleifen nachgelagerte, teure und schwierige in die Prozesskette zu integrierende Wärmebehandlungsverfahren.

Aus der gleichen Gruppe als vorbehaltlos positiv eingestuft wurde die Schneidkantenpräparation und mit leichten Vorbehalten das ELID-Schleifen sprödharter Werkstoffe. Beiden Verfah-

ren ist gemein, dass sie, noch mehr als die beiden vorgenannten Härteprozesse, neue Anwendungsfelder für das Schleifen erschließen und technologisch Möglichkeiten bieten, die aktuell keine anderen Verfahren als Alternative leisten können. Die Konkurrenzlosigkeit ist selbstverständlich auch ein Aspekt der Nachhaltigkeit, denn können mit einem Verfahren neue oder neuartige Produkte hergestellt werden, die sich positiv auf die Umwelt und die Gesellschaft auswirken, so ist dies nachhaltig.

Aus der Gruppe der Entwicklung spezieller Schleifscheiben erhielten uneingeschränkt positive Empfehlungen: die Optimierung von Schleifbelägen mittels Laser und die Spezialschleifscheiben für die Mikrostrukturierung von Oberflächen. Erstgenannte können für alle Produkttypen einen positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeit erzielen und die Mikrostrukturierung für die wichtigen Produkttypen I und III. Positive Empfehlungen erhielten die Bearbeitung sprödharter Werkstoffe und genutete Schleifscheiben zur Verbesserung der KSS-Zufuhr. Für erstgenanntes gilt das Gleiche wie bei den beiden vorgenannten: es werden neue Anwendungsfelder für das Schleifen erschlossen. Die genuteten Schleifscheiben eignen sich für beide Kategorien von Produkttyp II und sind daher auch für klassische, mittels Schleifen hergestellte Produkte sinnvoll. Nur eingeschränkte Empfehlungen ergaben sich für die optimierten Schleifbeläge durch Segmentierungen und die KSS-Zufuhr über Zwischenräume im Schleifbelag, beide zielen lediglich auf eine Produktivitätserhöhung ab und sind aufgrund der genannten Argumente nicht eindeutig nachhaltig.

Abschließend lässt sich sagen, dass zukünftige Entwicklungen sich aufgrund der genannten Argumente nicht auf eine Steigerung der Produktivität konzentrieren sollten, wie dies aktuell beim Gros der Fall ist. Die Verbesserungen der Qualität und der Eigenschaften (Tribologie) erzeugter Produkte sollte im Vordergrund stehen. Verfahren zur Mikrostrukturierung mittels Schleifen, die wesentlich schneller als konkurrierende Verfahren der Mikro- und UP-Zerspannung sind, stellen ein positives Beispiel dar.

Aus allen in dieser Schrift genannten Verfahren sticht die Entwicklung von Spezialschleifscheiben mit durch Laser optimierten Schleifbelägen hervor. Dieses noch junge und vergleichsweise wenig beforschte Feld bietet nicht nur technologisch neue und einzigartige Lösungen, es kann auch für alle durch Schleifen hergestellte Produkttypen eine gesteigerte Nachhaltigkeit erreichen. Aus diesem Bereich sind, nicht zuletzt aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit leistungsstarker, präziser und günstiger Dioden gepumpter Lasersysteme, zukünftig noch interessante Entwicklungen für die Schleifscheibentechnologie zu erwarten.

Der Einsatz herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialanwendungen zeigt, dass die Applikationsmöglichkeiten des Schleifens deutlich über eine bloße Geometrie- oder Oberflächenerzeugung ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Schleifscheibenentwicklungen hinaus gehen können. Die prozessintegrierte Oberflächenhärtung und die gezielte Schneidkantenpräparation sind hier besonders zu erwähnen. Beides sind industriell weit verbreitete Notwendigkeiten; der Einsatz des Schleifens bietet hier technologische und wirtschaftliche Vorteile. Die Untersuchungen zeigen somit, das Schleifen weit mehr kann als nur Schleifen.

		Steigerung der Nachhaltigkeit von Produkttyp:			Bewertung des technolog. Aufwands / der grauen Energie	Gesamtbewertung
		P I	P II	P III		
konventionelle Schleifscheiben	Schleifhärten	↑	□	□	□	↑
	Ausnutzung des Größeneffekts	↑	□	□	□	↑
	Schneidkantenpräparation	↑+	□	□	□	↑
	ELID Schleifen	□	+	□	↓	↑
	Interne KSS-Zufuhr	↓	□	↓	↓	↓
Spezialschleifscheiben	Optimierte Schleifbeläge - segmentierte	↓	□	↓	↓	↓
	Optimierte Schleifbeläge - definiert gesetzt	↓	□	↓	↓↓	↓↓
	Optimierte Schleifbeläge - laserabgerichtet	↑	↑	↑	↓↓	↑↑
	Optimierte Schleifbeläge - Trockenzerspanung	□	↓	□	↓↓	↓↓
	Schleifscheiben für sprödharte Zerspanung	□	+	□	↓↓	↑
	Optimierung KSS-Zufuhr - Bohrungen	↓	□	↓	↓↓	↓↓
	Optimierung KSS-Zufuhr - Zwischenräume	↓	□	↓	↓	↓↓
	Optimierung KSS-Zufuhr - Nuten	□	↑	□	↓	□
	Strukturierung von Oberflächen	↑	□	↑	↓↓	↑↑
	Passive Kühlung	□	□	□	↓	↓↓
	Festschmierstoff	□	□	□	□	↓

Legende ↓↓ sehr negativ □ kein Einfluss oder nicht anwendbar ↑ positiv
 ↓ negativ + Sonderfall: neues Anwendungsgebiet ↑↑ sehr positiv

Abbildung 91: Zusammenfassende Bewertung der Spezialanwendungen und Spezialschleifscheiben

7 Literaturverzeichnis

- 1 M. Abebe, F.C. Appl: Theoretical analysis of the basic mechanics of abrasive processes - Part 1: general model. *Wear* 126 (1988): S. 251-266.
- 2 M. Abebe, F.C. Appl: Theoretical analysis of the basic mechanics of abrasive processes - Part 2: Model of the ploughing process. *Wear* 126 (1988): S. 267-283.
- 3 R.L. Aghan, R. McPherson: Mechanism of material removal during abrasion of rutile. *Journal of the American Ceramic Society* 56/1 (1973): S. 46-47.
- 4 X. Ai, J. Zhang: Study on the grinding of polycrystalline diamond with slotted diamond wheels. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of the Society of Mechanical Engineers* (1995): S. 55-60.
- 5 S.K. Ajjarapu, R.R. Fesperman, J.A. Patten, H.P. Cherukuri: Experimental and numerical investigation of ductile regime machining of silicon nitride. *AIP Conference Proceedings* 712 (2004): S. 1377-1383.
- 6 J. Akbari, Y. Ichida, K. Kishi, T. Machida: Grinding energy of fine ceramics. *Proceedings of the 1st International Conference on new Manufacturing Technology* (1990): S. 323-328.
- 7 T. Akiyama, J. Shibata, S. Yonetsu: Behaviour of grinding fluid in the gap of the contact area between a grinding wheel and a workpiece. *Proceedings of the 5th International Conference on Production Engineering* (1984): S. 52-57.
- 8 R. Alberdi, J.A. Sanchez, I. Pombo, N. Ortega, B. Izquierdo, S. Plaza, D. Barrenetxea: Strategies for optimal use of fluids in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51 (2011): S. 491-499.
- 9 M. Alberts, K. Kalaitzidou, S. Melkote: An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49/12-13 (2009): S. 966-970.
- 10 P. Albrecht: New developments in the theory of the metal-cutting process - Part I - The ploughing process in metal cutting. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 81/4 (1960): S. 348-357.
- 11 G.I. Alden: Operation of grinding wheels in machine grinding. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 36/1446 (1914): S. 451-460.
- 12 I.M. Allam: Solid lubricants for applications at elevated temperatures. *Journal of Materials Science* 26/15 (1991): S. 3977-3984.
- 13 R.L. Allor, R.K. Govila, T.J. Whalen: Influence of machining on strength properties of turbine materials. *Ceramic engineering and science proceedings* (1982): S. 392-404.
- 14 D. Anderson, A. Warketin, R. Bauer: Experimental and numerical investigation of single abrasive-grain cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51/12 (2011): S. 898-910.

- 15 P. Andersson, J. Koskinen, S. Varjus, Y. Gerbig, H. Haefke, S. Georgiou, B. Zhmud, W. Buss: Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces. *Wear* 262/3-4 (2007): S. 369-379.
- 16 ANSI B74.12: Specifications for the size of abrasive grain-grinding wheels, polishing and general industrial uses (1992).
- 17 M. Arif, M. Rahman, W.Y. San: A state-of-the-art review of ductile cutting of silicon wafers for semiconductor and microelectronics industries. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 63 (2012): S. 481-504.
- 18 M. Arif, Z. Xinquan, M. Rahman, S. Kumar: A predictive model of the critical undeformed chip thickness for ductile-brittle transition in nano-machining of brittle materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 64 (2013): S. 114-122.
- 19 D. Aslan, E. Budak: Surface roughness and thermo-mechanical force modeling for grinding operations with regular and circumferentially grooved wheels. *Journal of Materials Processing Technology* 223 (2015): S. 75-90.
- 20 J.C. Aurich, O. Braun, G. Warnecke, G. Cronjäger: Development of a superabrasive grinding wheel with defined grain structure using kinematic simulation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52/1 (2003): S. 275-280.
- 21 J.C. Aurich, M. Carrella, B. Kirsch: Product-oriented sustainability aspects of abrasive processes. *ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference* (2013): S. 1-6.
- 22 J.C. Aurich, M. Carrella, M. Walk: Micro grinding with ultra small micro pencil grinding tools using an integrated machine tool. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64/1 (2015): S. 325-328.
- 23 J.C. Aurich, C. Effgen: Influence of the machining conditions when preparing cutting edges with elastic bonded grinding wheels. *Production Engineering* 9/3 (2015): 329-336.
- 24 J.C. Aurich, C. Effgen, B. Kirsch: Cutting edge preparation with elastic bonded superabrasive grinding wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65/1 (2016): S. 329-332.
- 25 J.C. Aurich, J. Hartig, B. Kirsch, P. Mayer, M. Zimmermann: Schneidkantenpräparation an Wendeschneidplatten mit elastisch gebundenen Schleifscheiben. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111/9 (2016): S. 492-495.
- 26 J.C. Aurich, P. Herzenstiel, H. Sudermann, T. Magg: High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57/1 (2008): S. 357-362.
- 27 J.C. Aurich, R. Ilsen, G. Mert, B. Kirsch: Nachhaltigkeit in der Produktion–Aufgabenstellungen und Lösungsansätze. *Fortschritte in der Nachhaltigkeitsforschung* 7 (2018): S. 233-252.

- 28 J.C. Aurich, B. Kirsch: Grinding Wheel. CIRP Encyclopedia of Production Engineering (2014).
- 29 J.C. Aurich, B. Kirsch: Energieeffizienz beim Schleifen: Eine Betrachtung über Produktion und Produkteinsatz. 3rd International Chemnitz Manufacturing Colloquium ICMC (2014): S. 463-480.
- 30 J.C. Aurich, B. Kirsch: Improved coolant supply through slotted grinding wheel. CIRP Annals - Manufacturing Technology 62/1 (2013): S. 363-366.
- 31 J.C. Aurich, B. Kirsch: Kinematic simulation of high-performance grinding for analysis of chip parameters of single grains. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 5/3 (2012): S. 164-174.
- 32 J.C. Aurich, B. Kirsch, P. Herzenstiel, P. Kugel: Hydraulic design of a grinding wheel with an internal cooling lubricant supply. Production Engineering 5/2 (2011): S. 119-126.
- 33 J.C. Aurich, B. Linke, M. Hauschild, M. Carrella, B. Kirsch: Sustainability of abrasive processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology 62/2 (2013): S. 653-672.
- 34 J.C. Aurich, G. Warnecke, O. Braun: Kinematische Simulation zur Prozessoptimierung und Werkzeugentwicklung beim Schleifen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen 61 (2004): S. 160-172.
- 35 B.W.E. Avient, J. Goddard, H. Wilman: An experimental study of friction and wear during abrasion of metals. Proceedings Royal Society London A 258/1293 (1960): S. 159-180.
- 36 D. Axinte, P. Butler-Smith, C. Akgun, K. Kolluru: On the influence of single grit micro-geometry on grinding behavior of ductile and brittle materials. International Journal of Machine Tools and Manufacture 74 (2013): S. 12-18.
- 37 B. Azarhoushang: Wear of non-segmented and segmented diamond wheels in high-speed deep grinding of carbon fibre-reinforced ceramics. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 74/9-12 (2014): S. 1293-1302.
- 38 B. Azarhoushang, A. Daneshi, D.H. Lee: Evaluation of thermal damages and residual stresses in dry grinding by structured wheels. Journal of Cleaner Production 142 (2017): S. 1922-1930.
- 39 B. Azarhoushang, H. Kitzig-Frank, A. Zahedi, N. Jandaghi: Optimiertes Trockenschleifen mit mechanisch- und laserstrukturierten Schleifscheiben. DIHW - Diamant Hochleistungswerkzeuge 9/2 (2017): S. 20-25.
- 40 B. Azarhoushang, A. Zahedi: Laserstrukturieren und-profilieren von Schleifwerkzeugen. DIHW - Diamant Hochleistungswerkzeuge 8/3 (2016): S. 32-36.
- 41 B. Azarhoushang, A. Zahedi, T. Luckstein: Erzeugung von Mikrostrukturen auf einer cBN-Schleifscheibe mit einem Pikosekundenlaser. DIHW - Diamant Hochleistungswerkzeuge 6/3 (2014): S. 40-45.

- 42 D. Babic, D.B. Murray, A.A. Torrance: Control of grinding temperature by high speed air jets. Proceeding of the ASME - ZSIS International Thermal Science Seminar II (2004): S. 399-406.
- 43 W.R. Backer, E.R. Marshall, M.C. Shaw: The size effect in metal cutting. Transactions of the ASME 74 (1952): S. 61-72.
- 44 W.R. Backer, M.E. Merchant: On the basic mechanics of the grinding process. Transactions of the ASME 80/1 (1958): S. 141-148.
- 45 J. Badger: Factors affecting wheel collapse in grinding. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009): S. 307-310.
- 46 M. Bailey, L. Hedges: Die Kristallmorphologie von Diamant und ABN. Industrie Diamanten Rundschau 3 (1995): S. 126-129.
- 47 M.J. Ball, N.A. Murphy, P. Shore: Electrolytically assisted "ductile" mode diamond grinding of BK7 and SF10 optical glasses. SPIE 1573 (1991): S. 30-38.
- 48 B.P. Bandyopadhyay, H. Ohmori, I. Takahashi: Ductile regime mirror finish grinding of ceramics with electrolytic in-process dressing (ELID) grinding. Material and Manufacturing Processes 11/5 (1996): S. 789-799.
- 49 EP 1331064 B1: Verfahren zur Herstellung eines Schleifwerkzeugs mit galvanisch gebundenen Schleifscheiben.
- 50 R. Barth: Über die Kühlung beim Genauerschleifen. wt - Werkstatttechnik online 53/4 (1963): S. 175-177.
- 51 D. Berger, M. Althoff, K. Rickens, C. Heinzel, E. Brinksmeier: Präzisionsschleifen mit groben Diamantkörnern. wt - Werkstatttechnik online 106/6 (2016): S. 387-393.
- 52 U.S. Patent No. 1,526,953: Segmental grinding wheel.
- 53 D. Bhaduri, R. Kumar, A.K. Jain, A.K. Chattopadhyay: On tribological behaviour and application of TiN and MoS₂-Ti composite coating for enhancing performance of monolayer cBN grinding wheel. Wear 268/9-10 (2010): S. 1053-1065.
- 54 D. Bhaduri, S.L. Soo, D. Novovic, D.K. Aspinwall, P. Harden, C. Waterhouse, S. Bohr, A.C. Mathieson, M. Lucas: Ultrasonic Assisted Creep Feed Grinding of Inconel 718. Procedia CIRP 6 (2013): S. 615-620.
- 55 D. Biermann, R. Aßmuth, M. Wolf, M. Kipp: Der letzte Schliff formt die Mikrogestalt – Neue Potenziale in der Schneidkantenpräparation mittels elastisch gebundener Diamantschleifscheiben. Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik 26/2 (2013): S. 76-83.
- 56 T.G. Bifano: Ductile-Regime Grinding of Brittle Materials. Dissertation, NC State University, Raleigh (1988).
- 57 T.G. Bifano, P. Blake, T.A. Dow, R.O. Scattergood: Precision machining of ceramic materials. Proceedings of 1st International Symposium on Machining of Ceramic Materials and Components (1988): S. 99-120.

- 58 T.G. Bifano, T.A. Dow, R.O. Scattergood: Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 113 (1991): S. 184-189.
- 59 T.G. Bifano, T.A. Dow, R.O. Scattergood: Ductile-regime grinding of brittle materials: Experimental results and the development of a model. *Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics* 966 (1988): S. 108-115.
- 60 T.G. Bifano, S.C. Fawcett: Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding. *Precision Engineering* 13/4 (1991): S. 256-262.
- 61 W.S. Blackley, R.O. Scattergood: Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials. *Precision Engineering* 13/2 (1991): S. 95-103.
- 62 P.N. Blake: On ductile-regime diamond turning of germanium and silicon. Dissertation, North Carolina State University, USA (1988).
- 63 P.N. Blake, R.O. Scattergood: Ductile-regime machining of germanium and silicon. *Journal of the American Ceramic Society* 73/4 (1990): S. 949-957.
- 64 J. Bliedtner, H. Müller, A. Barz: *Lasermaterialbearbeitung*, Carl Hanser Verlag (2013).
- 65 J.M. Boettger, M.K. Ker, P. Shore, D.J. Stephenson: Influence of ductile mode grinding on the strength of silicon based ceramics. *Machining of Advanced Materials - Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials* 847 (1993): S. 353-358.
- 66 A.C. Bottene, E.J. da Silva, A. Simon, B. Kirsch, J.C. Aurich: New Advances in Texturing by Grinding. *Proceedings of the 23rd International Congress of Mechanical Engineering* (2015).
- 67 K.D. Bouzakis, E. Bouzakis, S. Kombogiannis, S. Makrimalakis, G. Skordaris, N. Michailidis, P. Charalampous, R. Paraskevopoulou, R. M'Saoubi, J.C. Aurich, F. Barthelmä, D. Biermann, B. Denkena, D. Dimitrov, S. Engin, B. Karpuschewski, F. Klocke, T. Özel, G. Poulachon, J. Rech, V. Schulze, L. Settineri, A. Srivastava, K. Wegener, E. Uhlmann, P. Zeman: Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 7/3 (2014): S. 264-273.
- 68 K.-D. Bouzakis, P. Charalampous, T. Kotsanis, G. Skordaris, E. Bouzakis, B. Denkena, B. Breidenstein, J.C. Aurich, M. Zimmermann, T. Herrmann, R. M'saoubi: Effect of HM substrates' cutting edge roundness manufactured by laser machining and micro-blasting on the coated tools' cutting performance. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 18/18 (2017): S. 188-197.
- 69 P.-H. Brammertz: Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindrehen. *Industrie-Anzeiger* 2 (1961): S. 25-32.
- 70 O. Braun: Konzept zur Gestaltung und Anwendung definiert gesetzter CBN-Schleifscheiben. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation / TU Kaiserslautern (2008).

- 71 O. Braun, G. Warnecke, J.C. Aurich: Simulationsgestützte Entwicklung von CBN-Schleifscheiben mit definierter Kornanordnung. *Industrie Diamanten Rundschau* 38/1 (2004): S. 26-32.
- 72 P.W. Bridgman: *Studies in large plastic flow and fracture*, Harvard University Press (1964).
- 73 P.W. Bridgman: The Effect of Hydrostatic Pressure on the Fracture of Brittle Substances. *Journal of Applied Physics* 18/2 (1947): S. 246-258.
- 74 P.W. Bridgman, I. Šimon: Effects of Very High Pressures on Glass. *Journal of Applied Physics* 24/4 (1953): S. 405-413.
- 75 E. Brinksmeier: Prozeß- und Werkstückqualität in der Feinbearbeitung. Habilitation, IFW Hannover (1991).
- 76 E. Brinksmeier: Randzonenanalyse geschliffener Werkstücke. Dissertation, IFW Hannover (1982).
- 77 E. Brinksmeier, N. Bleil: Grind-strengthening of Low Carbon Steels. *Proceedings of the 2nd ICNFT: 2nd International Conference on New Forming Technology* (2007): S. 563-571.
- 78 E. Brinksmeier, N. Bleil: Using the size effect of specific energy in grinding for work hardening. *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 12/1-3 (2007): S. 259-269.
- 79 E. Brinksmeier, A. Bohling: Beherrschung des Kühlschmierstoffeinsatzes beim Schleifen. 7. Seminar Moderne Schleiftechnologie und Feinbearbeitung, Neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis (2008): 3.1 - 3.26.
- 80 E. Brinksmeier, T. Brockhoff: Schleifhärten - Grundlagen, Potentiale und Verfahrensgrenzen. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen* (2000): S. 23-44.
- 81 E. Brinksmeier, T. Brockhoff: Advanced grinding processes for surface strengthening of structural parts. *Machining Science and Technology* 1/2 (1997): S. 299-309.
- 82 E. Brinksmeier, T. Brockhoff: Utilization of grinding heat as a new heat treatment process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 45/1 (1996): S. 283-286.
- 83 E. Brinksmeier, T. Brockhoff: Randschicht-Wärmebehandlung durch Schleifen. *Zeitschrift für Werkstoffe, Wärmebehandlung, Fertigung - Im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e.V.(AWT)* Hrsg. 49/5 (1994): S. 327-330.
- 84 E. Brinksmeier, J.T. Cammet, W. König, P. Leskovar, H.K. Tönshoff: Residual stresses - Measurements and causes in machining processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 31/2 (1982): S. 491-510.
- 85 E. Brinksmeier, A. Giwerzew: Characterization of the size effect and its influence on the workpiece residual stresses in grinding. *Process Scaling - Proceedings of the*

1. Colloquium of DFG Priority Program Process Scaling Bremen (2003): S. 137-144.
- 86 E. Brinksmeier, D. Grimme, K. Rickens: Duktiler Materialabtrag beim Schleifen sprödharter Werkstoffe. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen 60 (2001): S. 50-67.
- 87 E. Brinksmeier, C. Heinzel, N. Bleil: Superfinishing and grind-strengthening with elastic bonding system. Journal of Materials Processing Technology 209/20 (2009): S. 6117-6123.
- 88 E. Brinksmeier, C. Heinzel, C. Böhm: Schleifhärten als Alternative - Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit und Prozessstabilität. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 95/7-8 (2000): S. 373-378.
- 89 E. Brinksmeier, C. Heinzel, J.-W. Huntemann: Schleifhärten. Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten (2015): S. 417-423.
- 90 E. Brinksmeier, C. Heinzel, L. Meyer, M. Wittmann: Bewertung der Effektivität der Kühlschmierstoffzufuhr beim Schleifen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen 61 (2004): S. 2-16.
- 91 E. Brinksmeier, C. Heinzel, M. Wittmann: Friction, cooling and lubrication in grinding. CIRP Annals - Manufacturing Technology 48/2 (1999): S. 581-598.
- 92 E. Brinksmeier, R. Malz, W. Preuß: Investigation of a novel tool concept for ductile grinding of optical glass. Proceedings of ASPE 2000 Annual Meeting, Scottsdale, Arizona 10 (2000): S. 74-77.
- 93 E. Brinksmeier, E. Minke, T. Wilke: Investigations on surface layer impact and grinding wheel performance for industrial grind-hardening applications. Production Engineering—Research and Development 12/1 (2005): S. 35-40.
- 94 E. Brinksmeier, W. Preuß, O. Riemer: From friction to chip removal. An experimental investigation of the microcutting process - Part 2 - Ductile to brittle transition in monocrystalline silicon and germanium. Proceedings of the 8th International Precision Engineering Seminar 8 (1995): S. 335-338.
- 95 E. Brinksmeier, O. Riemer, R. Gläbe, B. Lünemann, C.V. Kopylow, C. Dankwart, A. Meier: Submicron functional surfaces generated by diamond machining. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59/1 (2010): S. 535-538.
- 96 E. Brinksmeier, O. Riemer, K. Rickens, D. Berger: Neuartiges Werkzeugkonzept für verschleißfeste Diamantschleifscheiben. Diamond Business 55 (2015): S. 12-18.
- 97 E. Brinksmeier, O. Riemer, K. Rickens, Y. Mutlugünes: Schleifen optischer Gläser mit grobkörnigen Diamantschleifscheibe - Teil 1: Konditionieren. wt - Werkstattstechnik online 99/6 (2009): S. 409-414.
- 98 E. Brinksmeier, O. Riemer, K. Rickens, Y. Mutlugünes: Schleifen optischer Gläser mit grobkörnigen Diamantschleifscheibe - Teil 2: Präzisionsschleifen. wt - Werkstattstechnik online 99/6 (2009): S. 415-419.

- 99 E. Brinksmeier, R. Stöhr, T. Wilke: Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten des Schleifhärtens. *Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung / neue Entwicklungen und trends* (2002): 3.1-3.21.
- 100 E. Brinksmeier, T. Wilke: Einfluss der Prozessauslegung auf den Eigenspannungszustand geschliffener Bauteile. *Fortschritts-Berichte VDI 2/642* (2003): 15-1 - 15-29.
- 101 E. Brinksmeier, M. Wittmann, F. Klocke, T. Beck: Strategien zur Kühlschmierstoff-Zuführung beim Schleifen. *Schleiftechnik im Wettbewerb, 2. Schleiftechnologisches Kolloquium* (2000): 10.1-10.17.
- 102 T. Brockhoff: Grind-hardening - A comprehensive view. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 48/1 (1999): S. 255-260.
- 103 J. Brodbeck, S. Rothenaicher, D. Biermann, T. Heymann, M. Wolf: Drillpolishen als neuartiges Kantenpräparationsverfahren - Mit elastisch gebundenen Scheiben die Kanten verrunden. *WB - Werkstatt + Betrieb* 147/1-2 (2014): S. 84-87.
- 104 T. Brücher: Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe. *Dissertation, Fachbereich Maschinenbau und Produktionstechnik / TU Berlin* (1996).
- 105 A.A.G. Bruzzone, H.L. Costa, P.M. Lonardo, D.A. Lucca: Advances in engineered surfaces for functional performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57/2 (2008): S. 750-769.
- 106 G. Burkhard: Beitrag zur Optimierung von einschichtigen Abrasivwerkzeugen. *Dissertation, Dissertation ETH Zürich* (2001).
- 107 00811113.0: Verfahren zum Aufbringen von Partikeln auf einen Träger.
- 108 G. Burkhard, F. Rehsteiner, B. Schumacher: High efficiency abrasive tool for honing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51/1 (2002): S. 271-274.
- 109 P.W. Butler-Smith, D.A. Axinte, M. Daine: Solid diamond micro-grinding tools: From innovative design and fabrication to preliminary performance evaluation in Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 59 (2012): S. 55-64.
- 110 P.W. Butler-Smith, D.A. Axinte, M. Daine: Ordered diamond micro-arrays for ultra-precision grinding—An evaluation in Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51/1 (2011): S. 54-66.
- 111 P.W. Butler-Smith, D.A. Axinte, M. Daine: Preferentially oriented diamond micro-arrays: A laser patterning technique and preliminary evaluation of their cutting forces and wear characteristics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49/15 (2009): S. 1175-1184.
- 112 P.W. Butler-Smith, D.A. Axinte, M. Daine, M.C. Kong: Mechanisms of surface response to overlapped abrasive grits of controlled shapes and positions: An analysis of ductile and brittle materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63/1 (2014): S. 321-324.

- 113 P.W. Butler-Smith, D.A. Axinte, M. Pacella, M.W. Fay: Micro/nanometric investigations of the effects of laser ablation in the generation of micro-tools from solid CVD diamond structures. *Journal of Materials Processing Technology* 213/2 (2013): S. 194-200.
- 114 T.C. Buttery, J.F. Archard: Grinding and abrasive wear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 185/43/71 (1970): S. 537-551.
- 115 M.B. Cai, X.P. Li, M. Rahman: Study of the temperature and stress in nanoscale ductile mode cutting of silicon using molecular dynamics simulation. *Journal of Materials Processing Technology* 192-193 (2007): S. 607-612.
- 116 M.B. Cai, X.P. Li, M. Rahman: Study of the mechanism of nanoscale ductile mode cutting of silicon using molecular dynamics simulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47/1 (2007): S. 75-80.
- 117 M.B. Cai, X.P. Li, M. Rahman, A.A.O. Tay: Crack initiation in relation to the tool edge radius and cutting conditions in nanoscale cutting of silicon. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (2007): S. 562-569.
- 118 J. Campbell: Optimized coolant application. *Society of Manufacturing Engineers - 1st International Machining and Grinding Conference* (1995): S. 895-904.
- 119 H.S. Carslaw, J.C. Jaeger: *Conduction of heat in solids*. Oxford Science Publications (1959): S. 351-362.
- 120 T. Cayli: *Surface Anomalies in Turning of Difficult-to-Cut Materials with High-Pressure Coolant Supply*. Dissertation, RWTH Aachen (2017).
- 121 J. Chae, S.S. Park, T. Freiheit: Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46/3-4 (2006): S. 313-332.
- 122 J.M. Challen, P.L.B. Oxley: Slip-line fields for explaining the mechanics of polishing and related processes. *International Journal of Mechanical Sciences* 26/6-8 (1984): S. 403-418.
- 123 J.M. Challen, P.L.B. Oxley: An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models. *Wear* 53 (1979): S. 229-243.
- 124 Y. Chang, Y.-T. Hung, J.-H. Tsai, C.-L. Chao, S.-C. Chang, T.-S. Lin, Y.-P. Chiu, C.-C. Wang: Si-O-Si Bonding configurations of damaged layer formed after diamond grinding and chemomechanical polishing of Si Wafers. *Advances in abrasive technology* 1997 (1997): S. 38-42.
- 125 C.L. Chao, K.J. Ma, S.C. Sheu, H.Y. Lin, F.Y. Chang: Investigation of the surface integrity of precision machined single crystal silicon (2000): S. 1-4.
- 126 A.K. Chattopadhyay, L. Chollet, H.E. Hintermann: Improved monolayer CBN wheel for load free grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 32/4 (1992): S. 571-581.

- 127 A.K. Chattopadhyay, L. Chollet, H.E. Hintermann: On performance of brazed bonded monolayer diamond grinding wheel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 40/1 (1991): S. 347-350.
- 128 A.K. Chattopadhyay, L. Chollet, H.E. Hintermann: Superabrasive tool for load free cutting. *Proceedings of Surface Modification Technologies* 3 (1990): S. 863-871.
- 129 A.K. Chattopadhyay, L. Chollet, H.E. Hintermann: On performance of chemically bonded single-layer CBN grinding wheel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 39/1 (1990): S. 309-312.
- 130 A.K. Chattopadhyay, H.E. Hintermann: On performance of brazed single-layer CBN wheel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 43/1 (1994): S. 313-317.
- 131 C. Chen, Y. Jung, I. Inasaki: Surface, cylindrical and internal grinding of advanced ceramics. *Grinding Fundamentals and Applications* 39 (1989): S. 201-211.
- 132 J. Chen, Y. Fu, Q. He, H. Shen, C.Y. Ching, D. Ewing: Environmentally friendly machining with a revolving heat pipe grinding wheel. *Applied Thermal Engineering* 107 (2016): S. 719-727.
- 133 J. Chen, J. Shen, H. Huang, X. Xu: Grinding characteristics in high speed grinding of engineering ceramics with brazed diamond wheels. *Journal of Materials Processing Technology* 210/6-7 (2010): S. 899-906.
- 134 J. Chen, X. Xu: Tribological characteristics in high-speed grinding of alumina with brazed diamond wheels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 71/9-12 (2014): S. 1579-1585.
- 135 J.B. Chen, Q.H. Fang, C.C. Wang, J.K. Du, F. Liu: Theoretical study on brittle-ductile transition behavior in elliptical ultrasonic assisted grinding of hard brittle materials. *Precision Engineering* 46 (2016): S. 104-117.
- 136 S.-T. Chen, S.-J. Lin: Development of an extremely thin grinding-tool for grinding microgrooves in optical glass. *Journal of Materials Processing Technology* 211/10 (2011): S. 1581-1589.
- 137 K. Cheng, D. Huo, K. Cheng, D. Huo: *Micro-Cutting: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons Ltd (2013).
- 138 W. Cheng, E. Ling, I. Finnie: Median cracking of brittle solids due to scribing with sharp indenters. *Journal of American Ceramics Society* 73/3 (1990): S. 580-586.
- 139 B.N. Colding: Applicability of the grinding equivalent. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 20/1 (1971): S. 63-64.
- 140 B.N. Colding: *Theorie und Wirtschaftlichkeit der Diamant-Schleifscheiben*. *Schleif und Poliertechnik - Zeitschrift über die Oberflächenveredelung sämtlicher natürlicher und künstlicher Werkstoffe* 1,2 (1966): 5-12, 41-46.
- 141 B.N. Colding: *A wear relationship for turning milling and grinding*. Dissertation, *Machining economics* P.h.D. Thesis Stockholm 1959 (1959).

- 142 U.S. Patent No. 3,510,993: Segmental grinding wheel.
- 143 N. Cook: Manufacturing analysis, Addison-Wesley (1966).
- 144 H.L. Costa, I.M. Hutchings: Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International* 40/8 (2007): S. 1227-1238.
- 145 N. Courjal, B. Guichardaz, G. Ulliac, J.-Y. Rauch, B. Sadani, H.-H. Lu, M.-P. Bernal: High aspect ratio lithium niobate ridge waveguides fabricated by optical grade dicing. *Journal of Physics D: Applied Physics* 44/30 (2011): 1-7.
- 146 C. Czenkusch: Technologische Untersuchungen und Prozeßmodelle zum Rundschleifen. Dissertation, IFW Hannover (2000).
- 147 H. Czichos, K.H. Habig: Methoden und Ergebnisse der Triboforschung. *Technica : Fachzeitschrift für die Fertigungstechnik und Automation* 21 (1971): S. 2043-2048.
- 148 L. Dabrowski, M. Marciniak: Efficiency of special segmental grinding wheel. *Journal of Materials Processing Technology* 109/3 (2001): S. 264-269.
- 149 J.B. Dahmus, T.G. Gutowski: An environmental analysis of machining. *Proceedings of IMECE2004* 62600 (2004): S. 1-10.
- 150 S.M. Degtyarenko: Contact area between the component and the intermittent working surface of the grinding wheel. *Soviet Engineering Research - Combined Selective Translation* 9/11 (1989): S. 54-59.
- 151 H. Deng, G.Y. Chen, C. Zhou, X.C. Zhou, J. He, Y. Zhang: A theoretical and experimental study on the pulsed laser dressing of bronze-bonded diamond grinding wheels. *Applied Surface Science* 314 (2014): S. 78-89.
- 152 B. Denkena, J. Becker, M. Jung, F. Catoni: Optimization of the cooling conditions in continuous generating grinding of gears. *3rd International Conference and Exhibition on Design and Production of Dies and Molds* (2004): S. 339-344.
- 153 B. Denkena, D. Biermann: Cutting edge geometries. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63/2 (2014): S. 631-653.
- 154 B. Denkena, D. Boehnke, J. Kästner: Investigation of chip formation during microstructuring by means of cutting. *Proceedings of the Euspen International Conference 2* (2008): S. 134-137.
- 155 B. Denkena, T. Grove, T. Götttsching: Noch schneller als Drehen. *WB - Werkstatt + Betrieb* 3 (2017): S. 68-71.
- 156 B. Denkena, T. Grove, T. Götttsching: Grinding with patterned grinding wheels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 8 (2015): S. 12-21.
- 157 B. Denkena, T. Grove, T. Götttsching, E.J. da Silva, R.T. Coelho, R. Filletti: Enhanced grinding performance by means of patterned grinding wheels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 77/9-12 (2015): S. 1935-1941.

- 158 B. Denkena, T. Grove, T. Krawczyk, J. Harmes: Mit geschliffenen Riblets zur effizienteren Pumpe - Schleifstrategien zur Mikrostrukturierung von Pumpenlaufrädern. *wt - Werkstattstechnik online* 104/11-12 (2014): S. 716-721.
- 159 B. Denkena, J. Kästner, G. Knoll, S. Brandt, F.W. Bach, B. Drößler, E. Reitheimer, M. Bretschneider: Mikrostrukturierung funktionaler Oberflächen - Auslegung, Fertigung und Charakterisierung von Mikrostrukturen zur tribologischen Funktionalisierung von Oberflächen. *wt - Werkstattstechnik online* 98/6 (2008): S. 486-494.
- 160 B. Denkena, J. Kästner, B. Wang: Advanced microstructures and its production through cutting and grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59/1 (2010): S. 67-72.
- 161 B. Denkena, J. Köhler, T. Götsching: Influence of micro patterned grinding wheels on the work piece quality. *Proceedings of the 13th Euspen International Conference* 13 (2013): S. 249-252.
- 162 B. Denkena, J. Köhler, C.E. Hirata Ventura: Optimierte Herstellung von Schneidkanten-Mikrogeometrien. *VDI Z-Integrierte Produktion-Special* 1 (2012): S. 34-37.
- 163 B. Denkena, J. Köhler, J. Kästner: Chip formation in grinding: an experimental study. *Production Engineering* 6/2 (2012): S. 107-115.
- 164 B. Denkena, J. Köhler, C.E.H. Ventura: Customized cutting edge preparation by means of grinding. *Precision Engineering* 37/3 (2013): S. 590-598.
- 165 B. Denkena, J. Köhler, B. Wang: Manufacturing of functional riblet structures by profile grinding. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3/1 (2010): S. 14-26.
- 166 B. Denkena, N. Kramer, M. Jung: Einsatz von Acoustic Emission Signalen zur Schleifprozessauslegung. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen* 62 (2005): S. 38-53.
- 167 B. Denkena, L. de Leon, B. Wang: Grinding of microstructured functional surfaces: a novel strategy for dressing of microprofiles. *Production Engineering* 3/1 (2009): S. 41-48.
- 168 B. Denkena, M. Reichstein, B. Wang: Manufacturing of microfunctional structures by grinding. *Production Engineering* 13/1 (2006): S. 31-34.
- 169 B. Denkena, H.K. Tönshoff: *Spanen - Grundlagen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2011).
- 170 DIN-ISO 6106: *Schleifmittel - Überprüfung der Korngrößen von Doamant oder kubischem Bornitrid* (2006).
- 171 DIN 8589-11: *Fertigungsverfahren Spanen Teil11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug* (2003).

- 172 W. Ding, J. Xu, Z. Chen, H. Su, Y. Fu: Grindability and Surface Integrity of Cast Nickel-based Superalloy in Creep Feed Grinding with Brazed CBN Abrasive Wheels. *Chinese Journal of Aeronautics* 23/4 (2010): S. 501-510.
- 173 W.-F. Ding, J.H. Xu, M. Shen, Y.C. Fu, B. Xiao, H.H. Su, H.J. Xu: Development and performance of monolayer brazed CBN grinding tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 34/5-6 (2007): S. 491-495.
- 174 W.-F. Ding, Y.-J. Zhu, J.-H. Xu, H.-H. Su: Comparative Investigation on Brazing Behavior, Compressive Strength, and Wear Properties of Multicrystalline CBN Abrasive Grains. *Advances in Mechanical Engineering* 6 (2014): S. 1-9.
- 175 Y.F. Ding, W.G. Huo, X.D. Su, L. Zhang: A Grinding Wheel of Self-Lubrication with Solid Powder Lubricant and Centrifugal Impeller for Green Grinding Process of TC4 Alloy. *Key Engineering Materials* 748 (2017): S. 269-274.
- 176 C. Dold, R. Transchel, M. Rabiey, P. Langenstein, C. Jaeger, F. Pude, F. Kuster, K. Wegener: A study on laser touch dressing of electroplated diamond wheels using pulsed picosecond laser sources. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60/1 (2011): S. 363-366.
- 177 E.D. Doyle, S.K. Dean: The fine grinding of glass and ceramics using conventional wheels. *The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing II - WBS Special Publication* 562 (1979): S. 107-114.
- 178 EP 1371451B1: Abrasive tools with precisely controlled abrasive array and method of fabrication.
- 179 S. Ebbrell, N.H. Woolley, Y.D. Tridimas, D.R. Allanson, W.B. Rowe: The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (2000): S. 209-223.
- 180 C. Effgen: Schneidkantenpräparation mit elastisch gebundenen Schleifwerkzeugen – Konzeptionierung, Entwicklung und Bewertung am Beispiel von Vollhartmetallfräswerkzeugen. Dissertation, TU Kaiserslautern, FBK (2018).
- 181 C. Effgen: Schleifen auf hohem Niveau. *WB - Werkstatt + Betrieb* 11 (2016): S. 46-48.
- 182 C. Effgen: Ein neues Verfahren zur Schneidkantenpräparation mittels Schleifen. *4th European Conference on Grinding* (2013): 16-4-1 - 16-4-9.
- 183 C. Effgen, B. Kirsch: A New Method for the Preparation of Cutting Edges via Grinding. *Advanced Materials Research. Trans Tech Publications* 769 (2013): S. 85-92.
- 184 C. Effgen, B. Kirsch, J.C. Aurich: Neues Verfahren zur Schneidkantenpräparation Schneidkantenpräparation direkt in der Werkzeugmaschine - Schneidkantenpräparation mithilfe elastisch gebundener Schleifscheiben. *VDI-Z Integrierte Produktion - Special II Werkzeuge* 155 (2013): S. 22-24.
- 185 F. Effgen: Diamant- und Bornitrid-Werkzeuge in galvanischer Bindung (Produktkatalog) (2019).

- 186 F. Engineer, C. Guo, S. Malkin: Experimental measurement of fluid flow through the grinding zone. *Journal of Engineering for Industry* 114 (1992): S. 61-66.
- 187 H. Ernst, M.E. Merchant, M.C. Shaw: *Machining - Theory and Practice*, Americal Society for Metals (1950).
- 188 A.G. Evans, D.B. Marshall: Wear mechanisms in ceramics. *Fundamentals of Friction and Wear of Materials* 439 (1981): S. 439-452.
- 189 F.Z. Fang, L.J. Chen: Ultra-precision cutting for ZKN7 glass. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 49/1 (2000): S. 17-20.
- 190 F.Z. Fang, V.C. Venkatesh: Diamond cutting of silicon with nanometric finish. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47/1 (1998): S. 45-49.
- 191 S. Fang, L. Llanes, D. Bähre: Laser surface texturing of a WC-CoNi cemented carbide grade: Surface topography design for honing application. *Tribology International* 122 (2018): S. 236-245.
- 192 K. Fathima, A. Senthil Kumar, M. Rahman, H.S. Lim: A study on wear mechanism and wear reduction strategies in grinding wheels used for ELID grinding. *Wear* 254/12 (2003): S. 1247-1255.
- 193 Standard 43-2:2006: Körnungen aus Elektrokorund, Siliziumkarbid und anderen Schleifmitteln für Schleifmittel auf Unterlagen - Bezeichnung und Bestimmung der Korngrößenverteilung - Makrokörnungen P240 bis P2500 (2006).
- 194 Standard 43-1:2006: Körnungen aus Elektrokorund, Siliziumkarbid und anderen Schleifmitteln für Schleifmittel auf Unterlagen - Bezeichnung und Bestimmung der Korngrößenverteilung - Makrokörnungen P12 bis P220 (2006).
- 195 M. Field, J.F. Kahles: The surface integrity of machined-and-ground high-strength steels. *DMIC Report* 210 (1964): S. 54-77.
- 196 M. Field, J.F. Kahless: Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke, "Surface Integrity". *Fertigung* 5/72 (1972): S. 145-156.
- 197 M. Field, W. Koster: Optimizing grinding parameters to combine high productivity with high surface integrity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 27/1 (1978): S. 523-526.
- 198 Föckerer, T. et al.(Hrsg.): Einfluss der Wärmequellenmodellierung auf die Simulation der Einhärtetiefe und der Bauteilverzüge beim Schleifhärteprozess, 2009,
- 199 Fraunhofer-Gesellschaft: Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion - Abschlussbericht. 2008.
- 200 K. Friedrich: Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 1/1 (2018): S. 3-39.
- 201 Y.C. Fu, H.J. Xu, F.H. Sun: Experimental study on creep feed deep grinding titanium alloy with slotted CBN grinding wheels. *Key Engineering Materials* 304-305 (2006): S. 166-170.

- 202 T. Fukazawa, N. Fuwa, J. Ikeno, H. Shibutani, O. Horiuchi, H. Suzuki: Mirror grinding of silicon wafer with silica EPD pellets. Proceedings of the 10th International Conference on Precision Engineering (2001): S. 366-370.
- 203 N. Fuwa, H. Shibutani, O. Horiuchi, K. Suzuki, J. Ikeno: Mirror grinding of silicon wafer with silica EPD Pellets-effects of air-cooling. Proceedings of the 4th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (2001): S. 6-9.
- 204 R. Gahlin, H. Björkman, P. Rangsten, S. Jacobson: Designed abrasive diamond surfaces. *Wear* 233-235 (1999): S. 387-394.
- 205 A. Gallee, M. Nakamura, E. Nagy, D. McGarry, S. Peteves: Influence of machining on the strength of hot-pressed silicon nitride. Proceedings of the 1st European Ceramic Society Conference (1989): 3.538–3.542.
- 206 H. Gao, J. Wang, X. Lan: Development of CBN wheel with cold gas inner cooling. *Key Engineering Materials* 202-203 (2001): S. 215-218.
- 207 M. Gavvas, I. Karacan, E. Kaya: A novel method to improve surface quality in cylindrical grinding. *Experimental Techniques* 35/1 (2011): S. 26-32.
- 208 A. Ghosh, A.K. Chattopadhyay: On grit-failure of an indigenously developed single layer brazed CBN wheel. *Industrial Diamond Review* 1 (2007): S. 59-64.
- 209 A. Ghosh, A.K. Chattopadhyay: Experimental investigation on performance of touch-dressed single-layer brazed cBN wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47/7-8 (2007): S. 1206-1213.
- 210 P. Gilormini, E. Felder: Theoretical and experimental study of the ploughing of a rigid-plastic semi-infinite body by a rigid pyramidal indenter. *Wear* 88 (1983): S. 195-206.
- 211 J.H. Giovanola, I. Finnie: On the machining of glass. *Journal of Material Science* 15 (1980): S. 2508-2514.
- 212 A. Giwerczew: Spanbildungsmechanismen und tribologisches Prozeßverhalten beim Schleifen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten. Dissertation, IWT Bremen (2003).
- 213 J. Goddard, H. Wilman: A theory of friction and wear during the abrasion of metals. *Wear* 5 (1962): S. 114-135.
- 214 S. Goel, X. Luo, A. Agrawal, R.L. Reuben: Diamond machining of silicon: a review of advances in molecular dynamics simulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 88 (2015): S. 131-164.
- 215 Y.D. Gong, H. Li, Y.C. Zhang, G.Q. Cai, Z.H. Deng: The Experiment Method of the Study on the Airflow Field around the Grinding Wheel in Super-High Speed Based on PIV. *Key Engineering Materials* 359-360 (2007): S. 185-188.
- 216 A.V. Gordeev: Wear resistance of segmental diamond wheels. *Machines & Tooling* (English translation of *Stanki i Instrument*) 48/2 (1997): S. 21-22.

- 217 W. Graf: Schleifen - jetzt auch ein Bearbeitungsprozess mit definierter Schneide. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen 66 (2013): S. 179-190.
- 218 W. Graham, M. Whiston: Some observations of through-wheel coolant application in grinding. International Journal of Machine Tool Design and Research 18 (1978): S. 9-18.
- 219 A.A. Griffith: The phenomena of rupture and flow in solids. Proceeding of Royal Society London A 221 (1920): S. 163-198.
- 220 D. Grimme, K. Rickens, Q. Zhao, C. Heinzel: Dressing of coarse-grained diamond wheels for ductile machining of brittle materials. Towards synthesis of micro-/nano-systems - The 11th International Conference on Precision Engineering (2006): S. 305-307.
- 221 J.J. Guest: The theory of grinding, with reference to the selection of speeds in plain and internal work. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers - Part B 2 (1915): S. 543-590.
- 222 K. Gühring: Hochleistungsschleifen - Eine Methode zur Leistungssteigerung der Schleifverfahren durch hohe Schnittgeschwindigkeiten. Dissertation, RWTH Aachen (1967).
- 223 J.F. Gülich: Kreiselpumpen - Handbuch für Entwicklung, Anlagenbau und Betrieb, Springer (2004).
- 224 M. Gulpak, J. Sölter, E. Brinksmeier: Prediction of shape deviations in face milling of steel. Proceedia of CIRP 8 (2014): S. 15-20.
- 225 B. Guo, M. Wu, Q. Zhao, H. Liu, J. Zhang: Improvement of precision grinding performance of CVD diamond wheels by micro-structured surfaces. Ceramics International 44/14 (2018): S. 17333-17339.
- 226 B. Guo, Q. Zhao, X. Fang: Precision grinding of optical glass with laser micro-structured coarse-grained diamond wheels. Journal of Materials Processing Technology 214/5 (2014): S. 1045-1051.
- 227 B. Guo, Q. Zhao, X. Yu: Surface micro-structuring of coarse-grained diamond wheels by nanosecond pulsed laser for improving grinding performance. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 15/10 (2014): S. 2025-2030.
- 228 B. Guo, Q.L. Zhao, W. Zhang: Optical glass grinding with laser structured coarse-grained diamond wheels. Proc. of the 13th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology (2013): S. 31-34.
- 229 C. Guo, S. Malkin: Inverse heat transfer analysis of grinding, part 1: methods. Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME 118/1 (1996): S. 137-142.

- 230 C. Guo, S. Malkin: Inverse heat transfer analysis of grinding, part 2: applications. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 118/1 (1996): 143-149.
- 231 C. Guo, S. Malkin: Analysis of transient temperatures in grinding. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 117/4 (1995): S. 571-577.
- 232 C. Guo, S. Malkin: Heat transfer in grinding. *Journal of Materials Processing & Manufacturing Science* 1 (1992): S. 16-27.
- 233 C. Guo, S. Malkin: Analysis of fluid flow through the grinding zone. *Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME* 114 (1992): S. 427-434.
- 234 S. Gutwein, B. Kirsch, T. Hermann, K. Yang, J.C. Aurich: Kurzpulsaserunterstützte Schneidkantenpräparation - Wirtschaftliche Verrundung der Werkzeugschneide mittels 2D-Laserbearbeitung. *VDI Z-Integrierte Produktion* 161/6 (2019): S. 38-41.
- 235 S. Gutwein, B. Kirsch, T. Hermann, K. Yang, J.C. Aurich: Effizienzanalyse bei der Kurzpulsaserbearbeitung - Konstante Fluenz bei unterschiedlicher Pulsfolgefrequenz mittels Anpassung der Laserleistung. *wt - Werkstatttechnik online* 109/5 (2019): S. 394-398.
- 236 V. Gviniashvili, J. Webster, B. Rowe: Fluid flow and pressure in the grinding wheel-workpiece interface. *Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME* 127 (2005): S. 198-205.
- 237 V. Gviniashvili, N.H. Woolley, W.B. Rowe: Useful coolant flowrate in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44 (2004): S. 629-636.
- 238 D. Hafenbraedl, S. Malkin: Environmentally-conscious minimum quantity lubrication (MQL) for internal cylindrical grinding. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of the Society of Mechanical Engineers* 28 (2000): S. 149-154.
- 239 R.S. Hahn: On the nature of the grinding process. *Advances in Machine Tool Design and Research/Proceedings of the 3rd international M.T.D.R. conference* (1962): S. 129-154.
- 240 R.S. Hahn: The relation between grinding conditions and thermal damage in the workpiece. *Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME* 78 (1956): S. 807-812.
- 241 R.S. Hahn: The effect of wheel-work conformity in precision grinding. *Journal of Tribology - Transactions of the ASME* 77 (1955): S. 1325-1329.
- 242 M. Hakulinen: Residual strength of ground hot isostatically pressed silicon nitride. *Journal of Materials Science* 20/3 (1985): S. 1049-1060.
- 243 P. Han, I. Marinescu: Elid grinding of sapphire - Experimental approach. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of the Society of Mechanical Engineers* 37 (2009): S. 137-142.

- 244 J. Hartig, B. Kirsch, J.C. Aurich: Drehen von ausferritischem Gusseisen - Einfluss inhomogen präparierter Schneidkanten auf den Werkzeugverschleiß und das Prozessergebnis. *wt - Werkstatttechnik online* 108/10 (2018): S. 736-742.
- 245 J. Hartig, B. Kirsch, M. Zimmermann, J.C. Aurich: Drehen von ausferritischem Gusseisen - Einfluss der Schneidengeometrie auf den Werkzeugverschleiß und das Prozessergebnis. *wt - Werkstatttechnik online* 107/10 (2017): S. 754-760.
- 246 M. Hauschild, J. Jeswiet, L. Alting: From life cycle Assessment to Sustainable production: Status and Perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54/2 (2005): S. 1-21.
- 247 Q. He, Y. Fu, H. Xu, K. Ma: Investigation of a heat pipe cooling system in high-efficiency grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70/5-8 (2014): S. 833-842.
- 248 C. Heinzl: Schleifprozesse verstehen: zum Stand der Modellbildung und Simulation sowie unterstützender experimenteller Methoden. Habilitation, IWT Bremen (2009).
- 249 C. Heinzl, G. Antsupov: Prevention of wheel clogging in creep feed grinding by efficient tool cleaning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61/1 (2012): S. 323-326.
- 250 C. Heinzl, N. Bleil: The use of the size effect in grinding for work-hardening. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56/1 (2007): S. 327-330.
- 251 C. Heinzl, E. Brinksmeier: Optimierung der Kühlschmierung beim Schleifen durch strömungstechnische Methoden. *International Colloquium Tribology* 11/1 (1998): S. 151-163.
- 252 C. Heinzl, D. Meyer, B. Kolkwitz, J. Eckebrecht: Advanced approach for a demand-oriented fluid supply in grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64/1 (2015): S. 333-336.
- 253 C. Heinzl, K. Rickens: Engineered wheels for grinding of optical glass. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58/1 (2009): S. 315-318.
- 254 C. Heinzl, J. Sölter, S. Jermolajev, B. Kolkwitz, E. Brinksmeier: A Versatile Method to Determine Thermal Limits in Grinding. *Procedia CIRP* 13 (2014): S. 131-136.
- 255 C. Heinzl, A. Wagner: Fine finishing of gears with high shape accuracy. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62/1 (2013): S. 359-362.
- 256 U.S. Patent No. 2,032,362: Segmental grinding wheel.
- 257 H. Hertz: Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92 (1981): S. 156-171.
- 258 P. Herzenstiel: Hochleistungsplanschleifen mit einer definiert gesetzten CBN-Schleifscheibe. Dissertation, TU Kaiserslautern, FBK (2009).

- 259 P. Herzenstiel, J.C. Aurich: CBN-grinding wheel with a defined grain pattern-extensive numerical and experimental studies. *Machining Science and Technology* 14/3 (2010): S. 301-322.
- 260 P. Herzenstiel, J.C. Aurich: Numerical and experimental investigations of a grinding wheel with a defined grain pattern. *Proceedings of the 12th CIRP Conference on Modeling of Machine Operations* 12 (2009): S. 567-574.
- 261 P. Herzenstiel, J.C. Aurich: Experimental investigation of wet and dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern. *Proceedings of the 37th Annual North American Manufacturing Research Conference NAMRC* (2009): S. 81-88.
- 262 P. Herzenstiel, B. Kirsch, J.C. Aurich: Gleich- und Gegenlaufschleifen unter Verwendung einer Schleifscheibe mit definierter Kornanordnung mit und ohne Einsatz von Kühlschmierstoff. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen* 64 (2010): S. 95-107.
- 263 P. Herzenstiel, B. Kirsch, J.C. Aurich: Spezialwerkzeug zum Trocken-und Nassschleifen. *Diamond Business* 4/31 (2009): S. 16-23.
- 264 F. Hetz: Randzonenbeeinflussung durch Schleifen - Wesentliche Einflussgrößen des Prozesses. 6. Oberflächenkolloquium - TH Karl-Marx-Stadt und Kammer der Technik (1984): 28.1 - 28.8.
- 265 T. Heymann: Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallwerkzeugen. Dissertation, ISF Dortmund (2015).
- 266 Heymann, T.(Hrsg.): Gezielte Nut- und Schneidkantenpräparation von Vollhartmetall-Zerspanwerkzeugen durch Polierschleifen. 6. Ausgabe Essen, Vulkan Verlag, 2012.
- 267 G.H. Hiatt: A fracture mechanics technique for predicting the ductile regime in single point diamond turning of brittle materials. Dissertation, North Carolina State University, USA (1992).
- 268 H.E. Hintermann, A.K. Chattopadhyay: New generation superabrasive tool with monolayer configuration. *Diamond and Related Materials* 1/12 (1992): S. 1131-1143.
- 269 R. Hockauf, E. Asadi, B. Denkena, T. Grove, M. Wurz: Grinding of riblets with "beaver tooth" multi-layer tools. *Procedia CIRP* 71 (2018): S. 155-159.
- 270 H.-W. Hoffmeister, S. Illenseer: Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen konventionellem und CD (continuous dressing)-Schleifen von Inconel 706. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen* 60 (2002): S. 188-198.
- 271 H.-W. Hoffmeister, A. Langemeyer: Auf dem Weg zum Trockenschleifen. *VDI-Z* 140/5 (1998): S. 43-46.
- 272 H.-W. Hoffmeister, T. Weber: Kühlbedingungen beim Schleifen. *VDI-Z* 144/7-8 (2002): S. 34-36.

- 273 T. Hollstein, W. Pfeifer: The strength and fracture behaviour of engineering ceramics - influence of machining and residual stresses. 4th International Symposium on Ceramic Materials and Components for Engines (1991): S. 821-829.
- 274 A. Hosokawa, T. Ueda, T. Yunoki: Laser dressing of metal bonded diamond wheel. CIRP Annals - Manufacturing Technology 55/1 (2006): S. 329-332.
- 275 T. Howes, T. Pearce, T. Stuart: The application of continuous dressing in creep feed grinding. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen (1985): S. 289-302.
- 276 M. Huerta, S. Malkin: Grinding of glass - The mechanics of the process. Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME 98 (1976): S. 459-467.
- 277 M. Huerta, S. Malkin: Grinding of glass - Surface structure and fracture strength. Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME 98 (1976): S. 468-473.
- 278 T.W. Hwang, C.J. Evans, S. Malkin: Size effect for specific energy in grinding of silicon nitride. Wear 225-229 (1999): S. 862-867.
- 279 T.W. Hwang, C.J. Evans, E.P. Whitenon, S. Malkin: High speed grinding of silicon nitride with electroplated diamond wheels, Part1: Wear and wheel life. Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME 122 (2000): S. 32-41.
- 280 T.W. Hwang, S. Malkin: Upper bound analysis for specific energy in grinding of ceramics. Wear 231 (1999): S. 161-171.
- 281 T.W. Hwang, S. Malkin: Grinding mechanisms for and energy balance for ceramics. Journal of Manufacturing Science and Engineering 121 (1999): S. 623-631.
- 282 Y. Ichida, K. Kishi, T. Hanida: On the formation of flow-type chips in precision grinding of oxide ceramic tool materials. Proceedings 28th Japan Congress on Materials Research (1985): S. 183-188.
- 283 A. Imanaka, S. Fujino, S. Maneta: Direct observation of material removal process during grinding of ceramics by micro-flash-technique. The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing XI 348 (1972): S. 37-43.
- 284 I. Inasaki: Grinding Process Simulation Based on the Wheel Topography Measurement. CIRP Annals - Manufacturing Technology 45/1 (1996): S. 347-350.
- 285 I. Inasaki: Creep-feed grinding with continuous dressing. CIRP Annals - Manufacturing Technology 36/1 (1987): S. 227-230.
- 286 I. Inasaki: Grinding of hard and brittle materials. CIRP Annals - Manufacturing Technology 36/2 (1987): S. 463-471.
- 287 I. Inasaki, K. Nakayama: High-efficiency grinding of advanced ceramics. CIRP Annals - Manufacturing Technology 35/1 (1986): S. 211-214.

- 288 M.M. Islam, A. Senthil Kumar, S. Balakumar, H.S. Lim, M. Rahman: Advanced ELID Process Development for Grinding Silicon Wafers. *Materiala Research Society Symposium 867* (2005): S. 97-101.
- 289 U.S. Patent No. 6,428,587: Vitrified abrasive solid mass having pores filled with resin, and solid lubricant agent.
- 290 S. Ito, M. Nakamura, W. Kanematsu: Machining of high performance ceramics. *Bulletin Japan Society of Precesion Engineering 21/3* (1987): S. 167-172.
- 291 N. Itoh, H. Ohmori: Grinding characteristics of hard and brittle materials by fine grain lapping wheels with ELID. *Journal of Materials Processing Technology 62/4* (1996): S. 315-320.
- 292 N. Itoh, H. Ohmori, T. Kasai, Y. Yamamoto, S. Moriyasu, S. Morita: Mirror surfaces finishing on double sided lapping machine with ELID. *First international conference and general meeting of the European society for precision engineering and nano-technology* (1999): S. 266-269.
- 293 N. Itoh, H. Ohmori, S. Moriyasu, T. Kasai, T. Karaki-Doy, B.P. Bandyopadhyay: Finishing characteristics of brittle materials by ELID-lap grinding using metal-resin bonded wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture 38* (1998): S. 747-762.
- 294 L.K. Ives, C.J. Evans, S. Jahanmir, R.S. Polvani, T.J. Strakna, M.L. Mcglaulin: Effect of ductile-regime grinding on the strength of hot-isostatically-pressed silicon nitride. *Machining of Advanced Materials - Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials 847* (1993): S. 341-352.
- 295 J.C. Jaeger: Moving sources of heat and temperature at sliding contacts. *Proceedings of the Royal Society of New South Wales 76* (1942): S. 203-224.
- 296 S. Jahanmir, T.J. Strakna, G.D. Quinn, H. Liang, R.L. Allor, R.D. West: Effect of grinding on strength and surface integrity of silicon nitride: Part 1. *Machining of Advanced Materials - Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials 847* (1993): S. 263-277.
- 297 D.X. Jin, Z. Meng: Research for Discontinuous Grinding Wheel with Multi-Porous Grooves. *Key Engineering Materials 259-260* (2004): S. 117-121.
- 298 T. Jin, W.B. Rowe, D. McCormack: Temperatures in deep grinding of finite workpieces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture 42/1* (2002): S. 53-59.
- 299 T. Jin, D.J. Stephenson, J. Corbett: Burn threshold of high-carbon steel in high-efficiency deep grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B - Journal of Engineering Manufacture 216* (2002): S. 357-364.
- 300 N. Jochum: Zerspanung ultraharter Keramik am Beispiel einer dreigliedrigen Zahnbrücke. *Dissertation, ETH Zürich* (2013).

- 301 S. Johannsson, J.-A. Schweitz: Contact damage in single-crystalline silicon investigated by cross-sectional transmission electron microscopy. *Journal of American Ceramics Society* 71/8 (1988): S. 617-623.
- 302 R.L. Judd, K. Aftab, M.A. Elbestawi: An investigation of the use of heat pipes for machine tool spindle bearing cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 34/7 (1994): S. 1031-1043.
- 303 A. Kanai, M. Miyashita, M. Sato, M. Daito: Proposal of high productivity in ductile mode grinding of brittle materials. *Proceedings of ASPE 10th Annual Meeting, Austin, Texas 12/10 (1995): S. 167-170.*
- 304 S. Kannappan, S. Malkin: Effects of grain size and operating parameters on the mechanics of grinding. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 94 (1972): S. 833-842.
- 305 K. Karmarsch: Versuche über die absolute Festigkeit der zu Draht gezogenen Metalle. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen* 18 (1834): S. 54-115.
- 306 B. Karpuschewski, G. Brunner, Y. Falkenberg: Strategien zur Reduzierung des Kühlschmierstoffverbrauchs beim Schleifen. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen* 58 (1997): S. 146-159.
- 307 B. Karpuschewski, E. Kalhöfer, D. Joswig, M. Rief: Energiebedarf für die Hartmetallherstellung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 106/7-8 (2011): S. 496-501.
- 308 G. Kassen: Simulation des Schleifprozesses. *Industrie-Anzeiger* 91/24 (1969): S. 29-32.
- 309 G. Kassen: Beschreibung der elementaren Kinematik des Schleifvorganges. *Dissertation, WZL Aachen (1969).*
- 310 K. Katahira, H. Ohmori, Y. Uehara, Y. Watanabe, W.M. Lin, J. Komotori, M. Mitzutani: Fabrication of High-Quality Surfaces on Micro Tools by the ELID Grinding Technique. *Key Engineering Materials* 257-258 (2004): S. 441-446.
- 311 K. Katahira, H. Ohmori, Y. Uehara, Y. Watanabe, W. Lin, T. Suzuki: Study on ELID ground micro-tool and its applications. *International Conference on Industrial Technology* 2 (2002): S. 1138-1141.
- 312 K. Kato, K. Hokkirigawa, T. Kayaba, Y. Endo: Three dimensional shape effect on abrasive wear. *Journal of Tribology - Transactions of the ASME* 108 (1986): S. 346-351.
- 313 T. Kato, H. Ohmori, K. Katahira, N. Itoh, N. Mitsuishi, A. Nemoto: Friction and Wear Properties of an ELID-Grinding Wheel based on CCD Microscope Observation. *Key Engineering Materials* 238-239 (2003): S. 307-314.
- 314 T. Kayaba, K. Hokkirigawa, K. Kato: Analysis of the abrasive wear mechanism by successive observations of wear processes in a scanning electron microscope. *Wear* 110 (1986): S. 419-430.

- 315 K. Kendall: Complexities of compression failure. Proceedings of the Royal Society A 361 (1978): S. 245-263.
- 316 A. Khangar, N.B. Dahotre: Morphological modification in laser-dressed alumina grinding wheel material for microscale grinding. Journal of Materials Processing Technology 170/1-2 (2005): S. 1-10.
- 317 J.-D. Kim, Y.-H. Kang, D.-X. Jin, Y.-S. Lee: Development of discontinuous grinding wheel with multi-porous grooves. International Journal of Machine Tools and Manufacture 37/11 (1997): S. 1611-1624.
- 318 R.F. King, D. Tabor: The strength properties and frictional behavior of brittle solids. Proceedings of Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 223/1153 (1954): S. 225-238.
- 319 M. Kirchgatter: Einsatzverhalten genuteter CBN-Schleifscheiben mit keramischer bindung beim Außenrund-Einsteichschleifen. Dissertation, Fakultät V, TU Berlin (2010).
- 320 H.P. Kirchner: Damage penetration at elongated machining grooves in hot pressed Si3N4. Journal of American Ceramics Society 67/2 (1984): S. 127-132.
- 321 H.P. Kirchner, J.C. Conway, Jr.: Mechanisms of material removal and damage penetration during single point grinding of ceramics. Winter Annual Meeting of the ASME (1985): S. 53-61.
- 322 B. Kirsch: The impact of contact zone flow rate and bulk cooling on the cooling efficiency in grinding applying different nozzle designs and grinding wheel textures. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 18/18 (2017): S. 179-187.
- 323 B. Kirsch: Wirkmechanismen der Kühlschmierstoff-Zufuhr beim Schleifen - Analyse externer und interner Kühlschmierstoff-Zufuhrmethoden. Dissertation, TU Kaiserslautern, FBK (2013).
- 324 B. Kirsch, J.C. Aurich: Herstellung von mikrostrukturierten Oberflächen mit einer Spezialschleifscheibe und Analyse des Abtragverhaltens. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen (2016): S. 12-24.
- 325 B. Kirsch, J.C. Aurich: Influence of the Macro-topography of Grinding Wheels on the Cooling Efficiency and the Surface Integrity. Procedia CIRP 13 - Proceedings of the 2nd CIRP Conference on Surface Integrity 13 (2014): S. 8-12.
- 326 B. Kirsch, J.C. Aurich: Herstellung von mikrostrukturierten Oberflächen mittels Schleifen - Eine neue Methode. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109/4 (2014): S. 1-5.
- 327 B. Kirsch, J.C. Aurich: Manufacturing of structured surfaces via grinding. Proceedings from the CIRP Research Affiliate Workshop (2014): S. 3-10.
- 328 B. Kirsch, J.C. Aurich: Kontaktzonenvolumenstrom und Überflutungskühlung - Kühlmechanismen von Freistrahls- und Schuhdüsen bei hoher Wärmebelastung.

- Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen 66 (2013): S. 81-99.
- 329 B. Kirsch, J.C. Aurich: Schleifen mit interner Kühlschmierstoff-Zufuhr - Experimentelle Untersuchungen mit Innenkühlung und zusätzlicher externer Kühlung. wt - Werkstatttechnik online 101/7/8 (2011): S. 487-493.
- 330 B. Kirsch, J.C. Aurich: Wirkmechanismen der Kühlung beim Schleifen mit galvanisch belegten CBN-Schleifscheiben mit unterschiedlichen Kühlschmierstoff-Zufuhrbedingungen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen 65 (2011): S. 87-107.
- 331 B. Kirsch, C. Effgen, M. Büchel, J.C. Aurich: Comparison of the Embodied Energy of a Grinding Wheel and an End Mill. Procedia CIRP 15 (2014): S. 74-79.
- 332 B. Kirsch, P. Herzenstiel, J.C. Aurich: Experimental Results using a Grinding Wheel with an Internal Cooling Lubricant Supply. Proceeding of the 4th International Conference on High Performance Cutting (2010): S. 443-448.
- 333 E.D. Kizikov: Vacuum technology for diamond toolmaking. Industrial Diamond Review 51/542 (1991): S. 20-23.
- 334 A.V. Klimov: Das Schleifen mit unterbrochener Schleifscheibe an der Peripherie. Maschinenbau und Fertigungstechnik der UdSSR 8/79 (1967): S. 153-156.
- 335 F. Klocke: Fertigungsverfahren 2 - Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide, Springer Berlin (2017).
- 336 F. Klocke, T. Beck: Gut geschmiert statt schlecht gekühlt. wt - Werkstatttechnik online 88/9-10 (1998): S. 400-404.
- 337 F. Klocke, T. Beck: Zufuhrsysteme für den anforderungsgerechten Kühlschmierstoffeinsatz. Schleiftechn. Kolloquium 97 (1997): 9.1 - 9.13.
- 338 F. Klocke, T. Beck, S. Hoppe, T. Krieg, N. Müller, T. Nöthe, H.-W. Raedt, K. Sweeney: Examples of FEM application in manufacturing technology. Journal of Materials Processing Technology 120 (2002): S. 450-457.
- 339 F. Klocke, T. Beck, D. Lung, N. Koch: Gleiche Oberflächenqualität mit Innenkühlung. Industrie-Anzeiger 37 (1998): S. 68.
- 340 F. Klocke, E. Brinksmeier, C. Evans, T. Howes, I. Inasaki, E. Minke, H.K. Tönshoff, J.A. Webster, D. Stoff: High-speed grinding: Fundamentals and state of the art in Europe, Japan, and the USA. CIRP Annals - Manufacturing Technology 46/2 (1997): S. 715-724.
- 341 F. Klocke, C. Bucker: High-speed dry grinding with CBN - A borderline case of minimizing the quantity of cooling lubricants. Production Engineering 4/1 (1997): S. 15-18.
- 342 F. Klocke, G. Eisenblätter: Dry Cutting. CIRP Annals - Manufacturing Technology 42/2 (1997): S. 519-526.

- 343 F. Klocke, K. Gerschwiler: Trockenbearbeitung - Grundlagen, Grenzen, Perspektiven - VDI Berichte - Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung 1240 (1996): S. 1-43.
- 344 F. Klocke, G. Hegener, J. Muckli: Hochgeschwindigkeitsschleifen mit CBN. wt - Produktion und Management 85 (1995): S. 511-515.
- 345 A. Kobayashi: On the grinding force. Bulletin of the Japan Society of Grinding Engineers 1 (1961): S. 13-17.
- 346 N. Koch: Möglichkeiten zur Reduzierung des Kühlschmierstoffvolumenstromes beim Schleifen mit CBN-Schleifscheiben. Umweltverträgliches Schleifen - Ökologie als Ökonomie der Zukunft (2000): S. 39-53.
- 347 U. Köckli: Grinding with helically grooved wheels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering 228/1 (2014): S. 33-42.
- 348 B. Kolkwitz, T. Föckerer, C. Heinzel, M.F. Zäh, E. Brinksmeier: Experimental and numerical analysis of the surface integrity resulting from outer-diameter grind-hardening. Procedia Engineering 19 (2011): S. 222-227.
- 349 B. Kolkwitz, T. Foeckerer, J.-W. Huntemann, C. Heinzel, M.F. Zaeh, E. Brinksmeier: Identification and analysis of part distortion resulting from grind-hardening process using computer-based methods. Proceedings of the 3rd international conference on distortion engineering (2011): 499-506.
- 350 K. Komvopoulos, N.P. Suh, N. Saka: Wear of boundary-lubricated metal surfaces. Wear 107 (1986): S. 107-132.
- 351 W. König, A. Arciszewski: Continuous dressing - Dressing conditions determine material removal rates and workpiece quality. CIRP Annals - Manufacturing Technology 37/1 (1988): S. 303-307.
- 352 W. König, L. Cronjäger, G. Spur, H.K. Tönshoff, M. Vigneau, W.J. Zdeblick: Machining of new materials. CIRP Annals - Manufacturing Technology 39/2 (1990): S. 673-681.
- 353 W. König, F. Ferlemann: CBN-Schleifgeschwindigkeit für 500 m/s Schnittgeschwindigkeit. Industrie Diamanten Rundschau 4/90 : S. 242-251.
- 354 W. König, J. Messer: Influence of the composition and structure of steels on the grinding process. CIRP Annals - Manufacturing Technology 30/2 (1981): S. 547-552.
- 355 W. König, V. Sinhoff: Ductile grinding of ultraprecise aspherical optical lenses. International Symposium of Optical Systems Design - SPIE 1780 (1992): S. 778-788.
- 356 W. König, R. Vits: Kühlschmierstoffzuführung beim Außenrundschleifen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen 54 (1987): S. 1-16.

- 357 E.M. Kopalinsky, P.L.B. Oxley: Size effects in metal removal processes. *Mechanical Properties at High Rates of Stain 3* (1984): S. 389-396.
- 358 P. Koshy, A. Iwasaki, M.A. Elbestawi: Surface generation with engineered diamond grinding wheels: insights from simulation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52/1 (2003): S. 271-274.
- 359 J.A. Kovach, P.J. Blau, S. Malkin, S. Srinivasan, B. Bandyopadhyay, K. Ziegler: A feasibility investigation of high speed, low damage grinding for advanced ceramics. *5th International Grinding Conference 1* (1993): S. 1-17.
- 360 J.A. Kovach, S. Malkin, G. Bibel: Grinding energy relationships for superalloy materials. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of the Society of Mechanical Engineers* 17 (1989): S. 185-192.
- 361 I.W. Kragelksi: *Reibung und Verschleiß*, Carl Hanser Verlag München (1971).
- 362 N. Krishnan, S. Malkin, C. Guo: Fluid flow through the grinding zone in creep feed grinding. *Technical Papers of the 1st International machining and grinding Conference; Society of Manufacturing Engineers* (1995): S. 905-916.
- 363 M. Kurrein: Die Messung der Schleifkraft. *wt - Werkstattstechnik online* 20 (1927): S. 585-595.
- 364 Kwak J.-S., M.-K. Ha: Force modeling and machining characteristics of the intermittent grinding wheels. *KSME international journal* 15/3 (2001): S. 351-356.
- 365 A. Langemeyer, R. Bock: Alternative Kühlschmierung beim Schleifen. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen* 59 (2000): S. 80-89.
- 366 K. Langenheinecke, P. Jany, G. Thieleke: *Thermodynamik für Ingenieure*, Vieweg + Teubner Verlag (2011).
- 367 H. Lauer-Schmaltz, W. König: Phenomenon of wheel loading mechanisms in grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 29/1 (1980): S. 201-206.
- 368 A.S. Lavine, S. Malkin: The role of cooling in creep feed grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88/618 (1990): S. 1-15.
- 369 B.R. Lawn, A.G. Evans: A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields. *Journal of Materials Science* 12 (1977): S. 2195-2199.
- 370 B.R. Lawn, T. Jensen, A. Arora: Brittleness as an indentation size effect. *Journal of Material Science* 11 (1976): S. 573-575.
- 371 B.R. Lawn, M.V. Swain: Microfracture beneath point indentations in brittle solids. *Journal of Material Science* 10 (1975): S. 113-122.
- 372 K.W. Lee, P.K. Wong, J.H. Zhang: Study on the grinding of advanced ceramics with slotted diamond wheels. *Journal of Materials Processing Technology* 100 (2000): S. 230-235.

- 373 S.-J. Lee, Y.-G. Jang: Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film. *Journal of fluids and structures* 20/5 (2005): S. 659-672.
- 374 B. Li, X. Jiang, J. Yang, S.Y. Liang: Effects of depth of cut on the redistribution of residual stress and distortion during the milling of thin-walled part. *Journal of Materials Processing Technology* 216 (2015): S. 223-233.
- 375 H.N. Li, K.G. Xie, B. Wu, W.Q. Zhu: Generation of textured diamond abrasive tools by continuous-wave CO₂ laser: Laser parameter effects and optimisation. *Journal of Materials Processing Technology* 275 (2020): S. 116279.
- 376 S.S. Li, J.H. Xu, B. Xiao, M.H. Yan, Y.C. Fu, H.J. Xu: Performance of brazed diamond wheel in grinding cemented carbide. *Materials Science Forum* 532 (2006): S. 381-384.
- 377 X. Li: Application of self-inhaling internal cooling wheel in vertical surface grinding. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 27/1 (2014): S. 86-91.
- 378 X. Li, Z. Chen, W. Chen: Suppression of surface burn in grinding of titanium alloy TC4 using a self-inhaling internal cooling wheel. *Chinese Journal of Aeronautics* 24 (2011): S. 96-101.
- 379 D. Liedtke, R. Jönsson: *Wärmebehandlung - Grundlagen und Anwendungen für Eisenwerkstoffe*, expert verlag, Renningen (2004).
- 380 T. Lierske: *Mechanische und thermische Wirkungen beim Schleifen keramischer Werkstoffe*. Dissertation, IFW Hannover (1998).
- 381 B. Linke: *Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools*. Habilitation (2016).
- 382 B. Linke, J. Das, M. Lam, C. Ly: Sustainability Indicators for Finishing Operations based on Process Performance and Part Quality. *Procedia CIRP* 14 (2014): S. 564-569.
- 383 B. Linke, M. Overcrash: Life Cycle Analysis of Grinding. *CIRP International Conference of Life Cycle Engineering* 19 (2012): S. 293-298.
- 384 J.H. Liu, Z.J. Pei, G.R. Fisher: ELID grinding of silicon wafers: A literature review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47/3-4 (2007): S. 529-536.
- 385 K. Liu, X. Li, S.Y. Liang: Nanometer-scale ductile cutting of tungsten carbide. *Journal of Manufacturing Processes* 6/2 (2004): S. 187-195.
- 386 K. Liu, X.P. Li: Ductile cutting of tungsten carbide. *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001): S. 348-354.
- 387 K. Liu, X.P. Li, S.Y. Liang: The mechanism of ductile chip formation in cutting of brittle materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (2007): S. 875-884.
- 388 K. Liu, X.P. Li, M. Rahman, K.S. Neo, X.D. Liu: A study of the effect of tool cutting edge radius on ductile cutting of silicon wafers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32 (2007): S. 631-637.

- 389 Z.Z. Liu, J. Wang, Y.S. Lu, F. Ma, L. Xiang, S. Zhang: Fabrication of the Electroplated CBN Wheel for Cylindrical Grinding with Abrasive Phyllotactic Pattern. *Advanced Materials Research* 1077 (2014): S. 44-49.
- 390 T.N. Loladse: *Spanbildung beim Schneiden von Metallen*, VEB Verlag Technik Berlin (1954).
- 391 G.S. Lomdahl, R. McPherson: A scale effect in the abrasive wear of glass. *Wear* 73 (1981): S. 205-208.
- 392 R. Lowin: *Schleiftemperaturen und ihre Auswirkung im Werkstück*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen / RWTH Aachen (1980).
- 393 J. Lu: *Handbook of measurement of residual stresses*, Fairmont Press (1996).
- 394 D.A. Lucca, Y.W. Seo, R. Komanduri: Effect of tool edge geometry on energy dissipation in ultraprecision machining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 42/1 (1993): S. 83-86.
- 395 S.Y. Luo, K.C. Chen: An experimental study of flat fixed abrasive grinding of silicon wafers using resin-bonded diamond pellets. *Journal of Materials Processing Technology* 209/2 (2009): S. 686-694.
- 396 H. Lutze, E. Westkämper, H.-W. Hoffmeister, U. Harbs: Integration des Schleifens und HSC in Bearbeitungszentren. *Die Maschine*, dima 9 (1994): S. 29-33.
- 397 S. Malkin: Current trends in CBN grinding technology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 34/2 (1985): S. 557-563.
- 398 S. Malkin: Grinding of metals: Theory and application. *Journal of Applied Metalworking* 3/2 (1984): S. 95-109.
- 399 S. Malkin: Grinding mechanism for metallic and nonmetallic materials. *Proceedings of the 9th North American Manufacturing Research Conference - SME* (1981): S. 235-239.
- 400 S. Malkin: Negative rake cutting to simulate chip formation in grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 28/1 (1979): S. 209-212.
- 401 S. Malkin: Burning limit for surface and cylindrical grinding of steels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 27/1 (1978): S. 233-236.
- 402 S. Malkin: Selection of operating parameters in surface grinding of steels. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 98 (1976): S. 56-62.
- 403 S. Malkin: Specific energy and mechanisms in abrasive processes. *Proceedings 3rd North American Metalworking Research Conference* (1975): S. 453-465.
- 404 S. Malkin: Thermal aspects of grinding Part 2 - Surface temperatures and workpiece burn. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 96/4 (1974): S. 1184-1191.

- 405 S. Malkin, R.B. Anderson: Thermal aspects of grinding: part 1-energy partition. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 96/4 (1974): S. 1177-1183.
- 406 S. Malkin, N.H. Cook: The wear of grinding wheels - Part 2 - Fracture wear. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 93/4 (1971): S. 1129-1133.
- 407 S. Malkin, N.H. Cook: The wear of grinding wheels - Part 1 - Attritious wear. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 93/4 (1971): S. 1120-1128.
- 408 S. Malkin, C. Guo: *Grinding Technology: Theory and Applications of machining with abrasives*, Industrial Press (2008).
- 409 S. Malkin, C. Guo: Thermal analysis of grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56/2 (2007): S. 760-782.
- 410 S. Malkin, M. Huerta: Glass grinding mechanisms and influence on the finished surface and strength. *The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing II - WBS Special Publication* 562 (1979): S. 93-106.
- 411 S. Malkin, T.W. Hwang: Grinding mechanisms for ceramics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 45/2 (1996): S. 569-580.
- 412 S. Malkin, N. Joseph: Minimum energy in abrasive processes. *Wear* 32 (1975): S. 15-23.
- 413 S. Malkin, J.E. Ritter: Grinding Mechanisms and Strength Degradation for Ceramics. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 111/2 (1989): S. 167-174.
- 414 S. Malkin, K.L. Wiggins, M. Osman, R.W. Smalling: Size effects in abrasive processes. *Proceedings of the 13th International Machine Tool Design and Research* (1973): S. 291-296.
- 415 A. Malshe, K. Rajurkar, A. Samant, H.N. Hansen, S. Bapat, W. Jiang: Bio-inspired functional surfaces for advanced applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62/2 (2013): S. 607-628.
- 416 B. Mandal, R. Singh, S. Das, S. Banerjee: Improving grinding performance by controlling air flow around a grinding wheel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51 (2011): S. 670-676.
- 417 B.P. Marinov, A.I. Rivkin: Grinding operations with coolant delivery from inside and outside the grinding wheel. *Machines and Tooling - Production research Association of Great Britain* 30/9 (1959): S. 21-24.
- 418 D.B. Marshall, B.R. Lawn: Indentation of brittle materials. *Microindentation Techniques in Materials, Science and Engineering - ASTM STP* 889 (1986): S. 26-46.
- 419 E.R. Marshall, M.C. Shaw: Forces in dry surface grinding. *Transactions of the ASME* 74 (1952): S. 51-59.

- 420 R. Martens, R. Maier, A. Bettingen: Innenkühlung beim CBN-Schleifen. VDI-Z 140/1-2 (1998): S. 42-44.
- 421 K. Martin, K. Yegenoglu: HSG-Technologie - Handbuch zur praktischen Anwendung, Firma Guehring Automation GmbH, Stetten a.k.M.-Frohnstetten (1992).
- 422 U.S. Patent No. 3,117,400: Abrasive Wheel.
- 423 S. MatSui, K. Soji, T. Kuriyagawa: Grinding characteristics of segmental wheel-Studies on creep feed grinding, (4th report)-. Journal of The Japanese Society of Precision Engineering 52/11 (1986): S. 1863-1869.
- 424 T. Matsuo, S. Toyoura, E. Oshima, Y. Ohbuchi: Effect of grain shape on cutting force in superabrasive single-grit tests. CIRP Annals - Manufacturing Technology 33/1 (1989): S. 323-326.
- 425 J.E. Mayer Jr., G.P. Fang: Diamond grinding of silicon nitride ceramic. Machining of Advanced Materials - Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials 847 (1993): S. 205-222.
- 426 J.E. Mayer, Jr., M.C. Shaw: Grinding temperatures. Lubrication Engineering - Journal of the American Society of Lubrication Engineers (1957): S. 21-27.
- 427 M.J. McCarthy, N.A. Molloy: Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design. Chemical Engineering Journal 7 (1974): S. 1-20.
- 428 P.A. McKeown, K. Carlisle, P. Shore, R.F.J. Read: Ultra-precision high stiffness CNC grinding machines for ductile mode grinding of brittle materials. Infrared Technology and Applications, SPIE 1320 (1990): S. 301-313.
- 429 D. Mewes: Einfluss der relativen Anteile von Mikrospanen zu Mikroflügen auf den abrasiven Verschleißwiderstand duktiler Metalle. Dissertation, Fortschrittsberichte VDI Reihe 5 (101) (1986).
- 430 U.S. Patent No. 2,307,632: Segmental grinding wheel.
- 431 Q. Miao, W.F. Ding, J.H. Xu, C.Y. Yang, Y.C. Fu: Fractal analysis of wear topography of brazed polycrystalline cBN abrasive grains during grinding nickel super alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 68/9-12 (2013): S. 2229-2236.
- 432 A.S. Michaels: Fundamentals of surface chemistry and surface physics. Symposium on Properties of Surfaces. ASTM International. (1963): S. 3-23.
- 433 R.B. Mindek, J. Webster: Minimizing thermal damage of Aerospace components using coolant nozzle and coolant system optimization. IGTI - ASME Cogen-Turbo 9 (1994): S. 97-104.
- 434 E. Minke: Auswirkungen von Kühlschmierstoff, schleifscheibenspezifikationen und Schleifbedingungen auf hydrodynamische Effekte beim Schleifen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen 62 (2005): S. 54-76.

- 435 K. Mizutani, T. Kawano, Y. Tanaka: A piezoelectric-drive table and its application to micro-grinding of ceramic materials. *Precision Engineering* 12/4 (1990): S. 219-226.
- 436 K. Miyoshi: Solid lubricants and coatings for extreme environments: state-of-the-art survey. *National Aeronautics and Space Administration/TM- 2007-214668* (2007): S. 1-16.
- 437 Y. Mizumoto, P. Maas, Y. Kakinuma, S. Min: Investigation of the cutting mechanisms and the anisotropic ductility of monocrystalline sapphire. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66/1 (2017): S. 89-92.
- 438 A.-M.O. Mohamed, R. Bauer, A. Warkentin: A novel method for grooving and re-grooving aluminum oxide grinding wheels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73/5-8 (2014): 715-725.
- 439 A.-M.O. Mohamed, R. Bauer, A. Warkentin: Application of shallow circumferential grooved wheels to creep-feed grinding. *Journal of Materials Processing Technology* 213/5 (2013): S. 700-706.
- 440 O. Mohr: Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials? *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure* 44/45-46 (1900): 1524-1530, 1572-1577.
- 441 M.N. Morgan, A.R. Jackson, H. Wu, V. Baines-Jones, A. Batako, W.B. Rowe: Optimisation of fluid application in grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (2008): S. 363-366.
- 442 T. Moriwaki, E. Shamoto, K. Inoue: Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 41/1 (1992): S. 141-144.
- 443 J.C. Morris, D.L. Callahan, J. Kulik, J.A. Patten, R.O. Scattergood: Origins of the ductile regime in single-point diamond turning of semiconductors. *Journal of the American Ceramic Society* 78/8 (1995): S. 2015-2020.
- 444 M. Morstein, T. Cselle, O. Coddet: Senkung der Produktionskosten durch Verwendung von Nanocomposite-Schichten. *Effizienter zerspanen, 7. SWISSMEM Zerspanungsseminar 7* (2007).
- 445 K.P. Mosbach: Sprödbbruch und Mikroplastizität von Glas an Eindruckversuchen. *Glastechnische Berichte* 37/7 (1964): 333 - 345.
- 446 T.O. Mulhearn, L.E. Samuels: The abrasion of metals: A model of the process. *Wear* 5 (1962): S. 478-499.
- 447 D. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich: Kühlkanalaustrittsbedingungen bei Bohrern - Einfluss des Kühlkanaldurchmessers und des zweiten Freiwinkels auf den Bohrprozess. *wt - Werkstattstechnik online* 109/1-2 (2019): S. 30-34.
- 448 D. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich: The influence of structured flank faces on cooling performance when drilling. *Procedia CIRP* 82 - Proceedings of the 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (2019): S. 415-420.

- 449 D. Müller, B. Kirsch, A. Lange, J.C. Aurich: Kühlkanalaustrittsbedingungen bei Bohren - Simulative Analyse des Einflusses des Kühlkanaldurchmessers, des zweiten Freiwinkels und der Kühlkanalanzahl auf die thermische Belastung von Vollhartmetall-Wendelbohrern. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113/7-8 (2018): S. 471-474.
- 450 R. Murata, K. Okano, Tsutsumi C.: Grinding of structural ceramics - (Some applications of electrolytic in-process dressing to abrasive cut-off operation). Milton C. Shaw grinding symposium 1985 (1985): S. 261-272.
- 451 Y. Mutlugünes, O. Riemer, E. Brinksmeier: Definiert abgerichtete Diamantschleifscheiben - Thermo-chemisch abgerichtete Diamantschleifscheiben zum Ultrapräzisionsschleifen. wt - Werkstatttechnik online 104/6 (2014): S. 374-381.
- 452 N. N: Internally cooled wheels cut surface grinding costs. Machinery (1951): S. 151-153.
- 453 K. Nadolny: Small-dimensional sandwich grinding wheels with a centrifugal coolant provision system for traverse internal cylindrical grinding of steel 100Cr6. Journal of Cleaner Production 93 (2015): S. 354-363.
- 454 K. Nadolny: The effect of integrating the structural modifications of the grinding wheel upon the internal cylindrical grinding process. Archives of Civil and Mechanical Engineering 12/1 (2012): S. 60-67.
- 455 K. Nadolny, A.S.M. Al-Obaidi: A multi-criteria methodology for effectiveness assessment of internal cylindrical grinding process with modified grinding wheels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 87/1-4 (2016): S. 625-637.
- 456 209014: Folding grinding tool with internal centrifugal cooling and component of this tool.
- 457 209013: Folding grinding tool with internal centrifugal cooling and component of this tool.
- 458 K. Nadolny, W. Sienicki, M. Wojtewicz: The effect upon the grinding wheel active surface condition when impregnating with non-metallic elements during internal cylindrical grinding of titanium. Archives of Civil and Mechanical Engineering 15/1 (2015): S. 71-86.
- 459 T. Nakajima, Y. Uno, T. Fujiwara: Cutting mechanism of fine ceramics with a single point diamond. Precision Engineering 11/1 (1989): S. 19-26.
- 460 T. Nakasuji, S. Kodera, S. Hara, H. Matsunaga, N. Ikawa, S. Shimada: Diamond turning of brittle materials for optical components. CIRP Annals - Manufacturing Technology 39/1 (1990): S. 89-92.
- 461 K. Nakayama: Improved grinding performance through grooved grinding wheel. Manufacturing Engineering Transactions (1978): S. 34-37.

- 462 K. Nakayama, J. Takagi, T. Abe: Grinding wheel with helical grooves - An attempt to improve the grinding performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 25/1 (1977): S. 133-138.
- 463 K. Nakayama, K. Tamura: Size Effect in Metal-Cutting Force. *Journal of Engineering for Industry* (1968): S. 119-126.
- 464 Y. Namba, Y. Yamada, A. Tsuboi, K. Unno, H. Nakao: Surface structure of Mn-Zn ferrite single crystals ground by an ultraprecision surface grinder with various diamond wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 41/1 (1992): S. 347-351.
- 465 T. Nguyen, L.C. Zhang: Performance of a new segmented grinding wheel system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49/3-4 (2009): S. 291-296.
- 466 T. Nguyen, L.C. Zhang: The coolant penetration in grinding with a segmented wheel - Part 2 - Quantitative analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46/2 (2006): S. 114-121.
- 467 T. Nguyen, L.C. Zhang: Modelling of the mist formation in a segmented grinding wheel system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45 (2005): S. 21-28.
- 468 T. Nguyen, L.C. Zhang: The coolant penetration in grinding with segmented wheels- Part 1 - Mechanism and comparison with conventional wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45/12-13 (2005): S. 1412-1420.
- 469 T.K. Nguyen, K.-H. Park, P.Y. Kwon: Experimental results on lamellar-type solid lubricants in enhancing minimum quantity lubrication machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME* 138/10 (2016): 101011-1-101011-12.
- 470 U.S. Patent No. 3,324,603: Grinding tool with interrupted helicoid.
- 471 K. Oehlert, J.R. Seume, F. Siegel, A. Ostendorf, B. Wang, B. Denkena, T. Vynnyk, E. Reithmeier, W. Hage, K. Knobloch, R. Meyer: Exploratory experiments on machined riblets for 2-D compressor blades. *ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (2007): S. 25-39.
- 472 H. Ohmori: Electrolytic in-process dressing (ELID) grinding technique for ultraprecision mirror surface machining. *International journal of the Japan Society for Precision Engineering* 26/4 (1992): S. 273-278.
- 473 H. Ohmori, I.D. Marinescu, K. Katahira: *Electrolytic in-process dressing (ELID) technologies*, CRC Press (2011).
- 474 H. Ohmori, T. Nakagawa: Mirror surface grinding of silicon wafers with electrolytic in-process dressing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 39/1 (1990): S. 329-332.
- 475 H. Ohmori, I. Takahashi, T. Nakagawa: Mirror surface grinding by metal bonded super-abrasive wheel with electrolytic in-process dressing. *Progress in Precision Engineering* (1991): S. 153-165.

- 476 H. Ohmori, T. Yamamoto, I.D. Marinescu: Development of New Honing Machine with Electrolytic Interval Dressing Capability. *International Journal for Manufacturing Science and Technology* 1/2 (1995): S. 75-79.
- 477 6,203,589 B1: METAL-RESIS BOND GRINDSTONE AND METHOD FOR MANUFACTURING THE SAME. 20.03.2001.
- 478 H. Ohmori, T. Nakagawa: Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID (Electronic In-Process Dressing) Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 44/1 (1995): S. 287-290.
- 479 S. Okuyama, T. Kitajima, A. Yui: Grinding Performance of a Grain-Arranged Diamond Wheel against Industrial Pure Aluminum. *Key Engineering Materials* 329 (2007): S. 33-38.
- 480 S. Okuyama, Y. Nakamura, S. Kawamura: Cooling action of grinding fluid in shallow grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 33/1 (1993): S. 13-23.
- 481 S. Okuyama, A. Yui, T. Kitajima: Grinding Performance of a Grain-Arranged Diamond Wheel against Aluminum Alloys and Ti6Al4V. *Advanced Materials Research* 126-128 (2010): S. 107-112.
- 482 J.F.G. Oliveira, A.C. Bottene, T.V. Franca: A novel dressing technique for texturing of ground surfaces. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010): S. 361-364.
- 483 J.F.G. Oliveira, D.A. Dornfeld: Application of AE contact sensing in reliable grinding monitoring. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50/1 (2001): S. 217-220.
- 484 J.F.G. Oliveira, D.A. Dornfeld, B. Winter: Dimensional characterization of grinding wheel surface through acoustic emission. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 43/1 (1994): S. 291-294.
- 485 M. Osman, S. Malkin: Lubrication by grinding fluids at normal and high wheel speeds. *ASLE Transactions* 15/4 (1972): S. 261-268.
- 486 M. Ota, K. Miyahara: Influence of grinding on the flexural strength of ceramics. *SME 4th International Grinding Conference MR90-538* (1990): S. 1-18.
- 487 H.W. Ott: Dimensionierung der Kühlschmierstoffzuführung (Menge, Druck, Leistungsbedarf und Düsenausführungen). *Feinstbearbeitung technischer Oberflächen - 6. internationales IWF-Kolloquium Zürich* (2002): S. 111-135.
- 488 H.W. Ott: Richtig gekühlt ist halb geschliffen - Eine eher physikalische Betrachtung. 4. Seminar - *Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung - Neue Entwicklungen und Trends* (2002): 7.1-7.32.
- 489 H.W. Ott: Zufuhrsysteme für Kühlschmierstoffe - Schleifprozesse optimieren. *SMM Die technische Industriezeitschrift* 46 (1998): S. 56-65.

- 490 H.W. Ott: Zuführsysteme für Kühlschmierstoffe beim Schleifen. Kühlschmierstoffe in der spanenden Fertigung (1991): S. 1-17.
- 491 J.O. Outwater, M.C. Shaw: Surface temperatures in grinding. Transactions of the ASME 74 (1952): S. 73-86.
- 492 M. Pacella, D.A. Axinte, P.W. Butler-Smith, P. Shipway, M. Daine, C. Wort: An Assessment of the Wear Characteristics of Microcutting Arrays Produced From Polycrystalline Diamond and Cubic Boron Nitride Composites. Journal of Manufacturing Science and Engineering 138/2 (2016): S. 1-42.
- 493 G. Pahlitzsch: Von innengekühlte Schleifscheiben verringern die Schleifkosten. Werkstatttechnik und Maschinenbau 42/2 (1952): S. 484.
- 494 G. Pahlitzsch, J. Appun: Wesen und Wirkung eines neuartigen Kühlverfahrens, der Zweistoff-Zweiweg-Kühlung, beim Schleifen. Werkstatttechnik und Maschinenbau 11 (1953): S. 487-494.
- 495 G. Pahlitzsch, H. Helmerdig: Bestimmung und Bedeutung der Spandicke beim Schleifen. wt - Werkstatttechnik online 37/22/11/12 (1943): S. 397-399.
- 496 G. Pahlitzsch, R. Schmitt: Einfluss des Abrichtens mit diamantbestückten Rollen auf die Feingestalt der Schleifscheibenschneidfläche. wt - Werkstatttechnik online 58/1 (1968): S. 1-8.
- 497 D.M. Pai, E. Ratterman, M.C. Shaw: Grinding swarf. Wear 131 (1989): S. 329-339.
- 498 B. Pal, A.K. Chattopadhyay, A.B. Chattopadhyay: Development and performance evaluation of monolayer brazed cBN grinding wheel on bearing steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 48/9-12 (2010): S. 935-944.
- 499 V.A. Panaioti: Applying solid lubricant to the grinding-wheel surface. Russian Engineering Research 37/4 (2017): S. 359-362.
- 500 M.S. Paterson: Experimental Deformation and Faulting in Wombeyan Marble. Bulletin of the Geological Society of America 69 (1958): S. 465-476.
- 501 T. Pearce, T. Howes, T. Stuart: The application of continuous dressing in creep feed grinding. Proceedings of the 20th International Machine Tool Design and Research Conference : S. 383-390.
- 502 J. Peklenik: Ermittlung von geometrischen und physikalischen Kenngrößen für die Grundlagenforschung des Schleifens. Dissertation, TH Aachen (1957).
- 503 R. Peng, X. Huang, X. Tang, R. Chen, Y. Hu: Performance of a pressurized internal-cooling slotted grinding wheel system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 94/5-8 (2018): S. 2239-2254.
- 504 J. Peters: Contribution of CIRP research to industrial problem in grinding. CIRP Annals - Manufacturing Technology 33/2 (1984): S. 451-468.
- 505 J.M. Peters: Les recherches actuelles dans le domaine de la rectification. CIRP Annals - Manufacturing Technology 15 (1967): S. 21-23.

- 506 J. Pfaff, M. Warhanek, P.W. Butler-Smith, K. Wegener: DIPLAT: Ultrakurzpulslaserbearbeitung von Diamantwerkzeugen. *Diamond Business* 2/57 (2016): 057-010.
- 507 F.W. Pinto: An experimental and numerical approach to investigate the machining performance of engineered grinding tools. Dissertation, ETH Zürich (2008).
- 508 F.W. Pinto: Grain pattern evaluation on engineered grinding tools. 7th International Conference and Exhibition on Laser Metrology, Machine Tool, CMM and Robotic Performance (LAMDAMAP 2005). (2005).
- 509 F.W. Pinto, G.E. Vargas, K. Wegener: Simulation for optimizing grain pattern on engineered grinding tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57/1 (2008): S. 353-356.
- 510 F.W. Pinto, K. Wegener, F. Kuster, S. Wunder, M. Kiser: Model to Optimise the Grain Pattern of Grinding Discs with Controlled Positions of the Abrasives. 8th CIRP International workshop on Modeling of Machining Operations 10-11 (2005): S. 349-362.
- 511 U.S. Patent No. 6,669,745 B2: Abrasive article with optimally oriented abrasive particles and methods of making the same.
- 512 M. Rabiey: Dry grinding with CBN wheels, The effect of structuring. Dissertation, Universität Stuttgart (2011).
- 513 M. Rabiey, T. Tawakoli, K. Wegener: The effect of special structured slectroplated CBN wheel in dry grinding of 100Cr6. *Advanced Materials Research* 76-78 (2009): S. 119-124.
- 514 M. Rasim, P. Mattfeld, F. Klocke: Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding. *Journal of Materials Processing Technology* 226 (2015): S. 60-68.
- 515 B.P. Ravuri, B.K. Goriparthi, R.S. Revuru, V.G. Anne: Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85/9-12 (2016): S. 2235-2245.
- 516 G.S. Reichenbach, J.E. Mayer, S. Kalpakcioglu, M.C. Shaw: The role of chip thickness grinding. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 78 (1956): S. 847-859.
- 517 S. Rezaei, T. Suto, T. Waisa, H. Noguchi: Creep feed grinding of advanced ceramics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers / Part B, Journal of engineering manufacture* 206 (1992): S. 93-99.
- 518 K. Rickens: Deterministisches Schleifen optischer Gläser mit grobkörnigen Diamantschleifscheiben. Dissertation, Universität Bremen (2011).
- 519 K. Rickens, D. Grimme, O. Riemer, E. Brinksmeier: Engineered diamond grinding wheels for precision ductile grinding. *Production Engineering* 13/2 (2006): S. 71-76.
- 520 E. Roos, K. Maile: *Werkstoffkunde für Ingenieure*, Springer (2004).

- 521 M. Röthlin, H. Klippel, M. Afrasiabi, K. Wegener: Meshless single grain cutting simulations on the GPU. *Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems* 12/3/4 (2019): S. 272-297.
- 522 G.W. Rowe, A.G. Wetton: Theoretical considerations in the grinding of metals. *Journal of the Institute of Metals* 97 (1969): S. 193-200.
- 523 W. Rowe, T. Jin: Temperatures in high efficiency deep grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50/1 (2001): S. 205-208.
- 524 W.B. Rowe: Temperatures in grinding - A review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME* 1369/12 (2017): 121001-1-121001-8.
- 525 W.B. Rowe: *Principles Of Modern Grinding Technology*, Elsevier (2009).
- 526 W.B. Rowe: Thermal analysis of high efficiency deep grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41/1 (2001): S. 1-19.
- 527 W.B. Rowe, X. Chen: Characterization of the size effect in grinding and the sliced bread analogy. *International Journal of Production Research* 35/3 (1997): S. 887-899.
- 528 W.B. Rowe, T. Jin: Temperatures in high efficiency deep grinding (HEDG). *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50/1 (2001): S. 205-208.
- 529 N. Des Ruisseaux: Thermal aspects of the grinding process. Dissertation (1968).
- 530 N.R. Des Ruisseaux, R.D. Zerkle: Thermal analysis of the grinding process. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 92 (1970): S. 428-434.
- 531 E. Saljé, J. Riefenstahl: Kühlmittelzufuhr durch die Schleifscheibe beim Innenrundschleifen. *Industrie-Anzeiger* 43/104 (1982): S. 39-40.
- 532 R. Samuel, S. Chandrasekar, T.N. Farris, R.H. Licht: Effect of residual stress on the fracture of ground ceramics. *Journal of American Ceramic Society* 72/10 (1989): S. 1960-1966.
- 533 L.E. Samuels: Abrasive surface finishing processes: mechanics. *New Developments in Grinding Proceedings of International Grinding Conference* (1972): S. 283-304.
- 534 H. Sasahara, T. Kikuma, R. Koyasu, Y. Yao: Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel. *Precision Engineering* 38/4 (2014): S. 775-782.
- 535 T. Sasaki, K. Okamura: The cutting mechanism of abrasive grain. *Bulletin of JSME* 3/12 (1960): S. 547-555.
- 536 K. Sato: Features and principles of through wheel coolant grinding. *Technology Reports* 28/1 (1963): S. 87-102.

- 537 R.S. Sayles, T.R. Thomas: A stochastic explanation of some structural properties of a ground surface. *International Journal of Production Research* 14/6 (1976): S. 641-655.
- 538 G.S. Schajer, C.O. Ruud: Overview of Residual Stresses and Their Measurement. *Practical Residual Stress Measurement Methods*, John Wiley & Sons, Ltd (2013): S. 1-27.
- 539 M.G. Schinker: Subsurface damage mechanisms at high-speed ductile machining of optical glasses. *Precision Engineering* 13/3 (1991): S. 208-218.
- 540 M.G. Schinker, W. Döll: Turning Of Optical Glasses At Room Temperature. *In-Process Optical Metrology for Precision Machining 802* (1987): S. 70-80.
- 541 M.G. Schinker, W. Döll: Grundlegende Untersuchungen zur spanenden Bearbeitbarkeit von anorganischen Gläsern mit Einzahlwerkzeugen - Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben AIF Nr. 6241. 1987.
- 542 M.G. Schinker, W. Döll: Plasticity and fracture induced by scratching optical glasses at high speeds. *Strength of Inorganic Glass XIV* 643 (1985): S. 115-133.
- 543 M.G. Schinker, W. Döll: Basic investigation into the high speed processing optical glasses with diamond tools. *Proceedings of SPIE* 381 (1983): S. 32-38.
- 544 M.G. Schinker, W. Döll: Plasticity and fracture of inorganic glasses at high speed grinding. *Le Journal de Physique Colloques* 12/43 (1982): S. 603-606.
- 545 G. Schmaltz: *Technische Oberflächenkunde*, Springer, Berlin (1936).
- 546 M. Schneider, C. Abt, F. Klein: Grinding with internal cooling lubrication supply. 6th International DAAAM Baltic Conference, *Industrial Engineering* (2008).
- 547 R.E. Schofield, S.J. Hollands: A review of some aspects of research into the grinding process, Part1 - The grinding mechanism. *The Production Engineer* (1973): S. 265-270.
- 548 M. Schumack, J. Chung, W. Schultz, E. Kannatey-Asibu, Jr.: Analysis of fluid flow under a grinding wheel. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME* 113 (1991): S. 190-197.
- 549 A.J. Sedriks, T.O. Mulhearn: Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive processes. *Wear* 6 (1963): S. 457-466.
- 550 S. Shaji, V. Radhakrishan: A study on calcium fluoride as a solid lubricant in grinding. *International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing* 11/1 (2003): S. 29-36.
- 551 S. Shaji, V. Radhakrishan: Investigations on the application of solid lubricants in grinding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 216/10 (2002): S. 1325-1343.
- 552 S. Shaji, V. Radhakrishnan: An investigation on solid lubricant moulded grinding wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43/9 (2003): S. 965-972.

- 553 S. Shaji, V. Radhakrishnan: Application of Solid Lubricants in Grinding: Investigations on Graphite Sandwiched Grinding Wheels. *Machining Science and Technology* 7/1 (2003): S. 137-155.
- 554 M.C. Shaw: The size effect in metal cutting. *Sadhana* 28/5 (2003): S. 875-896.
- 555 M.C. Shaw: Principles of abrasive processing. Clarendon Press (1996).
- 556 C. Shi, X. Li, Z. Chen: Design and experimental study of a micro-groove grinding wheel with spray cooling effect. // Design and experimental study of a micro-groove grinding wheel with spray cooling effect. *Chinese Journal of Aeronautics* 27/2 (2014): S. 407-412.
- 557 H. Shibutani, J. Ikeno, O. Horiuchi, K. Yano: Mirror grinding of silicon wafer with EPD pellet. *Proceedings of the 9th International Conference on Production Engineering* (1999): S. 98-102.
- 558 S. Shimada, N. Ikawa, T. Inamura, N. Takazawa, H. Ohmori, T. Sata: Brittle-ductile transition phenomena in microindentation and micromachining. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 44/1 (1995): S. 523-526.
- 559 M. Shimano, Y. Yamamoto, J. Maruyama, W. Lin, H. Ohmori: Development of ELID Honing Method (First Report). *Review of automotive engineering* 29/1 (2008): S. 103-106.
- 560 T. Shonozaki, H. Shigematu: Mechanism of rubbing and biting of cutting edge on work surface in grinding process. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering* 2/1 (1966): S. 8-13.
- 561 P. Shore: «ELID» for efficient grinding of super smooth surfaces. *Industrial Diamond Review* 53/559 (1993): S. 318-322.
- 562 P. Shore: State of the art in "damage-free" grinding of advanced engineering ceramics. *British ceramic proceedings/ British Ceramic Society* 46 (1990): S. 189-200.
- 563 J. Sieniawski, K. Nadolny: Experimental study on grinding wheel radial wear in surface grinding of steel CrV12 using a zonal centrifugal coolant provision system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 230/12 (2016): S. 1452-1461.
- 564 J. Sieniawski, K. Nadolny: The effect upon grinding fluid demand and workpiece quality when an innovative zonal centrifugal provision method is implemented in the surface grinding of steel CrV12. *Journal of Cleaner Production* 113 (2016): S. 960-972.
- 565 E.J. da Silva, E.C. Bianchi, J.F.G. de Oliveira, P.R. de Aguiar: Evaluation of grinding fluids in the grinding of a martensitic valve steel with CBN and alumina abrasives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B - Journal of Engineering Manufacture* 217 (2003): S. 1047-1055.

- 566 E.J. da Silva, A.C. Bottene, J.F. de Oliveira, A. Atoatte, A.S. de Rodrigues: Grinding process for profiled texturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65/1 (2016): S. 337-340.
- 567 E.J. da Silva, B. Kirsch, A.C. Bottene, A. Simon, J.C. Aurich, J.F.G. de Oliveira: Manufacturing of structured surfaces via grinding. *Journal of Materials Processing Technology* 243/243 (2017): S. 170-183.
- 568 E.J. da Silva, J.F.G. de Oliveira, B.B. Salles, R.S. Cardoso, V.R.A. Reis: Strategies for production of parts textured by grinding using patterned wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62/1 (2013): S. 355-358.
- 569 L.R. Silva, E.C. Bianchi, R.E. Catai, R.Y. Fuisse, T.V. Franca, P.R. de Aguiar: Study on the behaviour of the Minimum Quantity Lubricant - MQL Technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. *Journal of the Brazil Society of Mechanical Science & Engineers* 27/2 (2005): S. 192-199.
- 570 U.S. Patent No. 3,779,727: Resin-bonded abrasive tools with metal fillers.
- 571 H. Sixt: Zuführung von Kühlmittel durch die Schleifscheibe. *Die Schleif- und Poliertechnik* 17/5 (1940): S. 70.
- 572 H.E. Sliney: An investigation of oxidation resistant solid lubricant materials // An Investigation of Oxidation-Resistant Solid Lubricant Materials. *ASLE Transactions* 15/3 (1972): S. 177-183.
- 573 A. Smekal: Die Mikroplastizität der Hartstoffe. Vorträge gehalten auf dem Plansee-Seminar De Re Metallica (1956): S. 28-40.
- 574 R. Snoeys, A. Decneut: Review of the results of the cooperative research program of the CIRP-grinding group. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 19 (1971): S. 507-512.
- 575 R. Snoeys, U. Leuven, M. Maris, J. Peters: Thermally induced damage in grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 27/2 (1978): S. 571-581.
- 576 R. Snoeys, J. Peters, A. Decneut: The Significance of Chip Thickness in Grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 23/2 (1974): S. 227-237.
- 577 D.J. Snoha, M.R. Foley: An investigation of residual stresses in machined silicon nitride. *U.S. Army Materials Technology Laboratory* 92-46 (1992): S. 1-20.
- 578 A.P. Sokolowski: Präzision in der Metallbearbeitung, VEB Verlag Technik Berlin (1955).
- 579 J. Sölter, J. Eckebrecht, B. Kolkwitz, C. Heinzl: Analysis of the distortion and compensation potential in grind-hardening of linear guides: Analyse des Verzugs- und des Kompensationspotenzials beim Schleifhärten von Linearführungen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 47/8 (2016): S. 726-734.

- 580 F.J.P. Sousa, J.C. Aurich, W.L. Weingaertner, O.E. Alarcon: Optimization of the Kinematics Available in the Polishing Process of Ceramic Tiles by Computational Simulations. *Journal of the American Ceramic Society* 92/1 (2009): S. 41-48.
- 581 H. Sprengler, W. Plötner: *Technisches Handbuch Pumpen*, VEB Verlag Technik Berlin (1976).
- 582 K. Spring: The applications and properties of micron diamond abrasives. *Industrial Diamond Review* 59/580 (1999): S. 50-52.
- 583 U. Sridharan, S. Malkin: Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) with nanofluids on grinding behavior and thermal distortion. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of the Society of Mechanical Engineers* 37 (2009): S. 629-636.
- 584 K. Steffens: Closed Loop Simulation of Grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 32/1 (1983): S. 255-259.
- 585 K. Steffens, H. Lauer-Schmaltz: Spanbildung und Trennpunktlage beim Schleifen. *Industrie-Anzeiger* 73 (1978): S. 49-50.
- 586 D.J. Stephenson, T. Jin, J. Corbett: High efficiency deep grinding of a low alloy steel with plated CBN wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 55/1 (2002): S. 241-244.
- 587 D.J. Stephenson, E. Laine, I. Johnstone, A. Baldwin, J. Corbett: Burn threshold studies for superabrasive grinding using electroplated CBN wheels. *Society of Manufacturing Engineers* 01/219 (2001): S. 1-14.
- 588 P. Stępień: Deterministic and stochastic components of regular surface texture generated by a special grinding process. *Wear* 271/3-4 (2011): S. 514-518.
- 589 P. Stępień: Grinding forces in regular surface texture generation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47/14 (2007): S. 2098-2110.
- 590 P. Stępień: Oberflächengestaltung gasdynamischer Lager und Dichtungen. *Industrie Diamanten Rundschau* 2 (1994): S. 108-114.
- 591 P. Stępień, B. Bałasz: Simulation of the formation process of regular grooves on surface ground. *Proceedings of the Fourth Annual Industrial Simulation Conference* 5-6 (2006): S. 269-276.
- 592 P. Stępień: Regular Surface Texture Generated by Special Grinding Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME* 131/1 (2009): 011015-1-011015-7.
- 593 R. Stöhr: *Untersuchung und Entwicklung des Innenrundschleifhärstens*. Dissertation, IWT Bremen (2007).
- 594 R. Stöhr, C. Heinzel: Grind-hardening with CBN. *Abrasives Magazine* 6 (2002): S. 22-30.

- 595 K. Subramanian, S. Ramanath: Mechanism of material removal in the precision grinding of ceramics. *Precision Machining - Technology and Machine Development and Improvement ASME* 58 (1992): S. 1-19.
- 596 F.H. Sun, M. Chen, H.J. Xu, Y.C. Fu: Experimental research on slotted & perforated electroplated CBN grinding wheel with radial jet. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics* 16/2 (1999): S. 154-159.
- 597 C.-M. Sung: Brazed diamond grid: a revolutionary design for diamond saws. *Diamond and Related Materials* 8/8-9 (1999): S. 1540-1543.
- 598 J.C. Sung, M. Sung: The brazing of diamond. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 27/2 (2009): S. 382-393.
- 599 R.S. Sussmann, J.R. Brandon, S.E. Coe, J.L. Collins, A.J. Whitehead: A review of the industrial applications of CVD diamond. *Industrial Diamond Review* 61/591 (2001): S. 271-278.
- 600 T. Suto, T. Waida, H. Noguchi, H. Inoue: High performance creep feed grinding of difficult-to-machine materials with new-type wheels. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering* 24/1 (1990): S. 39-44.
- 601 T. Suto, T. Waida, H. Noguchi, M. Rezaei: Creep Feed Grinding of Ceramic-Matrix Composites with a Segmented and Perforated Wheel. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering* 24/3 (1990): S. 227-228.
- 602 Y. Suzuki, N. Kasagi: Turbulent drag reduction mechanism above a riblet surface. *AIAA journal* 32/9 (1994): S. 1781-1790.
- 603 M.V. Swain: Microfracture about scratches in brittle solids. *Proceeding of Royal Society London A* 366 (1979): S. 575-597.
- 604 D. Tabor: Mohs's hardness scale - A physical interpretation. *Proceedings Physical Society London B* 67/3 (1954): S. 249-257.
- 605 U.S. Patent No. 6,875,098 B2: Electroplated grinding wheel and its production equipment.
- 606 N. Takenaka: A study on the grinding action by single grit. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 13 (1966): S. 183-190.
- 607 N. Takeno, S. Nagaoka: Electron microscope observation of abrasive grain in precision grinding operations. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering* 1/3 (1965): S. 150-161.
- 608 D. Taminiau, J.H. Dautzenberg: Bluntness of the tool and process forces in high-precision cutting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 40/1 (1991): S. 65-68.
- 609 H. Tanaka, S. Shimada, L. Anthony: Requirements for ductile-mode machining based on deformation analysis of mono-crystalline silicon by molecular dynamics simulation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56/1 (2007): S. 53-56.
- 610 L.P. Tarasov: Grinding fundamentals - I. *International Production Engineering Residual Conference* (1963): S. 196-208.

- 611 T. Tawakoli: T-Tool-Profil - Ein praktisches Einsatzbeispiel für die Innenrundbearbeitung. *Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung / neue Entwicklungen und trends* 5 (2004): 3b-1 - 3b-6.
- 612 T. Tawakoli: Minimalmengen-Kühlschmierung beim Schleifen, T-Tool Profil. *Horizonte* 21 (2002): S. 38-44.
- 613 T. Tawakoli: Minimalmengen-Kühlschmierung beim Schleifen. *IDR Archiv Ausgabe* 3 (2002): S. 1-9.
- 614 T. Tawakoli: Innovatives System zum Schleifen, Abrichten und Fräsen. *Industrie Diamanten Rundschau* 35/1 (2001): S. 48-54.
- 615 T. Tawakoli: Innovative Werkzeugsysteme zum Schleifen, Abrichten und Fräsen (T-Tool Profil und T-Tool). *Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung / neue Entwicklungen und trends* 3 (2000): 4-1 bis 4-12.
- 616 T. Tawakoli: *High Efficiency Deep Grinding*, VDI-Verlag (1993).
- 617 T. Tawakoli, B. Azarhoushang: Intermittent grinding of ceramic matrix composites (CMCs) utilizing a developed segmented wheel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51 (2011): S. 112-119.
- 618 T. Tawakoli, B. Azarhoushang: Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48 (2008): S. 1585-1591.
- 619 T. Tawakoli, A. Daneshi: New kinematic in dressing of grinding wheels. *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (2013): V02BT02A076-1-V02BT02A076-5.
- 620 T. Tawakoli, M.J. Hadad, M.H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stöckert, A. Rasifard: An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication - MQL grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49 (2009): S. 924-932.
- 621 T. Tawakoli, U. Heisel, A. Daneshi, D.H. Lee: An experimental investigation on the characteristics of cylindrical plunge dry grinding with structured cBN wheels. *Procedia CIRP* 1 (2012): S. 399-403.
- 622 T. Tawakoli, D.H. Lee, A. Daneshi: Green grinding with innovative wheel topography. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 14/7 (2013): S. 1209-1212.
- 623 T. Tawakoli, M. Rabiey: An innovative concept and its effects on wheel surface topography in dry grinding by resin and vitrified bond CBN wheel. *Machining Science and Technology* 12/4 (2008): S. 514-528.
- 624 T. Tawakoli, M. Rabiey: Trockenschleifen mit CBN Schleifscheiben, der Effekt der Makrotopographie. *Hochschule Furtwangen, IAF / Kompetenzzentrum für Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung* (2008): 15.1 -15.21.

- 625 T. Tawakoli, M. Rabiye: Trockenschleifen mit CBN-Schleifscheiben - ein innovatives Konzept. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen 63 (2007): S. 100-118.
- 626 T. Tawakoli, E. Westkämper, M. Rabiye: Dry grinding by special conditioning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 33 (2007): S. 419-424.
- 627 U. Teicher, A. Ghosh, A.B. Chattopadhyay, K. Künanz: On the grindability of titanium alloy by brazed type monolayered superabrasive grinding wheels. International Journal of Machine Tools and Manufacture 46/6 (2006): S. 620-622.
- 628 U. Teicher, K. Künanz, A. Ghosh, A.B. Chattopadhyay: Performance of diamond and CBN single-layered grinding wheels in grinding titanium. Materials and Manufacturing Processes 23/3 (2008): S. 224-227.
- 629 S.P. Timoshenko, J.N. Goodier: Theory of Elasticity - Third Edition. Engineering Societies Monographs (1970): S. 393-402.
- 630 S.B. Toh, R. McPherson: Fine scale abrasive wear of ceramics by a plastic cutting process. Science of hard Materials - Institute of Physics Conference Series 75/9 (1986): S. 865-871.
- 631 H.K. Tönshoff, E. Brinksmeier: Eigenspannungen durch Schleifen - wesentliche Einflußgrößen des Prozesses. Macherauch, E., Hauck, V., Eigenspannungen: Entstehung - Messung - Bewertung; DGM-Seminar 2 (1983): S. 251-270.
- 632 H.K. Tönshoff, T. Friemuth, C. Marzenell: Properties of honed gears during lifetime. CIRP Annals - Manufacturing Technology 49/1 (2000): S. 431-434.
- 633 H.K. Tönshoff, B. Karpuschewski, T. Glatzel: Particle emission and immission in dry grinding. CIRP Annals - Manufacturing Technology 46/2 (1997): S. 693-695.
- 634 H.K. Tönshoff, W. v. Schmeiden, I. Inasaki, W. König, G. Spur: Abrasive machining of silicon. CIRP Annals - Manufacturing Technology 39/2 (1990): S. 621-635.
- 635 H.K. Tönshoff, R. Telle, P. Roth: Chip formation and material removal in grinding of ceramics. SME Technical Paper MR90-539 (1990): S. 1-18.
- 636 H.K. Tönshoff, H.-G. Wobker: Influence of surface integrity on the wear of ceramic cutting tools. Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers 47/7 (1990): S. 579-583.
- 637 A.A. Torrance: The effect of grit size and asperity blunting on abrasive wear. Wear 253 (2002): S. 813-819.
- 638 A.A. Torrance: The correlation of process parameters in grinding. Wear 139 (1990): S. 383-401.
- 639 A.A. Torrance: An approximate model of abrasive cutting. Wear 118 (1987): S. 217-232.
- 640 A.A. Torrance: A new approach to the mechanics of abrasion. Wear 67 (1981): S. 233-257.

- 641 9066468 A: Electroplated diamond cutter and its manufacture.
- 642 R. Transchel, F. Heini, J. Stirnimann, F. Kuster, C. Leinenbach, K. Wegener: Influence of the clearance angle on the cutting efficiency of blunt, octahedral-shaped diamonds in an active filler alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 75 (2013): S. 9-15.
- 643 R. Transchel, C. Leinenbach, K. Wegener: Cutting and ploughing forces for small clearance angles of hexa-octahedron shaped diamond grains. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63/1 (2014): S. 325-328.
- 644 C. Treffert: Hochgeschwindigkeitsschleifen mit galvanisch gebundenen CBN_Schleifscheiben. Dissertation, RWTH Aachen (1995).
- 645 G. Trmal, H. Kaliszer: Delivery of cutting fluids in grinding. *Journal of the Institution of Mechanical Engineers* 23/8 (1976): S. 95-100.
- 646 M.-Y. Tsai, S.-T. Chen, Y.-S. Liao, J. Sung: Novel diamond conditioner dressing characteristics of CMP polishing pad. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49/9 (2009): S. 722-729.
- 647 M.-Y. Tsai, S.-X. Jian: Development of a micro-graphite impregnated grinding wheel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 56 (2012): S. 94-101.
- 648 K. Ueda, T. Sugita, H. Hiraga, K. Iwata: A j-integral approach to material removal mechanisms in microcutting of ceramics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 40/1 (1991): S. 61-64.
- 649 U. Uhlig, R. Bleich: Profilschleifen mit kontinuierlichem Abrichten. *wt - Zeitschrift für industrielle Fertigung* 72 (1982): S. 313-317.
- 650 E. Uhlmann, C. Bäcker, N. Schröer: Surface structuring using kinematic modulation in grinding. *Production Engineering* 7/4 (2013): S. 373-381.
- 651 E. Uhlmann, T. Borsoi Klein, L. Hochschild, C. Bäcker: Influence of Structuring by Abrasive Machining on the Tribological Properties of Workpiece Surfaces. *Procedia Engineering* 19/30 (2011): S. 363-370.
- 652 E. Uhlmann, L. Hochschild: Tool optimization for high speed grinding. *Production Engineering Research and Development* 7/2-3 (2013): S. 185-193.
- 653 E. Uhlmann, M. Kirchgatter: Technologischer Nutzen von Schleifbelagsnutungen - Vorteile teuer erkauft? *wt - Werkstattstechnik online* 99/6 (2009): S. 390-395.
- 654 E. Uhlmann, J. Mewis, L. Hochschild: Analyse von Schleifprozessen mit genuteten Schleifscheiben. *wt - Werkstattstechnik online* 100/6 (2010): S. 494-501.
- 655 E.G. Uhlmann: Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe. Dissertation, TU Berlin (1994).
- 656 N. Ukai: Super High Speed Grinding with vitrified CBN wheels. *International Grinding* 5 (1993): S. 1-27.

- 657 S. Venkatachalam, X. Li, S.Y. Liang: Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009): S. 3306-3319.
- 658 C.E.H. Ventura: Herstellung von Schneidkantengeometrien an PKD-Wendeschneidplatten durch Querseiten-Planschleifen. Dissertation, IFW Hannover (2014).
- 659 C.E.H. Ventura, J. Köhler, B. Denkena: Cutting edge preparation of PCBN inserts by means of grinding and its application in hard turning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6/4 (2013): S. 246-253.
- 660 J. Verkerk: Slotted wheels to avoid cracks in precision grinding. *Abrasive Engineering Society Conference* 16 (1979): S. 75-81.
- 661 J. Verkerk: The influence of the dressing operation on productivity in precision grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 28/2 (1979): S. 487-495.
- 662 J. Verkerk, A.J. Pekelharing: Characterization of wheel wear in plunge grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 25/1 (1977): S. 127-131.
- 663 J. Verkerk, Peters J.: Final report concerning CIRP cooperative work on the characterization of grinding wheel topography. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 26/2 (1977): S. 385-395.
- 664 G. Vieregge: Zerspanung der Eisenwerkstoffe, Stahleisen (1970).
- 665 R. Vits: Technologische Aspekte der Kühlschmierung beim Schleifen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen / RWTH Aachen (1985).
- 666 T. Vodenitcharova, I. Zhang, T. Yu: Constitutive modeling of multi-phase transformation of silicon under nano-scale deformation. *Key Engineering Materials* 233-236 (2003): S. 621-626.
- 667 F. Vollertsen: Categories of size effects. *Production Engineering - Research and Development* (2008): S. 377-383.
- 668 F. Vollertsen, D. Biermann, H.N. Hansen, I.S. Jawahir, K. Kuzman: Size effects in manufacturing of metallic components. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58/2 (2009): S. 566-587.
- 669 U.S. Patent No. 4,680,199: Method for depositing a layer of abrasive material on a substrate.
- 670 D.J. Waldorf, R.E. DeVor, S.G. Kapoor: An evaluation of ploughing models for orthogonal machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME* 121 (1999): S. 550-559.
- 671 D.J. Waldorf, R.E. DeVor, S.G. Kapoor: A slip-line field for ploughing during orthogonal cutting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the ASME* 120 (1998): S. 693-699.
- 672 M.J. Walsh: Riblets as a viscous drag reduction technique. *AIAA journal* 21/4 (1983): S. 485-486.

- 673 A. Walter: Kühlschmierstoffe effizient eingesetzt. Werkstatt und Betrieb 5 (2004): S. 54-56.
- 674 C. Walter, T. Komischke, F. Kuster, K. Wegener: Laser-structured grinding tools- Generation of prototype patterns and performance evaluation. Journal of Materials Processing Technology 214/4 (2014): S. 951-961.
- 675 C. Walter, T. Komischke, E. Weingärtner, K. Wegener: Structuring of CBN Grinding Tools by Ultrashort Pulse Laser Ablation. Procedia CIRP 14 (2014): S. 31-36.
- 676 C. Walter, M. Rabiey, M. Warhanek, N. Jochum, K. Wegener: Dressing and truing of hybrid bonded CBN grinding tools using a short-pulsed fibre laser. CIRP Annals - Manufacturing Technology 61/1 (2012): S. 279-282.
- 677 J.-J.J. Wang, Y.-Y. Liao: Critical depth of cut and specific cutting energy of a microscribing process for hard and brittle materials. Journal of Engineering Materials and Technology 130 (2008): (011002)1-6.
- 678 Z. Wang, W. Chen, Y. Zhang, Z. Chen: Study on the machining distortion of thin-walled part caused by redistribution of residual stress. Chinese Journal of Aeronautics 18/2 (2005): S. 175-179.
- 679 M. Warhanek, C. Walter, S. Huber, F. Hänni, K. Wegener: Cutting characteristics of electroplated diamond tools with laser-generated positive clearance. CIRP Annals - Manufacturing Technology 64/1 (2015): S. 317-320.
- 680 G. Warnecke: Spanbildung bei metallischen Werkstoffen. Dissertation, IFW Hannover (1974).
- 681 G. Warnecke, T. Hollstein, W. König: Schleifen von Hochleistungskeramik - Werkstoff / Anwendung / Bearbeitung / Qualität, TÜV Rheinland (1994).
- 682 G. Warnecke, U. Zitt: Kinematic simulation for analyzing and predicting high-performance grinding processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology 47/1 (1998): S. 265-270.
- 683 J. Webster, E. Brinksmeier, C. Heinzl, M. Wittmann, K. Thoens: Assessment of grinding fluid effectiveness in continuous-dress creep feed grinding. CIRP Annals - Manufacturing Technology 51/1 (2002): S. 235-240.
- 684 J.A. Webster, C. Cui, R.B. Mindek, R. Lindsay: Grinding fluid application system design. CIRP Annals - Manufacturing Technology 44/1 (1995): S. 333-338.
- 685 J.A. Webster, P. Grün: Improving grinding process economics through more effective fluid application. 7. Seminar Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, Neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis (2008): 19.1 - 19.24.
- 686 K. Wegener, H.-W. Hoffmeister, B. Karpuschewski, F. Kuster, W.-C. Hahmann, M. Rabiey: Conditioning and monitoring of grinding wheels. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60/1 (2011): S. 757-777.

- 687 K. Weinert, I. Inasaki, J.W. Sutherland, T. Wakabayashi: Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53/2 (2004): S. 511-538.
- 688 G. Werner: Kinematik und Mechanik des Schleifprozesses. Dissertation, RWTH Aachen (1971).
- 689 G. Werner, M.A. Younis: Darstellung der Schleifergebnisse mit Hilfe eines die Einstellgrößen zusammenfassenden Faktors. *Industrie-Anzeiger* 92 (1970): 1663-1666.
- 690 E. Westkämper: Grinding assisted by Nd:YAG Lasers. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 44/1 (1995): S. 317-320.
- 691 E. Westkämper, R. Bock, H.-W. Hoffmeister: Umweltgerechte Prozeßgestaltung. *VDI Berichte - Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung* 1240 (1996): S. 122-139.
- 692 E. Westkämper, J. Freytag, U. Harbs: Dressing of Resin-Bonded CBN Grinding Wheels by Means of a Pulsed Nd:YAG Solid-State Laser. *Proceedings of the LANE'94* 1 (1994): S. 491-500.
- 693 E. Westkämper, M. Klyk: High-speed I.D. grinding with CBN wheels. *Production Engineering* 1/1 (1993): S. 31-36.
- 694 W.J. Wills-Moren, R.F.J. Read: Experiences in the precision machining of brittle materials. *Ultraprecision in Manufacturing Engineering - Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology* (1988): S. 3-21.
- 695 H.v. Wingraber, M. Abou-Aly: *Handbuch Technische Oberflächen*, Vieweg (1989).
- 696 M. Wittmann: Methode zur Bewertung der Kühlwirkung des Kühlschmierstoff-Zufuhrsystems beim Schleifen. *Tribology and Lubrication Engineering - 14th International Colloquium Tribology* (2004): S. 881-893.
- 697 M. Wittmann, E. Brinksmeier, C. Heinzel: Einfluss des Kühlschmierstoff-Zufuhrsystems auf die Wirkmechanismen im Schleifspalt. *Automotive and Industrial Lubrication - 15th International Colloquium Tribology* (2006): S. 1-17.
- 698 M. Wojtewicz: Original methods of ceramic grinding wheels impregnation. *Journal of Mechanical and Energy Engineering* 1(41)/1 (2017): S. 45-50.
- 699 U. Wolfstieg, E. Macherauch: Ursachen und Bewertung von Eigenspannungen. *Chemie-Ing.-Techn.* 45/11 (1973): S. 760-770.
- 700 R. Woxén: Wheel-Wear in Cylindrical Grinding. *Ingeniörsvetenskapsakademiens* 124 (1933): S. 1-38.
- 701 H. Wu, S.N. Melkote: Study of ductile-to-brittle transition in single grit diamond scribing of silicon: application to wire sawing of silicon wafers. *Journal of Engineering Materials and Technology* 134/4 (2012): 041011-1-04011-8.

- 702 M. Wu, B. Guo, Q. Zhao, P. He: Precision grinding of a microstructured surface on hard and brittle materials by a microstructured coarse-grained diamond grinding wheel. *Ceramics International* 44/7 (2018): S. 8026-8034.
- 703 G. Xiao, S. To, G. Zhang: Molecular dynamics modelling of brittle-ductile cutting mode transition: Case study on silicon carbide. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 88 (2015): S. 214-222.
- 704 X.-Z. Xie, G.-Y. Chen, L.-J. Li: Dressing of resin-bonded superabrasive grinding wheels by means of acousto-optic Q-switched pulsed Nd:YAG laser. *Optics & Laser Technology* 36/5 (2004): S. 409-419.
- 705 H. Xu, Y. Fu, F. Sun, X. Xu: Fundamental studies on enhancing heat transfer in contact zone during high efficiency grinding. *Science in China (Series E)* 45/3 (2002): S. 261-272.
- 706 Y. Yamamoto, H. Maeda, H. Shibutani, H. Suzuki, O. Horiuchi: A study on constant-pressure grinding with EPD pellets. *Key Engineering Materials* 257-258 (2004): S. 135-138.
- 707 J. Yan, K. Syoji, T. Kuriyagawa, H. Suzuki: Ductile regime turning at large tool feed. *Journal of Materials Processing Technology* 121/2-3 (2002): S. 363-372.
- 708 J. Yan, K. Syoji, J. Tamaki: Crystallographic effects in micro/nanomachining of single-crystal calcium fluoride. *Journal of Vacuum Science and Technology B* 22/1 (2003): S. 46-51.
- 709 J. Yan, M. Yoshino, T. Kurigawa, T. Shirakashi, K. Syoji, R. Komanduri: On the ductile machining of silicon for micro electro-mechanical systems (MEMS), opto-electronic and optical applications. *Material Science and Engineering A* 297 (2001): S. 230-234.
- 710 C.Y. Yang, J.H. Xu, W.F. Ding, S.T. Tong: Grinding Titanium Alloy with Brazed Monolayer CBN Wheels. *Key Engineering Materials* 359-360 (2007): S. 33-37.
- 711 Y. Yao, Y. Fuwa, H. Sasahara: Development of a device for coolant supply from inside of grinding wheel and its application for profile machining of difficult to grinding materials. *Proceeding of the 4th International Conference on High Performance Cutting* (2010): S. 417-420.
- 712 H. Yasui, S. Tsukuda: Influence of fluid type on wet grinding temperature. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering* 17/2 (1983): S. 133-134.
- 713 K. Yegenoglu, M. Roth: Good surface finish with electroplated CBN wheels. *Industrial Diamond Review* 3 (1987): S. 114-116.
- 714 6015574 A: Manufacture of abrasive grain electroplated tool.
- 715 J. Yoshioka, K. Koizumi, M. Shimizu, H. Yoshikawa, M. Miyashita, A. Kanai: Surface grinding with newly developed ultra precision grinding machine. *SME Technical Paper MR82, 930* (1982): S. 1-21.

- 716 H. Yu, J. Wang, Y. Lu: Modeling and analysis of dynamic cutting points density of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86/5-8 (2016): S. 1933-1943.
- 717 H.P. Yuan, H. Gao, Y.J. Bao, Y.B. Wu: Grinding of Carbon/Epoxy Composites Using Electroplated CBN Wheel with Controlled Abrasive Clusters. *Key Engineering Materials* 389-390/389 (2008): S. 24-29.
- 718 H.P. Yuan, H. Gao, Y.D. Liang: Fabrication of a new-type electroplated wheel with controlled abrasive cluster and its application in dry grinding of CFRP. *International Journal of Abrasive Technology* 3/4 (2010): S. 299-315.
- 719 M.F. Zäh, E. Brinksmeier, C. Heinzl, J.-W. Huntemann, T. Föckerer: Experimental and numerical identification of process parameters of grind-hardening and resulting part distortions. *Production Engineering* 3/3 (2009): S. 271-279.
- 720 M.F. Zäh, T. Föckerer, E. Brinksmeier, C. Heinzl, J.-W. Huntemann: Experimentelle und numerische Bestimmung der Einhärtetiefe beim Schleifhärten - Einflüsse und Absicherung der Wärmequellenmodellierung. *wt - Werkstatttechnik online* 99/1/2 (2009): S. 49-55.
- 721 B. Zhang, Y. Fu: Grinding of brittle materials with brazed diamond grinding wheel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67/9-12 (2013): S. 2845-2852.
- 722 B. Zhang, T.D. Howes: Material-removal mechanism in grinding ceramics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 43/1 (1994): S. 305-308.
- 723 B. Zhang, H. Tokura, M. Yoshikawa: Study on surface cracking of alumina scratched by single-point diamonds. *Journal of Materials Science* 23 (1988): S. 3214-3224.
- 724 L. Zhang, I. Zarudi: Towards a deeper understanding of plastic deformation in mono-crystalline silicon. *International Journal of Mechanical Sciences* 43 (2001): S. 1985-1996.
- 725 X. Zhang, M. Arif, K. Liu, A.S. Kumar, M. Rahman: A model to predict the critical undeformed chip thickness in vibration-assisted machining of brittle materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 69 (2013): S. 57-66.
- 726 X. Zhang, Z. Zhang, Z. Deng, S. Li, Q. Wu, Z. Kang: Precision grinding of silicon nitride ceramic with laser macro-structured diamond wheels. *Optics and Laser Technology* 109 (2019): S. 418-428.
- 727 Q. Zhao, J. Chen, H. Huang, X. Fang: Grinding damage of BK7 using copper-resin bond coarse-grained diamond wheel. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 12/1 (2011): S. 5-13.
- 728 Q. Zhao, Y. Liang, D. Stephenson, J. Corbett: Surface and subsurface integrity in diamond grinding of optical glasses on Tetraform 'C'. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47/14 (2007): S. 2091-2097.

- 729 Q.L. Zhao, E. Brinksmeier, O. Riemer, K. Rickens: Ultraprecision Ductile Grinding of Optical Glass Using Super Abrasive Diamond Wheel. *Key Engineering Materials* 339 (2007): S. 382-388.
- 730 H.W. Zheng, H. Gao: A general thermal model for grinding with slotted or segmented wheel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 43/1 (1994): S. 287-290.
- 731 Z. Zhong, V.C. Venkatesh: Semi-ductile grinding and polishing of ophthalmic aspherics and spherics. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 44/1 (1995): S. 339-342.
- 732 M. Zhou, X.J. Wang, B.K.A. Ngoi, J.G.K. Gan: Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration. *Journal of Materials Processing Technology* 121 (2002): S. 243-251.
- 733 Y. Zhou, D. Axinte, P. Butler-Smith, E. Jessen, T. Norbygaard: Effects of novel rotary-abrasive finishing pad textures on the controlled 2-body abrasive wear of Type 304 stainless steel. *Wear* 348-349 (2016): S. 89-97.
- 734 U. Zitt: Modellierung und Simulation von Hochleistungsschleifprozessen. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation / TU Kaiserslautern (1999).
- 735 U. Zitt, O. Braun, G. Warnecke: Improvement of workpiece quality of ceramic engine valves by kinematic simulation of the valve grinding operation. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of the Society of Mechanical Engineers XXVII* (1999): S. 153-158.
- 736 K.H. Zum Gahr: Verschleiß von Metallen, Keramiken und Polymeren im Vergleich. Reibung und Verschleiß bei metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen - Vortragstexte eines Symposiums der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde (1989): S. 77-94.
- 737 K.H. Zum Gahr, D. Mewes: Werkstoffabtrag beim Furchungverschleiß. *Metall* 12 (1983): S. 1212-1217.

8 Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen

(Stand: 01.05.2020)

- I E. Abele, J.C. Aurich, B.A. Behrens, D. Biermann, C. Brecher, E. Brinksmeier, M. Czora, B. Denkena, U. Engel, K. Großmann, U. Heisel, D. Heinisch, R. Hermes, B. Kirsch, F. Klocke, A. Krause, T. Kroiß, R. Laurischkat, M. Löser, F. Mahr, H. Meier, M. Pischon, P. Rasper, A.V. Scheidler, M. Storchak, E. Uhlmann, M. Weiß: Process Machine Interactions - Prediction and Manipulation of Interactions between Manufacturing Processes and Machine Tool Structures - Measurement and Test Techniques. (2013).
- II P.A. Arrabiyeh, M. Bohley, F. Ströer, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Experimental Analysis for the Use of Sodium Dodecyl Sulfate as a Soluble Metal Cutting Fluid for Micromachining with Electroless-Plated Micropencil Grinding Tools. *Inventions* 2/4 (2017).
- III P.A. Arrabiyeh, M. Dethloff, C. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich: Optimization of Micropencil Grinding Tools Via Electrical Discharge Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 141/3 (2019): 31005-1-31005-9.
- IV P.A. Arrabiyeh, M. Heintz, B. Kirsch, J.C. Aurich: Custom made electroless plated dicing blades for micro machining operations. *Proceedings of the 19th euspen International Conference* (2019): S. 380-383.
- V P.A. Arrabiyeh, B. Kirsch, J.C. Aurich: Electroless plating and application of micro pencil grinding tools with a diameter of $\sim 5 \mu\text{m}$. *Proceedings of the 18th euspen International Conference & Exhibition* (2018): S. 309-310.
- VI P.A. Arrabiyeh, B. Kirsch, J.C. Aurich: Development of Micro Pencil Grinding Tools Via an Electroless Plating Process. *Journal of Micro and Nano Manufacturing* 5/1 (2017): 011002-1-011002-6.
- VII P.A. Arrabiyeh, B. Kirsch, J.C. Aurich: Development of Micro Pencil Grinding Tools via an Electroless Plating Process. *Proceedings of the 11th International Conference on Manufacturing Science and Engineering* (2016).
- VIII P.A. Arrabiyeh, V. Raval, B. Kirsch, M. Bohley, J.C. Aurich: Electroless Plating of Micro Pencil Grinding Tools with 5-10 μm sized cBN Grits. *Advanced Materials Research 1140 – Proceedings of the WGP Congress 2016 – Progress in Production Engineering* (2016): S. 133-140.
- IX P.A. Arrabiyeh, D. Setti, S. Basten, B. Kirsch, J.C. Aurich: Micro grinding 16MnCr5 hardened steel using micro pencil grinding tools with diameters $\sim 50 \mu\text{m}$. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (2019).
- X DE 102016215545B3: Verfahren zum Betrieb einer spanenden Werkzeugmaschine und Werkzeugmaschine für die spanende Bearbeitung von Werkstücken.
- XI J.C. Aurich, D. Biermann, H. Blum, B. Kirsch, A. Rademacher, A.V. Scheidler: Vergleich unterschiedlicher Prozesssimulationen für das Flachsleifen und ihre Kopplung mit einer Finite-Elemente-Maschinensimulation. *Schleifen + Polieren* 15/4 (2011): S. 44-50.
- XII J.C. Aurich, M. Bohley, I.G. Reichenbach, B. Kirsch: Surface quality in micro milling: Influences of spindle and cutting parameters. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66/1 (2017): S. 101-104.

- XIII J.C. Aurich, M. Bohley, F. Schneider, B. Kirsch: Einfluss der Hartmetallspezifikation bei der Mikrofräsbearbeitung. *Maschinenbau* 10 (2017): S. 14-17.
- XIV J.C. Aurich, M. Bohley, F. Schneider, B. Kirsch: Hartmetallwerkzeuge für die Mikrobearbeitung - Einflussgrößen auf das Bearbeitungsergebnis. *Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis* 32 (2016): S. 231-254.
- XV J.C. Aurich, A. Bouabid, P. Steinmann, B. Kirsch: Process Machine Interactions - Prediction and Manipulation of Interactions between Manufacturing Processes and Machine Tool Structures - High-Performance Surface Grinding. (2013).
- XVI J.C. Aurich, M. Carrella, B. Kirsch: Product-oriented sustainability aspects of abrasive processes. *Proceedings of the ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference* (2013): S. 1-6.
- XVII J.C. Aurich, C. Effgen, B. Kirsch: CIRP Encyclopedia of Production Engineering - Grinding. (2017).
- XVIII J.C. Aurich, C. Effgen, B. Kirsch: Cutting edge preparation with elastic bonded superabrasive grinding wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65/1 (2016): S. 329-332.
- XIX J.C. Aurich, S. Greco, H. Hotz, M. Zimmermann, J. Hartig, B. Kirsch: Schleifende Nachbearbeitung additiv gefertigter austenitischer Edelstähle. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112/7-8 (2017): S. 473-476.
- XX J.C. Aurich, J. Hartig, B. Kirsch, P. Mayer, M. Zimmermann: Schneidkantenpräparation an Wendschneidplatten mit elastisch gebundenen Schleifscheiben - Neue Potenziale für die Schneidkantenverrundung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111/9 (2016): S. 492-495.
- XXI J.C. Aurich, P. Herzenstiel, B. Kirsch, M. Steffes: *Proceedings of the 2nd International Conference on Process Machine Interaction - Experimental and Numerical Studies of a Surface Grinding Process.* (2010).
- XXII J.C. Aurich, R. Ilsen, G. Mert, B. Kirsch: Nachhaltigkeit in der Produktion - Aufgabenstellungen und Lösungsansätze - Fortschritte in der Nachhaltigkeitsforschung. (2018).
- XXIII J.C. Aurich, B. Kirsch: Manufacturing of structured surfaces via grinding. *Proceedings from the CIRP Research Affiliate Workshop* (2014): S. 3-10.
- XXIV J.C. Aurich, B. Kirsch: Energieeffizienz beim Schleifen: Eine Betrachtung über Produktion und Produkteinsatz. *Innovations of Sustainable Production for Green Mobility - Energy-Efficient Technologies in Production - 3rd International Chemnitz Manufacturing Colloquium* (2014): S. 463-480.
- XXV J.C. Aurich, B. Kirsch: Improved coolant supply through slotted grinding wheel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62/1 (2013): S. 363-366.
- XXVI J.C. Aurich, B. Kirsch: Kinematic simulation of high-performance grinding for analysis of chip parameters of single grains. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 5/3 (2012): S. 164-174.
- XXVII J.C. Aurich, B. Kirsch, P. Herzenstiel, P. Kugel: Hydraulic design of a grinding wheel with an internal cooling lubricant supply. *Production Engineering - Research and Development* 5/2 (2011): S. 119-126.

- XXVIII J.C. Aurich, B. Kirsch, C. Müller, L. Heberger: Quality of drilled and milled rivet holes in carbon fiber reinforced plastics. *Procedia CIRP 24 - Proceedings of the 5th Machining Innovations Conference - New Production Technologies in Aerospace Industry* (2014): S. 56-61.
- XXIX J.C. Aurich, B. Kirsch, D. Setti, D. Axinte, A. Beaucamp, P. Butler-Smith, H. Yamaguchi: Abrasive processes for micro parts and structures. *CIRP Annals – Manufacturing Technology 68/2* (2019): S. 653-676.
- XXX J.C. Aurich, B. Linke, M. Hauschild, M. Carrella, B. Kirsch: Sustainability of abrasive processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology 62/2* (2013): S. 653-672.
- XXXI J.C. Aurich, P. Mayer, B. Kirsch, D. Eifler, M. Smaga, R. Skorupski: Characterization of deformation induced surface hardening during cryogenic turning of AISI 347. *CIRP Annals - Manufacturing Technology 63/1* (2014): S. 65-68.
- XXXII J.C. Aurich, N. Menck, B. Kirsch: Forschung an der Grenze des Technisch machbaren. *MM Maschinenmarkt 50-51* (2015): S. 70-73.
- XXXIII J.C. Aurich, C. Müller, M. Bohley, P.A. Arrabiyeh, B. Kirsch: Recent Developments in Desktop-Sized Machine Tools. *Solid State Phenomena 261* (2017): S. 425-431.
- XXXIV J.C. Aurich, F. Schneider, B. Kirsch, M. Zimmermann: Zerspanung von additiv hergestelltem Edelstahl - Vergleich von additiv mit konventionell hergestelltem Edelstahl hinsichtlich Spanbildung, Prozess- und Prozessergebnisgrößen. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 7/8* (2017): S. 465-468.
- XXXV J.C. Aurich, F. Schneider, P. Mayer, B. Kirsch, H. Hasse: Oberflächenerzeugungs-Morphologie-Eigenschafts-Beziehungen - Vom Fertigungsverfahren direkt zu den Bauteileigenschaften. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111/4* (2016): S. 213-216.
- XXXVI S. Basten, B. Kirsch, H. Hasse, J.C. Aurich: Turning of AISI 4140 (42CrMo4V): A novel sub-zero cooling approach. *Advances in Production Research - Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology* (2018): S. 313-323.
- XXXVII S. Basten, B. Kirsch, H. Hasse, J.C. Aurich: Neue kryogene Kühlstrategie für die Zerspanung. *MM Maschinenmarkt 13* (2017): S. 24-28.
- XXXVIII S. Basten, P. Mayer, B. Kirsch, H. Hasse, J.C. Aurich: Kryogener Kühlschmierstoff auf der Basis von Ethylenglykol. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111/7-8* (2016): S. 444-448.
- XXXIX S. Becker, H. Hotz, B. Kirsch, J.C. Aurich, E.v. Harbou, R. Müller: The Influence of Cooling Nozzle Positions on the Transient Temperature Field during Cryogenic Turning of Metastable Austenitic Steel AISI 347. *PAMM 18 - Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* (2018).
- XL S. Becker, H. Hotz, B. Kirsch, J.C. Aurich, E.v. Harbou, R. Müller: A Finite Element Approach to Calculate Temperatures Arising During Cryogenic Turning of Metastable Austenitic Steel AISI 347. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 140/10* (2018): 101016-101016-7.
- XLI S. Becker, H. Hotz, B. Kirsch, J.C. Aurich, E.v. Harbou, R. Müller: Estimation of Heat Transfer Properties for the FE Simulation of Cryogenic Turning. *PAMM 17 - Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* (2017): S. 401-402.

- XLII S. Becker, H. Hotz, B. Kirsch, J.C. Aurich, R. Müller: Application of model order reduction to a finite element model of cryogenic turning. PAMM 19 - Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (2019).
- XLIII S. Becker, P. Mayer, B. Kirsch, J.C. Aurich, E.v. Harbou, R. Müller: Transient Finite Element Simulation of the Temperature Field during Cryogenic Turning of Metastable Austenitic Steel AISI 347. PAMM 16/1 - Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (2016): S. 303-304.
- XLIV M. Bohley, L. Heberger, B. Kirsch, J.C. Aurich: Untersuchung des Verschleißverhaltens von TiB₂-beschichteten Mikrofräswerkzeugen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 9 (2017): S. 598-601.
- XLV M. Bohley, S. Kieren-Ehse, L. Heberger, B. Kirsch, J.C. Aurich: Size limitations and wear behavior of TiB₂ coated micro end mills ($\varnothing < 50 \mu\text{m}$) when machining cp-titanium. Procedia CIRP 71 - Proceedings of the 4th CIRP Conference on Surface Integrity (2018): S. 187-191.
- XLVI M. Bohley, S. Kieren-Ehse, B. Kirsch, J.C. Aurich: Die gesamte Prozesskette der Mikrofräsbearbeitung. Mav - Innovation in der spanenden Fertigung 11 (2017): S. 18-21.
- XLVII M. Bohley, C. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich: Integration of a confocal microscope in a desktop machine tool for in situ process control. Proceedings of the 17th euspen International Conference (2017): S. 122-123.
- XLVIII M. Bohley, I.G. Reichenbach, S. Kieren-Ehse, L. Heberger, P.A. Arrabiyeh, R. Merz, L. Böhme, J. Hering, B. Kirsch, M. Kopnarski, E. Kerscher, G.v. Freymann, J.C. Aurich: Coating of Ultra-Small Micro End Mills: Analysis of Performance and Suitability of Eight Different Hard-Coatings. Journal of Manufacturing and Materials Processing 2/2 (2018).
- XLIX M. Bohley, I.G. Reichenbach, C. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich: Compact hydrodynamic spindle module for micromachining applications. 16th international conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (2016).
- L L. Böhme, A. Hebestreit, S. Kieren-Ehse, M. Bohley, B. Kirsch, J.C. Aurich, E. Kerscher: Fortschritte in der Metallographie - Präparation dünner Stege zur Bestimmung der kristallographischen Orientierung und deren Einfluss bei der Zerspanung von Reintitan auf der Mikroskala. (2019).
- LI L. Böhme, A. Kessel, F. Ströer, M. Bohley, S. Kieren-Ehse, B. Kirsch, J.C. Aurich, J. Seewig, E. Kerscher: Micro hardness determination on a rough surface by using combined indentation and topography measurements. Surface Topography: Metrology and Properties 7/4 (2019): S. 45021.
- LII A.C. Bottene, E.J. Silva, A. Simon, B. Kirsch, J.C. Aurich: New Advances in Texturing by Grinding. Proceedings of COBEM 2015 - 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering (2015).
- LIII C. Effgen, B. Kirsch: A new method for the preparation of cutting edges via grinding. Advanced Materials Research 769 - Proceedings of the WGP Congress 2013 - Progress in Production Engineering - Research and Development (2013): S. 85-92.
- LIV C. Effgen, B. Kirsch, J.C. Aurich: Neues Verfahren zur Schneidkantenpräparation Schneidkantenpräparation direkt in der Werkzeugmaschine - Schneidkantenpräparation mithilfe elastisch gebundener Schleifscheiben. VDI-Z Integrierte Produktion - Special II Werkzeuge 155 (2013): S. 22-24.

- LV M. Eifler, K. Klauer, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Model-based design of areal material measures with component surfaces. *Surface Topography: Metrology and Properties* 7/4 (2019).
- LVI M. Eifler, K. Klauer, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Micro-milling of areal material measures - influences on the resulting surface topography. *Procedia CIRP* 71 - Proceedings of the 4th Conference on Surface Integrity (2018): S. 122-127.
- LVII M. Eifler, K. Klauer, R. Volk, S. Feifel, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Verschleiß von Raunormalen - Experimentelle Untersuchung zum Einfluss der taktilen Abtastung. *wt Werkstattstechnik online* 108/11-12 (2018): S. 749-754.
- LVIII M. Eifler, F. Schneider, J. Seewig, B. Kirsch, J.C. Aurich: Manufacturing of new roughness standards for the linearity of the vertical axis - Feasibility study and optimization. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19/4 (2016): S. 1993-2001.
- LIX D. Frölich, B. Magyar, B. Sauer, P. Mayer, B. Kirsch, J.C. Aurich, R. Skorupski, M. Smaga, T. Beck, D. Eifler: Investigation of wear resistance of dry and cryogenic turned metastable austenitic steel shafts and dry turned and ground carburized steel shafts in the radial shaft seal ring system. *Wear* 328-329 (2015): S. 123-131.
- LX C. Gillmann, T. Post, B. Kirsch, T. Wischgoll, J. Hartig, B. Hamann, H. Hagen, J.C. Aurich: An Industrial Vision System to Analyze the Wear of Cutting Tools. *Applied Mechanics and Materials* 869 - Proceedings of the 1st Conference on Physical Modeling for Virtual Manufacturing Systems and Processes (2017): S. 183-194.
- LXI S. Greco, B. Kirsch, J.C. Aurich: Vibration-assisted air bearing spindle for micro machining - development of a magnetic field controlled ultrasonic actuator. *Proceedings of the 18th euspen International Conference* (2018): S. 141-142.
- LXII S. Greco, A. Lange, B. Kirsch, J.C. Aurich: Simulation-based design of an ultrasonic-assisted air bearing spindle for micro machining. *Procedia CIRP* 82 - Proceedings of the 17th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (2019): S. 160-165.
- LXIII S. Greco, A. Lange, B. Kirsch, J.C. Aurich: Acoustic frequency measurement of an ultrasonic actuator designed for the use in a vibration-assisted air bearing spindle for micro machining. *Proceedings of the 19th euspen International Conference* (2019): S. 150-153.
- LXIV S. Gutwein, B. Kirsch, T. Herrmann, H. Derouach, J.C. Aurich: Kurzpuls laserbearbeitung unterschiedlicher Hartmetallsorten - Identifikation geeigneter Parameter zur gezielten Präparation von Schneidkanten. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113/7-8 (2018): S. 453-457.
- LXV S. Gutwein, B. Kirsch, T. Herrmann, Y. Kang, J.C. Aurich: Kurzpuls laserunterstützte Schneidkantenpräparation - Wirtschaftliche Verrundung der Werkzeugschneide mittels 2D-Laserbearbeitung. *VDI-Z Integrierte Produktion* 161/6 (2019): S. 38-41.
- LXVI S. Gutwein, B. Kirsch, T. Herrmann, Y. Kang, J.C. Aurich: Effizienzanalyse bei der Kurzpuls laserbearbeitung - Konstante Fluenz bei unterschiedlicher Pulsfolgefrequenz mittels Anpassung der Laserleistung. *wt Werkstattstechnik online* 109/5 (2019): S. 394-398.
- LXVII J. Hartig, B. Kirsch, J.C. Aurich: Drehen von ausferritischem Gusseisen - Einfluss inhomogen präparierter Schneidkanten auf den Werkzeugverschleiß und das Prozessergebnis. *wt Werkstattstechnik online* 108/10 (2018): S. 736-742.

- LXVIII J. Hartig, B. Kirsch, M. Zimmermann, J.C. Aurich: Drehen von ausferritischem Gusseisen - Einfluss der Schneidengeometrie auf den Werkzeugverschleiß und das Prozessergebnis. *wt Werkstattstechnik online* 107/10 (2017): S. 754-760.
- LXIX L. Heberger, B. Kirsch, T. Donhauser, S. Nissle, M. Gurka, S. Schmeer, J.C. Aurich: Influence of the quality of rivet holes in carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) on the connection stability. *Procedia Manufacturing 6 - Proceedings of the 16th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry* (2016): S. 140-147.
- LXX L. Heberger, B. Kirsch, B. Henn, J.C. Aurich: Machining of CFRP via Short Amplitude Torsion Pendulum Drilling. *Procedia CIRP 66 - Proceedings of the 1st CIRP Conference on Composite Materials Parts Manufacturing* (2017): S. 169-174.
- LXXI L. Heberger, S. Nissle, M. Gurka, B. Kirsch, J.C. Aurich: Qualitätssteigerung von Bohrungen in Faserkunststoffverbunden - Untersuchung des Einflusses verschiedener Einspannstrategien. *wt Werkstattstechnik online* 105/7-8 (2015): S. 501-507.
- LXXII P. Herzenstiel, B. Kirsch, J.C. Aurich: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Gleich- und Gegenlaufschleifen mit und ohne Einsatz von Kühlschmierstoff unter Einsatz einer Schleifscheibe mit definierter Kornanordnung. (2010).
- LXXIII P. Herzenstiel, B. Kirsch, J.C. Aurich: Spezialwerkzeug zum Trocken- und Nassschleifen. *Diamond Business* 4/31 (2009): S. 16-23.
- LXXIV H. Hotz, B. Kirsch: Influence of tool properties on thermomechanical load and surface morphology when cryogenically turning metastable austenitic steel AISI 347. *Journal of Manufacturing Processes* 52 (2020): S. 120-131.
- LXXV H. Hotz, B. Kirsch, S. Becker, E.v. Harbou, R. Müller, J.C. Aurich: Modification of surface morphology during cryogenic turning of metastable austenitic steel AISI 347 at different parameter combinations with constant CO₂ consumption per cut. *Procedia CIRP 77 - Proceedings of the 8th CIRP Conference on High Performance Cutting* (2018): S. 207-210.
- LXXVI H. Hotz, B. Kirsch, S. Becker, E.v. Harbou, R. Müller, J.C. Aurich: Improving the surface morphology of metastable austenitic steel AISI 347 in a two-step turning process. *Procedia CIRP 71 - Proceedings of the 4th CIRP Conference on Surface Integrity* (2018): S. 160-165.
- LXXVII H. Hotz, B. Kirsch, S. Becker, R. Müller, J.C. Aurich: Combination of cold drawing and cryogenic turning for modifying surface morphology of metastable austenitic AISI 347 steel. *Journal of Iron and Steel Research International* 26/11 (2019): S. 1188-1198.
- LXXVIII H. Hotz, B. Kirsch, S. Becker, R. Müller, J.C. Aurich: Bewertung der Oberflächenmorphologie kryogen gedrehter Werkstücke. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113/9 (2018): S. 592-595.
- LXXIX H. Hotz, B. Kirsch, S. Gutwein, S. Becker, E.v. Harbou, R. Müller, J.C. Aurich: Kryogenes Drehen von X6CrNiNb18-10 - Einfluss des Schneidkantenradius auf Prozesskräfte und Prozessergebnisgrößen. *wt Werkstattstechnik online* 108/1-2 (2018): S. 12-17.
- LXXX H. Hotz, B. Kirsch, P. Mayer, S. Becker, E.v. Harbou, A. Boemke, R. Skorupski, M. Smaga, R. Müller, T. Beck, J.C. Aurich: Surface integrity of cryogenic turned austenitic stainless steels AISI 347 and AISI 904L. 7. WGP-Jahreskongress (2017): S. 473-480.

- LXXXI H. Hotz, F. Ströer, L. Heberger, B. Kirsch, M. Smaga, T. Beck, J. Seewig, J.C. Aurich: Konzept zur Oberflächenkonditionierung beim kryogenen Hartdrehen. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113/7-8 (2018): S. 462-465.
- LXXXII H. Hotz, M. Zimmermann, S. Greco, B. Kirsch, J.C. Aurich: Herstellung hybrider Bauteile durch Laserauftragsschweißen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114/7-8 (2019): S. 440-443.
- LXXXIII S. Kieren-Ehnes, M. Bohley, P. Arrabiyeh, B. Kirsch, J.C. Aurich: Influence of different metal working fluids when micro machining cp-titanium with 50 µm diameter micro end mills. *Procedia CIRP* 71 - Proceedings of the 4th CIRP Conference on Surface Integrity (2018): S. 198-202.
- LXXXIV S. Kieren-Ehnes, M. Bohley, B. Kirsch, J.C. Aurich: Influence of the metal working fluid quantity on process results when micro milling cp-titanium with 50 µm diameter micro end mills. *Proceedings of the 19th euspen International Conference* (2019): S. 400-401.
- LXXXV B. Kirsch: The impact of contact zone flow rate and bulk cooling on the cooling efficiency in grinding applying different nozzle designs and grinding wheel textures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 18 (2017): S. 179-187.
- LXXXVI B. Kirsch: Wirkmechanismen der Kühlschmierstoff-Zufuhr beim Schleifen - Analyse externer und interner Kühlschmierstoff-Zufuhrmethoden. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, (2013).
- LXXXVII B. Kirsch, J.C. Aurich: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen - Herstellung von mikrostrukturierten Oberflächen mit einer Spezialschleifscheibe und Analyse des Abtragverhaltens. (2016).
- LXXXVIII B. Kirsch, J.C. Aurich: Influence of the macro-topography of grinding wheels on the cooling efficiency and the surface integrity. *Procedia CIRP* 13 - Proceedings of the 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (2014): S. 8-12.
- LXXXIX B. Kirsch, J.C. Aurich: Herstellung von mikrostrukturierten Oberflächen mittels Schleifen - Eine neue Methode. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109/4 (2014): S. 242-246.
- XC B. Kirsch, J.C. Aurich: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen - Kontaktzonenvolumenstrom und Überflutungskühlung - Kühlmechanismen von Freistrahls- und Schuhdüsen bei hoher Wärmebelastung. (2013).
- XCI B. Kirsch, J.C. Aurich: Simulation des Einflusses von Spindelverlagerungen auf den Materialabtrag beim Schleifen. *Diamond Business* 10/3 (2011): S. 32-37.
- XCII B. Kirsch, J.C. Aurich: Schleifen mit interner Kühlschmierstoff-Zufuhr. *wt Werkstattstechnik online* 101/7-8 (2011): S. 487-493.
- XCIII B. Kirsch, J.C. Aurich: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Wirkmechanismen der Kühlung beim Schleifen mit galvanisch belegten CBN-Schleifscheiben mit unterschiedlichen Kühlschmierstoff-Zufuhrbedingungen. (2011).
- XCIV B. Kirsch, S. Basten, H. Hasse, J.C. Aurich: Sub-zero cooling: A novel strategy for high performance cutting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 67/1 (2018): S. 95-98.
- XCV B. Kirsch, M. Bohley, P.A. Arrabiyeh, J.C. Aurich: Application of Ultra-Small Micro Grinding and Micro Milling Tools: Possibilities and Limitations. *Micromachines* 8/9 (2017): S. 261-279.

- XCVI B. Kirsch, C. Effen, M. Büchel, J.C. Aurich: Comparison of the embodied energy of a grinding wheel and an end mill. *Procedia CIRP 15 - Proceedings of the 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering* (2014): S. 74-79.
- XCVII B. Kirsch, S. Greco, H. Hotz, M. Zimmermann, J. Hartig, J.C. Aurich: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren - Verfahren und Maschinen - Schleifende Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile - Einflüsse auf die Werkstückqualität. (2018).
- XCVIII B. Kirsch, P. Herzenstiel, J.C. Aurich: Experimental Results using a Grinding Wheel with an Internal Cooling Lubricant Supply. *Proceedings of the 4th CIRP Conference on High performance Cutting* (2010): S. 443-448.
- XCIX B. Kirsch, H. Hotz, R. Müller, S. Becker, A. Boemke, M. Smaga, T. Beck, J.C. Aurich: Generation of deformation-induced martensite when cryogenic turning various batches of the metastable austenitic steel AISI 347. *Production Engineering - Research and Development 13* (2019): S. 343-350.
- C K. Klauer, M. Eifler, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Correlation between different cutting conditions, surface roughness and dimensional accuracy when ball end micro milling material measures with freeform surfaces. *Machining Science and Technology* (2019).
- CI K. Klauer, M. Eifler, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Ball end micro milling of areal material measures: influence of the tilt angle on the resulting surface topography. *Production Engineering – Research and Development* (2019).
- CII K. Klauer, M. Eifler, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Micro milling of areal material measures: Influence of the manufacturing parameters on surface quality. *Production at the leading edge of technology – Proceedings of the 9th Congress of the German Academic Association for Production Technology 2019* : S. 259-268.
- CIII K. Klauer, M. Eifler, J. Seewig, B. Kirsch, J.C. Aurich: Application of function-oriented roughness parameters using confocal microscopy. *Engineering Science and Technology 21/3* (2018): S. 302-313.
- CIV K. Klauer, M. Eifler, G. Stelzer, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Design and machining of a calibration artefact for an angular-resolved scattering light sensor. *Proceedings of the 19th euspen International Conference* (2019): S. 270-274.
- CV A. Lange, S. Greco, B. Kirsch, J.C. Aurich: Optimierung von Strömungssimulationen durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113/11* (2018): S. 751-754.
- CVI M.P. Lautenschlaeger, S. Stephan, M.T. Horsch, B. Kirsch, J.C. Aurich, H. Hasse: Effects of lubrication on friction and heat transfer in machining processes on the nanoscale: a molecular dynamics approach. *Procedia CIRP 67 - Proceedings of the 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering* (2018): S. 296-301.
- CVII M.P. Lautenschlaeger, S. Stephan, H.M. Urbassek, B. Kirsch, J.C. Aurich, M.T. Horsch, H. Hasse: Effects of Lubrication on the Friction in Nanometric Machining Processes - A Molecular Dynamics Approach. *Applied Mechanics and Materials 869 - Proceedings of the 1st Conference on Physical Modeling for Virtual Manufacturing Systems and Processes* (2017): S. 85-93.

- CVIII P. Mayer, B. Kirsch, J.C. Aurich: Randschichthärten bei der Edelstahlbearbeitung - Verformung beim Drehen gezielt nutzen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109/7-8 (2014): S. 530-533.
- CIX P. Mayer, B. Kirsch, J.C. Aurich: Investigations on cryogenic turning to achieve surface hardening of metastable austenitic steel AISI 347. Advanced Materials Research 1018 - Proceedings of the WGP Congress 2014 - Progress in Production Engineering (2014): S. 153-160.
- CX P. Mayer, B. Kirsch, C. Müller, H. Hotz, R. Müller, S. Becker, E.v. Harbou, R. Skorupski, A. Boemke, M. Smaga, D. Eifler, T. Beck, J.C. Aurich: Deformation induced hardening when cryogenic turning. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 23 (2018): S. 6-19.
- CXI P. Mayer, B. Kirsch, R. Müller, S. Becker, E.v. Harbou, J.C. Aurich: Influence of cutting edge geometry on deformation induced hardening when cryogenic turning of metastable austenitic stainless steel AISI 347. Procedia CIRP 45 - Proceedings of the 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (2016): S. 59-62.
- CXII C. Müller, M. Bohley, B. Kirsch, J.C. Aurich: A novel rotational air bearing axis for the manufacturing of ultra-small micro end mills. Proceedings of the 17th euspen International Conference (2017): S. 144-145.
- CXIII C. Müller, S. Greco, B. Kirsch, J.C. Aurich: A Finite Element Analysis of Air Bearings Applied in Compact Air Bearing Spindles. Procedia CIRP 58 - Proceedings of the 16th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (2017): S. 607-612.
- CXIV C. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich: Small Machine Tools for Small Workpieces - Compact Air Bearing Spindles for Desktop Sized Machine Tools. (2017).
- CXV D. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich: The influence of structured flank faces on cooling performance when drilling. Procedia CIRP 82 - Proceedings of the 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (2019): S. 415-420.
- CXVI D. Müller, B. Kirsch, J.C. Aurich: Kühlkanalaustrittsbedingungen bei Bohrern. wt Werkstattstechnik online 109/1-2 (2019): S. 30-34.
- CXVII D. Müller, B. Kirsch, A. Lange, J.C. Aurich: Kühlkanalaustrittsbedingungen bei Bohrern. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113/7-8 (2018): S. 471-474.
- CXVIII P. Puerto, B. Kirsch, J. Madariaga, R. Fernández, J.C. Aurich, I. Gallego: A Comparison of Techniques to Measure the Wear Flat Area of Conventional and Superabrasive Grinding Wheels. Journal of Tribology 137/2 (2015): 024503-1 – 024503-7.
- CXIX M. Sabel, C. Sator, R. Müller, B. Kirsch: Particle Finite Element Simulation of Chip Formation Cutting Processes. Applied Mechanics and Materials 869 - Proceedings of the 1st Conference on Physical Modeling for Virtual Manufacturing Systems and Processes (2017): S. 50-61.
- CXX R. Schmitt, P. Mayer, B. Kirsch, J.C. Aurich, C. Kuhn, R. Müller, K. Bhattacharya: A Phase Field Approach for Martensitic Transformations and Plasticity. PAMM 14/1 - Proceedings of the 85th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (2014): S. 383-384.

- CXXI F. Schneider, J. Das, B. Kirsch, B. Linke, J.C. Aurich: Sustainability in Ultra precision and Micro machining: a review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* 6/3 (2019): S. 601-610.
- CXXII F. Schneider, C. Effgen, B. Kirsch, J.C. Aurich: Manufacturing and preparation of micro cutting tools: influence on chip formation and surface topography when micro cutting titanium. *Production Engineering - Research and Development* (2019).
- CXXIII F. Schneider, M. Eifler, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Praxisnahe Kalibrierung von Messgeräten - Entwicklung und Fertigung von Kalibriernormalen auf Basis realer Bauteiloberflächen. *VDI-Z Integrierte Produktion* 157/7-8 (2015): S. 32-34.
- CXXIV F. Schneider, M. Eifler, B. Kirsch, J. Seewig, J.C. Aurich: Entwicklung und Fertigung von Geometrienormalen auf Basis realer Bauteiloberflächen. *Unter Span 2* (2015): S. 23-24.
- CXXV F. Schneider, B. Kirsch, M. Gurka, T. Hermann, J.A. L'huillier, J.C. Aurich: Improved Quality of Drilled Holes in Laminated Carbon Fiber Reinforced Plastics via Laser-Preprocessing. *New Production Technologies in Aerospace Industry - Proceedings of the 4th Machining Innovations Conference* (2013): S. 27-31.
- CXXVI F. Schneider, R. Lohkamp, B. Kirsch, C. Kuhn, R. Müller, J.C. Aurich: Investigation of Chip Formation and Surface Integrity when Micro-cutting cp-Titanium with Ultra-fine Grain Cemented Carbide. *Procedia CIRP 45 - Proceedings of the 3rd CIRP Conference on Surface Integrity* (2016): S. 115-118.
- CXXVII J. Seewig, M. Eifler, F. Schneider, B. Kirsch, J.C. Aurich: A model-based approach for the calibration and traceability of the angle resolved scattering light sensor. *Surface Topography: Metrology and Properties* 4/2 (2016).
- CXXVIII D. Setti, P.A. Arrabiyeh, B. Kirsch, J.C. Aurich: Visualization of geometrical deviations in micro grinding by kinematic simulations. *Proceedings of ASME 13th Manufacturing Science and Engineering Conference* (2018): V004T03A038.
- CXXIX D. Setti, P.A. Arrabiyeh, B. Kirsch, M. Heintz, J.C. Aurich: Analytical and experimental investigations on the mechanisms of surface generation in micro grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 149 (2019).
- CXXX D. Setti, B. Kirsch, J.C. Aurich: Experimental investigations and kinematic simulation of single grit scratched surfaces considering pile-up behaviour: grinding perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2019).
- CXXXI D. Setti, B. Kirsch, J.C. Aurich: An Analytical Method for Prediction of Material Deformation Behavior in Grinding Using Single Grit Analogy. *Procedia CIRP 58 - Proceedings of the 16th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations* (2017): S. 263-268.
- CXXXII D. Setti, B. Kirsch, J.C. Aurich: A Method to Predict and Visualize the Wheel and Work Surface Topography in Surface Grinding. *Applied Mechanics and Materials* 869 - Proceedings of the 1st Conference on Physical Modeling for Virtual Manufacturing Systems and Processes (2017): S. 62-68.
- CXXXIII D. Setti, B. Kirsch, J.C. Aurich: Characterization of micro grinding tools using optical profilometry. *Optics and Lasers in Engineering* 2019/121 : S. 150-155.

- CXXXIV E.J. Silva, B. Kirsch, A.C. Bottene, A. Simon, J.C. Aurich, J.F.G. Oliveira: Manufacturing of structured surfaces via grinding. *Journal of Materials Processing Technology* 243 (2017): S. 170-183.
- CXXXV M. Smaga, T. Beck, P. Arrabiyeh, I. Reichenbach, B. Kirsch, J.C. Aurich: Characterization of micro machined surface from TRIP/TWIP steels. *MATEC Web of Conferences - ESOMAT 2015 - 10th European Symposium on Martensitic Transformations* 33 (2015): S. 07004-1-07004-5.
- CXXXVI M. Smaga, R. Skorupski, P. Mayer, B. Kirsch, J.C. Aurich, I. Raid, J. Seewig, J. Man, D. Eifler, T. Beck: Influence of surface morphology on fatigue behavior of metastable austenitic stainless steel AISI 347 at ambient temperature and 300°C. *Procedia Structural Integrity* 5 - Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Integrity (2017): S. 989-996.
- CXXXVII S. Thielen, B. Magyar, B. Sauer, F. Schneider, P. Mayer, B. Kirsch, R. Müller, E.v. Harbou, J.C. Aurich: Functional investigation of zero lead radial shaft seal counter-surfaces turned with a special method. *Tribology International* 118 (2018): S. 442-450.
- CXXXVIII J. Uebel, F. Ströer, S. Basten, W. Ankener, H. Hotz, L. Heberger, G. Stelzer, B. Kirsch, M. Smaga, J. Seewig, J.C. Aurich, T. Beck: Approach for the observation of surface conditions in-process by soft sensors during cryogenic hard turning. *Procedia CIRP* 81 – Proceedings of the 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (2019): S. 1260-1265.
- CXXXIX D. Weber, B. Kirsch, C.R. D'Elia, B.S. Linke, M.R. Hill, J.C. Aurich: Concept to analyze residual stresses in milled thin walled monolithic aluminum components and their effect on part distortion. *Production at the leading edge of technology - Proceedings of the 9th Congress of the German Academic Association for Production Technology* (2019): S. 287-296.

9 Kurzfassung

Diese Schrift behandelt Spezialanwendungen von Schleifscheiben. Darunter fallen Anwendungen herkömmlicher Schleifscheiben für Spezialanwendungen, die über den üblichen Materialabtrag hinausgehen und auch die Entwicklung von Spezialschleifscheiben. Die Spezialanwendungen werden jeweils vorgestellt, die erzielten Ergebnisse diskutiert und kritisch reflektiert. Vor- und Nachteile sowie eventuelle Hemmnisse für die Erreichung einer Serienreife werden beleuchtet. Nach der technologischen Bewertung erfolgt eine Betrachtung der Nachhaltigkeit der Spezialanwendungen, um eine abschließende Beurteilung zu ermöglichen, welche Konzepte sowohl technologisch also auch ökologisch und ökonomisch sinnvoll erscheinen und welche nicht. Hintergrund dieser Überlegungen ist die Tatsache, dass ein Spezialverfahren technologisch noch so interessant oder fähig sein mag, so lange es keine Vorteile für den Einsatz der Produkte oder eine Steigerung der Nachhaltigkeit der Produkte mit sich bringt, ist die Verfolgung des Spezialverfahrens nicht zu empfehlen. Daraus ergeben sich Empfehlungen für die Forschung und die Industrie zur Verfolgung bestimmter Spezialanwendungen.

This book deals with special applications of grinding wheels. This includes applications of common grinding wheels for special applications that go beyond the usual material removal and also the development of special, engineered grinding wheels. The special applications are presented, the results achieved are discussed and critically reflected. Advantages and disadvantages as well as possible obstacles for the achievement of a series-production readiness are discussed. The technological evaluation is followed by a consideration of the sustainability of the special applications to enable a final assessment which concepts appear to be technologically, ecologically and economically feasible. The background to these considerations is the fact that no matter how interesting or capable a special application may be technologically, as long as it does not provide any advantages for the use of the products or an increase in the sustainability of the products, the pursuit of the special process is not recommended. This results in recommendations for research and industry to pursue certain special applications.

Lebenslauf**Persönliche Daten:**

Name: Benjamin Kirsch
Geburtsort: Homburg

Schule:

1988 – 1992 Wendelinus-Grundschule Ramstein
1992 – 1994 Konrad-Adenauer Realschule Landstuhl
1994 – 2001 Hohenstaufen-Gymnasium Kaiserslautern

Studium:

10/2001 – 09/2008 TU Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenbau
Vertiefungsrichtungen: Produktionstechnik, Fertigungstechnik

Berufstätigkeit und akademische Laufbahn:

12/2006 – 09/2008 Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, TU Kaiserslautern

10/2008 – 12/2012 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation, TU Kaiserslautern
Forschungsschwerpunkte: Werkzeugentwicklung; Modellierung und Simulation von Schleifprozessen; Herstellung von Mikrostrukturen mittels Schleifen

12/2012 – 10/2014 Teamleiter Zerspantechnologie

seit 07/2014 Geschäftsführer des Internationalen Graduiertenkollegs 2057 „Physical Modeling for Virtual Manufacturing Systems and Processes“,

seit 11/2014 Oberingenieur Fertigungstechnik

05/2015 Ernennung zum Akademischen Rat der TU Kaiserslautern

05/2017 Ernennung zum Akademischen Oberrat der TU Kaiserslautern

Verzeichnis im Themenbereich Schleifen betreuter studentischer Arbeiten (Erstbetreuung):

Hauptenthal, Sebastian: Analyse und Bewertung der Einsatzmöglichkeiten bekannter Zufuhrmethoden beim Hochleistungsschleifen hinsichtlich Kühlschmierstoff-Reduzierung. Studienarbeit, 2010.

Steffes, Manfred: Numerische und experimentelle Betrachtung eines Hochleistungsflachschleifprozesses. Diplomarbeit, 2010.

Berdin, Ramona: Untersuchung und Bewertung entstehender Werkstückrandzonen beim Schleifen mit unterschiedlichen Kühlschmierstoff-Zufuhrmethoden. Diplomarbeit, 2010.

Hauptenthal, Sebastian: Untersuchung und Bewertung entstehender Werkstückrandzonen beim Schleifen mit verschiedenen Kühlschmierstoff-Zufuhrstrategien. Studienarbeit, 2011.

Dahler, Sebastian: Untersuchung und Bewertung der Wärmeverteilung in der Kontaktzone beim Schleifen. Studienarbeit, 2011.

Lauvin, Guillaume: Untersuchung der Randzonenbeeinflussung beim Schleifen in Abhängigkeit unterschiedlicher Kühlschmierstoff-Zufuhrmethoden. Diplomarbeit, 2011.

Laurain, Pierre: Konstruktion und Inbetriebnahme einer Vorrichtung zur Druckmessung des Kühlschmierstoffs. Diplomarbeit, 2011.

Nell, Oliver: Experimentelle Untersuchung und Bewertung einer Schleifscheibe mit interner Kühlschmierstoff-Zufuhr. Studienarbeit, 2011.

Wittkowski, Fabian: Analyse von Mikrohärteverläufen von geschliffenem 42CrMo4 in Abhängigkeit der Kühlschmierstoffzufuhr. Studienprojekt, 2012.

Jost, Jannick: Experimentelle Stabilitätsbetrachtung eines Hochleistungsflachschleifprozesses. Projektarbeit, 2012.

Gu, Chao: Quantitative Ermittlung des Verschleißes hochharter Schleifscheiben. Studienarbeit, 2012.

Von Landenberg, Daniel: Qualitative und Quantitative Ermittlung des Verschleißes hochharter Schleifscheiben. Studienarbeit, 2013.

Jakob, Lukas: Herstellung und Charakterisierung strukturierter Oberflächen. Bachelorarbeit, 2014.

Hartig, Jörg: Schneidkantenpräparation an Vollhartmetallbohrern mit Hilfe elastisch gebundener Schleifscheiben - Konzeptionierung, Entwicklung und Validierung von Präparationsstrategien. Masterarbeit, 2016

Pek, Fabian: Analyse und vergleichende Bewertung des Energieverbrauchs beim Fräsen und Schleifen. Studienarbeit, 2016.

Büttner, Daniel: Ein neuartiges Werkzeugkonzept für das Schleifen – Entwicklung, Einsatz und Bewertung. Projektarbeit, 2017.

Weis, Marc: Ein neuartiges Werkzeugkonzept für das Schleifen – Einsatz und Bewertung. Studienprojekt, 2020.

Verzeichnis im Themenbereich Schleifen betreuter studentischer Arbeiten (Zweitbetreuung):

Mayer, Patrick: Randzonenbetrachtung geschliffener Werkstücke. Studienarbeit, 2009.

Olenburg, Anatolij: Entwurf eines Schleifprüfstands zur Verifizierung von Simulationsrechnungen. Studienarbeit, 2009.

Olenburg, Anatolij: Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme eines Schleifprüfstands. Diplomarbeit, 2009.

Charrier, Simon: Analyse der Randzonenbeeinflussung durch das Fertigungsverfahren Schleifen. Studienarbeit, 2010.

Hu, Maikun: Untersuchung des Materialverhaltens von 42CrMo4 bei Einkornritzen. Studienarbeit, 2012.

Produktionstechnische Berichte aus dem FBK

bereits veröffentlicht wurden

- 01/09 Aurich, J.C.: Radio Frequency Identification (RFID) in der Fertigung – Handbuch zur Einführung in neue Anwendungsfelder.
2009, ISBN 978-3-941438-08-8 € 30,-
- 02/09 Stürenburg, B.: Optimierung der Spanbildung und Minimierung des Späneeintrages in das Werkstück für das Bohren von Al-Legierungen.
2009, ISBN 978-3-941438-13-2 € 30,-
- 03/09 Eyrisch, T.: Optimierung der Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen – Strategie zur Vermeidung von Oberflächenschädigungen.
2009, ISBN 978-3-941438-12-5 € 30,-
- 04/09 von Killisch-Horn, G.: Erfahrungsbasierte Implementierung von APS-Systemen in der Einzel- und Kleinserienproduktion.
2009, ISBN-978-3-941438-17-0 € 30,-
- 05/09 Naab, C.: Auslaufmanagement – Konzept zur Abwicklung des Serienauslaufs in der Produktion.
2009, ISBN-978-3-941438-26-2 € 35,-
- 06/09 Herzenstiel, P.: Hochleistungsplanschleifen mit einer definiert gesetzten CBN-Schleifscheibe.
2009, ISBN-978-3-941438-28-6 € 35,-
- 07/09 Aurich, J.C.: Lebenszyklusorientierte Konfiguration von Produkt-Service Systemen – Ein Leitfaden für die Praxis.
2009, ISBN-978-3-941438-27-9 € 30,-
- 01/10 Aurich, J.C.: Organisationsveranstaltung und Kompetenzaufbau bei der Gestaltung und Realisierung investiver Produkt-Service Systeme – Ein Leitfaden für die Praxis.
2010, ISBN-978-3-941438-37-8 € 35,-
- 02/10 Aurich, J.C.: Gestaltung investiver Produkt-Service Systeme – Ein Leitfaden für die Praxis.
2010, ISBN-978-3-941438-38-5 € 35,-
- 03/10 Aurich, J.C.: Realisierung investiver Produkt-Service Systeme – Ein Leitfaden für die Praxis.
2010, ISBN-978-3-941438-39-2 € 35,-
- 04/10 Franke, V.: Einfluss der Werkzeugschneidkante auf die Bohrungsqualität bei der spanenden Bearbeitung langfaserverstärkter Kunststoffe.
2010, ISBN-978-3-941438-53-8 € 35,-

- 05/10 Sudermann, H.: Gratbildung beim Schleifen – Experimentelle Analyse und Modellierung der Gratbildung sowie Ansätze zur Gratminimierung.
2010, ISBN-978-3-941438-54-5 € 35,-
- 06/10 Shahzad, M.A.: Analysis of the Machinability of an Aluminum Matrix Composite Material.
2010, ISBN-978-3-941438-56-9 € 35,-
- 07/10 Gómez Kempf, F.A.: Flexibilitätsorientierte Produktionssysteme – Modulare Gestaltung, Einführung und Nutzung.
2010, ISBN-978-3-941438-58-3 € 35,-
- 01/11 Engmann, J.: Galvanisch gebundene Mikroschleifstifte – Entwicklung, Herstellung und Einsatz.
2011, ISBN-978-3-941438-59-0 € 35,-
- 02/11 Leitz, L.: Beitrag zur Beherrschung der Gratbildung bei Bohrungsverschneidungen.
2011, ISBN-978-3-941438-72-9 € 35,-
- 03/11 Siener, M.: Sicherung der Qualitätsfähigkeit von Produktionsprozessen.
2011, ISBN-978-3-941438-79-8 € 35,-
- 04/11 Wolf, N.: Modell zur Unterstützung der Analyse von Ausfallursachen bei komplexen mechatronischen Systemen.
2011, ISBN-978-3-941438-89-7 € 35,-
- 01/12 Faltin, M.: RFID-Einsatz in fertigungstechnischen Prozessketten – Identifikation und Beurteilung von Einsatzpotentialen.
2012, ISBN-978-3-941438-97-2 € 35,-
- 01/13 Lauer, C.: Integriertes Modell zur Materialflusssimulation und zur Visualisierung in der Virtuellen Realität.
2013, ISBN 978-3-943995-19-0 € 35,-
- 02/13 Aurich, J.C.: Qualitätsorientierte Instandhaltungsplanung und -steuerung in produktionstechnischen Prozessketten Handbuch für die Praxis.
2013, ISBN 978-3-943995-21-3 € 35,-
- 03/13 Kirsch, B.: Wirkmechanismen der Kühlschmierstoff-Zufuhr beim Schleifen – Analyse externer und interner Kühlschmierstoff-Zufuhrmethoden.
2013, ISBN 978-3-943995-25-1 € 35,-
- 04/13 Schweitzer, E.J.: Prozessorientiertes Dienstleistungsproduktionssystem.
2013, ISBN 978-3-943995-30-2 € 35,-

- 05/13 Malak, R. C.: Methode zur softwarebasierten Planung technischer Änderungen in der Produktion.
2013, ISBN 978-3-943995-34-3 € 35,-
- 06/13 Yang, X.: Sound Simulation and Visualization in virtual Manufacturing Systems.
2013, ISBN 978-3-943995-39-8 € 35,-
- 07/13 Kranz, J.-N.: Konzept zur Vermeidung von Produkt-Piraterie Risiken – Ein Ansatz für die Ersatzteile der Investitionsgüterindustrie –
2013, ISBN 978-3-943995-46-6 € 35,-
- 01/14 Mannweiler, C.: Konfiguration investiver Produkt-Service Systeme.
2014, ISBN 978-3-943995-61-9 € 35,-
- 02/14 Aurich J.C. (Hrsg.): Produktivität und Qualität von Serviceprodukten – Ein Leitfaden für die Praxis.
2014, ISBN 978-3-943995-65-7 € 35,-
- 03/14 Waltemode S.: Qualitätsbewertung technischer Produkt-Service Systeme.
2014, ISBN 978-3-943995-68-8 € 35,-
- 04/14 Bohr C. L.: Vermeidung struktureigener Produktpiraterie bei Ersatzteilen.
2014, ISBN 978-3-943995-69-5 € 35,-
- 05/14 Olenburg A.: Tribologisches Prozessverhalten beim Bearbeiten von Feinsteinzeug-Fliesen.
2014, ISBN 978-3-943995-76-3 € 35,-
- 01/15 Zimmermann M.: Drehen von Aluminium-Matrix-Verbundwerkstoffen - Analyse thermischer und mechanischer Einflüsse auf die Fertigungsgenauigkeit bei der Trockenbearbeitung.
2015, ISBN 978-3-943995-94-7 € 35,-
- 01/16 Adam M.: Konzept zum Umgang mit scheinbar zufälligen Fehlern an technischen Systemen – eine Systematik.
2016, ISBN 978-3-95974-008-1 € 35,-
- 02/16 Walk M.: Integriertes Desktopmaschinensystem für die Herstellung und Anwendung ultrakleiner Mikroschleifwerkzeuge.
2016, ISBN 978-3-95974-021-0 € 35,-
- 03/16 Carrella M.: Zerspanungsmechanismen beim Mikroschleifen von einkristallinem Silizium.
2016, ISBN 978-3-95974-032-6 € 35,-
- 01/17 Reichenbach I. G.: Beitrag zur Beherrschung der Mikrofräsbearbeitung von Polymethylmethacrylat.
2017, ISBN 978-3-95974-042-5 € 35,-

- 02/17 Fallenstein F.: Kühlkanalaustrittsbedingungen bei VHM-Wendelbohrern
- Analyse der Einflüsse von Kühlkanalaustrittsposition und
KSS-Volumenstrom auf die Temperatur im Schneidkeil.
2017, ISBN 978-3-95974-056-2 € 35,-
- 03/17 Winkes P.: Vorgehensmodell für den systematischen Einsatz
der Virtuellen Realität zur Unterstützung des Montageplanungsprozesses.
2017, ISBN 978-3-95974-057-9 € 35,-
- 04/17 Schneider F.: Analyse der Spanbildung und Oberflächenmorphologie
beim Mikrospanen von Titanwerkstoffen
2017, ISBN 978-3-95974-059-3 € 35,-
- 05/17 Mert G.: Kumulierter Energieaufwand technischer Produkt-Service Systeme
2017, ISBN 978-3-95974-074-6 € 35,-
- 06/17 Weidig C.: Konzept zum prozessgetriebenen Anforderungsmanagement
für die Entwicklung mobiler Fabrikplanungs-Apps
2017, ISBN 978-3-95974-075-3 € 35,-
- 07/17 Cichos D.: Physikalische Modellierung technischer Änderungen
in der Produktion
2017, ISBN 978-3-95974-073-9 € 35,-
- 01/18 Effgen C.: Schneidkantenpräparation mit elastisch gebundenen
Schleifwerkzeugen – Konzeptionierung, Entwicklung und Bewertung
am Beispiel von Vollhartmetallfräswerkzeugen
2018, ISBN 978-3-95974-089-0 € 35,-
- 02/18 Kasakow G.: Entwicklung einer ereignisdiskreten Produktionssteuerung
2018, ISBN 978-3-95974-090-6 € 35,-
- 03/18 Mayer P.: Verformungsinduzierte Martensitbildung beim kryogenen
Drehen von metastabilem austenitischem Stahl
2018, ISBN 978-3-95974-098-2 € 35,-
- 04/18 Herder C.: Konzept zur impliziten Identifikation und Planung
von Technologien für die Produktion
2018, ISBN 978-3-95974-101-9 € 35,-
- 01/19 Müller C.: Kompakte Luftlagerspindeln für die spanende Mikrobearbeitung
auf Desktop-Werkzeugmaschinen
2019, ISBN 978-3-95974-105-7 € 35,-
- 01/20 Meissner H. M.: Integrierte Arbeitsplanung und Produktionssteuerung
cyber-physischer Produktionssysteme
2020, ISBN 978-3-95974-125-5 € 35,-

- 02/20 Sinnwell C.: Methode zur Produktionssystemkonzipierung auf Basis früher Produktinformationen – Ein Beitrag zur Integration von Produktionssystemplanung und Produktentwicklung unter Einsatz des MBSE
2020, ISBN 978-3-95974-127-9 € 35,-
- 03/20 Bohley M.: Prozess-Maschine-Interaktion beim Mikrofräsen von cp-Titan
2020, ISBN 978-3-95974-130-9 € 35,-
- 01/21 Hotz H.: Kryogenes Drehen metastabiler austenitischer Stähle – Analyse der Wirkzusammenhänge zwischen Einstellgrößen, Prozessgrößen und Oberflächenmorphologie
2021, ISBN 978-3-95974-146-0
- 02/21 Arrabiyeh P. A.: Electroless Plated Micro Pencil Grinding Tools: Conception, Manufacturing, and Application
2021, ISBN 978-3-95974-158-3
- 03/21 Yi L.: Eco-Design for Additive Manufacturing Using Energy Performance Quantification and Assessment
2021, ISBN 978-3-95974-157-6
- 01/22 Kölsch P.: Agile Planung von Produkt-Service Systemen durch den Einsatz von Design Thinking
2022, ISBN 978-3-95974-170-5
- 02/22 Klauer K.: Mikrofräsen flächenhafter Kalibriernormale auf Basis realer Bauteiloberflächen
2022, ISBN 978-3-95974-177-4
- 03/22 Greco S.: Additiv-Subtraktive Prozesskette in der Mikrobearbeitung – Analyse der Einflüsse auf die Prozess- und Prozessergebnisgrößen beim selektiven Laserschmelzen und Mikrofräsen von Edelstahl 1.4404
2022, ISBN 978-3-95974-182-8
- 04/22 Siedler C.: Entwicklung eines Transformationskonzepts zur Digitalisierung von Produktionssystemen in KMU
2022, ISBN 978-3-95974-185-9
- 05/22 Kirsch B.: Spezialanwendungen von Schleifscheiben - Technologische Möglichkeiten und Anforderungen sowie deren Nachhaltigkeit
2022, ISBN 978-3-95974-191-0



Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation

ISBN 978-3-95974-191-0

ISSN 0937-9061



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN