

Dirk Hessel

# **Punktcrushieren keramisch gebundener Diamantschleifscheiben**



## Berichte aus dem IFW

Wissenschaftliche Schriftenreihe des  
Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen  
der Universität Hannover

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena

### Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist erhältlich  
bei: Die Deutsche Bibliothek

Zugleich: Dissertation, Universität Hannover, 2003

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das  
des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in  
Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen  
Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2002  
Schloßwender Straße 5 ♦ 30159 Hannover  
Tel: 0511-762-19434 ♦ Fax: 0511-762-5115  
http: [www.pzh-gmbh.de](http://www.pzh-gmbh.de) ♦ mail: [info@pzh-gmbh.de](mailto:info@pzh-gmbh.de)

ISBN 3-936888-22-1 (gedruckte Ausgabe)  
ISBN 3-936888-23-X (elektronische Ausgabe)  
ISSN 1610-7527 (gedruckte Ausgabe)  
ISSN 1610-7535 (elektronische Ausgabe)

Verlag: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH

Herstellung: Digital Print, Garbsen  
Printed in Germany



# **Punktcrushieren keramisch gebundener Diamantschleifscheiben**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Universität Hannover

zur Erlangung des akademischen Grades

**DOKTOR-INGENIEUR**

genehmigte  
Dissertation  
von

Dipl.-Ing. Dirk Hessel  
geboren am 20.11.1971 in Zweibrücken

2003

1. Referent: Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. K. Tönshoff

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach

Prof. Dr.-Ing. B. Denkena

Tag der Promotion: 4. November 2003



„Es gibt Dinge, die sind unbekannt,  
und es gibt Dinge die sind bekannt -  
dazwischen gibt es Türen.“

*William Blake (1757-1827)*  
*englischer Maler, Grafiker und Dichter*



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als Projektingenieur und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Universität Hannover entstanden. Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungen wurden mit Mitteln des Niedersächsischen Ministeriums für Wirtschaft, Technologie und Verkehr gefördert.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Hans Kurt Tönshoff, dem langjährigen Leiter des Instituts, gilt mein besonderer Dank für seine stete Unterstützung und Förderung, die ich während meiner Tätigkeit am Institut und bei der Erstellung dieser Arbeit erfahren habe. Herrn Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach und Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Denkena danke ich für die Übernahme der Korreferate, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. H. Gatzen für den Vorsitz der Prüfungskommission sowie Herrn Dr.-Ing. M. Kaiser als externer Gutachter.

Meinen Freunden und ehemaligen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Ralf Egger, Herrn Dipl.-Ing. Hilmar Apmann, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Karpuschewski und Herrn Dipl.-Ing. Martin Reichstein möchte ich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit danken. Ferner gilt allen Freunden sowie Kollegen und Mitarbeitern am Institut und meinen wissenschaftlichen Hilfskräften ein herzlicher Dank.

Herrn Dr.-Ing. M. Kaiser und Herrn Dipl.-Ing. D. Völz von Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge (Celle) sowie Herrn Dr.-Ing. P. Dennis und Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) D. Preising von der Diamant-Werkzeuge Hameln GmbH danke ich besonders für die umfangreiche Unterstützung sowie für viele hilfreiche und konstruktive Hinweise.

Meine Freude über den Abschluss dieser Arbeit teile ich mit meinen Eltern, welche meinen beruflichen Werdegang ermöglicht und gefördert haben, und meiner Schwester.

Ein ganz besonders herzlicher Dank gilt meiner Frau Karen Hertrich, die mit ihrer Unterstützung und ihrem Verständnis zum Gelingen dieser Arbeit wesentlich beigetragen hat.

Hannover, im November 2003

Dirk Hessel

## **Abstrakt**

Konventionelle Konditionier- und Abrichttechnologien für Diamantschleifscheiben sind durch einen hohen Verschleiß des Abrichtwerkzeuges charakterisiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Einsatzvorbereitung von Diamantschleifscheiben für den Bereich des Werkzeug- und Profilschleifens neu entwickelt. Dieses kombiniert die kinematischen Verhältnisse des NC-gesteuerten Abrichtens mittels Diamantformrollen mit den Wirkmechanismen des Vollcrushierens. Durch einen geregelten Antrieb des Abrichtwerkzeuges, dessen Form unabhängig vom zu erzeugenden Schleifscheibenprofil ist, erfolgt dabei eine Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten zwischen den beiden Wirkpartnern. Die Vermeidung einer Relativgeschwindigkeit beim Abrichten minimiert den Verschleiß des Abrichtwerkzeuges und bietet die Möglichkeit zur Erzeugung hoher Formgenauigkeiten bei gleichzeitig hoher Flexibilität hinsichtlich des gewünschten Schleifscheibenprofils.

*Schlagnvorte: Punktcrushieren, Abrichttechnologie, keramisch gebundene Diamantschleifscheibe, Profilschleifen, Werkzeugschleifen*

## **Abstract**

Conventional dressing processes for super abrasives are characterised by a significant wear of the dressing roller. This thesis provides a survey of a newly developed control system for a flexible dressing process of vitrified bonded diamond grinding wheels. In contrast to conventional crushing processes the profile of the grinding wheel is generated by the CNC-controlled movement of a diamond roller, which shape is independent of the shape of the grinding tool. A control loop synchronises the peripheral speeds of the dressing and the grinding tool in the resulting point contact. Thus no relative speed between the effective partners occurs, which leads to minimised wear of the dressing tool. The objective is to solve the conflicting aims regarding the crushability as well as the wear resistance of the grinding wheel and the dressing tool.

*Keywords: Pointcrush Dressing, Dressing Technology, Vitrified Bonded Diamond Grinding Wheel, Plunge Form Grinding, Tool Grinding*

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Kenntnisse.....</b>	<b>2</b>
2.1	Entwicklung von Hochleistungsschleifscheiben.....	2
2.2	Aufbau und Eigenschaften von Diamantschleifscheiben .....	3
2.2.1	Einschichtig belegte Schleifscheiben .....	4
2.2.2	Mehrschichtig belegte, abrichtbare Schleifscheiben .....	4
2.3	Einsatzvorbereitung von Diamantschleifscheiben .....	9
2.3.1	Profilieren.....	11
2.3.2	Schärfen.....	16
2.3.3	Weitere Konditionierverfahren .....	18
2.4	Aufbau und Eigenschaften von Diamantformrollen zum Abrichten .....	18
2.4.1	Herstellverfahren.....	18
2.4.2	Diamantierung.....	20
2.4.3	Nachschleifen von Diamantformrollen .....	22
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung.....</b>	<b>24</b>
3.1	Problemstellung.....	24
3.2	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	25
<b>4</b>	<b>Versuchs- und Messtechnik .....</b>	<b>27</b>
4.1	Versuchsmaschine .....	27
4.2	Systeme zum Punktcrushieren.....	29
4.2.1	Crushierrollen.....	29
4.2.2	Antriebskonzepte für die Crushierrolle .....	30
4.3	Keramisch gebundene Diamantschleifscheiben.....	33
4.4	Versuchswerkstoff .....	34
4.5	Kühlschmierstoff.....	36
4.6	Mess- und Analysetechnik.....	36
4.6.1	Kraftmessung.....	36
4.6.2	Rasterelektronenmikroskopie.....	38
4.6.3	Charakterisierung der Crushierrollenverschleißes .....	38
4.6.4	Charakterisierung der Schleifbelagstopographie .....	38
4.6.5	Oberflächen- und Randzoneneigenschaften der Bauteile .....	41
<b>5</b>	<b>Technologie des Punktcrushierens .....</b>	<b>43</b>
5.1	Charakteristische Eigenschaften des Punktcrushierens .....	43
5.2	Technologische Größen .....	43
<b>6</b>	<b>Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten.....</b>	<b>48</b>
6.1	Einfluss des Antriebskonzeptes auf die Relativgeschwindigkeit.....	48
6.2	Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Abrichtprozess.....	54

---

<b>7</b>	<b>Punktcrushieren geradliniger Schleifscheibenprofile .....</b>	<b>59</b>
7.1	Einfluss der System- und Stellgrößen.....	59
7.1.1	Crushierrollen- und Schleifscheibenspezifikation .....	59
7.1.2	Radiale Zustellung.....	64
7.1.3	Überdeckungsgrad .....	68
7.1.4	Schnittgeschwindigkeit .....	70
7.1.5	Weitere Einflussfaktoren .....	73
7.2	Einsatzverhalten der Diamantschleifscheiben nach dem Crushieren.....	76
7.2.1	Einfluss der Schleifscheibenspezifikation.....	77
7.2.2	Einfluss der radialen Zustellung beim Punktcrushieren.....	79
7.2.3	Einfluss des Überdeckungsgrades beim Punktcrushieren .....	81
7.2.4	Optimierung der Abrichtzeit .....	83
<b>8</b>	<b>Modellbetrachtungen der Wirkmechanismen beim Punktcrushieren .....</b>	<b>85</b>
8.1.1	Strukturmodell eines mehrschichtigen Schleifbelags .....	85
8.1.2	Kritische Belastung der Bindungsbrücken.....	92
<b>9</b>	<b>Punktcrushieren von Profilschleifscheiben .....</b>	<b>97</b>
9.1	Strategie beim Abrichten .....	98
9.2	Schleifscheibenspezifikation .....	103
9.3	Radiale Zustellung .....	106
9.4	Axiale Vorschubgeschwindigkeit.....	108
9.5	Schnittgeschwindigkeit.....	109
9.6	Schleifscheibenprofil.....	110
<b>10</b>	<b>Folgerungen für die Praxis.....</b>	<b>114</b>
10.1	Prozessauslegung und wirtschaftliche Aspekte.....	114
10.2	Ausblick auf weitere Entwicklungen und Einsatzgebiete .....	117
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>119</b>
<b>12</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>122</b>

## Formelzeichen und Abkürzungen

### Formelzeichen

$2\varphi$	°	Flankenwinkel des Profils der Schleifscheibe
$a$	mm	Achsabstand
$a_e$	mm	Arbeitseingriff
$a_{edg}$	mm	Gesamtarbeitseingriff beim Abrichten
$a_{pd}$	mm	Eingriffsbreite beim Abrichten
$a_{apd}$	mm	axiale Eingriffsbreite beim Abrichten
$a_{rpd}$	mm	radiale Eingriffsbreite beim Abrichten
$A_{kd}$	$\mu\text{m}^2$	Kontaktfläche beim Abrichten
$A_{Rd}$	$\text{mm}^2$	Verschleißquerschnittsfläche der Crushierrolle
$A_{sd}$	$\text{mm}^2$	Verschleißquerschnittsfläche des Schleifbelags
$b_{Dd}$	mm	Wirksamkeit der Crushierrolle beim Abrichten
$b_{gd}$	$\mu\text{m}$	geometrische Kontaktbreite beim Abrichten
$b_s$	mm	Schleifbelagsbreite
$c$	$\text{N}/\mu\text{m}$	Federsteifigkeit
$C$	$\text{g}/\text{mm}^3$	Diamantkonzentration
$d_B$	$\mu\text{m}$	Durchmesser der Bindungsbrücke
$d_G$	$\mu\text{m}$	Durchmesser des Diamantkorns
$d_{hkl}$	nm	Netzebenenabstand
$d_K$	$\mu\text{m}$	mittlere Korngröße
$d_R$	mm	Crushierrolldurchmesser
$d_s$	mm	Schleifscheibendurchmesser
$E$	GPa	Elastizitätsmodul
$E_B$	GPa	Elastizitätsmodul des Materials der Bindungsbrücke
$f_{ad}$	$\mu\text{m}$	axiale Zustellung beim Abrichten
$f_d$	$\mu\text{m}$	Zustellung beim Abrichten
$f_{rd}$	$\mu\text{m}$	radiale Zustellung beim Abrichten
$f_{rdH}$	$\mu\text{m}$	radiale Zustellung pro Abrichthub
$F$	N	Kraft
$F_a$	N	Axialkraft
$F_{aGd}$	N	Abrichtaxialkraft am Einzelkorn
$F_{Bkrit}$	N	kritische Kraft des Euler-Knickfalls an der Bindungsbrücke
$F_G$	N	Kraft am Einzelkorn
$F_{GB}$	N	Kraft an der am Einzelkorn angreifenden Bindungsbrücke
$F_{Gd}$	N	Abrichtkraft am Einzelkorn
$F_{krit}$	N	kritische Kraft des Euler-Knickfalls
$F_n$	N	Normalkraft
$F_{nBd}$	N	Abrichtnormalkraft an der Bindungsbrücke
$F_{nd}$	N	Abrichtnormalkraft
$F'_{nd}$	$\text{N}/\text{mm}$	bezogene Abrichtnormalkraft
$F''_{nd}$	$\text{N}/\text{mm}^2$	flächenbezogene Abrichtnormalkraft

$F_{nGd}$	N	Abrichtnormalkraft am Einzelkorn
$F_t$	N	Tangentialkraft
$F_{tGd}$	N	Abrichttangentialkraft am Einzelkorn
$F_{xd}$	N	Abrichtkraft parallel zur x-Achse der Schleifmaschine
$F_{yd}$	N	Abrichtkraft parallel zur y-Achse der Schleifmaschine
$F_{zd}$	N	Abrichtkraft parallel zur z-Achse der Schleifmaschine
$G_d$	-	Gütefaktor beim Abrichten
$H$	$\mu\text{m}$	Höhe des Profils der Schleifscheibe
$i_{Hd}$	-	Anzahl der Crushierhübe beim Abrichten
$I_{ds}$	A	Elektrodenstrom
$k_G$	-	Gitter-Konstante
$k_T$	-	Tetraeder-Konstante
$K_{Ic}$	$\text{MPam}^{0,5}$	Spannungsintensitätsfaktor
$l_B$	$\mu\text{m}$	Länge der Bindungsbrücke
$l_G$	$\mu\text{m}$	Kornabstand im Schleifbelag
$l_{gd}$	mm	geometrische Kontaktlänge beim Abrichten
$l_k$	$\mu\text{m}$	Knicklänge
$l_r$	mm	Einzelmessstrecke nach DIN EN ISO 4288
$M_t$	Nm	Motordrehmoment
$n_R$	$\text{min}^{-1}$	Drehfrequenz der Crushierrolle
$n_{Rcal}$	$\text{min}^{-1}$	Berechnete Drehfrequenz der Crushierrolle
$n_{Rist}$	$\text{min}^{-1}$	Ist-Drehfrequenz der Crushierrolle
$n_{Rsoll}$	$\text{min}^{-1}$	Soll-Drehfrequenz der Crushierrolle
$n_s$	$\text{min}^{-1}$	Drehfrequenz der Schleifscheibe
$N_{BAd}$	$1/\text{mm}^2$	Anzahl der belasteten Bindungsbrücken pro Flächeneinheit
$N_{BAkd}$	-	Anzahl der belasteten Bindungsbrücken in der Kontaktfläche
$N_G$	-	Anzahl der Diamantkörner
$N_{GactA}$	$1/\text{mm}^2$	Anzahl der aktiven Diamantkörner pro Flächeneinheit
$N_{GV}$	$1/\text{mm}^3$	Anzahl der Diamantkörner pro Volumeneinheit
$N_E$	-	Anzahl der Ecken eines Polyeders
$N_{EL}$	-	Anzahl der Diamantkörner pro Kornlage im Gitternetz
$N_F$	-	Anzahl der Flächen eines Polyeders
$N_K$	-	Anzahl der Kanten eines Polyeders
$N_L$	-	Anzahl der Kornlagen im Gitternetz
$N_R$	-	Anzahl an räumlich hintereinander angeordneten Gitternetze
$N_T$	-	Anzahl der Tetraeder
$p$	bar	Druck
$p_{KSS}$	bar	Kühlschmierstoffdruck
$q_{FBd}$	-	Kraftverhältnis an der Bindungsbrücke beim Abrichten
$q_d$	-	Geschwindigkeitsverhältnis beim Abrichten
$q_{dist}$	-	Ist-Geschwindigkeitsverhältnis beim Abrichten
$q_{dsoll}$	-	Soll-Geschwindigkeitsverhältnis beim Abrichten



$q_{KSS}$	l/min	Volumenstrom des Kühlschmierstoffes
$r_n$	mm	Abstand des Kraftangriffspunktes vom Schwerpunkt
$r_R$	mm	Verrundungsradius am Umfang der Crushierrolle
$R$	$\mu\text{m}$	Radius an der Profilspitze der Schleifscheibe
$R_a$	$\mu\text{m}$	arithmetischer Mittenrauwert
$R_p$	$\mu\text{m}$	Glättungstiefe
$R_{ps}$	$\mu\text{m}$	Glättungstiefe des Schleifbelags
$R_{ps,theo}$	$\mu\text{m}$	theoretisch ermittelte Glättungstiefe des Schleifbelags
$R_z$	$\mu\text{m}$	gemittelte Rautiefe
$t_d$	s	Abrichtzeit
$t_{dl}$	s	Zeit pro Leerhub beim Abrichten
$T_F$	$^{\circ}\text{C}$	Flammpunkt
$U_{ad}$	-	axialer Überdeckungsgrad
$U_d$	-	Überdeckungsgrad
$U_{rd}$	-	radialer Überdeckungsgrad
$v_c$	m/s	Schnittgeschwindigkeit
$v_{cd}$	m/s	Schnittgeschwindigkeit beim Abrichten
$v_{cdp}$	m/s	Schnittgeschwindigkeit beim Profilieren
$v_{c ds}$	m/s	Schnittgeschwindigkeit beim Schärfe
$v_{drel}$	m/s	Relativgeschwindigkeit beim Abrichten
$v_{drel70^{\circ}}$	m/s	Relativgeschwindigkeit beim Abrichten des Flankenbereichs (Konturneigungswinkel $\beta = 70^{\circ}$ )
$v_{cR}$	m/s	Schnittgeschwindigkeit der Abrichtrolle
$v_f$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
$v_{fa}$	mm/min	axiale Vorschubgeschwindigkeit
$v_{fad}$	mm/min	axiale Vorschubgeschwindigkeit beim Abrichten
$v_{fadp}$	mm/min	axiale Vorschubgeschwindigkeit beim Profilieren
$v_{fads}$	mm/min	axiale Vorschubgeschwindigkeit beim Schärfe
$v_{frd}$	mm/min	radiale Vorschubgeschwindigkeit beim Abrichten
$v_{frdp}$	mm/min	radiale Vorschubgeschwindigkeit beim Profilieren
$v_{sds}$	m/s	Geschwindigkeit des Wirkmediums beim Strahlschärfe
$v_R$	m/s	Schnittgeschwindigkeit der Crushierrolle beim Abrichten
$v_{rel}$	m/s	Relativgeschwindigkeit
$V_B$	$\mu\text{m}^3$	Volumen einer Bindungsbrücke im Schleifbelag
$V^*_B$	%	bezogenes Bindungsvolumen im Schleifbelag
$V^*_K$	%	bezogenes Kornvolumen im Schleifbelag
$V^*_P$	%	bezogenes Porenvolumen im Schleifbelag
$V_{Rd}$	$\text{mm}^3$	abgetragenes Volumen an der Crushierrolle beim Abrichten (Verschleißvolumen)
$V_s$	$\text{mm}^3$	Schleifbelagsvolumen
$V_{sd}$	$\text{mm}^3$	abgetragenes Schleifbelagsvolumen beim Abrichten (Nutzvolumen)

$V_T$	$\mu\text{m}^3$	Volumen eines Tetraeders
$V_w$	$\text{mm}^3$	Zerspanvolumen
$V_{w,\text{theo}}$	$\text{mm}^3$	theoretisches Zerspanvolumen
$x_s$	$\text{mm}$	Höhe des Schleifscheibenbelags
$x, y, z$		Raumkoordinaten
$\alpha_{\text{th}}$	$10^{-6}\text{K}^{-1}$	Wärmeausdehnungskoeffizient
$\beta$	$^\circ$	Konturneigungswinkel
$\Delta 2\varphi$	$^\circ$	Änderung des Flankenwinkels
$\Delta 2\varphi_{\text{max}}$	$^\circ$	maximale Änderung des Flankenwinkels
$\Delta a$	$\mu\text{m}$	Achsabstandsänderung
$\Delta H$	$\mu\text{m}$	Änderung der Profilhöhe
$\Delta r_{\text{Rd}}$	$\mu\text{m}$	radialer Verschleiß an der Crushierrolle beim Abrichten
$\Delta R$	$\mu\text{m}$	Änderung der Profilradius
$\varepsilon$	$^\circ$	Böschungswinkel im Tetraeder
$I$	$\mu\text{m}^4$	axiales Flächenträgheitsmoment
$I_B$	$\mu\text{m}^4$	axiales Flächenträgheitsmoment der Bindungsbrücke
$\lambda$	$\text{nm}$	Wellenlänge
$\lambda_w$	$\text{W/mK}$	Wärmeleitfähigkeit
$\nu$	$\text{mm}^2/\text{s}$	kinematische Viskosität
$\theta_0$	$^\circ$	Beugungswinkel des unverspannten Werkstoffs
$\theta_B$	$^\circ$	Beugungswinkel
$\rho$	$\text{g/cm}^3$	Dichte
$\rho_G$	$\text{g/cm}^3$	Dichte des Diamantkorns
$\sigma$	$\text{MPa}$	Eigenspannung
$\sigma_{\parallel}$	$\text{MPa}$	Eigenspannung parallel zur Bearbeitungsrichtung
$\sigma_{\perp}$	$\text{MPa}$	Eigenspannung senkrecht zur Bearbeitungsrichtung
$\sigma_{4bB}$	$\text{MPa}$	Biegebruchfestigkeit
$\sigma_{bB}$	$\text{MPa}$	Druckfestigkeit
$\psi$	$^\circ$	Probenkippwinkel
$\Omega, \Phi, \Theta, X$		Achsenbezeichnungen am Goniometer

**Abkürzungen**

A/D	analog/digital
AE	Acoustic Emission
Al	Aluminium
CBN	kubisches Bornitrid
CCD	Charge Coupled Device
CH <sub>4</sub>	Methan
Co	Kobalt
CVD	Chemical Vapour Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
ECDD	Electro Contact Discharge Dressing
ELID	Electrolytic In-Process Dressing
EN	Europäische Norm
FEPA	Fédération Eurpoéenne des fabricants de Produits Abrasifs
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
HM	Hartmetall
HV	Vickershärte
HW	wolframkarbidhaltiges Hartmetall (unbeschichtet)
ISO	International Organization for Standardization
KSS	Kühlschmierstoff
LED	Light Emitting Diode
mass-%	Massenprozent
MKD	Monokristalliner Diamant
MW	Mikrowelle
NbC	Niobkarbid
NC	Numerical Control
OED	ortsempfindlicher Detektor
PC	Personal Computer
PKD	polykristalliner Diamant
REK	röntgenographische Elastizitätskonstante
REM	Rasterelektronenmikroskop
SiC	Siliziumkarbid
St	Stahl
TaC	Tantalkarbid
TiC	Titankarbid
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
WC	Wolframkarbid

## 1 Einleitung

Bei der Herstellung von Bauteilen mit hoher Maß- und Formgenauigkeit sowie hoher Oberflächengüte haben neben der Fertigungsqualität auch die Fertigungskosten einen entscheidenden Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit der Produkte. Diese werden maßgeblich durch die erforderlichen Schleifoperationen bestimmt. Daraus lässt sich ein beträchtliches Rationalisierungspotenzial für Schleifverfahren ableiten. Rationalisierungsbestrebungen zielen sowohl darauf ab, die Haupt- und Nebenzeiten zu reduzieren, als auch die verschleißabhängigen Kosten zu senken. Maßnahmen hierzu stellen, neben der Realisierung höherer Zerspanleistungen durch den Einsatz von Hochleistungsschleifscheiben, die Zusammenfassung von Prozessen sowie eine Optimierung der Einsatzvorbereitung der Schleifwerkzeuge dar.

Ein effizienter Einsatz von Diamantschleifscheiben in automatisierten Prozessen ist möglich, wenn geeignete Konditionier- bzw. Abrichttechnologien zur Verfügung stehen. Neben der Profilgebung der Schleifwerkzeuge ist dabei auch die Erzeugung ausreichender Spanräume sowie der Verzicht nachträglicher Schärfoperationen durch selbstschärfende Bindungssysteme von großer Bedeutung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Einsatzvorbereitung von Diamantschleifscheiben für den Bereich des Werkzeug- und Profilschleifens neu entwickelt. Dieses kombiniert die kinematischen Verhältnisse des NC-gesteuerten Abrichtens mittels Diamantformrollen mit den Wirkmechanismen des Vollcrushierens. Aufgrund der Punktberührung im Kontaktpunkt zwischen Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug wird dieses Verfahren als Punktcrushieren bezeichnet. Durch einen geregelten Antrieb des Abrichtwerkzeuges erfolgt dabei eine Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten zwischen den beiden Wirkpartnern. Die Vermeidung einer Relativgeschwindigkeit beim Abrichten minimiert den Verschleiß des Abrichtwerkzeuges und bietet die Möglichkeit zur Erzeugung hoher Formgenauigkeiten bei gleichzeitig hoher Flexibilität hinsichtlich des gewünschten Schleifscheibenprofils.

Die experimentellen Analysen und theoretischen Betrachtungen zur Einsatzvorbereitung liefern einen Beitrag zum grundlegenden Verständnis der Wirkmechanismen beim Punktcrushieren und legen die notwendigen Randbedingungen für eine Verschleißminimierung des Abrichtwerkzeuges dar. Untersuchungen zum Einfluss der Stell- und Systemgrößen zeigen die technologischen Möglichkeiten bei der Einsatzvorbereitung von Diamantschleifscheiben aber auch die Grenzen bei der Profilerzeugung auf. Folgerungen für die Praxis zur Umsetzung der gewonnenen Kenntnisse sowie die Betrachtung wirtschaftlicher Aspekte bei der Einsatzvorbereitung am Beispiel der Werkzeugherstellung ergänzen diese Arbeit.

## 2 Stand der Kenntnisse

### 2.1 Entwicklung von Hochleistungsschleifscheiben

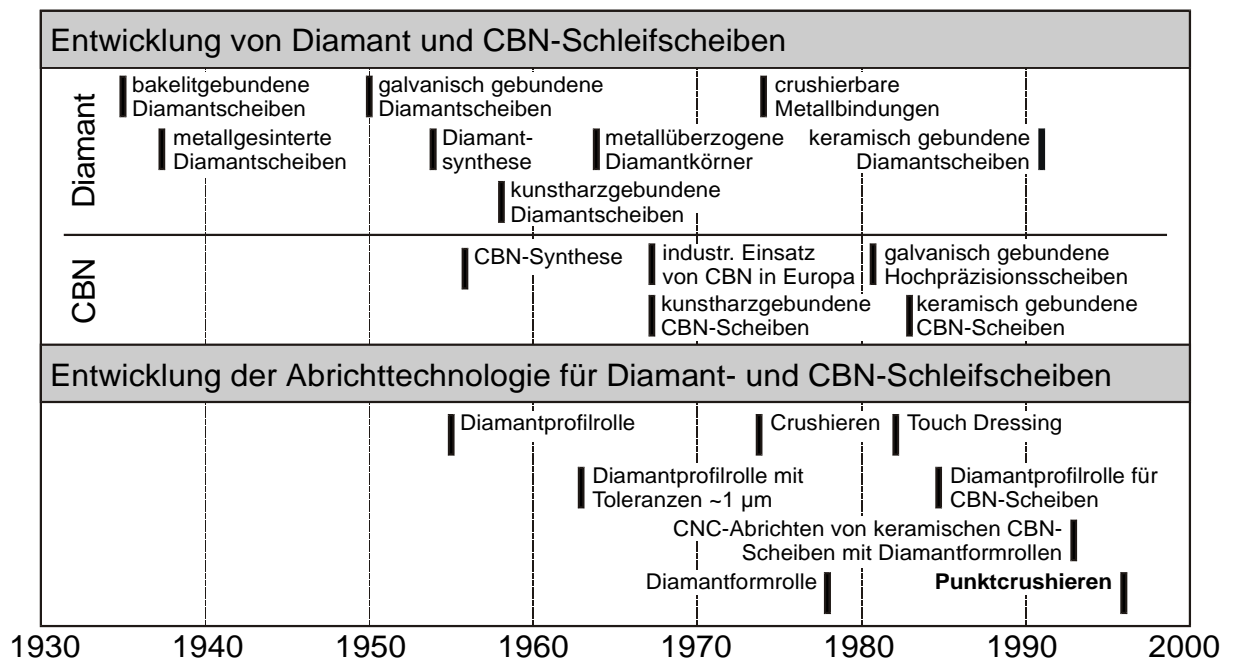
Die für Schleifscheiben verwendeten Abrasivstoffe lassen sich grob unterteilen in konventionelle und hochharte Schneidstoffe. Bei konventionellen Schleifscheiben wird in der Regel Aluminiumoxid oder Siliziumkarbid eingesetzt, während kubisches Bornitrid (CBN) und Diamant zu den hochharten Schneidstoffen für Hochleistungsschleifscheiben zählen. Der Diamant verdankt seine herausragende Stellung unter den Schneidstoffen in erster Linie seiner von keiner anderen Substanz erreichten Härte (Knoop-Härte: 80 kN/mm<sup>2</sup>, [Wend03]) sowie seinem hohen Druck- und Verschleißwiderstand [Götz68]. Der Einsatzbereich von Diamantschleifscheiben liegt vor allem in der Feinbearbeitung von harten, kurzspanenden und abrasiven Werkstoffen wie Hartmetall, Hochleistungskeramik, Halbleiterwerkstoffen, faserverstärkten Kunststoffen, Glas und Porzellan, sowie Graphit oder Gestein [Graf99].

Erste Diamantschleifscheiben mit bakelitischer Bindung wurden Mitte der dreißiger Jahre des letzten Jahrhunderts gefertigt [Krue35]. Die metallisch gesinterte und die galvanisch gebundene Diamantschleifscheibe waren dann die nächsten Entwicklungsschritte [MeyK97]. Seit der 1954 erstmals gelungenen Diamantsynthese gibt es neben dem Naturdiamanten synthetische Diamantsorten, welche den jeweiligen Anforderungen des Schleifprozesses angepasst werden können [BaiG99, Graf99a]. Die Einführung metallbeschichteter Diamantkörner ab 1964 förderte zusätzlich die Weiterentwicklung der verschiedenen Bindungstypen [LunH68], um eine verbesserte Wärmeabfuhr aus der Kontaktzone zu ermöglichen. Die seit Ende der 50er Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts herstellbaren Schleifscheiben mit Kunstharzbindung besitzen derzeit die weiteste Verbreitung [Frie02].

Nach der erstmalig im Jahr 1957 von Wentorf durchgeführten Synthese von kubischem Bornitrid (CBN) [Went57] fand dieses Anfang der 1970er Jahre erste Anwendung als Schneidstoff in der Schleiftechnologie [Bors74, Zakh71]. Die wichtigsten Eigenschaften von CBN sind die hohe Härte, welche bei Temperaturen oberhalb von 700 °C sogar die von Diamant übertrifft, und die bis ca. 1400°C vorhandene chemische Stabilität. Die, im Gegensatz zum Diamant, nicht vorhandene chemische Affinität zum Eisen prädestinieren das kubische Bornitrid als Schneidstoff für die Schleifbearbeitung schwererspanbarer Stahlwerkstoffe [Juch86].

Weiterentwicklungen im Bereich der Hochleistungsschleifscheiben erfolgten dann vor allem durch die Herstellung neuer Bindungssysteme. 1975 wurden die ersten Schleifscheiben mit crushierbarer metallischer Bindung hergestellt. Während für konventionelle Schleifstoffe die keramische Bindung bereits seit Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts eingesetzt wird, kamen erst zu Beginn der 1980er Jahre Hochleistungsschleifscheiben mit keramischen Bindungen auf den Markt [Fran36, Guil27, MeyK97]. Aufgrund der erforderlichen hohen Sintertemperaturen war die Herstellung

zunächst auf CBN-Schleifscheiben beschränkt, da die thermische Stabilität des Diamanten bei vorhandenem Sauerstoff auf Temperaturen unterhalb 700 °C begrenzt ist [Joun67, JucC83]. Erst durch die Entwicklung keramischer Bindemittel mit niedrigen Brenntemperaturen konnte auch die Herstellung von Diamantschleifscheiben mit diesem Bindungssystem erfolgen [KraT93, TanI85]. Bild 2.1 zeigt die Entwicklungsschritte bei der Herstellung von Diamant- und CBN-Schleifscheiben sowie die Innovationen bei der Abrichttechnologie [Alth81, Bors74, FerI92, Jaco79, Juch86, Lang98, LunH68, Meye01, MeyK97, Schl82, Schm68, TönF95]. Auf die Abrichttechnologie wird in Kap. 2.3 näher eingegangen.



Quelle: Althaus, Borse, Ferlemann, Jacobs, Juchem, Kaiser, König, Langelüddecke, Lundblad, Meyer, Schleich, Tönshoff He/34048 © IFW

**Bild 2.1:** Innovationen bei Diamant- und CBN-Schleifscheiben und der zugehörigen Abrichttechnologie

## 2.2 Aufbau und Eigenschaften von Diamantschleifscheiben

Diamantschleifscheiben bestehen aus einem Grundkörper und einem darauf aufgetragenen Schleifbelag. Als Werkstoff für den Grundkörper werden im niedrigen Drehzahlbereich Kunstharze mit verschiedenen Füllstoffen verwendet, welche sich durch gute Dämpfungseigenschaften auszeichnen. Für hohe Drehzahlen geeignet sind nur metallische Grundkörper aus Stahl oder Aluminium, welche durch hohe Festigkeit, Formstabilität und Wärmeleitfähigkeit charakterisiert sind [Lieb96].

Im Gegensatz zu geometrisch bestimmten Zerspanungswerkzeugen mit definierter Schneide ist der Schleifscheibenbelag ein inhomogener Körper, welcher durch die prozentualen Volumenanteile von Abrasivstoffen, Bindungsmaterial und Poren bestimmt wird [Padb92]. Dabei wird die Leistungsfähigkeit der Schleifscheibe – neben den mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften des verwen-

deten Schleifkorns – entscheidend vom Belagaufbau und dem eingesetzten Bindungsmaterial bestimmt [Lutz85]. Das verwendete Bindungssystem kann die Verschleißfestigkeit, die Dämpfungseigenschaften, die Temperaturleitfähigkeit, das Selbstschärfvermögen sowie den Kühlschmierstoff- und Spänetransport maßgeblich beeinflussen und stellt damit ein großes Optimierungspotenzial für die Schleifscheibe und den jeweiligen Einsatzfall dar. Grundsätzlich unterschieden wird dabei zwischen einschichtig und mehrschichtig belegten Schleifwerkzeugen [VDI3394].

### **2.2.1 Einschichtig belegte Schleifscheiben**

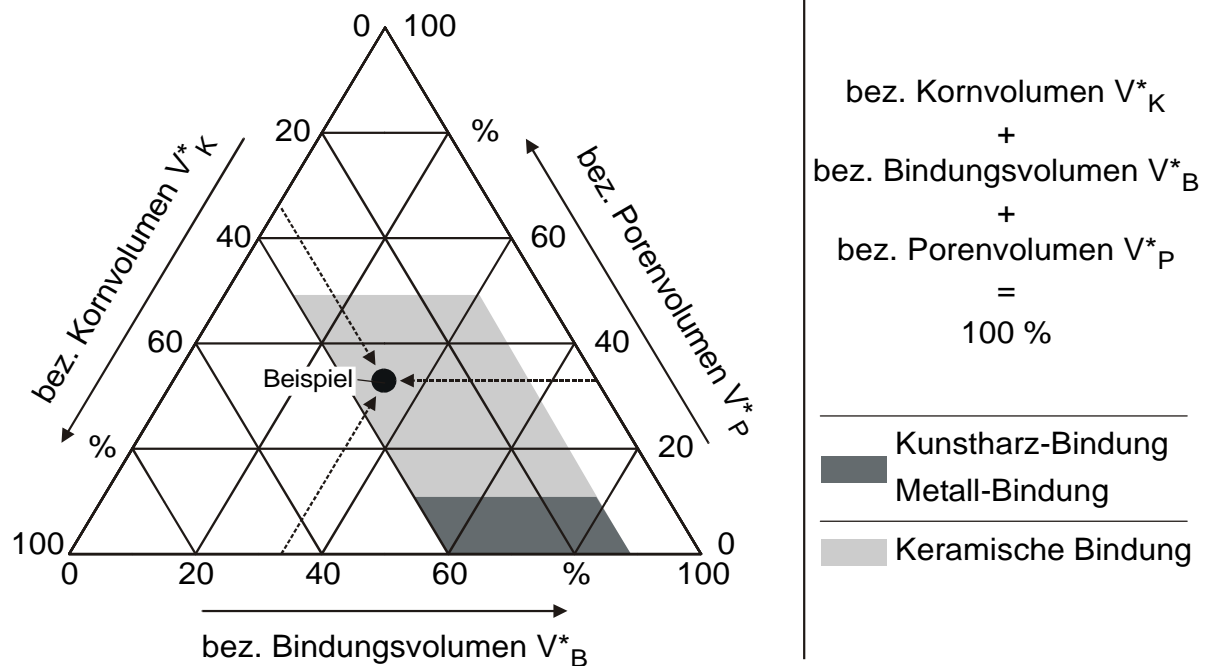
Einschichtig, galvanisch positiv belegte Werkzeuge werden vorwiegend bei Innenschleifoperationen sowie komplexen Profilschleifaufgaben eingesetzt [Marz01]. Das Profil der Schleifscheibe wird durch die Bearbeitung des Grundkörpers festgelegt. Anschließend wird der Schleifbelag mittels Elektrolyse aufgebracht. Durch die Möglichkeit eines anfänglich relativ hohen Kornüberstandes von etwa 40 % des Korndurchmessers und durch die sehr hohen Kornhaltekräfte können hohe Zeitspannungsvolumina realisiert werden [Brev96]. Die Schleifscheibe ist im Neuzustand unmittelbar einsatzfähig und somit entfällt ein aufwendiger Konditionierungsprozess. Da ein Profilieren nicht möglich ist, können Rundlauffehler, beispielsweise bedingt durch den Schleifscheibenflansch, nur durch eine präzise Justage bereits bei der Montage vermieden werden. Nachteilig kann sich das über die Standzeit veränderliche Schleifverhalten der galvanisch gebundenen Schleifscheibe auswirken. Zu Schleifbeginn ragen die einzelnen Kornspitzen aus der Bindung heraus und führen so bei geringeren Prozesskräften zu deutlich höheren Oberflächenrauheiten am Werkstück. Mit zunehmendem Zerspanungsvolumen stumpfen die Körner ab und die Einebnung des Schleifbelags führt zu besseren Oberflächenqualitäten. Der Grundkörper einer galvanisch belegten Schleifscheibe kann – je nach geforderter Genauigkeit – bis zu zwanzigmal wiederbelegt werden [WarH94].

### **2.2.2 Mehrschichtig belegte, abrichtbare Schleifscheiben**

Zu den mehrschichtig belegten und damit abrichtbaren Schleifscheibenbelägen zählen die mit Kunstharz-, metallischer oder keramischer Bindung. Eine Charakterisierung des volumetrischen Schleifkörperaufbaus erfolgt durch die Begriffe Struktur und Gefüge. Die Struktur eines Schleifbelags umfasst das Kornvolumen und beschreibt den Abstand einzelner Körner im Belag. Das Gefüge ist ein Maß für die Größe und Verteilung des Porenraums [Fuch67, Padb92]. So führt eine Gefügeveränderung durch Reduzierung des Porenvolumens bei gleichzeitig konstantem Kornvolumen zu einer Verstärkung der Bindungsstege. Dadurch wird das Einzelkorn fester eingebunden und die Härte des Belags gesteigert [Rohd85]. Die Zusammensetzung kann durch ein Dreistoffkoordinatensystem, welches das volumetrische Verhältnis von Bindung, Korn und Poren beschreibt, dargestellt werden (Bild 2.2) [Graf99b, Went57].

Weitere Kennzeichen des Schleifbelags sind die Eigenschaften der verwendeten Kornart, wie z.B. Größe, Form, Härte und Lage im Schneidenraum, und der Bin-

dungstyp. Durch entsprechende Auslegung dieser Bestandteile kann das Einsatzverhalten gezielt für die jeweilige Schleifaufgabe eingestellt werden. Der Zeitpunkt, wann das Schleifkorn ausbricht, ob Mikrosplitterung am Korn stattfindet und wie das Dämpfungsverhalten der Scheibe ist sind Beispiele hierfür [Hert94].



Quelle: Graf, Wentorf

He/32617 © IFW

**Bild 2.2:** Dreistoff-System-Darstellung der Zusammensetzung von Schleifbelägen

### Kunstharzgebundene Diamantschleifscheiben

Häufig eingesetzt und relativ kostengünstig sind kunstharzgebundene Diamantschleifscheiben. Typische Anwendungsgebiete sind das Trocken- und Nassschleifen von Hartmetall, auch im Verbund mit Trägerwerkstoffen [HolS88]. Als Bindungsmaterial kommen hier die duromerischen Werkstoffe Phenolharz und Polyimidharz zum Einsatz [Wend03]. Kunstharzgebundene Schleifscheiben, welche durch Heißpressen bei Temperaturen von etwa 150°C bis 400°C hergestellt werden, weisen nur ein geringes bis gar kein Porenvolumen auf. Aufgrund der abrasiven Wirkung der abgetrennten Späne im Schleifprozess tritt ein relativ starker Bindungsverschleiß auf. Weitere Eigenschaften dieser Bindung sind die elastische Verankerung der Körner und die damit verbundenen relativ guten Dämpfungseigenschaften sowie die Unempfindlichkeit gegenüber seitlichem Druck auf den Schleifbelag und dadurch verursachte mögliche Schädigungen.

Die Elastizität und die geringe Festigkeit dieses Bindungstyps beschränken jedoch die Standzeit und die erzielbare Profilhaltigkeit dieser Schleifwerkzeuge, weshalb diese Bindung überwiegend für zylindrische und einprofilige Schleifscheibengeometrien eingesetzt wird. Nachteilig kann sich die Empfindlichkeit der Kunstharzbindung gegenüber höheren Temperaturen auswirken, da, je nach Spezifikation der Bindung, bereits oberhalb von 250°C die Kornhaltekräfte nachlassen können und es ab 300°C



bereits zu einer Zersetzung des Bindungsmaterials kommen kann [FraM98, KönL80, Lieb96, MewM99, Töns95].

### Metallisch gebundene Diamantschleifscheiben

Neben der bereits erwähnten metallisch einschichtig, galvanisch belegten Schleifscheibe, kommen auch mehrschichtige Diamantschleifscheiben in metallischer Bindung zum Einsatz. Diese werden vorrangig beim Profilschleifen von Hartmetall, sowie bei der Bearbeitung von Glas, Quarz, Oxidkeramik und anderen keramischen und metallischen Werkstoffen eingesetzt [HolS88]. Als Bindungsmaterial wird überwiegend Bronze, für Sonderfälle auch Stahl- oder Hartmetall, verwendet. Häufig angewandtes Herstellverfahren ist das Sintern der Bindung bei Drücken bis zu 20 MPa. Die duktile Bronzebindung weist eine hohe mechanische Stabilität auf, welche sie weitgehend resistent gegenüber stoßartiger Belastung macht und bei hohen Schnittgeschwindigkeiten eine gute Profilhaltigkeit bietet. Der Belag zeichnet sich durch ein nahezu geschlossenes Gefüge ohne Porenraum aus.

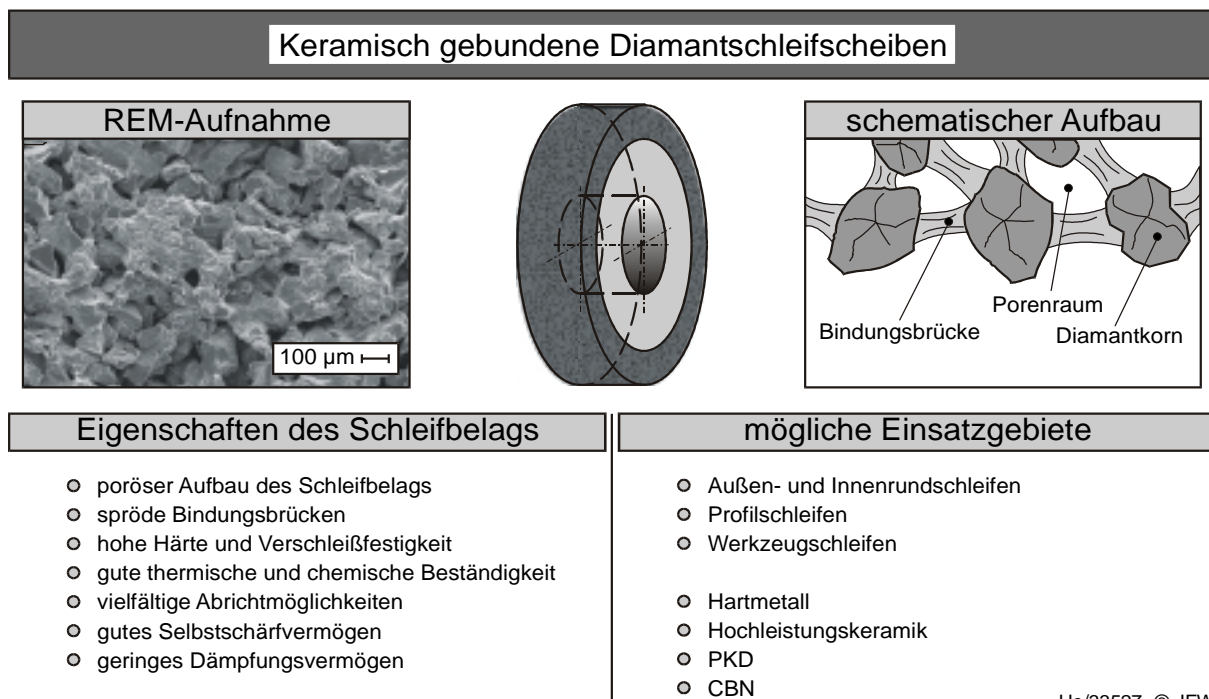
Aufgrund der guten Verschleiß- und Kantenfestigkeit sowie der ausgezeichneten Wärmeabfuhr aus der Kontaktzone und der hohen Kornhaltekräfte wird die metallisch gebundene Schleifscheibe bevorzugt für Profilschleifaufgaben eingesetzt. Die hohe Festigkeit des Schleifbelags verursacht jedoch große Kräfte beim Abrichten und damit einen erhöhten Abrichterverschleiß. Durch eine Modifikation des Sinterprozesses kann die Bindung auch als crushierbare Sprödbronze gefertigt werden, wodurch zwar die Profilierbarkeit deutlich verbessert, die Festigkeit aber gleichzeitig reduziert wird [Falk98, Gärt82, HolS88, Köni89, Tön95].

Ein weiteres Verfahren zur Herstellung metallischer Bindungen ist die Infiltration, bei der ein poröser Körper durch Wärmebehandlung mit einem Metall von niedrigem Schmelzpunkt durchdrungen wird. Dabei wird das Metall in den Poren der Skelettstruktur absorbiert. Die so erzeugte Verbundstruktur besitzt physikalische und chemische Eigenschaften, welche mit denen erschmolzener Metalle vergleichbar sind. Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass sämtliche Skelettkomponenten (Diamantkörner, Metallpulver und Füllstoffe) vom Infiltriermaterial benetzt werden müssen, um einen stabilen Schleifkörper zu erzeugen. Die Anzahl möglicher Kombinationen ist aufgrund der jeweiligen chemischen und physikalischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten und deren Wechselwirkungen untereinander jedoch beschränkt [LunH68].

### Keramisch gebundene Diamantschleifscheiben

Die Einsatzschwerpunkte für keramisch gebundene Diamantschleifscheiben liegen sowohl beim Außen- und Innenrundscheifen als auch beim Schleifen von komplexen Profilen und Zerspanwerkzeugen. Sie werden vorrangig bei der Bearbeitung hochverschleißfester Werkstoffe, wie z.B. Hartmetall, Hochleistungskeramik, polykristallinem Diamant (PKD) oder CBN eingesetzt. Bild 2.3 zeigt einen Überblick über den

Aufbau, die Eigenschaften und mögliche Einsatzgebiete keramisch gebundener Diamantschleifscheiben.



He/33527 © IFW

**Bild 2.3:** Aufbau und Eigenschaften keramisch gebundener Diamantschleifscheiben

Keramische Bindungen bestehen aus Tonen, Kaolinen, Feldspaten und Glasfritten sowie weiteren Zusatzstoffen, welche die Härte, das Benetzungsverhalten der Bindung und das thermische Verhalten gezielt beeinflussen können. In der Bindephase sind – neben den Diamantkörnern – Füllstoffe eingebettet. Die Anpassung der Konzentration dieser sogenannten Stützkörner bietet die Möglichkeit das Porenvolumen unabhängig von der Diamantkonzentration zu variieren. Im Gegensatz zur Kunstharz- oder metallischen Bindung zeichnen sich keramisch gebundene Schleifscheiben durch eine hohe Porosität aus, welche etwa im Bereich bis 50 % liegen kann. Dies kann beim Herstellungsprozess durch Einbringen künstlicher Poren oder durch verbleibende Freiräume infolge des Verdichtungsprozesses gezielt gesteuert werden. Künstliche Poren lassen sich durch Korundhohlkugeln oder den Einsatz von Ausbrennstoffen erzeugen.

Das hohe Porenvolumen macht einen Schärfprozess bei der Einsatzvorbereitung häufig überflüssig, da ein genügend großer Spanraum schon nach dem Profilieren zur Verfügung steht. Die Poren dienen außerdem zum Transport des Kühlschmierstoffes und dem Abtransport der Spanpartikel aus der Kontaktzone [Brit76, JacM01, Schu96, StaF79, WarH94].

Bei der Herstellung des keramischen Bindungsbelags wird prinzipiell zwischen den zwei Verfahren Kalt- und Heißpressen unterschieden [Link92]. Beim Kaltpressen wird der Bindungsgrundstoff zusammen mit den Schleifkörnern zu einer homogenen, rieselfähigen Masse vermischt. Vor dem Sinterprozess erfolgt die Formgebung durch

Press- und Rüttelverfahren. Bei sehr feinkörnigen Abrasivstoffen werden diese mit der Bindung zu einem Schlicker verarbeitet, welcher gegossen oder nach der Trocknung gepresst wird.

Beim Heißpressen hingegen geschieht die Formgebung und das Sintern in einem einzigen Arbeitsgang. Im Ergebnis unterscheiden sich diese beiden Herstellungsverfahren vor allem hinsichtlich der erreichbaren Porosität. So können mittels Heißpressen gefertigte Scheiben nahezu porenfrei erzeugt werden und sind im Schleifverhalten mit metallgebundenen Scheiben vergleichbar. Aufgrund der hohen Prozesstemperaturen beim Sintervorgang bleibt dieses Verfahren bei den hochharten Abrasivstoffen jedoch auf CBN beschränkt.

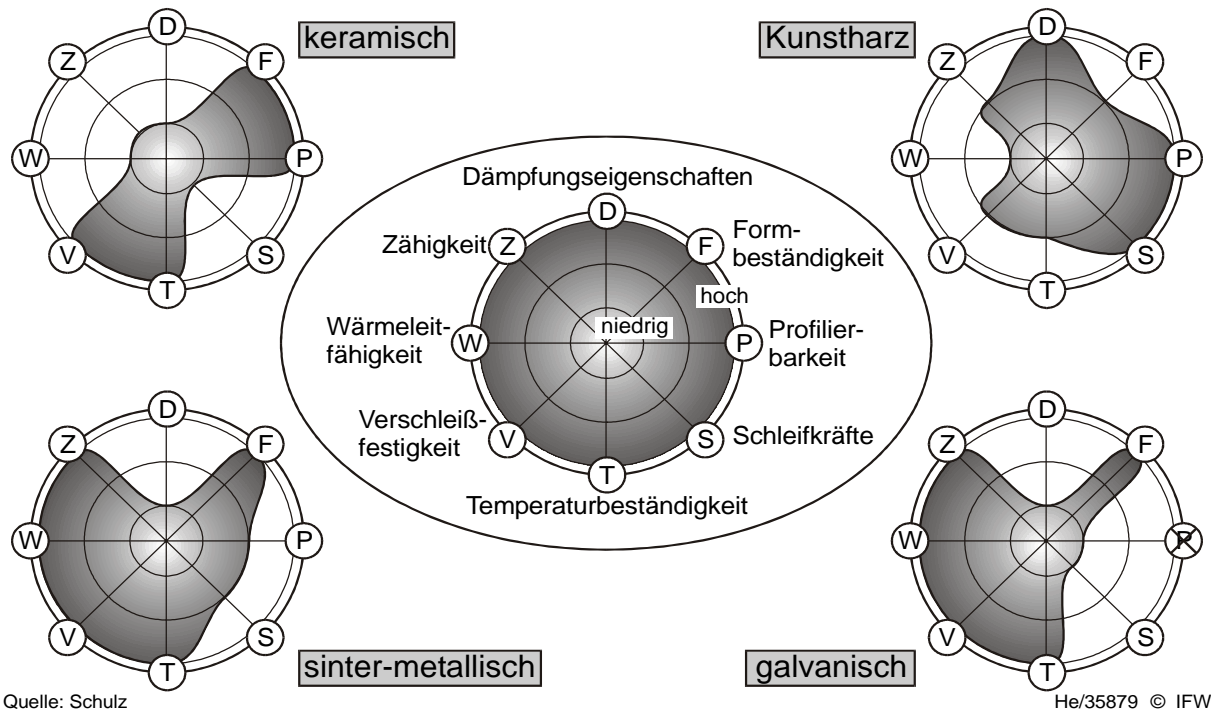
Bei den Grundstoffen für keramische Schleifscheibenbindungen unterscheidet man Sinterbindungen mit geringem oder gar keinem Glasphasenanteil, Bindungen mit mittlerem Glasphasenanteil und Schmelzbindungen mit hohem Glasphasenanteil [Brit76]. Während bei Sinterbindungen über Umlagerungs- und Feststoffreaktionen ein Umschließen der einzelnen Abrasivkörner erreicht wird, wird die Bindekraft bei Schmelzbindungen über eine niedrigviskose Glasphase erreicht. Die glas- bzw. porzellanartige Ausbildung der Bindungsbrücken erzeugt einen vergleichsweise harten Schleifbelag, bei dem, neben den eigentlichen Schleifkörnern, auch das Bindungsmaterial einen hohen Verschleißwiderstand gegen die abrasive Wirkung der beim Schleifprozess erzeugten Späne aufweist.

Die keramische Bindung ist durch ein geringes spezifisches Gewicht, eine hohe Festigkeit und Sprödigkeit sowie chemische Stabilität und eine hohe Temperaturbeständigkeit charakterisiert; jedoch empfindlich bei hohen thermischen Wechselbelastungen [HolS88, Padb93]. So wird die Temperaturbeständigkeit keramisch gebundener Diamantschleifscheiben im wesentlichen durch die ab 700 °C eintretende Graphitisierung des Diamanten beschränkt. Die relativ guten Möglichkeiten der Profilierung der Schleifscheibe, die hohen erzielbaren Zeitspannungsvolumina sowie eine geringe Verformungsfähigkeit und damit eine hohe Profilhaltigkeit sind weitere Vorteile dieses Bindungssystems. Diese Eigenschaften ermöglichen auch den Einsatz keramischer Bindungen im Hochgeschwindigkeitsbereich. So sind Schnittgeschwindigkeiten bis  $v_c = 200$  m/s möglich [Naoy93]. Nachteile der keramischen Bindung sind in der geringen Zähigkeit und Dämpfung zu sehen, welche die Schleifscheiben empfindlich gegenüber seitlichem Druck und stoßender Beanspruchung machen. Dabei initiierte Risse können zum Versagen durch Schleifscheibenbruch führen [Thie86].

Im Gegensatz zu den Scheiben mit konventionellen Schleifstoffen gibt es noch keine genormten Prüfverfahren zur Quantifizierung der durch die Variation des Aufbaus keramisch gebundener Diamant- und CBN-Schleifscheiben beeinflussten charakteristischen Eigenschaften. Die entwickelten Untersuchungsmethoden beziehen unterschiedliche materialkundliche und bruchmechanische Aspekte zur Bestimmung von Kennwerten mit ein. Dementsprechend ist eine einheitliche Bewertung und ein

Vergleich des Leistungsvermögens der Schleifwerkzeuge schwierig [Buch65, HauM82, KloM02, KünK98, Link92, MewS99, PetS68, SpuL90].

Bild 2.4 zeigt zusammenfassend einen Vergleich der wesentlichen Eigenschaften der gebräuchlichsten Bindungssysteme und verdeutlicht den Einfluss des Bindungsmaterials auf die Leistungsfähigkeit der Schleifscheibe [Schu96].



**Bild 2.4:** Eigenschaften der gebräuchlichsten Schleifscheibenbindungen

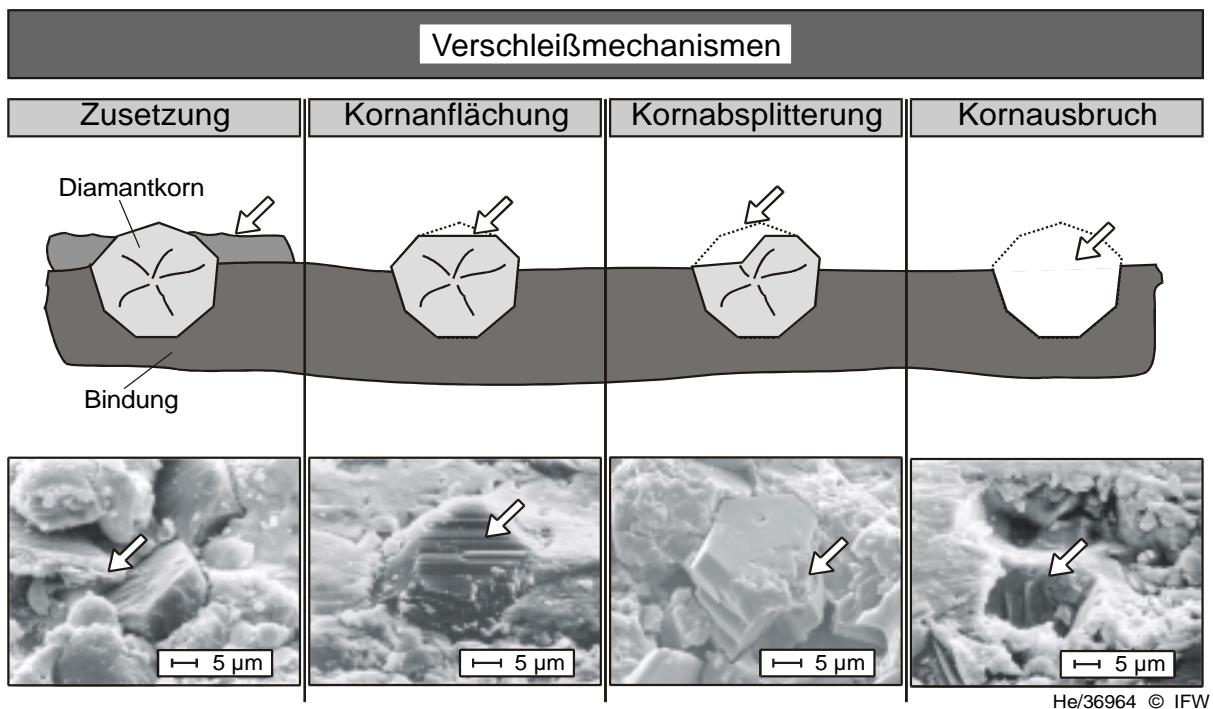
### 2.3 Einsatzvorbereitung von Diamantschleifscheiben

Eine wichtige Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Schleifprozess ist ein weitgehend automatisierter Produktionsablauf. Dies schließt auch eine geeignete Einsatzvorbereitung der Schleifwerkzeuge mit ein [Heue92]. Nach der Montage, bei welcher die Grob- und Feinjustage der Schleifscheibe erfolgt, muss durch Auswuchten die Unwucht und Exzentrizität des Schleifwerkzeuges beseitigt werden, um einen optimalen Rundlauf zu gewährleisten. Der Begriff *Konditionieren* umfasst nach Saljé die Ausbildung von Maß und Form sowie Rundlauf einer Schleifscheibe (*Profilieren*), die Erzeugung einer bestimmten Schneidenraumbeschaffenheit bzw. eines Spanraums durch Entfernen der abgestumpften Schleifkörner und Freilegung des Porenraums (*Schärfen*) sowie die Beseitigung von Span-, Korn- und Bindungsresten (*Reinigen*) [Salj91]. Durch das Profilieren zur Erzeugung der makroskopischen Geometrie der Schleifscheibe kann ein ausreichender Kornüberstand bei Diamantschleifscheiben in Bezug auf das Bindungsniveau in der Regel nicht erzielt werden. Das Schärfen dient dann dem Zurücksetzen des Bindungsmaterials, ohne dabei das zuvor erzeugte Profil zu verändern [Falk98, Frit97, Lier98, Wimm95]. Bei konventionellen Schleifstoffen oder offenporigen Schleifscheibenbindungen kann das Profilieren und Schär-

fen in einem einzigen Arbeitsgang, *Abrichten* genannt, erfolgen. In der Regel sind diese beiden Arbeitsschritte jedoch zwei eigenständige und nacheinander geschaltete Prozesse [Töns95].

Das Konditionieren, welches zur Schaffung und Regeneration der Schleiffähigkeit der Schleifscheibe dient, zeichnet sich durch verfahrensspezifische Werkzeuge und Wirkmechanismen aus. Dabei wird die Schleifscheibe als das zu bearbeitende Werkstück betrachtet und ist als Ausgangsgröße des Konditionierprozesses eine Eingangsgröße für den Schleifprozess [Pahl74, Köni89].

Diese Regeneration des Schleifbelags ist notwendig, um den Einfluss der wirkenden Verschleißmechanismen zu kompensieren. Man unterscheidet zwischen dem makroskopischen Verschleiß, also der Höhen- oder Radiusabnahme des Belags und dem mikroskopischen Verschleiß, welcher die Verschleißformen an Korn und Bindung umfasst. Der Verschleiß besitzt einen entscheidenden Einfluss auf das Prozessverhalten, wie etwa die Schleifkräfte oder die entstehenden Oberflächengüten sowie die Maß- und Formgenauigkeiten des Bauteils. Im wesentlichen lassen sich die in Bild 2.5 dargestellten vier Verschleißmechanismen unterscheiden [Köni89, Wern94, Wimm95, Wobk91].



**Bild 2.5:** Verschleißmechanismen

Zusetzungen (Auftragsverschleiß) bezeichnet die Einlagerung von Werkstückpartikeln in den Spanraum des Schleifbelags. Das Haften der Partikel im Schneidenraum wird auf mechanische Haltekräfte zurückgeführt, die durch Hinterschneidungen zwischen den unter hohem Druck in den Spanraum eingepressten Spänen und den rauen Kornoberflächen entstehen.

Kornanflächung bezeichnet das Abstumpfen von Schleifkörnern, welches als Folge von mechanischem Abrieb, Korrosion, Diffusion oder Adhäsion auftritt. Kornanflächungen führen zu reibungsbedingten höheren Schleifkräften bei geringerer Zerspanleistung. Dabei ist der makroskopische Verschleiß gering.

Kornabsplitterungen entstehen aufgrund einer mechanischen und/oder thermischen Belastung der Schleifkörner. Die Verschleißform kann sich als günstig erweisen, da neue und scharfe Schneidkanten erzeugt werden und gleichzeitig nur ein geringer makroskopischer Verschleiß auftritt. Zudem führen Kornsplitterungen zu niedrigen Schleifkräften. Beim Herstellungsprozess von Industriediamanten kann durch das Einbringen von Dotierungen das Splitterverhalten der Schleifkörner gezielt beeinflusst werden.

Kornausbruch (Bindungsverschleiß) ist definiert als das Ausbrechen von Schleifkörnern oder Korngruppen bei mechanischer Überbeanspruchung bzw. bei thermischem oder chemischem Verschleiß des Bindungsmaterials. Kornausbruch führt zu einem hohen Volumen- und Profilverschleiß an der Schleifscheibe.

Das Konditionieren des Schleifbelags kann prinzipiell vor dem Schleifprozess (Pre-Prozess) sowie kontinuierlich oder in Intervallen während des Schleifprozesses (In-Prozess) erfolgen.

### 2.3.1 Profilieren

Für das Profilieren von Diamantschleifscheiben stehen abtragende und spanende Verfahren zur Verfügung. Die weiteste Verbreitung besitzen die spanenden Profilierverfahren. Diese lassen sich hinsichtlich ihrer Kinematik unterteilen in Verfahren mit stehenden oder rotierenden Werkzeugen. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist das eingesetzte Wirkmedium (Siliziumkarbid (SiC), Stahl, Diamant, etc.). Bild 2.6 gibt hierfür einige Beispiele. Häufig wird auch nur zwischen diamantfreien und diamanthaltigen Abrichtwerkzeugen unterschieden [Frie99, Kloc82, Lieb96, MeyS82, Spur89, TönG81].

#### Generieren zylindrischer und einprofiliger Schleifscheibenprofile

Das eingesetzte Profilierverfahren hängt vor allem von dem zu erzeugenden Profil ab. Stehende Abrichtwerkzeuge, wie der Einkorn- oder Vielkornabrichter, sind aufgrund ihrer Geometrie nur für das Profilieren geradliniger Konturen einsetzbar [Mohr83, Sen91]. Hierbei handelt es sich um ein stabförmiges Werkzeug mit einer räumlich stochastisch verteilten oder definiert gesetzten Diamantkörnung in Metallbindung. Durch den ständigen Kontakt der Diamanten mit dem Schleifbelag und den damit verbundenen hohen Temperaturen an der Kontaktstelle ist die Verschleißgeschwindigkeit des Abrichtwerkzeuges relativ hoch [CoeO99]. Dies kann durch eine angepasste Kühlschmierung nur bedingt kompensiert werden. Profilfehler an der Schleifscheibe aufgrund des resultierenden Verschleißes am Abrichtwerkzeug sind die Folge [Eich97, Mink88].

Wirkmedium	Verfahrensmerkmal	Kunstharz- bindung	Metallbindung	crushierbare Metallbindung	keramische Bindung
Diamant	Vielkornabrichter				
	Diamantformrolle		X		
Siliziumkarbid	SiC-Scheibe				
Metall	Stahlrolle		X		
	Profilrolle	X	X		
elektrischer Strom	Funkenerosion	X			X
Elektrolyt	Elektrolyse	X			X

	gleichzeitiges Schärfen erforderlich	bedingt geeignet	gut geeignet
zylindrische Schleifscheiben			
einprofilige Schleifscheiben			
mehrsprofilige Schleifscheiben			

Quelle: Friemuth, Klocke, Liebe, Meyer, Spur, Tönshoff

He/33526 © IFW

### Bild 2.6: Profilierverfahren für Diamantschleifscheiben

Ein gängiges und wirtschaftliches Verfahren zur Erzeugung zylindrischer oder einprofilig geradliniger Schleifscheibenprofile stellt der Einsatz von Siliziumkarbid-Rollen dar [SpuL97]. Durch einen eigenen Antrieb der Rolle oder eine freilaufende, flieh-kraftgebremste Lagerung wird eine Relativgeschwindigkeit zwischen Profilierrolle und Schleifscheibe erzeugt, welche einen mechanischen Abtrag des Schleifbelags bewirkt. Ein Eigenantrieb der SiC-Rolle bietet den Vorteil der Variation des Geschwindigkeitsverhältnisses beim Abrichten, wodurch das Profilierergebnis beeinflusst werden kann [Huan01]. Das Verfahren kann sowohl für Kunstharz- als auch für metallisch oder keramisch gebundene Schleifscheiben eingesetzt werden. Die Kosten für das Abrichtwerkzeug sind gering. Neben der eingeschränkten Komplexität der erzeugbaren Profile können weitere Nachteile dieses Verfahrens in dem hohen Verschleiß des Abrichters und dem – bedingt durch den geringen Abtrag an der Schleifscheibe – großen Zeitaufwand für das Profilieren liegen. Dadurch ist eine Automatisierung des Abrichtprozesses häufig nur mit erheblichem messtechnischen Aufwand zur Erfassung der Zustände von Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug möglich. Als In-Prozess-Verfahren ergibt sich jedoch ein effektiver Einsatz diese Technologie [Krie97, MakA02, Wimm95].

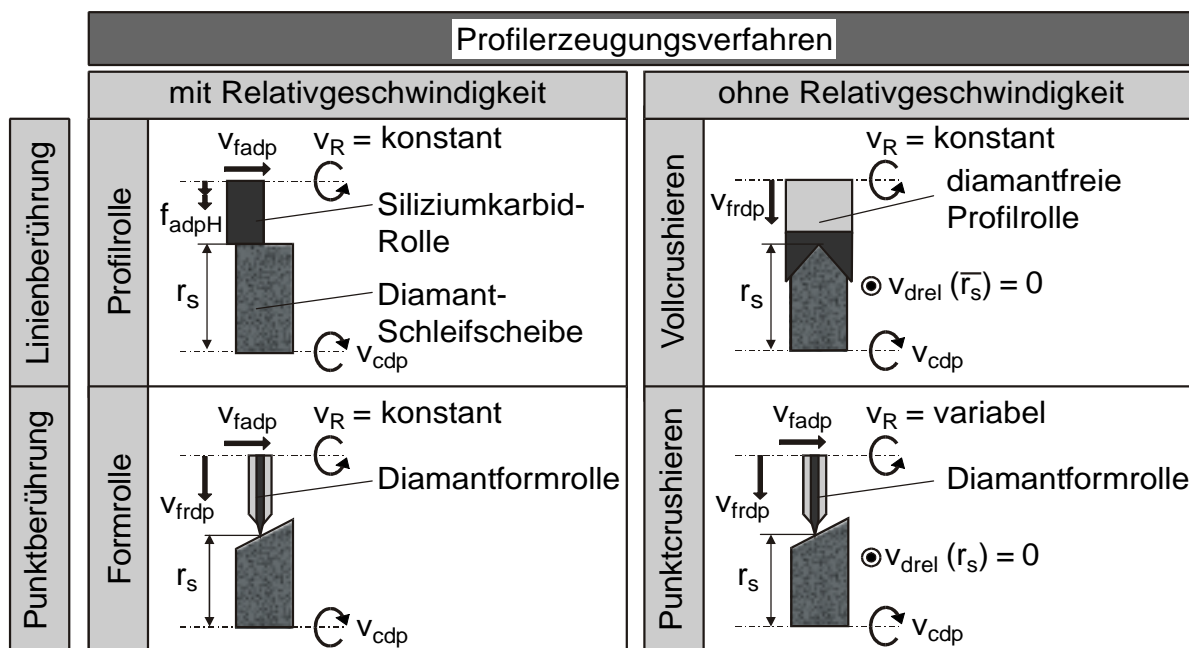
### Generieren komplexer Schleifscheibenprofile

Die Verwendung von Diamantschleifscheiben zum Profilschleifen komplexer Geometrien an hochharten Werkstoffen beschränkte sich zunächst auf den Einsatz galvanisch belegter Schleifscheiben. Hierbei besitzt der Grundkörper der Schleifscheibe das erforderliche Profil. Dadurch lassen sich Vorteile hinsichtlich der Profilgenauigkeit erzielen. Nachteile ergeben sich durch den ungleichmäßigen Korn-



verschleiß, welcher an den am meisten beanspruchten Bereichen – wie Kanten oder hervorstehenden Radien – am stärksten auftritt. Durch die nur einlagige Belegung wird auch ein kosten- und zeitaufwendiges Nachbelegen des Grundkörpers erforderlich, wenn der Schleifbelag nur partiell verschlissen ist [Manc81]. Die Entwicklung profilierbarer Bindungssysteme für Schleifscheiben und die Verbesserung der Positioniergenauigkeit der Schleifmaschinen sind Voraussetzungen, um komplexe Profile an mehrschichtig belegten hochharten Schleifscheibenbelägen zu generieren [Grab88].

Bei den spanenden Profilverfahren zur Erzeugung komplexer Schleifscheibenprofile – auch als Profilerzeugung bezeichnet – lassen sich Verfahren mit abbildender oder bahngesteuerter Formgebung unterscheiden. Eine systematische Untergliederung ergibt sich durch die Aufteilung in Verfahren mit und ohne Relativgeschwindigkeit sowie in Verfahren mit einer Linien- und einer Punktberührung zwischen den Wirkpartnern (Bild 2.7).



He/32595 © IFW

**Bild 2.7:** Verfahren zur Profilerzeugung bei Diamantschleifscheiben

Neben der Siliziumkarbid-Rolle ist das Vollcrushieren – auch Einrollen genannt – ein weiteres Verfahren mit Linienberührung zwischen den beiden Wirkpartnern Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug. Bei diesem abbildenden Verfahren kann eine diamantfreie Profilrolle aus Stahl oder Hartmetall verwendet werden, welche das Negativprofil des zu erzeugenden Schleifscheibenprofils besitzt. Die Diamant-Abrichtrolle unterscheidet sich nur durch die Belegung des Rollenprofils mit Einzeldiamanten. Aufgrund der hohen Abrasivität dieser Belegung ist dieses Abrichtwerkzeug auch für nicht sprödharte Bindungstypen einsetzbar [Howa76, SchL82]. Dieses Werkzeug wird radial zugestellt bis ein Reibschluss zwischen der Schleifscheibe und der Rolle



entsteht und diese von der Schleifscheibe angetrieben wird. Das Wirkprinzip beim Crushieren beruht auf dem Zerschneiden von Bindungsbrücken. Es wirkt eine Normalkraft zwischen den Wirkpartnern, welche bei Überschreiten eines bestimmten Niveaus zur Rissinitiierung und schließlich dem Zerschneiden von Bindungsbrücken im Schleifbelag führt. Daher ist dieses Verfahren nur bei Schleifscheiben mit spröden Bindungssystemen, wie speziellen keramischen oder Sprödbronzebindungen, einsetzbar.

Vorteile des Vollcrushierens sind vor allem der geringe Steuerungsaufwand und die kurzen Profilierzeiten. Als nachteilig erweist sich hingegen der relativ große Kontaktquerschnitt. Dieser führt zu hohen Radialkräften, die Systemauffederungen und damit Formfehler des Schleifscheibenprofils verursachen können [Alth81, Geis80, TönG79]. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass Schleifscheibe und Crushierrolle nur in einem Berührungspunkt die gleiche Umfangsgeschwindigkeit besitzen. Bei nicht-zylindrischen Profilen, welche eine radiale Ausdehnung besitzen (s. Bild 2.7, oben rechts), kommt es gerade in den Zonen mit hoher Beanspruchung aber auch hoher Anforderung an die Formgenauigkeit, wie etwa dem Profilgrund oder der Profilspitze, zu einer am Abrichter Verschleiß verursachenden Relativgeschwindigkeit [Barn85]. Aufgrund der mangelnden Flexibilität – jedes zu erzeugende Schleifscheibenprofil benötigt ein eigenes Abrichtwerkzeug – kommt dieses Verfahren nur in der Großserienproduktion ab einer gewissen zu fertigenden Mindestlosgröße zum Einsatz [Kamm91, Kirm75].

Die Diamantformrolle, die einschichtig mit Einzeldiamanten oder einer geschlossenen Diamantschicht belegt ist, bietet eine deutlich höhere Flexibilität. Mit nur einem Abrichtwerkzeug lassen sich unterschiedliche Schleifscheibenprofile mit Hilfe einer NC-Steuerung generieren. Hierbei erzeugt eine angetriebene Diamantformrolle mit einfacher Kontur das Profil der Schleifscheibe durch bahngesteuertes Verfahren der translatorischen Achsen in radialer und axialer Richtung zur Rotationsachse der Schleifscheibe [Heue92, Kamm91, Türi02]. Einschränkungen hinsichtlich der herstellbaren Profile ergeben sich nur durch den Spitzenradius sowie den Flankenwinkel der Seitenflächen der Formrolle [Stuff96, Wint03]. Für sehr komplexe Anforderungen, wie beispielsweise die Herstellung von Schneckenwerkzeugen, kann die Abrichteinheit selbst noch mit einer zusätzlichen Schwenkachse ausgerüstet sein, um den Abrichter leichter positionieren zu können. Man unterscheidet dann zwischen zwei- und dreiaxsigem NC-gesteuerten Abrichten [MeyS84, WecG81].

Ein weiterer Vorteil beim Einsatz einer Diamantformrolle sind die niedrigen Prozesskräfte beim Profilieren, bedingt durch die kleine Eingriffsbreite des Abrichtwerkzeuges. Dies verhindert eine Systemauffederung und erhöht somit die Genauigkeit des Abrichtergebnisses. Durch die, in Relation zur Schleifscheibe, relativ geringe Breite der Formrolle ergeben sich aber längere Abrichtzeiten. Bei einer geeigneten Wahl des Überdeckungsgrades, der radialen Zustellung und des Geschwindigkeitsverhältnisses kann die Schleifscheibentopographie entsprechend den Anforderungen

in einem weiten Bereich eingestellt werden [ArdM02, Sche73, Shih00]. Da die Kosten für Diamantformrollen, im Gegensatz zu Profilrollen, unabhängig von der Schleifscheibenbreite sind, bietet die Formrolle bei breiten Schleifscheibenprofilen aufgrund der geringeren Kapitalbindung für das Werkzeug deutliche Kostenvorteile. Diese Vorteile führen bei der Diamantformrolle zu einem überwiegenden Einsatz bei der Klein- und Mittelserienfertigung von Bauteilen mit hohen Genauigkeitsanforderungen [Schu96, Wend03a].

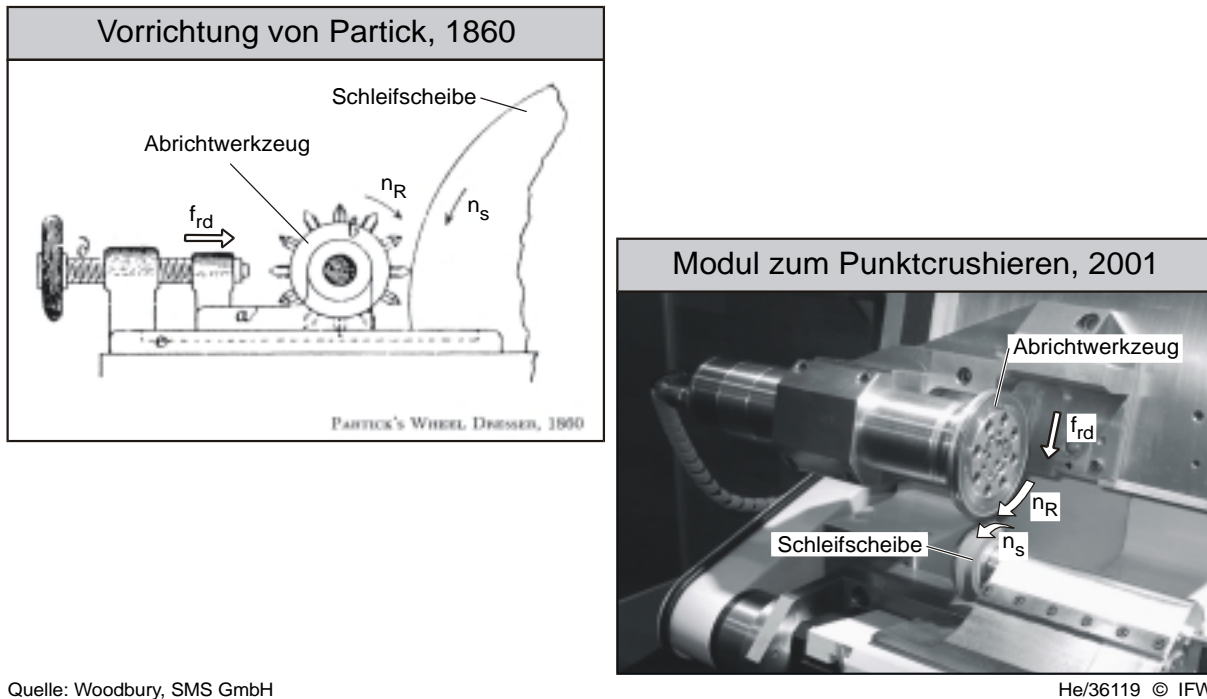
Nachteile ergeben sich beim dreiachsigen Abrichten durch den größeren Programmieraufwand und die höheren Anforderungen an die Steuerung zur Interpolation der Maschinenachsen sowie durch die Steifigkeitsverluste des Gesamtsystems aufgrund der zusätzlichen Bewegungsachse [Blei83].

### Punktcrushieren

Für Anwendungen im Werkzeug- und Profilschleifbereich mit hohen Anforderungen an die Formgenauigkeit des Schleifwerkzeuges wurde ein Verfahren zur Einsatzvorbereitung entwickelt, das die kinematischen Verhältnisse der Diamantformrolle mit dem Wirkprinzip des Crushierens kombiniert. Dieses wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht. Aufgrund der punktuellen Berührung der beiden Wirkpartner wird dieses Verfahren als Punktcrushieren bezeichnet. Real kommt es hierbei jedoch zu einer – jedoch kleinen – Flächen- und keiner reinen Punktberührung, so dass die Bezeichnung aus wissenschaftlicher Sicht nicht ganz korrekt ist. In der Praxis hat sich dieser Name jedoch bewährt, um eine eindeutige Unterscheidung vom sogenannten Vollcrushieren zu gewährleisten. Als Abrichtwerkzeug wird eine Diamantformrolle, auch als Crushierrolle bezeichnet, verwendet, deren Spitzenradius am Umfang kleiner ist als alle zu formenden konkaven Radien am Umfang der Schleifscheibe. Das Profil der Schleifscheibe wird durch einen numerisch gesteuerten Vorschub der Crushierrolle in radialer und axialer Richtung in mehreren Hüben erzeugt. Aufgrund der wirkenden Normalkräfte brechen dabei, wie beim Vollcrushieren, die Bindungsbrücken auf. Bedingt durch die punktförmige Berührung zwischen der Crushierrolle und der Schleifscheibe und das Abwälzen der beiden Wirkpartner aufeinander kann, im Unterschied zum Vollcrushieren, auch bei großen Profilhöhen eine Relativgeschwindigkeit und dadurch bedingter Verschleiß am Abrichtwerkzeug nahezu vermieden werden. Die damit auch bei längerem Einsatz gegebene gute Formhaltigkeit der Crushierrolle ermöglicht das Generieren von Schleifscheibenprofilen mit sehr hoher Formgenauigkeit und bietet das Potenzial zur Automatisierung des Abrichtprozesses [DenH02, DenK99, Kais96, TönD02, TönF00, TönF01].

Die unter anderem für das Punktcrushieren typischen Verfahrensmerkmale (Abwälzens der Wirkpartner aufeinander, punktueller Kontakt zwischen Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug) sind schon in den Anfängen der industriellen Schleif- und Abrichttechnik verwirklicht worden. Bild 2.8 zeigt im linken Teil eine von J. E. Partick 1860 in Chemnitz konzipierte Vorrichtung [Wood59]. Eine mit spitzen Stahlstiften belegte

Walze, welche jedoch über keinen eigenen Antrieb verfügt, wird mittels Schraubstock radial zu einer Sandstein-Schleifscheibe zugestellt, um diese zu schärfen. Rechts in Bild 2.8 ist zum Vergleich der Prototyp eines Moduls zum Punktcrushieren der Gesellschaft für Steuerungs-Software, Maschinenmodernisierung und Schleiftechnische Beratung mbH (SMS, Albstadt) aus dem Jahr 2001 zu sehen.



**Bild 2.8:** Einsatzvorbereitung von Schleifscheiben: Gestern und heute

### 2.3.2 Schärfen

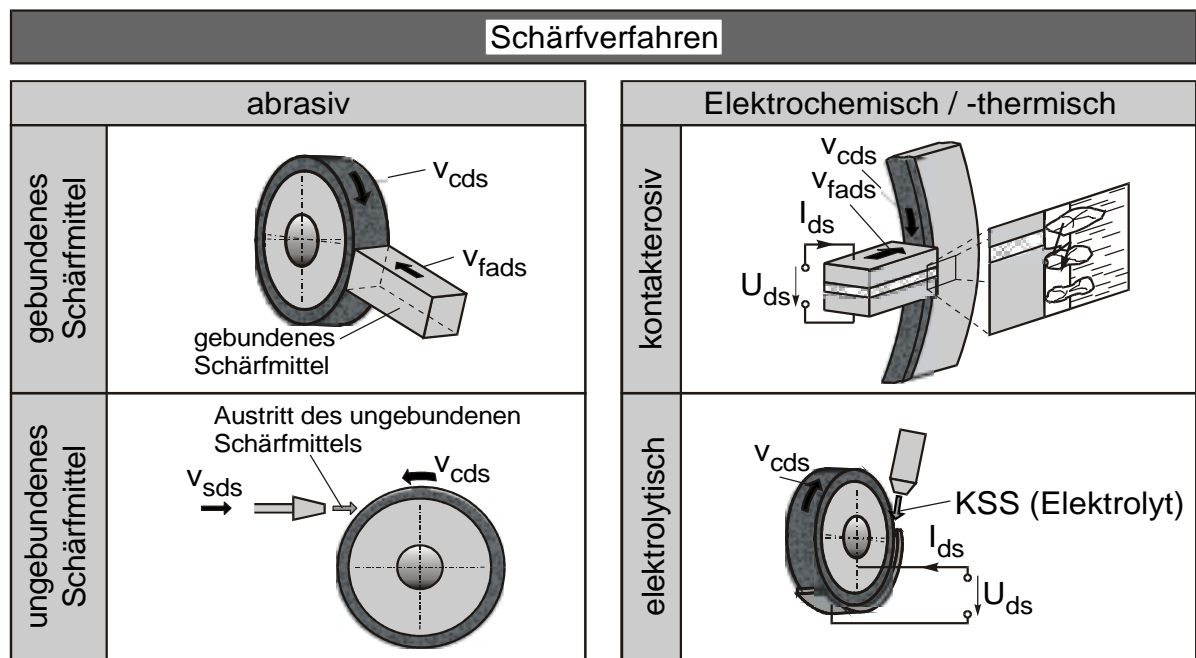
Im Schärfprozess sollen das Bindungsniveau der Schleifscheibe zurückgesetzt und Werkstückablagerungen abgetragen werden, um den Kornüberstand zu erhöhen und somit die Schärfe des Schleifbelags konstant zu halten bzw. zu steigern. Eine Veränderung des makroskopischen Profils des Schleifbelags ist dabei unerwünscht. Die Schärfverfahren können unterteilt werden in abrasive Verfahren und Verfahren, die auf der Wirkung des elektrischen Stroms basieren [Frie99] (Bild 2.9).

#### Abrasive Schärfverfahren

Das am häufigsten angewandte Verfahren zum Schärfen, das sich sowohl als In-Prozess-Verfahren als auch zur Vorbehandlung des Schleifbelags eignet, ist das abrasive Schärfen mit gebundenem Schärfmittel. Aufgrund der dabei verwendeten stabförmigen Schärfwerkzeuge aus Korund oder Siliziumkarbid in Keramik- oder Kunstharzbindung wird dieses auch als Blockschräfen bezeichnet. Dabei muss die Korngröße des Schärfmittels in der Regel auf die Größe der Körnung des Schleifbelags angepasst werden [HolS88]. Der Abtrag des Bindungsmaterials und der durch das zerspannte Werkstückmaterial bedingten Zusetzungen führt zu einem Freilegen der Schleifkörner. Dabei wird das Schärfmedium zerspannt. Die Anwendung als In-

Prozess-Schärfverfahren ermöglicht die Erzeugung und Erhaltung des notwendigen Kornüberstandes im Schleifbelag während des Prozesses. Hierdurch kann das Kraftniveau konstant gehalten und ein stationärer Prozessverlauf bei konstanter Zerspanleistung erreicht werden [Frie99].

Ein weiteres abrasives Schärfverfahren ist das sogenannte Strahlschärfen, bei dem loses Schärfmittel – in der Regel Siliziumkarbid- oder Korundkörner – mittels eines flüssigen Trägermediums mit hoher Geschwindigkeit auf die rotierende Schleifscheibe trifft. Als Trägermedium bietet sich der Kühlschmierstoff an. Beim Aufprall der Abrasivkörner auf den Schleifbelag wird das Bindungsniveau zurückgesetzt und es kann durch Splintern von Schleifkörnern zur Bildung neuer Schneiden kommen. Der Schärfzustand der Schleifscheibe wird im wesentlichen durch das verwendete Schärfmittel und dessen Menge sowie Geschwindigkeit und Wirkwinkel des Schärfstrahls beeinflusst [Salj83].



Quelle: Friemuth

He/35172 © IFW

**Bild 2.9:** Schärfverfahren für Diamantschleifscheiben

### Kontaktersives Schärfen

Das Funktionsprinzip der Kontaktersion (englisch: Electro Contact Discharge Dressing, ECDD) beruht auf der Zerspanung einer Elektrode durch eine Schleifscheibe mit elektrisch leitendem Bindungsmaterial. Durch die abgespannten Elektrodenpartikel und die gleichzeitig angelegte Elektrodenspannung kommt es zu Verzerrungen im elektrischen Feld. An den Feldverzerrungen kommt es zu Feldüberhöhungen, die Funkenentladungen ermöglichen und einen thermischen Bindungsabtrag herbeiführen [Falk98]. Neben der Elektrodenspannung ist der Schärfprozess durch das Elektrodenzeitspanvolumen und den Elektrodenstrom einstellbar. Das durch den Spaltabstand zwischen dem Bindungsmaterial und der Elektrode bestimmte und

selbstregulierende Verhalten dieses Verfahrens sorgt für einen intensiven Schärfprozess bei stumpfem Schleifbelag, wo hingegen bei großem Kornüberstand die Anzahl der Kurzschlussimpulse und damit die Bindungserosion abnimmt. Dieses Verfahren ist auch zum In-Prozess-Schärfen geeignet.

### Elektrolytisches Schärfen

Das elektrolytische Schärfen gewinnt vor allem beim Schärfen sehr feinkörniger Diamantschleifscheiben mit elektrisch leitender Bindung zunehmend an Bedeutung. Das Grundprinzip basiert auf dem anodischen Abtrag des Bindungsmaterials in einer elektrolytischen Reaktion. Beim Schärfprozess befindet sich im eingestellten Spalt zwischen der Anode (Schleifscheibe) und der Kathode ein flüssiger Elektrolyt. Über Bürsten wird dabei an die Schleifscheibe eine Gleichspannung angelegt. Das Bindungsmaterial der Schleifscheibe wird elektrochemisch abgetragen. Hierfür wird der elektrische Strom mittels Frequenzgenerator gepulst. Dieser Prozess wird bei der Anwendung zum In-Prozess-Schärfen ELID-Schleifen (Electrolytic In-Process Dressing) genannt [NakH92, Ohmo95].

### **2.3.3 Weitere Konditionierverfahren**

Neben den genannten Verfahren zum Profilieren und Schärfen von Schleifbelägen gibt es noch eine Vielzahl weiterer Prozesse zur Einsatzvorbereitung, welche aber in der industriellen Anwendung nicht so weit verbreitet sind. Diese lassen sich häufig in die in Kap. 2.3.1 bzw. 2.3.2 genannte Unterteilung einordnen. Hier sei beispielsweise der Einsatz einer Fräsabrichtrolle oder einer Topfschleifscheibe zum Profilieren genannt [Grün88, Syoi90]. Für ein exaktes Positionieren des Abrichtwerkzeuges im Nanometerbereich wurde das sogenannte Piezoabrachten entwickelt, bei dem ein Piezoaktor zur Feineinstellung der Abrichtzustellung dient [Grab88]. Daneben gibt es auch Verfahren, die nicht in die bekannte Nomenklatur passen. So kann zum Konditionieren hochharter Schleifbeläge der Materialabtrag mittels Laserbearbeitung herbeigeführt werden [Timm01].

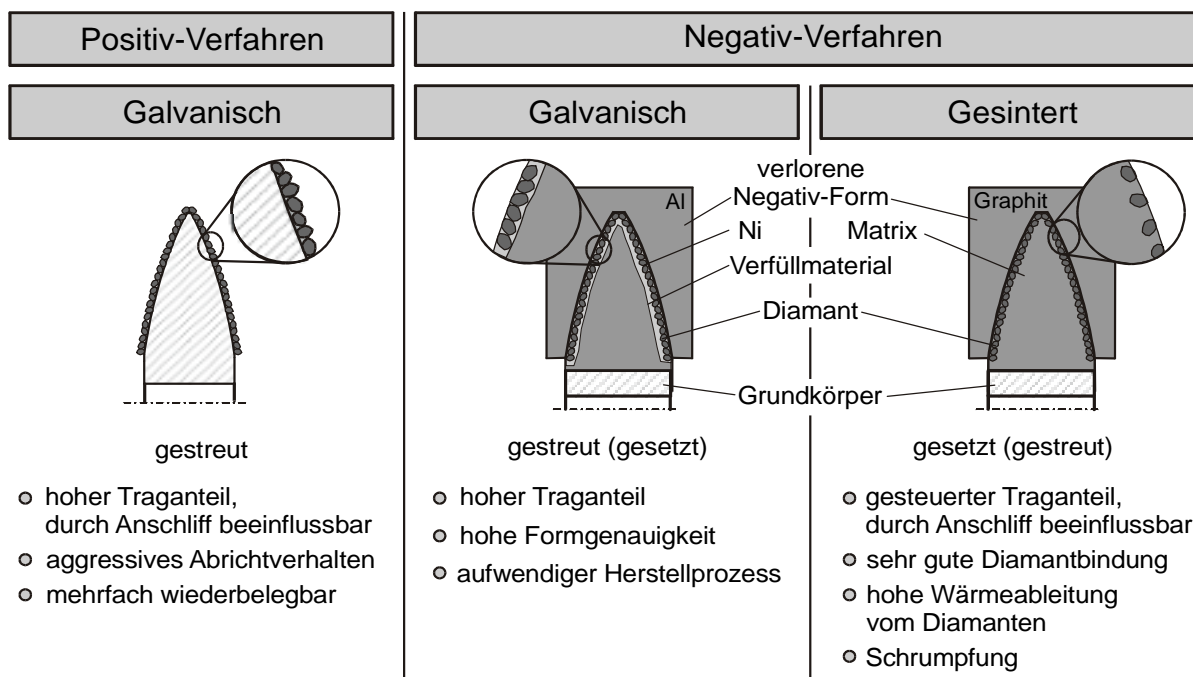
## **2.4 Aufbau und Eigenschaften von Diamantformrollen zum Abrichten**

Der Aufbau und die dadurch erzielten Eigenschaften der Diamantformrollen, welche im Abrichtprozess eingesetzt werden, können sowohl durch das Herstellverfahren als auch durch die Diamantierung beeinflusst werden. Dabei hat die Art der verwendeten Diamanten einen großen Einfluss auf die grundsätzliche Möglichkeit beim Nachschleifen der verschlissenen Abrichtwerkzeuge, aber auch die Ausbildung der Topographie.

### **2.4.1 Herstellverfahren**

An die Herstellung von Diamantformrollen werden hohe Anforderungen gestellt, da die Genauigkeit der Werkzeuge sich direkt auf die Formgenauigkeit der herzustellenden Schleifscheibenprofile überträgt.

Beim Positiv-Verfahren werden die einzelnen Diamanten galvanisch auf die Crushierrolle aufgebracht und sind über den aktiven Bereich der Rolle gestreut (Bild 2.10). Bei derart hergestellten Diamantformrollen kann der Traganteil durch den Anschliff beeinflusst werden. Der Grundkörper ist mehrfach wiederbelegbar [Kais03, Krie97].



Quelle: Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge

He/34898 © IFW

### Bild 2.10: Herstellverfahren für Diamantformrollen

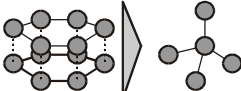
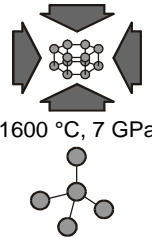
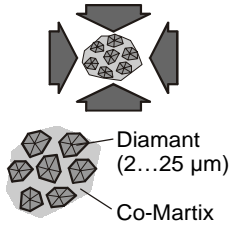
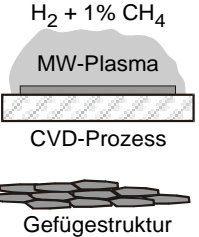




Das sogenannte Umkehr- oder Negativ-Verfahren bietet den Vorteil, dass die Diamanten sowohl gestreut als auch gesetzt aufgebracht werden können. Beim galvanischen Prozess werden Negativformen aus elektrisch leitenden Materialien, wie Metall oder Graphit, benötigt. Die so hergestellten Formrollen zeichnen sich durch einen hohen Traganteil und eine bessere Formgenauigkeit – gegenüber durch das Positiv-Verfahren hergestellten Werkzeugen – aus. Nachteilig ist aber der aufwendige Herstellungsprozess mit einer Dauer von mehreren Tagen bis Wochen, bei dem eine Nickelschicht, welche als Bindung für die einzelnen Diamanten dient, galvanisch abgeschieden wird. Der dabei entstehende Diamant-Profiling muss anschließend mit dem Grundkörper der Formrolle verbunden werden. Dies geschieht durch ein Vergießen der Zwischenräume. Danach wird die Negativform entfernt. Aufgrund der relativ geringen Prozesstemperatur beim galvanischen Abscheiden von etwa 60°C lassen sich hochgenaue Abrichtwerkzeuge herstellen, da die temperaturbedingte Ausdehnung der Materialien eine untergeordnete Rolle spielt [Kraf75, LieK01, Mink99, YegJ89].

Beim Negativ-Verfahren mittels Sinterprozess werden die einzelnen Diamanten zunächst in einer hochpräzisen Negativform, welche beim Herstellprozess letztendlich verloren geht, angeordnet. Die Anordnung kann dabei sowohl gestreut als auch definiert gesetzt erfolgen [KönS94]. Der verbleibende Raum zwischen Grundkörper

(häufig ein Stahlkern) und Diamantbelag wird mit Hartmetallpulver ausgefüllt und bei hohen Temperaturen gesintert. Auch bei diesem Herstellungsverfahren ist der Traganteil des Crusherwerkzeuges durch Anschliff der Diamanten gezielt beeinflussbar. Vorteile dieses Verfahrens liegen vor allem in der guten Einbindung der einzelnen Diamanten in den Grundkörper und der damit verbundenen hohen Fähigkeit zur Wärmeableitung. Ein Nachteil dieses Prozesses besteht darin, dass durch den Sinterprozess eine Schrumpfung der Rolle erfolgt, welche bei der Auslegung der Negativform von vornherein berücksichtigt werden muss [Graf99a, Kais03].

## 2.4.2 Diamantierung

Auch das verwendete Diamantmaterial der Formrollen bestimmt das Einsatzverhalten des Abrichtwerkzeuges. Dabei lassen sich prinzipiell die beiden Gruppen der ein- und der polykristallinen Diamanten unterscheiden (Bild 2.11).

	Einkristalliner Diamant		Polykristalliner Diamant (PKD)	
	Naturdiamant	MKD	mit Bindephase	ohne Bindephase
Entstehung bzw. Herstellung	vor ca. 4000 Jahren in 150-300 km Tiefe  Hauptvorkommen: - Südafrika - Australien	 1600 °C, 7 GPa	 Diamant (2...25 µm) Co-Martix	$H_2 + 1\% CH_4$ MW-Plasma CVD-Prozess  Gefügestruktur
Form				
Härte (Knoop)	6000 - 9000	8000 - 9000	4000 - 5500	8500 - 9000
Anwendung	Abrichtwerkzeuge	stehende Abrichter, Formrollen	Kantenverstärkung, Formrollen	Formrollen mit kleinen Radien und Winkeln

Quelle: Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge

He/34899 © IFW

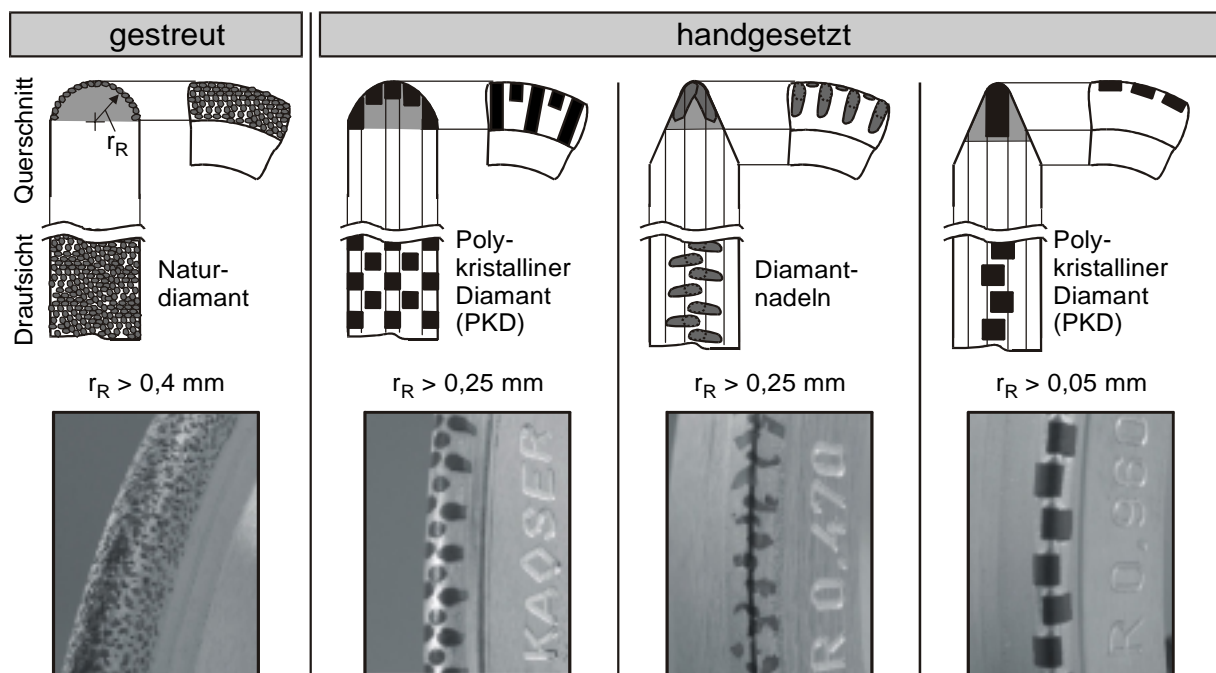
### Bild 2.11: Diamanten für technische Anwendungen

Zu den einkristallinen Diamanten zählt der Naturdiamant und der monokristalline Diamant (MKD). Naturdiamant stammt aus den Hauptabbaugebieten des afrikanischen Kontinents und Australiens und zeichnet sich durch unterschiedlichste Formen und Farben, welche hauptsächlich durch Einschlüsse im Diamanten bestimmt werden, aus. Die Härte kann relativ stark variieren. Die Menge aller synthetisch hergestellten Industriediamanten überschreitet jedoch die Menge dieses Minerals aus natürlichen Vorkommen bei weitem. Sie liegt zurzeit weltweit bei etwa 400 Millionen Karat (80 Tonnen) pro Jahr [Weis02]. Die durch weltweiten Bergbau gewonnene Menge an Diamanten betrug im Jahr 2002 nur 48,2 Millionen Karat [WebZ02].



Der MKD wird durch eine aufwendige Hochdruck-Hochtemperatur-Synthese unter der Mitwirkung metallischer Katalysatoren hergestellt und ist durch eine extreme Härte charakterisiert. Die durch einen Trennprozess mittels Laser hergestellten Stäbchen weisen eine homogene Kristallorientierung auf [BreN98]. Aufgrund der hohen Herstellungskosten wird dieser nur bei stark verschleißgefährdeten Werkzeugen, wie beispielsweise stehenden Abrichtern oder Formrollen, verwendet [Graf99a].

Die polykristallinen Diamanten (PKD) können je nach Herstellungsprozess in die Gruppen mit und ohne Bindungsphase unterteilt werden. PKD mit Bindephase besteht aus einzelnen Diamanten mit einer Größe von 2 ... 25  $\mu\text{m}$ , welche in einem Sinterprozess mit einer metallischen oder keramischen Matrix verbunden werden. PKD ohne Bindephase wird mittels Mikrowellenplasma in einem CVD-Prozess (Chemical Vapour Deposition) abgeschieden. Aufgrund der dichten Packung des Gefüges und der homogenen Struktur zeichnet sich dieser Werkstoff durch eine hohe Bruchfestigkeit aus. Durch die Möglichkeit extrem dünne Schichten abzuscheiden, eignet sich der so hergestellte Diamant vor allem für die Beschichtung von Formrollen mit kleinen Winkeln und Radien [Graf99a, LieK01, Weis02a].



Quelle: Lierse

He/36133 © IFW

**Bild 2.12:** Diamantierung von Formrollen

Neben dem Herstellprozess wird das Einsatzverhalten einer Diamantformrolle auch durch den Formrollen-Radius am Umfang charakterisiert, welche die Art der möglichen Diamantierung bestimmt (Bild 2.12). Bei Radien am Umfang der Formrolle oberhalb von  $r_R > 0,4 \text{ mm}$  ist eine gestreute Diamantierung möglich. Eine aufwendige definierte Belegung (beispielsweise durch bestimmte Setzmuster) entfällt hier, so dass der Herstellungsprozess schneller und kostengünstiger ist. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Formrollen nicht nachgeschliffen werden können, da bei einem

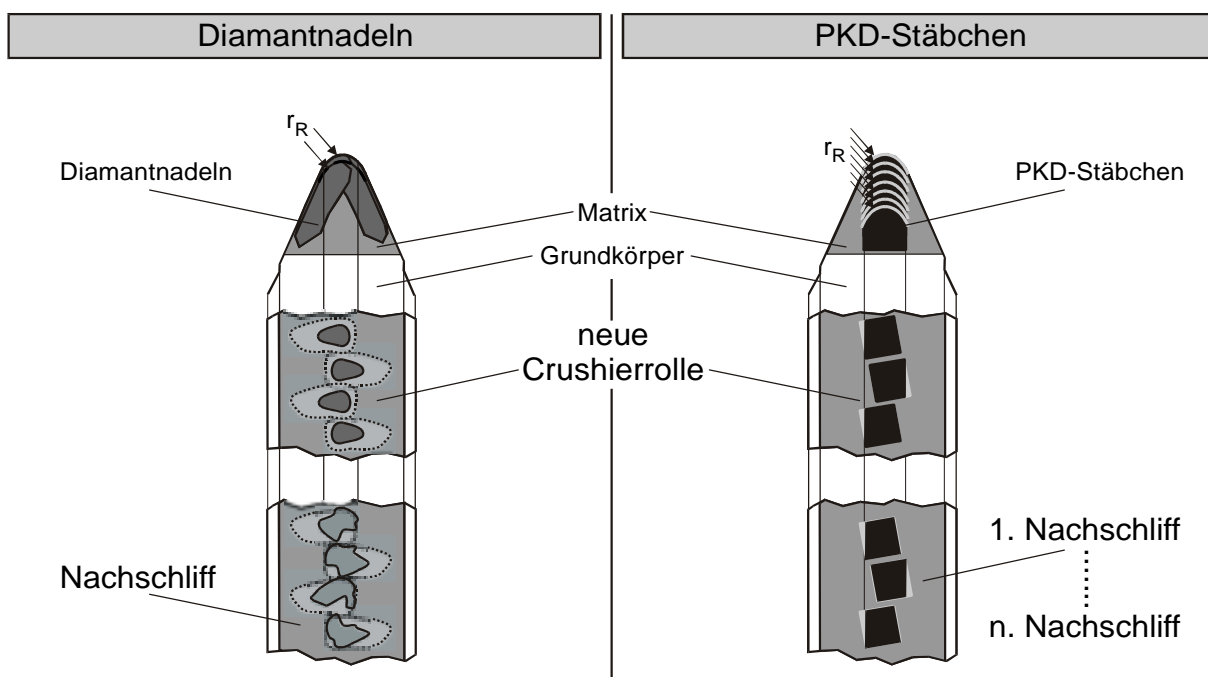


Verschleiß die einlagige Diamantierung in der Regel Fehlstellen aufweist und ein partielles Nachbelegen nicht möglich ist. Hinzu kommen geometrische Fehler durch Anflächungen an der Radiusfläche. Für kleinere Radien am Umfang der Formrolle bis zu  $r_R = 0,25$  mm werden längliche Diamanten verwendet. Zum Einsatz kommen sowohl Nadeln aus Naturdiamant als auch synthetisch hergestellte Diamantstäbchen aus mono- oder polykristallinem Diamanten.

Stäbchenförmige PKD-Diamanten können aufgrund ihrer Länge sehr gut in die Hartmetall-Matrix der Formrolle eingebunden werden und sind damit weniger anfällig gegenüber seitlicher Druckbelastung und daraus resultierendem Kornausbruch. Je nach Anwendungsfall können Größe des Formrollen-Radius sowie Setzmuster und Setzdichte der Diamanten variiert werden. Bei der Verwendung von Diamantnadeln kann die dichteste Diamantierung durch das sogenannte Reißverschluss-Verfahren erzielt werden. Die länglich geformten Diamanten liegen abwechselnd auf der linken bzw. rechten Profilflanke an und treffen im Radiusbereich der Formrolle zusammen [LieK01]. Bei Formrollen mit extrem kleinen Winkeln und Radien bis zu  $r_R = 0,05$  mm kann – neben der Beschichtung mittels CVD-Verfahren – die einreihige Belegung mit stäbchenförmigen Diamanten erfolgen.

### 2.4.3 Nachschleifen von Diamantformrollen

Die nach dem Sinterverfahren hergestellten Diamantformrollen müssen vor dem ersten Einsatz in der Regel geschliffen werden, um den exakten Radius am Umfang zu erzeugen [Mink99]. Dabei können Formgenauigkeiten im Bereich von einem Mikrometer erzeugt werden.



Quelle: Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge

He/36134 © IFW

**Bild 2.13:** Nachschleifen von Diamantformrollen

Bei geeigneter Diamantierung können diese Formrollen bei auftretendem Verschleiß mehrfach nachgeschliffen werden, ohne den Traganteil der Diamanten nennenswert zu verändern. Notwendig hierfür ist die Verwendung stäbchenförmiger Diamanten. Nachdem zunächst die Flanken nachgeschliffen werden, wird abschließend der Ausgangsradius am Umfang wieder hergestellt. Bei mit natürlichen Diamantnadeln belegten Formrollen führt das Nachschleifen aufgrund der in Längsrichtung zunehmenden Querschnittsfläche der Nadeln zu einer Erhöhung des Diamantanteils am Rollenumfang. Die homogene Form der PKD-Diamanten führt nur zu einer Reduzierung der Durchmesser der Formrolle beim Nachschleifen und verändert nicht die Eigenschaften der Oberfläche am Umfang des Abrichtwerkzeuges (Bild 2.13). Die Länge der PKD-Stäbchen von mehreren Millimetern erlaubt ein mehrfaches Nachschleifen und erhöht so die Lebensdauer des Abrichtwerkzeuges [Kais03, LieK01].

### 3 Aufgabenstellung

#### 3.1 Problemstellung

Abrichtbare Diamantschleifscheiben werden heute bei einer Vielzahl von Schleifoperationen eingesetzt. Besonders im Profil- und Werkzeugschleifbereich, bei der Bearbeitung hochharter Materialien wie Keramik oder Hartmetall, trägt der Einsatz dieses Schleifstoffs zu einer hohen Wirtschaftlichkeit der Bearbeitung bei. Eine wichtige Voraussetzung für den effizienten Einsatz von Diamantschleifscheiben ist eine geeignete Einsatzvorbereitung. Nicht anforderungsgerechte Konditionierung der Schleifwerkzeuge kann zu einem instationären Schleifprozess mit schwankenden Prozesskräften und Arbeitsergebnissen führen. Konventionelle Konditionierverfahren für Diamantschleifscheiben sind durch einen hohen Verschleiß des Abrichtwerkzeuges gekennzeichnet, wodurch hohe Kosten sowie Abweichungen bei der Formgenauigkeit des Schleifscheibenprofils entstehen. Da der Konditionierprozess zur Einsatzvorbereitung in der Regel außerhalb der Maschine stattfindet, entstehen zusätzliche Nebenzeiten sowie montagebedingte Abweichungen des Rundlaufes und der Profilgenauigkeit. Dies schränkt einen Einsatz im Präzisionsbereich, wie beispielsweise bei der Herstellung von engtolerierten Profil- und Gewindewerkzeugen, ein.

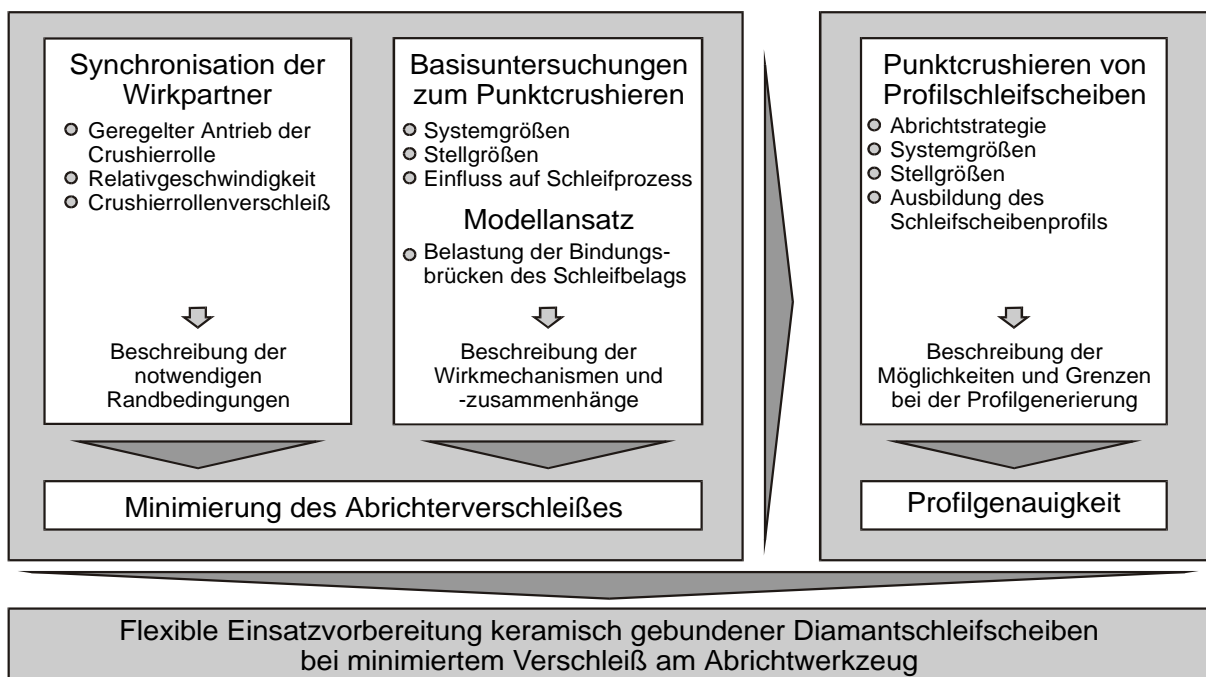
Die neu entwickelte Abrichttechnologie des Punktcrushierens kann diese Nachteile minimieren, da beim punktuellen Kontakt zwischen den beiden Wirkpartnern Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug die für den Verschleiß verantwortliche Relativgeschwindigkeit vermieden wird. Weitere Vorteile ergeben sich durch die Integration des Abrichtsystems in die Schleifmaschine und den Einsatz selbstschärfender, offenporiger Bindungssysteme für den Schleifbelag, wodurch ein dem Profilieren nachgeschalteter Schärfprozess eingespart werden kann. Die Möglichkeit der Automatisierung und die hohe Flexibilität in der Formgebung erschließen neue Anwendungsfelder.

Trotz des großen Potenzials dieses Verfahrens hat sich das Punktcrushieren in der industriellen Praxis nicht nennenswert verbreitet. Die bislang verfügbaren Systeme zum Punktcrushieren, bei denen kein Antrieb und keine Regelung der Drehfrequenz der Crushierrolle erfolgt, bieten keine ausreichende Synchronisationsgüte der Umfangsgeschwindigkeiten der beiden Wirkpartner. Der so durch den Schlupf und die Reibkräfte auftretende Verschleiß am Abrichtwerkzeug schränkt die Form- und Wiederholgenauigkeit bei der Profilerzeugung ein und erfordert ein häufiges und kostenintensives Nachschleifen der Crushierrolle. Eine Automatisierung des Konditionierprozesses ist aus diesen Gründen nicht möglich. Eine weitere Ursache für die mangelnde Verbreitung dieses Verfahrens ist in den nicht hinreichenden Kenntnissen über die Wirkmechanismen zu sehen. So fehlen grundlegende Erkenntnisse über den Einfluss der Stell- und Systemgrößen beim Punktcrushieren auf das erzeugte Profil und die Topographie des Schleifbelags. Für einen effektiven Einsatz

des Punktcrushierens ist aber eine genaue Abstimmung von Crushierwerkzeug, Schleifscheibenspezifikation und Stellgrößen des Abrichtprozesses auf den jeweiligen Einsatzfall erforderlich.

### 3.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aus der aufgezeigten Problemstellung resultiert die nachfolgend beschriebene und in Bild 3.1 zusammenfassend dargestellte Zielsetzung und Vorgehensweise. Die Vermeidung von Schlupf beim Erstkontakt sowie einer Relativgeschwindigkeit im Berührungspunkt von Schleifscheibe und Crushierrolle beim Abrichten ist eine wesentliche Voraussetzung zur Minimierung des Abrichterverschleißes. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein System zum Antrieb und zur Regelung der Drehfrequenz der Crushierrolle aufgebaut. Der Einfluss der Synchronisationsgüte auf die Relativgeschwindigkeit sowie den Abrichterverschleiß wird untersucht und analysiert. Der Vergleich mit konventionellen, unregelmäßigen Antriebskonzepten für das Abrichtwerkzeug soll hierfür eine Basis bilden.



He/33506 © IFW

**Bild 3.1:** Zielsetzung und Vorgehensweise

Eine weitere wesentliche Aufgabe dieser Arbeit ist die Erarbeitung des grundlegenden Verständnisses über die prozessbestimmenden Wirkzusammenhänge beim Punktcrushieren. Hierzu gehören die Kenntnisse über den Einfluss der Stell- und Systemgrößen auf das Abrichtergebnis und den Crushierrollenverschleiß, welche die Basis für eine anforderungsgerechte Auslegung der Einsatzvorbereitung der Schleifscheiben bilden. Neben der Crushierrolle bildet dabei die Schleifscheibe eine weitere wesentliche Systemgröße. Der Einfluss der Spezifikation des Schleifbelags hinsichtlich Korngröße und -art sowie Bindungssystem auf die Ausbildung der Schleifschei-

bentopographie und das Verschleißverhalten der eingesetzten Crushierrollen wird daher eingehend untersucht. Anschließende Untersuchungen zum Einsatzverhalten punktcrushierter Diamantschleifscheiben sollen sowohl den Einfluss der Schleifscheibenspezifikation als auch den der Stellgrößen beim Punktcrushieren auf das Schleifergebnis analysieren.

Mit Hilfe eines Modellansatzes soll die Belastung der Bindungsstruktur der Schleifscheibe beim Punktcrushieren ermittelt werden. Hierfür ist eine theoretische Betrachtung zum Aufbau des Schleifscheibenbelags und der Belastung der keramischen Bindungsbrücken notwendig. Dies kann das Verständnis der Wirkmechanismen vertiefen und bei der Auswahl geeigneter Schleifwerkzeuge genutzt werden, um einen schädigungsarmen Abrichtprozess mit definiertem und möglichst geringem Abtrag am Schleifbelag zu ermöglichen.

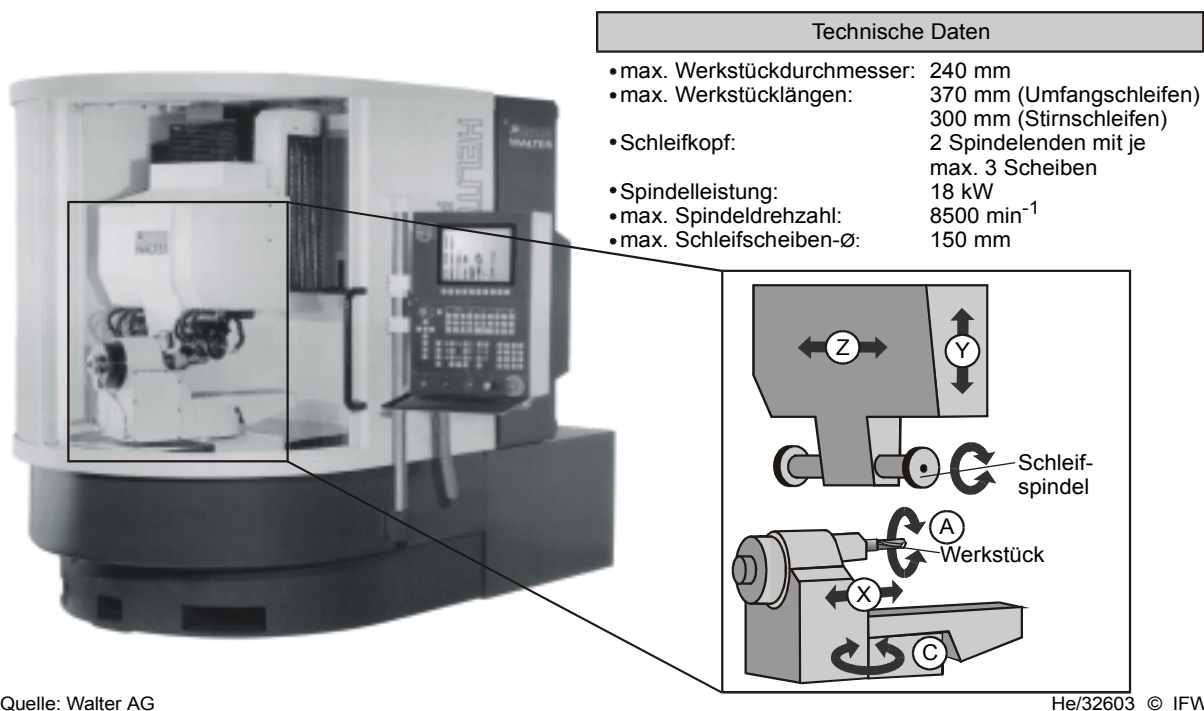
Hierauf aufbauend soll die Eignung des Punktcrushierens für die Einsatzvorbereitung von Profilschleifscheiben an Beispielgeometrien untersucht werden. Dabei sind Möglichkeiten und Grenzen bei den zu erzeugenden Profilen zu bewerten.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in Empfehlungen für den praktischen Einsatz des Punktcrushierens zum Abrichten von Diamantschleifscheiben mit einfließen.

## 4 Versuchs- und Messtechnik

### 4.1 Versuchsmaschine

Die Untersuchungen zum Punktcrushieren und zum Einsatz der keramisch gebundenen Diamantschleifscheiben werden auf einer Werkzeugschleifmaschine vom Typ „Helitronic Power“ der Firma Walter AG (Tübingen) durchgeführt. Bei der Portalbauweise befinden sich zwei translatorische Achsen auf der Werkzeugseite mit der Schleifspindel (Spindelkasten). Zwei rotatorische Achsen und die dritte translatorische Achse sind werkstückseitig angeordnet. Die Schleifmaschine eignet sich sowohl zur Produktion als auch zum Nachschleifen komplexer rotationssymmetrischer Werkzeuge in einer Aufspannung. Die Maschine verfügt über eine Steuerung vom Typ „HMC 500“ der Firma Andron (Wasserburg), bei der sich mittels grafischer Bedien-Oberfläche einzelne, werkzeugspezifische Programmpakete (Bohrer, Fräser, Reibahlen, etc.) abrufen und parametrisieren lassen. Zusätzliche Softwaretools ermöglichen die flexible Programmierung auf Basis des NC-Satzes nach ISO 6983 und eine Simulation des Schleifprozesses zur Überprüfung der programmierten Werkzeuggeometrie und zur Kollisionskontrolle [ISO6983]. Die wesentlichen technischen Daten der Versuchsmaschine sind in Bild 4.1 zusammengefasst.



Quelle: Walter AG

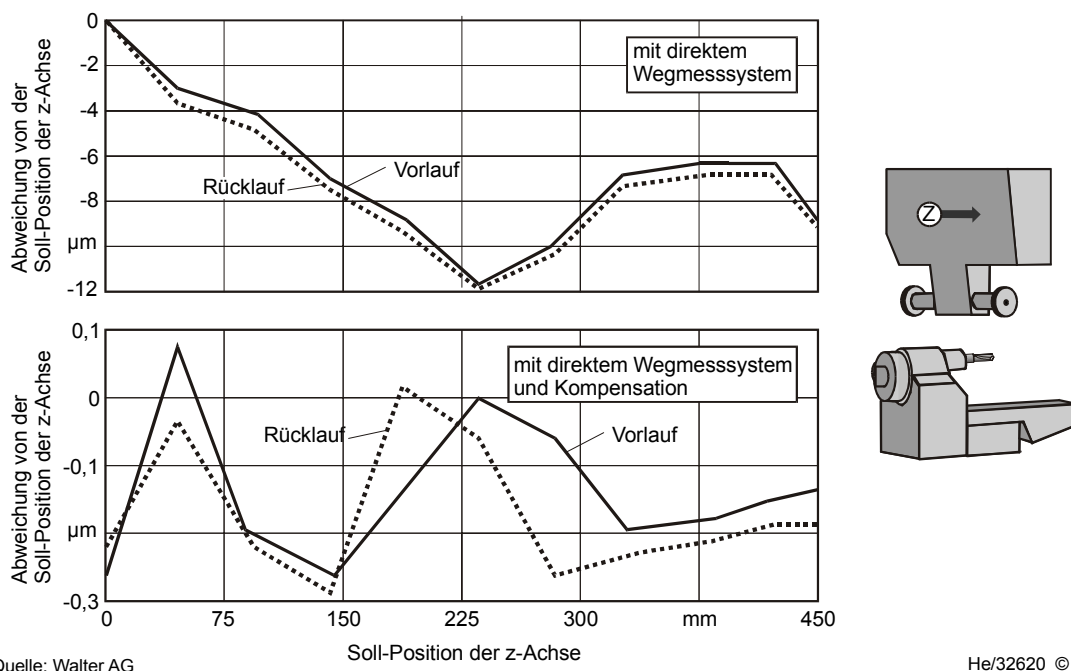
He/32603 © IFW

**Bild 4.1:** Werkzeugschleifmaschine „Helitronic Power“ der Walter AG

Um den Anforderungen beim Punktcrushieren gerecht zu werden und um die Möglichkeit der Prozessanalyse zu schaffen, wurden – in Zusammenarbeit mit dem Werkzeugmaschinenhersteller – an der verwendeten Versuchsmaschine verschiedene Modifikationen gegenüber der Serienmaschine vorgenommen.

Beim Punktcrushieren wird mit minimalen Zustellungen im Mikrometerbereich gearbeitet. Dies erfordert eine präzise und wiederholgenaue Zustellung. Daher sind die translatorischen Achsen zusätzlich mit einem direkten linearen Wegmesssystem ausgestattet. Dieses System ist im Vergleich zu indirekten Wegmesssystemen zwar mit höheren Kosten verbunden, kann jedoch die Genauigkeit der Verfahrbewegung erheblich verbessern [Töns95a].

Die gekapselten Glasmaßstäbe besitzen bei einer Strichteilung von  $20\ \mu\text{m}$ , welche mit dem Verfahren der Durchlichtabtastung erfasst wird, eine Genauigkeit von  $\pm 5\ \mu\text{m}$ . Durch Impulsvervielfachung in der Steuerungseinheit, externe Messung der Achsfehler (Vergleich der Direktmessung mit dem Motordrehgeber) sowie inverse Fehleraufschaltung (Kompensation) lässt sich so eine theoretische Auflösung von  $0,039\ \mu\text{m}$  erreichen. Aufgrund von Geradheits- und Parallelitätsfehlern in den Führungsbahnen ist die real erreichte Genauigkeit jedoch geringer. Bild 4.2 zeigt die Verbesserung der Genauigkeit der Verfahrbewegung am Beispiel der z-Achse. Während bei der direkten Wegmessung die Abweichung von der Soll-Position der z-Achse bis zu  $12\ \mu\text{m}$  betragen kann, wird durch die zusätzliche Kompensation der Messsignale die Abweichung auf maximal  $0,3\ \mu\text{m}$  reduziert.



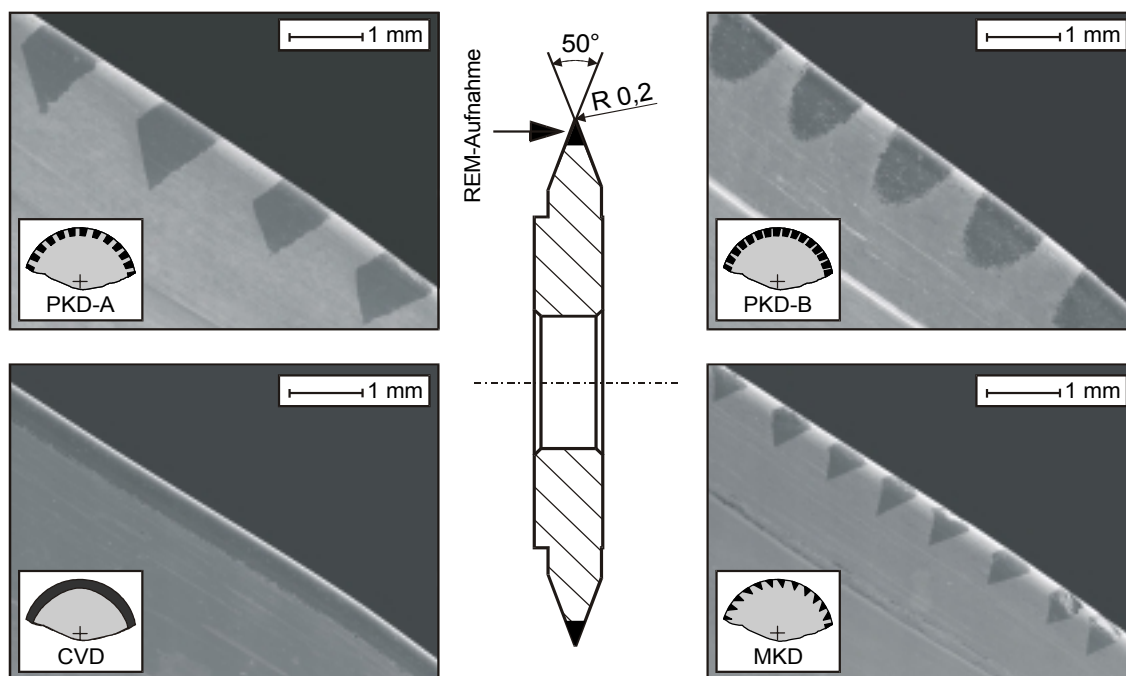
**Bild 4.2:** Verbesserung der Positioniergenauigkeit durch direkte Wegmessung mit Linearmaßstäben und Fehlerkompensation am Beispiel der z-Achse

Unterhalb des Werkstückträgers wurde eine piezoelektrische Sensorik zur Kraftmessung installiert. Diese ermöglicht es sowohl beim Punktcrushieren als auch beim Schleifen die auftretenden Prozesskräfte zu erfassen (detaillierte Beschreibung: siehe Kap. 4.6.1).

## 4.2 Systeme zum Punktcrushieren

### 4.2.1 Crushierrollen

Eine Übersicht über den Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit als Abrichtwerkzeuge eingesetzten Crushierrollen und die Spezifikationen der hierfür verwendeten Diamanten ist in Bild 4.3 gegeben. Hierbei handelt es sich um diamantbesetzte Formrollen der Firma Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge (Celle). Sämtliche Rollen besitzen einen Durchmesser von  $d_R = 100 \text{ mm}$  sowie ein V-förmiges Profil am Umfang mit einem Flankenwinkel von  $50^\circ$  und einem Spitzenradius von  $r_R = 0,2 \text{ mm}$ . Dies stellt bei Schleifscheibenprofilen mit steilen Flanken und größerer Profiltiefe eine punktuelle Berührung zwischen den beiden Wirkpartnern beim Abrichten sicher.



He/34890 © IFW

**Bild 4.3:** Spezifikationen der eingesetzten Crushierrollen

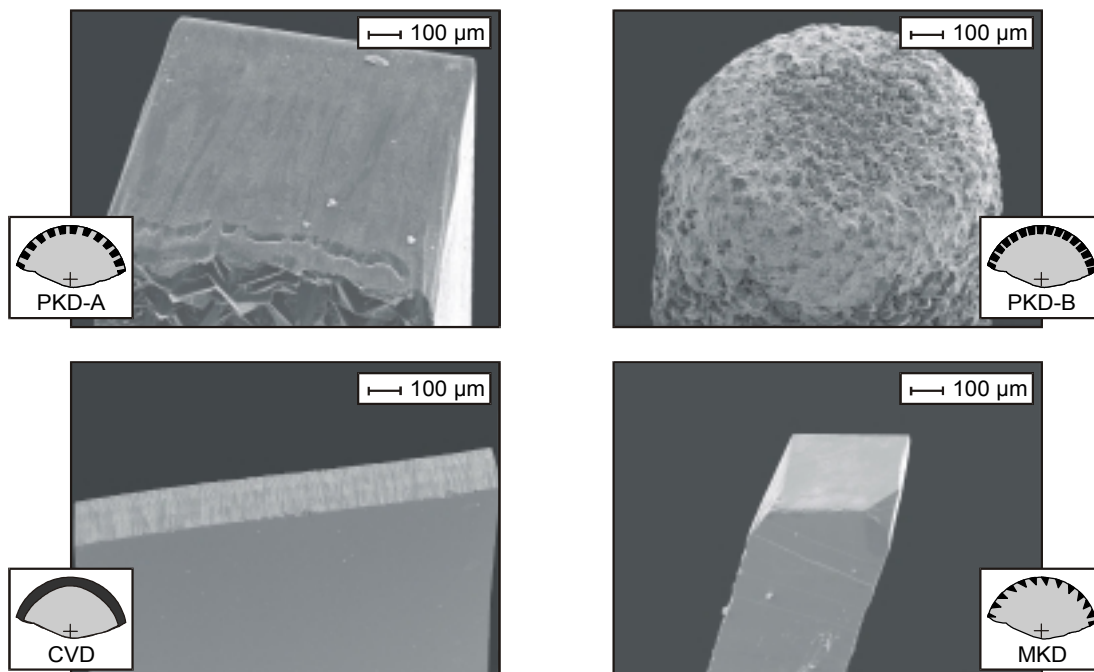
Die als PKD-A bezeichnete Crushierrolle besitzt eine gesinterte Diamantierung. Verwendet wird Quadermaterial aus Diamanten der Abmessung  $0,8 \text{ mm} \times 0,8 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , welches im CVD-Verfahren hergestellt und durch Laserschneiden vereinzelt wird.

Das als PKD-B bezeichnete Abrichtwerkzeug ist mit einzelnen, runden Diamantstäbchen, welche im Sinterverfahren hergestellt werden, belegt. Die metallische Bindephase (etwa 5 % Co-Anteil) wird im Herstellprozess herausgeätzt, wodurch eine auch als „Diamantschwamm“ bezeichnete Struktur entsteht. Die so hergestellten polykristallinen Diamanten sind von geringerer Härte als nach dem CVD-Verfahren hergestellte PKDs.



Die als CVD bezeichnete Crushierrolle ist mit einem kompletten Diamantring belegt. Die aus polykristallinem Diamant bestehende Schicht mit einer Dicke von 0,5 mm wird im CVD-Verfahren auf den Hartmetallgrundkörper aufgebracht. Die durch Dotierung im Material enthaltenen frei beweglichen Elektronen machen das Material elektrisch leitfähig und ermöglichen damit das Erodieren als Bearbeitungsverfahren. Die gesamte Oberfläche der Rolle, welche in Kontakt mit der Schleifscheibe tritt, besteht bei diesem Abrichtwerkzeug aus reinem Diamant ohne jegliches Bindemittel.

Die als MKD bezeichnete Diamantformrolle ist mit einzelnen monokristallinen Diamanten belegt. Das verwendete stäbchenförmige Material hat im Rohzustand etwa eine Abmessung von 0,4 mm x 0,4 mm x 2,5 mm. Eine Übersicht der eingesetzten Diamantmaterialien zeigt Bild 4.4.



He/35881 © IFW

**Bild 4.4:** Für die Herstellung der Crushierrollen verwendetes Diamantmaterial

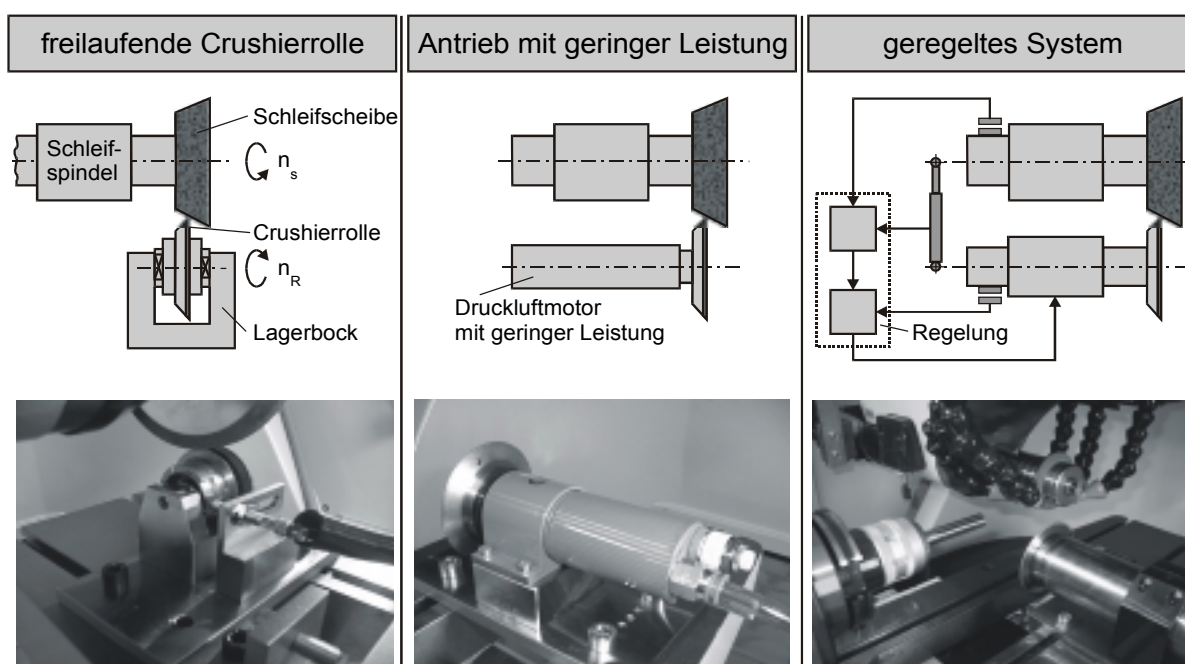
Die Präzision der Crushierrollen wird durch eine hochgenaue Fertigung und feinvuchten der Rollen gewährleistet. So lassen sich Radientoleranzen von  $\pm 2 \mu\text{m}$  und Formtoleranzen sowie Rund- und Planlauf toleranzen von  $\pm 1 \mu\text{m}$  erreichen. Die Innenbohrung der Crushierrolle ist mit einer Passung H3 und die aufnehmende Spindel mit einer Passung h2 versehen.

#### 4.2.2 Antriebskonzepte für die Crushierrolle

Für die Untersuchungen wurden insgesamt drei mögliche Antriebskonzepte für die Crushierrolle realisiert (Bild 4.5). Der einfachste Aufbau besteht aus einem Lagerbock und einer wälzgelagerten, freilaufenden Crushierrolle, welche über keinen eigenen Antrieb verfügt. Dabei muss die Lagerung so konzipiert sein, dass sie den beiden gegensätzlichen Forderungen nach möglichst spiel- und reibungsarmer Dreh-

bewegung der Crushierrolle bei gleichzeitiger Steifigkeit und Präzision gerecht wird. Bei Kontakt der beiden Wirkpartner Schleifscheibe und Abrichtwerkzeug wird die Crushierrolle durch die auftretenden Reibkräfte beschleunigt und von der Schleifscheibe während des Abrichtvorgangs angetrieben.

Zur Vermeidung des beim Erstkontakt auftretenden Schlupfes, welcher zu Verschleiß am Abrichtwerkzeug führt, bietet sich ein Eigenantrieb der Crushierrolle an. Dieser ermöglicht eine annähernde Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten vor dem Beginn des Abrichtprozesses. Der Antrieb bei diesem Konzept erfolgt durch einen Druckluftmotor. Neben dem Vorteil, dass dadurch keine zusätzlichen elektrischen Komponenten in den Bearbeitungsraum der Schleifmaschine eingebracht und gegenüber dem Kühlschmierstoff gekapselt werden müssen, zeichnet sich dieser Antrieb durch ein äußerst geringes Motordrehmoment von  $M_t < 0,4 \text{ Nm}$  im gesamten Drehfrequenzbereich und geringe Abmessungen der Spindel aus. Mit Hilfe einer vorgeschalteten Drossel kann die Drehfrequenz des Abrichtwerkzeuges vorgewählt werden. Aufgrund des geringen Antriebsmoments wird die Crushierrolle nach dem Erstkontakt von der Schleifscheibe angetrieben.



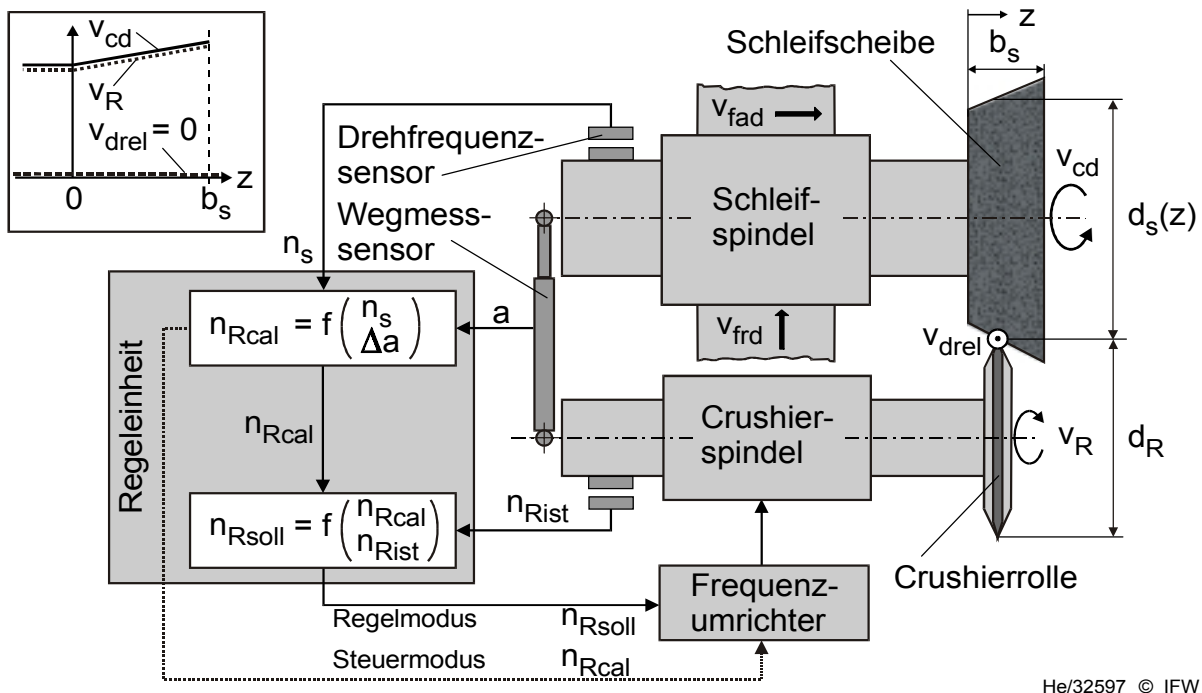
He/31809 © IFW

**Bild 4.5:** Realisierte Antriebskonzepte für das Punktcrushieren

Um eine vollständige Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten im Berührungspunkt von Crushierrolle und Schleifscheibe zu erreichen und somit den Verschleiß am Abrichtwerkzeug weitgehend zu minimieren, sind ein Antrieb der Crushierrolle sowie eine Drehfrequenzregelung erforderlich. Das im Rahmen dieser Arbeit realisierte System ist in Bild 4.6 schematisch dargestellt.

Die Regeleinheit vom Typ „PCC-Crush“ wurde von der Firma Dr. Zinngrebe GmbH (Ulm) entwickelt. Sie erfasst die Drehfrequenz der Schleifspindel  $n_s$  und der Crus-

hierspindel  $n_{Rist}$  sowie die Änderung des Achsabstandes  $\Delta a$  zwischen den Wirkpartnern Schleifscheibe und Crusherrolle. Über eine serielle Schnittstelle kann diese mit dem Frequenzumrichter der Crusherspindel kommunizieren. Alle 10 ms (100 Hz) wird der Abrichtspindel eine neue Soll-Drehfrequenz  $n_{Rsoll}$  vorgegeben. Die Drehfrequenz lässt sich im Bereich  $n_R = 1500 \dots 10000 \text{ min}^{-1}$  mit einer Genauigkeit von  $10 \text{ min}^{-1}$  einstellen.



He/32597 © IFW

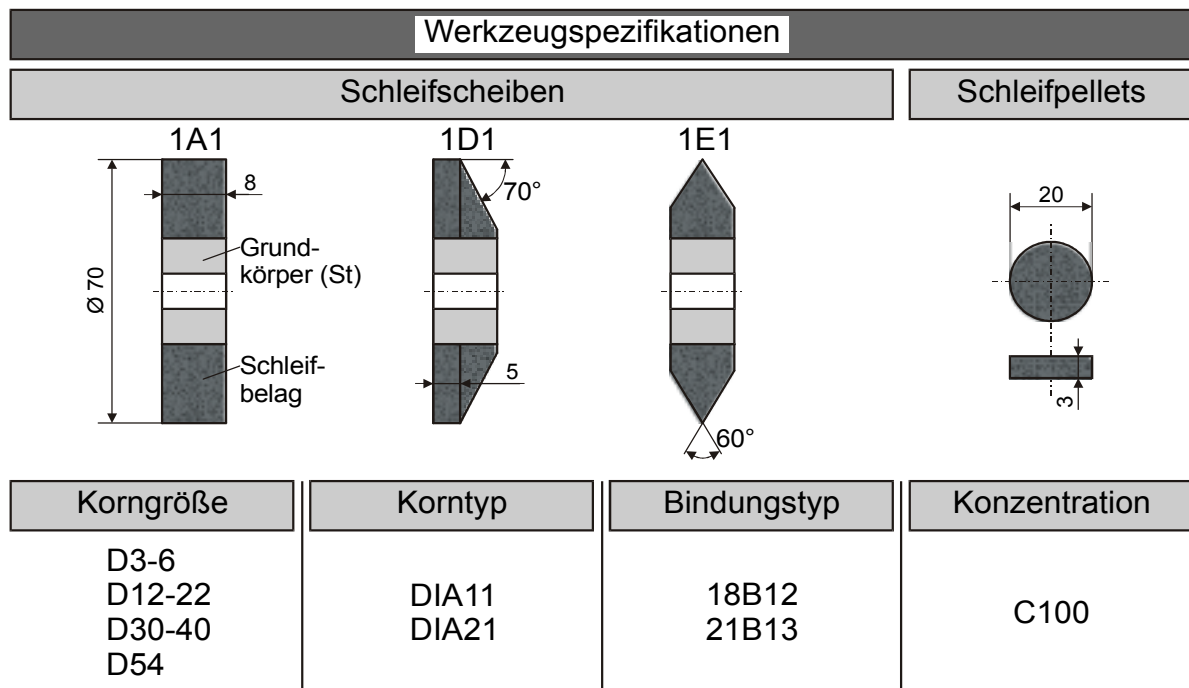
**Bild 4.6:** Drehfrequenzregelung für das Punktcrushieren

Ein Betrieb der Regeleinheit ist in zwei Modi möglich. Dabei wird vorausgesetzt, dass am Abrichtwerkzeug kein oder ein vernachlässigbar kleiner Verschleiß auftritt. Im Steuermodus wird in Abhängigkeit von der Drehfrequenz der Schleifscheibe sowie den Durchmessern der Crusherrolle und der Schleifscheibe eine berechnete Soll-Drehfrequenz  $n_{Rcal}$  für das Abrichtwerkzeug, welche im Berührungspunkt der Wirkpartner zu einer Relativgeschwindigkeit  $v_{drel} = 0 \text{ m/s}$  führt, direkt vorgegeben. Im Regelmodus wird zusätzlich die Ist-Drehfrequenz der Crusherrolle  $n_{Rist}$  überwacht und nachgeregelt. Dies ermöglicht insbesondere bei einem schnellen radialen Verfahren der Zustellachse entlang einer Schleifscheibenkontur eine bessere Anpassung der notwendigen Drehfrequenz des Abrichters  $n_{Rsoll}$  und erhöht so die Flexibilität bei den zu erzeugenden Schleifscheibenprofilen. Der in die Hochfrequenzspindel des Abrichters integrierte Acoustic-Emission-Sensor (AE-Sensor) erlaubt das prozesssichere Erkennen des Erstkontaktes der Wirkpartner und die Überwachung des Kontaktes zwischen Schleifscheibe und Crusherrolle beim Verfahren entlang einer vorgegebenen Kontur. Aufgrund der punktuellen Berührung beim Abrichten und der damit verbundenen geringen Reibungskräfte sowie Wärmebildung kann vor allem bei der Ermittlung des Erstkontaktes zwischen den Wirkpartnern mittels des AE-

Sensors auf den Einsatz von Kühlschmierstoff verzichtet werden. Der Verzicht auf Kühlschmierstoff im Prozess verringert die Störeinflüsse und erleichtert eine Ansnitterkennung [Karp01]. Eine Aufzeichnung und Auswertung der Achsabstandsänderung  $\Delta a$  und der Relativgeschwindigkeit  $v_{\text{drel}}$  erfolgt über eine zweite Schnittstelle an der Regeleinheit. Durch die modulare Bauweise des geregelten Crushiersystems und die Erfassung aller notwendigen Messwerte durch eigene Sensoren ist ein Eingriff in die Maschinensteuerung nicht notwendig, so dass das System prinzipiell völlig autark in jeder Schleifmaschine eingesetzt werden kann.

### 4.3 Keramisch gebundene Diamantschleifscheiben

Bei den Untersuchungen werden keramisch gebundene Diamantschleifscheiben der Firma Diamant-Werkzeuge Hameln GmbH eingesetzt. Alle eingesetzten Schleifscheiben haben einen Außendurchmesser von  $d_s = 70$  mm und besitzen einen Grundkörper aus Stahl. Für die Untersuchungen stehen unterschiedlich vorprofilierte Umfangsschleifscheiben der Formen 1A1, 1D1 und 1E1 zur Verfügung (Bezeichnungen nach FEPA, [FEPA64]). Die grundlegende Charakterisierung der Schleifbeläge durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des Bruchgefüges wird an Schleifpellets, welche in ihrer Spezifikation mit denen der Schleifscheibenbeläge identisch sind, durchgeführt. Eine Übersicht der eingesetzten Werkzeugspezifikationen gibt Bild 4.7.



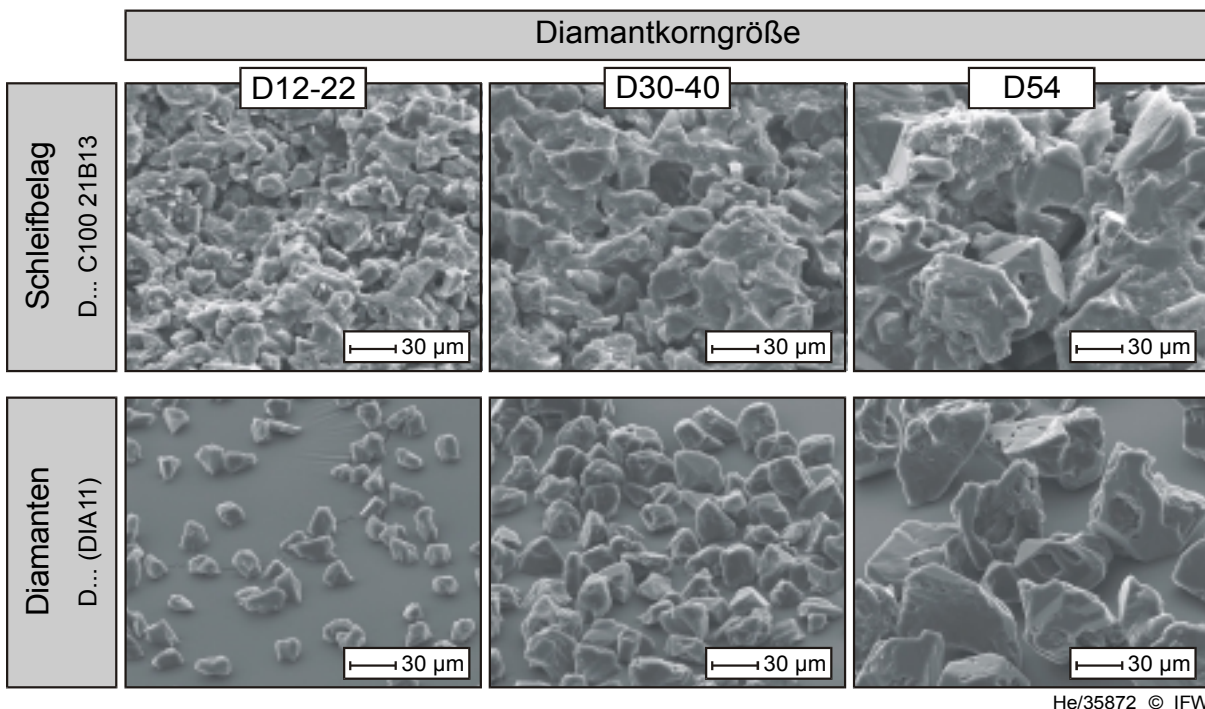
He/35873 © IFW

**Bild 4.7:** Eingesetzte Werkzeugspezifikationen

Neben den unterschiedlichen Diamantkorngrößen kommen Werkzeuge mit jeweils zwei verschiedenen Korn- und Bindungsspezifikationen zum Einsatz. Der Korntyp DIA11 bezeichnet ein Korn, welches durch eine unregelmäßige und blockige Kristall-

form bei mittlerer Kornfestigkeit charakterisiert ist und eine Brüchigkeit entlang innerer Unterkorngrenzen besitzt. Der Korntyp DIA21 besitzt eine unregelmäßige und splittrige Kristallform mit einer durch interne Einschlüsse und Strukturen bedingten relativ hohen Brüchigkeit, welche die Neubildung von Schneiden und damit einen Selbstschärfefeekt unterstützen soll. Die Festigkeit dieses Korntyps ist höher als die von DIA11. Sofern nicht explizit erwähnt, wird ausschließlich der Korntyp DIA11 bei den eingesetzten Schleifscheiben verwendet.

Die beiden eingesetzten Bindungsvarianten unterscheiden sich in der Härte bzw. Verschleißfestigkeit. Die keramische Bindung vom Typ 21B13 weist nach Herstellerangabe im Vergleich zur Bindung 18B12 einen höheren Verschleißwiderstand auf. Bild 4.8 zeigt im oberen Teil REM-Aufnahmen des Bruchgefüges der Schleifbeläge mit unterschiedlicher Korngröße (jeweils Korntyp DIA11 und Bindungstyp 21B13). Im unteren Teil von Bild 4.8 sind Aufnahmen der verwendeten Diamantkörner zu sehen.



**Bild 4.8:** Bruchgefüge der Schleifbeläge und eingesetzte Diamantkorngrößen

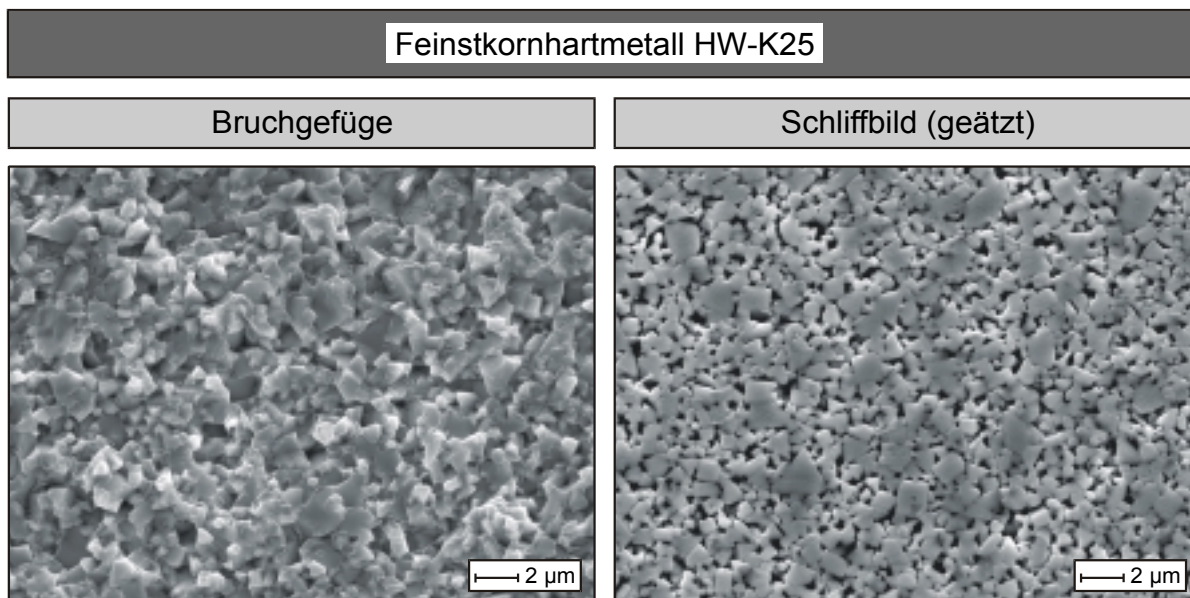
#### 4.4 Versuchswerkstoff

Bei den Untersuchungen zum Verschleißverhalten der Schleifscheiben beim Profil- und Tiefschleifen kommt ein Feinstkornhartmetall (Submikrokornsorte) der Anwendungsgruppe K25 nach ISO 513 [ISO513] zum Einsatz (Tabelle 1, Angaben nach DIN [DIN3327, DIN3369, DIN 3878]). Dieser pulvermetallurgisch hergestellte Verbundwerkstoff, welcher hauptsächlich aus Wolframkarbid in einer Bindephase aus Kobalt besteht, entsteht durch Sintern bei Temperaturen von bis zu 1500 °C.



**Tabelle 1:** Technische Daten des eingesetzten Feinstkornhartmetalls

Eigenschaft	Symbol	Einheit	Hartmetall HW-K25
Dichte	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	14,45
chemische Zusammensetzung:			
- Wolframkarbid (WC)	-	mass-%	89,5
- Cobalt (Co)	-	mass-%	10,0
- Zusatzkarbide (TiC + TaC+ NbC)	-	mass-%	0,5
mittlere Korngröße	$d_K$	$\mu\text{m}$	~ 0,8
Härte	HV 30	-	1600
Biegebruchfestigkeit	$\sigma_{4bB}$	MPa	4300
Druckfestigkeit	$\sigma_{bB}$	MPa	6250
E-Modul	E	GPa	600
Bruchzähigkeit	$K_{Ic}$	MPam <sup>0,5</sup>	9,7
Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_{th}$	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	6,2
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_W$	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	6



He/33529 © IFW

**Bild 4.9:** Bruchgefüge und Schliffbild des eingesetzten Feinstkornhartmetalls

Ferner enthält der Werkstoff verschiedene Zusatzkarbide als Hartstoffphase. Dieser Werkstoff kann unter anderem in Form von geschliffenen Rundstäben bezogen werden und wird bevorzugt zur Herstellung von unbeschichteten und beschichteten Vollhartmetallwerkzeugen für die Zerspanung von kurzspanenden Eisenwerkstoffen

eingesetzt. Die Feinkörnigkeit beeinflusst, neben dem Kobaltgehalt, wesentlich die Härte, Biegefestigkeit und Wärmeleitfähigkeit des Hartmetalls [Chri01, Drey00, GreK83]. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Bruchgefüges sowie die geschliffene und geätzte Oberfläche des Versuchswerkstoffes belegen die feinkörnige Struktur des eingesetzten Hartmetalls (Bild 4.9).

#### 4.5 Kühlschmierstoff

Bei den durchgeführten Untersuchungen zum Punktcrushieren und Schleifen kommt als Kühlschmierstoff ein synthetisches Metallbearbeitungsöl auf Basis von hydriertem Mineralöl mit polaren Hochdruck-Zusätzen der Firma Shell Macron GmbH (Dortmund) mit der Bezeichnung 2429 S-8 zum Einsatz. Die Zuführung erfolgt über Gliederschläuche mit kreisrundem Querschnitt. Druck und Volumenstrom werden während der gesamten Versuchsdurchführung nicht variiert, um eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch die Kühlschmierstoffzuführung zu vermeiden. Beim Punktcrushieren dient der Kühlschmierstoff vorrangig dazu die abgetragenen Partikel des Schleifbelages herauszuspülen sowie die Reibung zwischen den Wirkpartnern zu reduzieren. Die technischen Daten des eingesetzten Kühlschmierstoffes sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Technische Daten des eingesetzten Kühlschmierstoffes

Eigenschaft	Symbol	Einheit	Shell Macron 2429 S-8
Dichte (bei 20°C)	$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	0,815
kinem. Viskosität (bei 40°C)	$\nu$	mm <sup>2</sup> /s	7,5
Flammpunkt	$T_F$	°C	165
Kuschmierstoffdruck	$p_{KSS}$	bar	6
Volumenstrom	$q_{KSS}$	l/min	120
Schaumverhalten	-	-	gering

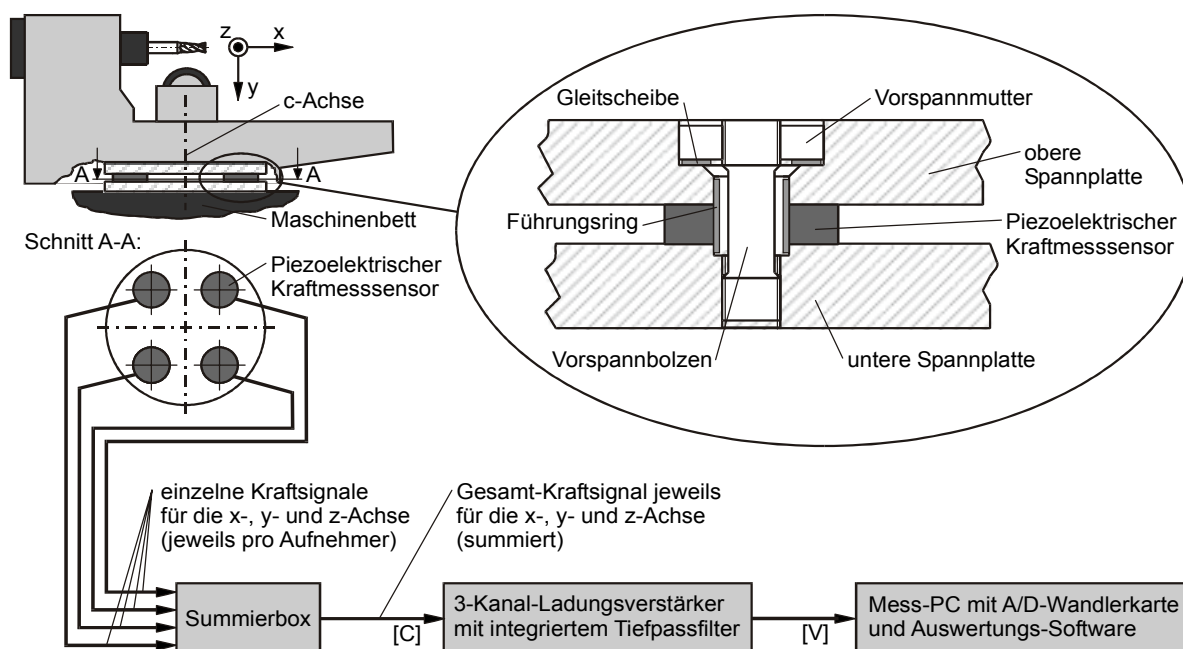
#### 4.6 Mess- und Analysetechnik

##### 4.6.1 Kraftmessung

Zur Analyse der Punktcrushier- und Schleifversuche ist ein Kraftmesssystem in die Versuchsmaschine eingebaut worden. Dieses besteht aus insgesamt vier piezoelektrischen 3-Komponenten-Kraftmesssensoren vom Typ 9167A der Firma Kistler (Winterthur, Schweiz). Diese Sensoren sind mittels Bolzen und Spannplatten unterhalb des Drehturms der Schleifmaschine, welcher die Werkstückaufnahme enthält, symmetrisch um dessen Drehachse (c-Achse) herum eingebaut (Bild 4.10). Durch eine hohe Vorspannung können auch Schubkräfte durch Haftreibung von den beiden Spannplatten auf die Oberfläche der Kraftmesssensoren übertragen werden. Hier-

durch wird eine Erfassung der Prozesskräfte in allen drei Raumachsen möglich. Durch diese Vorspannung und die relativ hohe Steifigkeit der Sensoren von  $1670 \text{ N}/\mu\text{m}$  in x- und z-Richtung bzw.  $4600 \text{ N}/\mu\text{m}$  in y-Richtung wird die Steifigkeit der Versuchsmaschine nicht nennenswert beeinflusst.

Mittels einer Summierbox werden die pro Sensor gemessenen Ladungen für die jeweiligen Raumachsen addiert und an einen Ladungsverstärker (Typ 5019A der Firma Kistler) weitergeleitet, welcher diese Signale in proportionale Spannungswerte konvertiert. Nachdem der integrierte Tiefpassfilter eventuelle Störsignale eliminiert hat, werden die Signale mittels A/D-Signalwandlung im Mess-PC mit entsprechender Auswertungssoftware (Catman® der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt) grafisch dargestellt und für die weitere Analyse gespeichert.



He/33507 © IFW

**Bild 4.10:** Integriertes Kraftmesssystem der Versuchsmaschine

Eine zusätzliche Kalibrierung des piezoelektrischen Kraftmesssystems erfolgte mittels Kraftmessung durch Dehnungsmessstreifen (DMS), um auch im Bereich geringer Prozesskräfte eine genaue Messung zu gewährleisten.

Zur Fehlerabschätzung bei der Kraftmessung muss der Linearitätsfehler des einzelnen Piezosensors von 0,5 % sowie der Hysteresefehler von 0,8 % berücksichtigt werden. Eine weitere Fehlerquelle ist der Ladungsverstärker, dessen Messfehler vom Hersteller mit 0,7 % angegeben wird. Die Auflösung des A/D-Wandlers mit 12 Bit verursacht einen maximalen Fehler von 0,5 %. Da diese Fehler statistisch unabhängig voneinander auftreten lässt sich der Gesamtfehler in der Messkette mit etwa drei Prozent abschätzen.



#### 4.6.2 Rasterelektronenmikroskopie

Die qualitative Charakterisierung der Schneidenraumtopographie des Schleifbelags sowie der Verschleißflächen an den diamantbesetzten Crushierrollen und der bearbeiteten Werkstückoberflächen erfolgen mittels Aufnahmen am Rasterelektronenmikroskop (REM) vom Typ SM 510 W der Firma Topcon (Paramus, New Jersey, U.S.A.). Hierfür müssen die Proben durch Reinigen und Aufbringen einer extrem dünnen Goldschicht präpariert werden, bevor sie mittels Elektronenstrahl zeilenförmig abgetastet werden. Beim Auftreffen der Primärelektronen des Strahls auf die Oberfläche werden aus der Probe Sekundärelektronen herausgelöst. Diese werden von einem Detektor registriert und die Impulse verstärkt. Da die Emission von Sekundärelektronen an herausragenden Oberflächenbereichen höher ist als an tiefer liegenden Zonen erscheinen diese Bereiche heller und man erhält ein Abbild der Oberfläche in Form eines Grautonbildes. Im Vergleich zur Lichtmikroskopie zeichnet sich das REM durch eine hohe Tiefenschärfe und die Möglichkeit extrem hoher Vergrößerungen aus. Aufgrund des Arbeitsraumes des Rasterelektronenmikroskops wird die Größe der zu untersuchenden Diamantschleifscheiben auf einen Durchmesser von  $d_s = 70$  mm beschränkt, um diese für Analysezwecke nicht zerstören zu müssen.

#### 4.6.3 Charakterisierung der Crushierrollenverschleißes

Neben der qualitativen Analyse durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen erfolgt eine quantitative Beurteilung des Abrichterverschleißes durch Profilmessungen der Crushierrollentopographie. Dafür wird eine abbildende Methode eingesetzt, bei welcher die Crushierrolle radial in ein Graphitplättchen eingeschliffen wird. Die Genauigkeit liegt im Bereich von etwa  $1 \mu\text{m}$ . Die so abgebildete Hüllfläche des Abrichtwerkzeuges kann durch Vermessen mit einem Tastschnittgerät ermittelt werden. Durch den Vergleich der erfassten Hüllflächen vor und nach dem Einsatz des Abrichtwerkzeuges kann der Profilverschleiß der Crushierrolle bestimmt werden. Die hohe Auflösung des eingesetzten Oberflächentastschnittgerätes und dessen maximale Messunsicherheit von 2 % ermöglichen die Messung sehr geringer Profilveränderungen an Radien, Winkeln und Strecken. Ein weiterer Vorteil in dieser Vorgehensweise liegt darin, dass das Crushierwerkzeug nicht von der Abrichtspindel demontiert werden muss und dadurch einbaubedingte Rundlaufungenauigkeiten vermieden werden.

#### 4.6.4 Charakterisierung der Schleifbelagstopographie

Die Charakterisierung der Schleifbelagstopographie kann, neben der qualitativen Beurteilung durch REM-Aufnahmen und indirekt durch Untersuchungen zum Einsatzverhalten, quantitativ durch eine Vielzahl von Kennwerten erfolgen. Wichtig ist hierbei einerseits die mikrogeometrische Charakterisierung des Schneiderraums und dessen durch Verschleißmechanismen, wie beispielsweise Zusetzungen aber auch Kornabstumpfung und -ausbrüchen, verursachter Veränderung. Andererseits ist

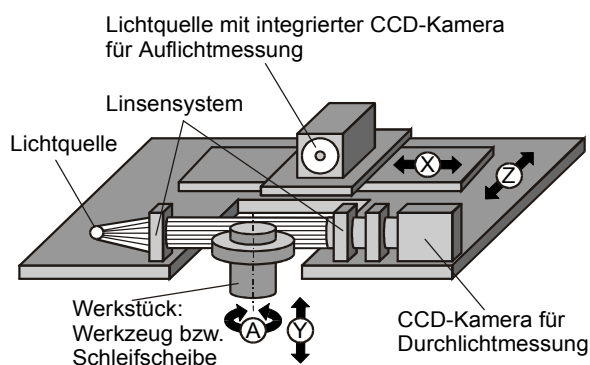
gerade beim Profilschleifen eine Beurteilung der Formhaltigkeit des Schleifscheibenprofils von besonderem Interesse, da sich Veränderungen durch auftretenden Verschleiß direkt in Form von Maßabweichungen auf das zu fertigende Bauteil übertragen.

### Bestimmung des Schleifscheibenprofils

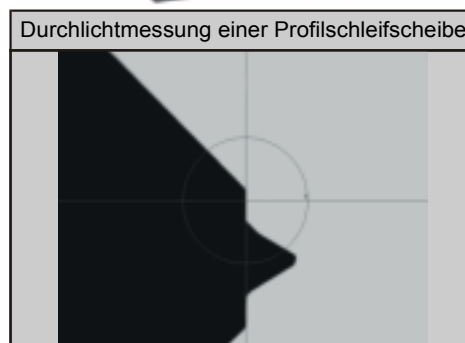
Zur Bestimmung des unmittelbar nach dem Punktcrushieren entstandenen Profils der Schleifscheibe wird, wie auch bei der Messung des Crushierrollenprofils, ein Graphitplättchen radial eingeschliffen und vermessen. Alle weiteren Hüllflächen werden direkt am geschliffenen Bauteil gemessen. Durch den Vergleich der Hüllflächen kann so der Profilverschleiß in Abhängigkeit vom erzielten Zerspanvolumen bestimmt werden. Für einfache, geradprofilige Schleifscheiben (beispielsweise Typ 1A1) kann diese Methode nur eingesetzt werden, wenn lediglich ein Teil der Schleifbelagsbreite zum Schleifen eingesetzt wird. Hierdurch entsteht ein Absatz zwischen dem belasteten und dem unbelasteten Teil des Schleifbelags, welcher ebenfalls durch Einstechschleifen in Graphit abgebildet und vermessen werden kann.

#### Technische Daten und Messprinzip

- max. Werkstückdurchmesser: 200 mm
- max. Werkstücklängen: 300 mm
- max. Werkstückgewicht: 25 kg
- Auflösung der Messachsen
  - Drehachse 0,001°
  - Linearachsen 0,25 µm
- Wiederholgenauigkeit
  - Drehachse 0,005°
  - Linearachsen 1 µm



Quelle: Walter AG



He/36131 © IFW

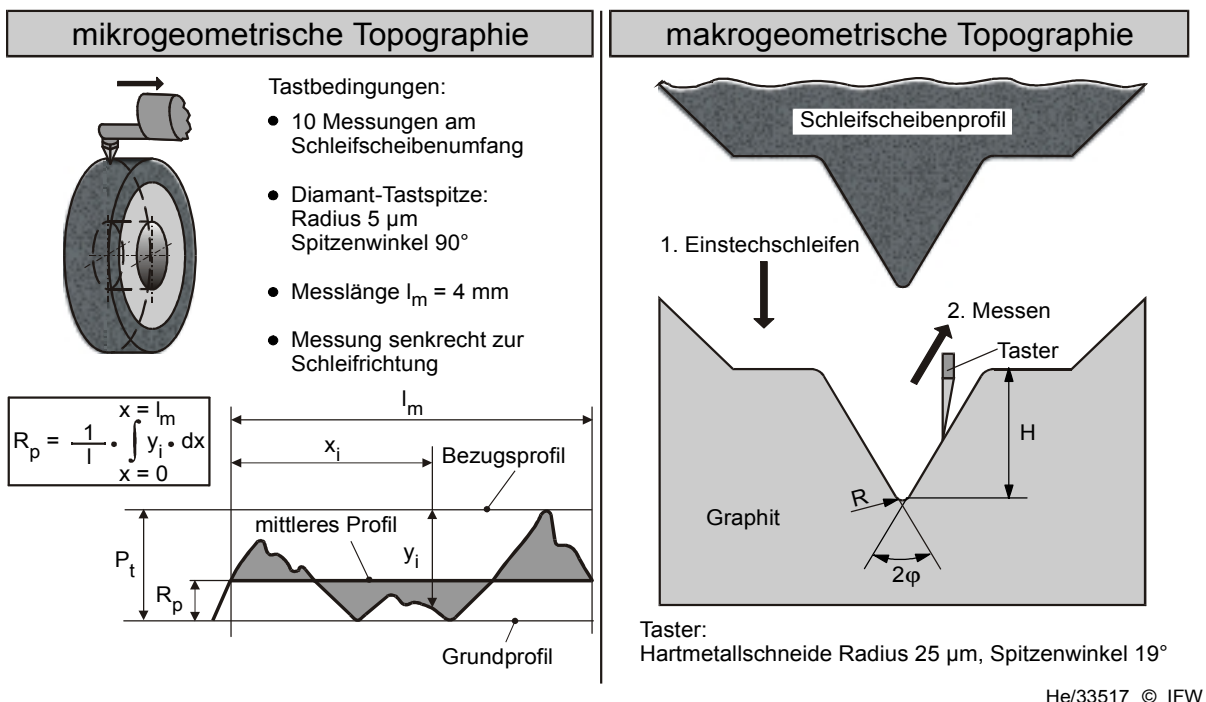
**Bild 4.11:** Optische Werkzeug- und Schleifscheibenmessmaschine „Helicheck NC4“ der Walter AG

Eine Verifizierung des abbildenden Messverfahrens erfolgt durch zusätzliche Messungen des Schleifscheibenprofils mit Hilfe der hochauflösenden, optischen Werkzeug- und Schleifscheibenmessmaschine „Helicheck NC4“ der Firma Walter AG (Tübingen). Mit Hilfe von CCD-Kameras, einer stufenlos regelbaren LED-Mehrsegment-Beleuchtung und einer Prismen-Optik kann die Messmaschine sowohl im Auflicht- als auch im Durchlichtverfahren arbeiten. Zur Erfassung der Durchmesser,

Längen, Winkel und Radien an den Profilschleifscheiben wird das Durchlichtverfahren eingesetzt (Bild 4.11).

### Bestimmung der mikrogeometrischen Schleifbelagstopographie

Die mikrogeometrische Beschreibung des Schneidenraums der Schleifscheibe erfolgt anhand der Glättungstiefe  $R_p$ . Dieser Kennwert, der seinen Ursprung in der Oberflächenmesstechnik zur Charakterisierung von Bauteiloberflächen hat, hat sich in vielen Anwendungsfällen auch zur Bestimmung der Schleifbelagstopographie durchgesetzt. Nach DIN EN ISO 4287 beschreibt die Glättungstiefe  $R_p$  die maximale Profilkuppenhöhe als senkrechten Abstand zwischen dem höchsten Punkt des Rauheitsprofils und einer Bezugslinie [DIN4287]. Diese Bezugslinie entspricht dem Mittelwert der kleinsten Abweichungsquadrate des Profils innerhalb einer Einzelmessstrecke. Aufgrund dieses integralen Charakters ist diese Kenngröße relativ unempfindlich gegenüber einzelnen Vertiefungen oder Erhöhungen und wird daher in der Literatur häufig zur Beschreibung des Schneidenraums herangezogen. Dies ermöglicht die Charakterisierung des Kornüberstandes bzw. Schärfegrades des Schleifbelags [Frie99, Salj91, Wimm95].



**Bild 4.12:** Tastende Messung der mikro- und makrogeometrischen Schleifscheibentopographie

Ein direkter Vergleich der Glättungstiefe bei Messung von Schleifscheiben verschiedener Bindungsmaterialien ist jedoch nicht möglich. Eine weitgehend dichte metallische oder Kunstharz-Bindung führt zu prinzipiell anderen Messwerten als eine offenporige, keramische Bindung. Die Glättungstiefe des Schleifbelags  $R_{ps}$  wird mittels eines Tastschnittgerätes vom Typ Perthometer Concept der Firma Mahr

GmbH (Göttingen) ermittelt. Dieser stationäre und modular aufgebaute Messplatz beinhaltet die Messwerterfassung und deren Auswertung mittels spezieller Software. Als Oberflächentaster kommt eine Diamant-Tastnadel mit einem Spitzenwinkel von  $90^\circ$  und einem Spitzenradius von  $5\ \mu\text{m}$  bei einem Messbereich der Profilhöhe von  $\pm 250\ \mu\text{m}$  zum Einsatz. Die maximale Messunsicherheit wird vom Hersteller mit 2 % angegeben. Um eine statistische Absicherung der Messwerte zu gewährleisten, wird der Mittelwert und die Standardabweichung aus jeweils zehn Einzelmessungen, welche an verschiedenen Positionen aufgenommen werden, bestimmt. Die Grundlagen der tastenden Messung zur Erfassung der mikro- bzw. makrogeometrischen Schleifscheibentopographie sind zusammenfassend in Bild 4.12 dargestellt.

#### 4.6.5 Oberflächen- und Randzoneneigenschaften der Bauteile

Die Charakterisierung der bearbeiteten Werkstücke kann durch unterschiedlichste Kennwerte erfolgen. Neben den makroskopischen Eigenschaften, wie Maß- und Formgenauigkeiten kann die mikroskopische Charakterisierung prinzipiell in Oberflächen- und Randzoneneigenschaften unterschieden werden.

##### Rauheitsmessung

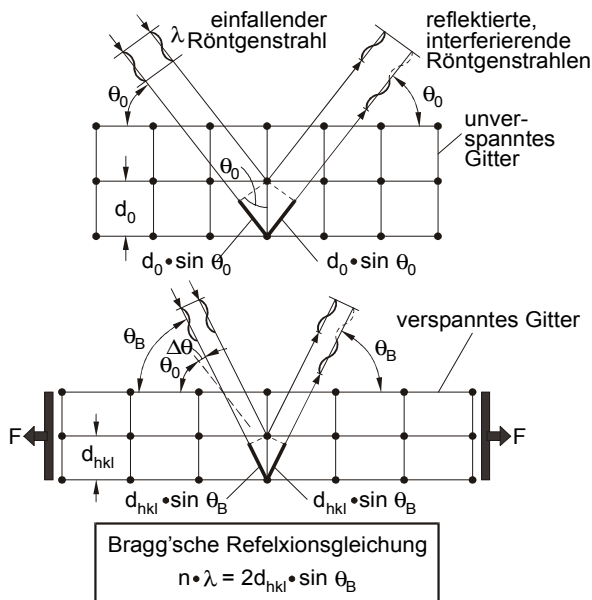
Die Beschreibung der erzeugten Oberflächenqualität der geschliffenen Bauteile erfolgt durch die Messung des arithmetischen Mittenrauwerts  $R_a$  und der gemittelten Rautiefe  $R_z$  nach DIN EN ISO 4287 [DIN4287]. Dabei erfolgt die Kalibrierung des Messsystems mittels Abtasten eines Rauheitsnormals. Um eine statistische Absicherung der Messwerte zu gewährleisten, wird der Mittelwert und die Standardabweichung aus jeweils zehn Einzelmessungen, welche an verschiedenen Positionen aufgenommen werden, bestimmt.

##### Röntgenographische Eigenspannungsanalyse

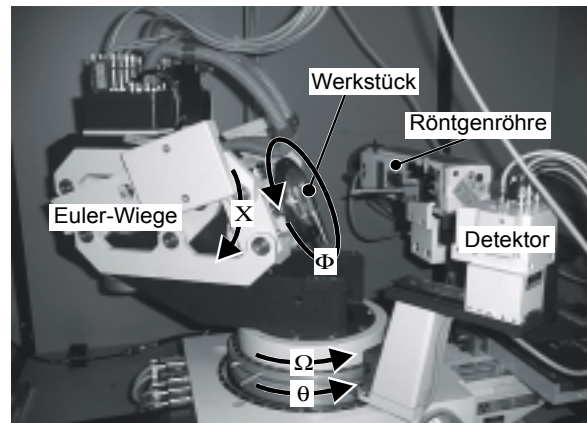
Die Randzone der geschliffenen Werkstücke wird durch röntgenographische Eigenspannungsanalysen, welche auf dem Prinzip der messtechnischen Erfassung von Gitterdehnungen durch Beugung von Röntgenstrahlen an Gitterebenen beruht, durchgeführt. Dabei werden Röntgenstrahlen durch Gangunterschiede und dadurch verursachte Interferenzen verstärkt oder ausgelöscht. Die Bragg'sche Reflexionsgleichung, in welche neben der Wellenlänge  $\lambda$  des Röntgenstrahls und dessen Einfallswinkel  $\theta_B$  der Netzebenenabstand  $d_{hkl}$  und der ganzzahlige Faktor  $n$  eingeht, beschreibt diese selektive Reflexion. Aus den Winkellagen der Beugungspeaks können die Abstände der Gitterebenen berechnet werden. Bei einer auf das Gitter wirkenden Belastung wird der Beugungswinkel des unverspannten Werkstoffes  $\theta_0$  vergrößert, wodurch sich die Interferenzlinien verschieben. Unter Berücksichtigung der röntgenographischen Elastizitätskonstante (REK) des jeweiligen Werkstoffes kann daraus mittels  $\sin^2\psi$ -Verfahren der makroskopische Eigenspannungszustand des Bauteils ermittelt werden.

Die Eigenspannungsmessungen werden an einem 4-Kreis-Röntgendiffraktometer vom Typ „PTS 3000“ der Firma Seifert (Ahrensburg) durchgeführt. Das Gerät arbeitet nach dem Fokussierprinzip von Bragg-Brentano. Die monochromatische  $\text{CuK}\alpha$ -Strahlung der Wellenlänge  $\lambda = 0,154184 \text{ nm}$  wird bei einer Eindringtiefe von max.  $1,7 \mu\text{m}$  an den  $\{211\}$ -Netzebenen reflektiert. Austrittsspalt der Primärstrahlung und Eintrittsspalt des ortsempfindlichen Detektors (OED) zur Messung der Intensitätsverteilung der gebeugten Röntgenstrahlung befinden sich auf einem Fokussierkreis. Das Standardgoniometer ist durch eine offene Euler-Wiege um zwei zusätzliche Drehachsen (Eulerwinkel  $\Phi$  und  $X$ ) erweitert. Messaufbau und -prinzip sowie die Bezeichnungen der verfahrenbaren Achsen sind in Bild 4.13 zu sehen.

### Prinzip der Röntgenbeugung



### Messaufbau und Achsenbezeichnung



4-Kreis-Röntgendiffraktometer

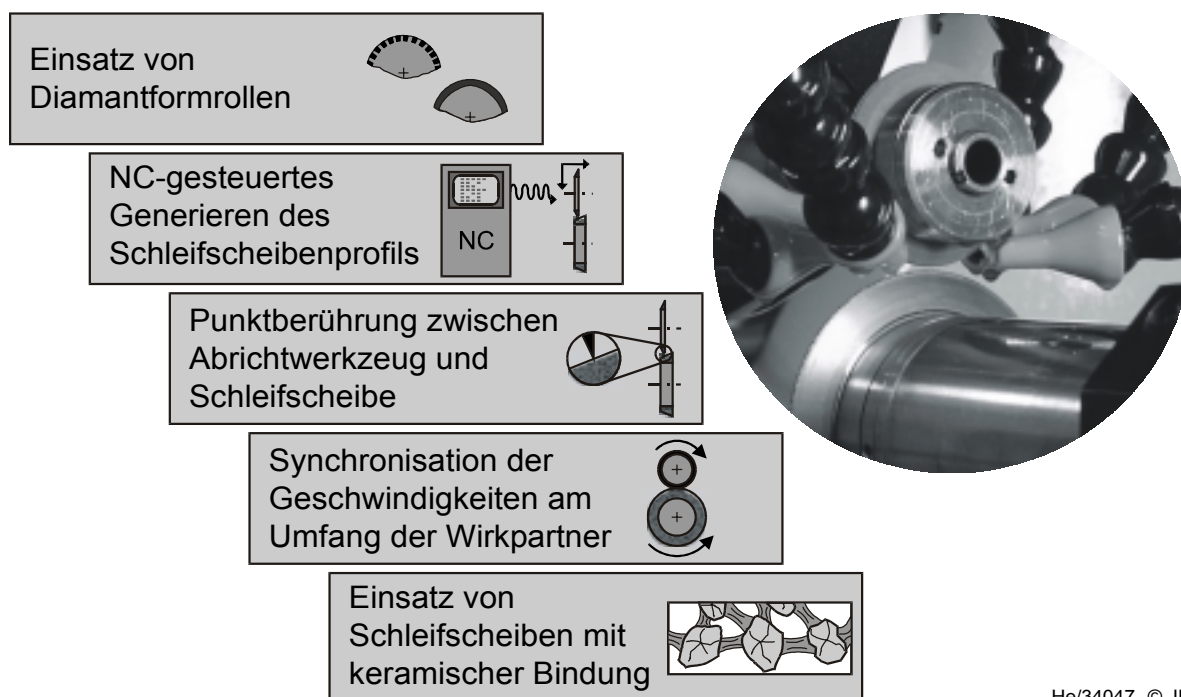
He/35874 © IFW

**Bild 4.13:** Röntgenographische Eigenspannungsanalyse

## 5 Technologie des Punktcrushierens

### 5.1 Charakteristische Eigenschaften des Punktcrushierens

Das Abrichtverfahren Punktcrushieren weist einige charakteristische Eigenschaften auf, welche in Bild 5.1 zusammenfassend dargestellt sind. Dieses, vor allem für den Werkzeug- und Profilschleifbereich entwickelte Verfahren, soll höchste Anforderungen an die Formgenauigkeit der Schleifwerkzeuge erfüllen. Um die Ausschöpfung des Potenzials des Punktcrushierens zu ermöglichen, ist eine systematische Analyse der grundlegenden Einflussfaktoren auf den Abrichtprozess und dessen Ergebnis erforderlich. Um hierfür eine einheitliche Basis zu schaffen, wird im nachfolgenden Kapitel zunächst auf die technologischen Größen eingegangen.



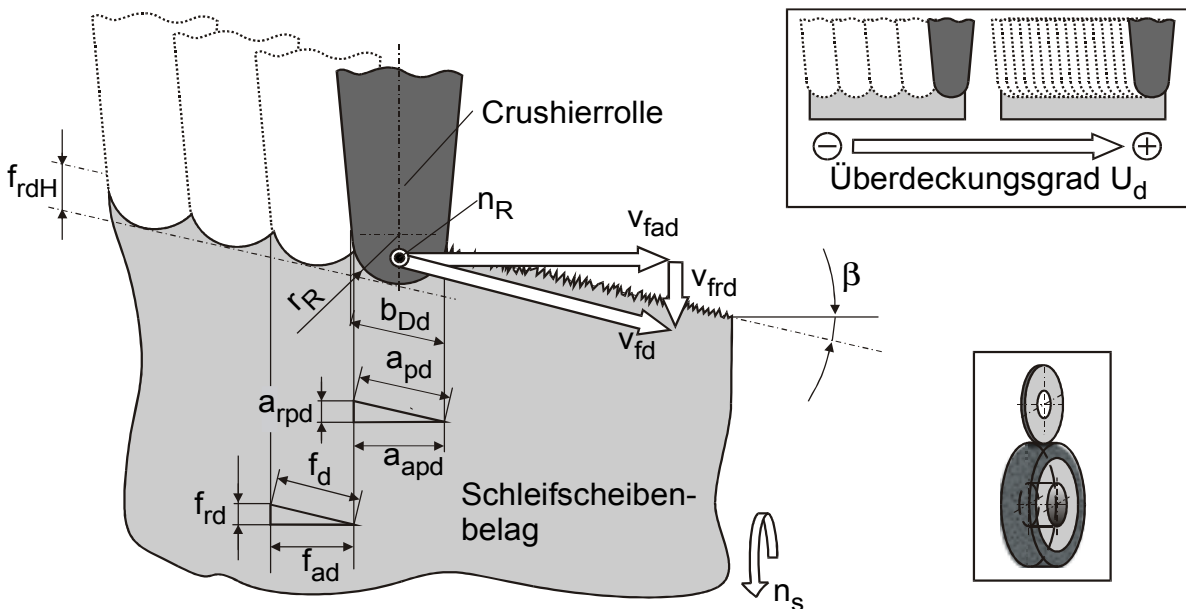
He/34047 © IFW

**Bild 5.1:** Charakteristische Eigenschaften des Punktcrushierens

### 5.2 Technologische Größen

Neben der Spezifikation der Crushierrolle, welche durch die Geometrie sowie die Diamantbelegung (Diamantspezifikation und Setzdichte bei Verwendung von Einzeldiamanten) am Umfang festgelegt ist, können die verschiedenen Stellgrößen beim Punktcrushieren sowohl die Ausbildung der Schleifscheibentopographie als auch das Verschleißverhalten des Abrichtwerkzeuges beeinflussen. Im folgenden wird die Kinematik des Punktcrushierens beschrieben und eine Begriffsdefinition der wesentlichen, charakteristischen Eingangs- und Prozessgrößen gegeben. Hierfür sind die Eingriffsverhältnisse beim bahngesteuerten Abrichten eines um den Kontur-

gungswinkel  $\beta$  geneigten Schleifscheibenprofils mit einer Crushierrolle, welche einen Radius  $r_R$  am Umfang besitzt, in Bild 5.2 dargestellt.



He/34050 © IFW

**Bild 5.2:** Eingriffsverhältnisse zwischen Crushierrolle und Schleifscheibe

Eine wesentliche Größe beim Punktcrushieren stellt der Überdeckungsgrad  $U_d$  dar. Dieser ist definiert als Quotient aus der Schnittgrößenbreite der Crushierrolle  $a_{pd}$  und der axialen Zustellung  $f_{ad}$  pro Umdrehung des Abrichtwerkzeuges. Für einen Konturwinkeln von  $\beta = 0^\circ$  ergibt sich dementsprechend folgende Definition:

$$U_d = \frac{a_{pd}}{f_{ad}} \quad (5.1)$$

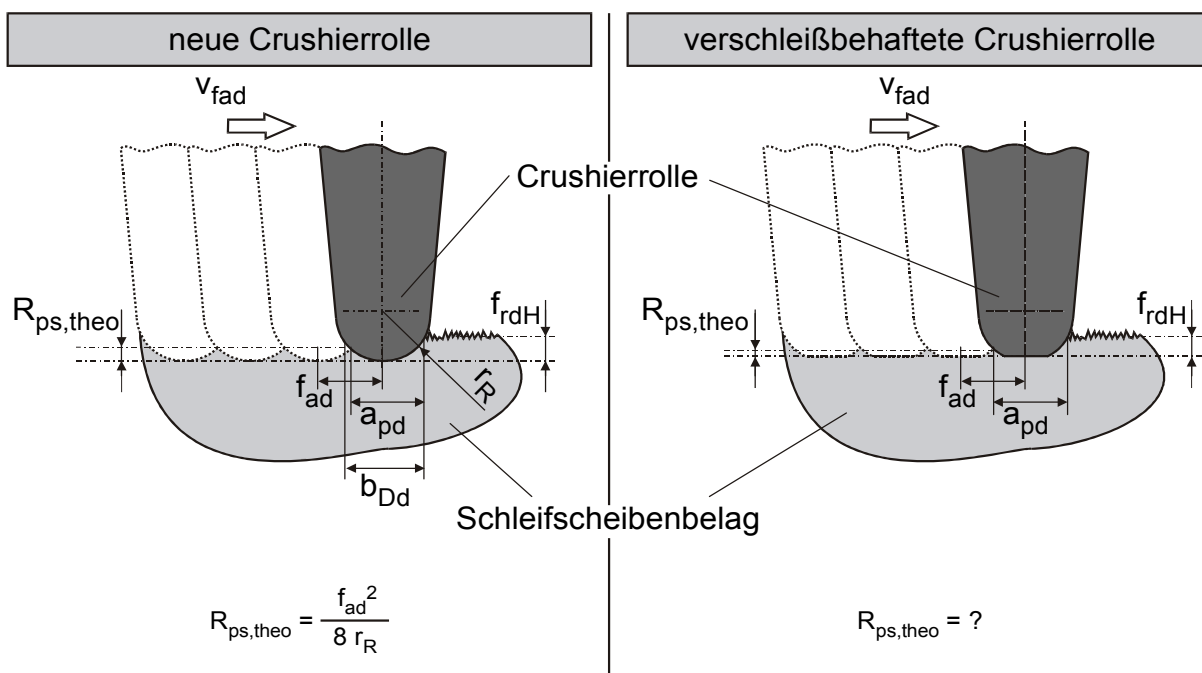
Durch Konturwinkeln von  $\beta \neq 0^\circ$  entstehen verschiedene Möglichkeiten zur Definition des Überdeckungsgrades. Neben dem Überdeckungsgrad  $U_d$ , welcher für eine Verfahrensbewegung des Abrichtwerkzeuges entlang der Kontur definiert ist, können die Bezugsgrößen in axialer ( $U_{ad}$ ) sowie radialer Richtung ( $U_{rd}$ ) definiert werden:

$$U_{ad} = \frac{a_{apd}}{f_{ad}} \quad \text{und} \quad U_{rd} = \frac{a_{rpd}}{f_{rd}} \quad (5.2) \quad \text{und} \quad (5.3)$$

Beim Abrichten liegt der theoretisch zulässige untere Grenzwert für den Überdeckungsgrad bei  $U_d = 1$ , da dann jeder Punkt des Schleifbelags gerade einmal von der Crushierrolle erfasst wird. Neben der Profilform des Abrichtwerkzeuges kann so die Wellenstruktur des Profilschnittes und damit die Topographie des Schleifbelags durch den Überdeckungsgrad beeinflusst werden. In der Praxis geht bei der Berech-

nung des Überdeckungsgrads häufig anstatt der Eingriffsbreite  $a_{pd}$  auch die Wirkbreite  $b_{Dd}$  der Crushierrolle ein. Bei abgeplatteten Profilen ist die Abweichung vom exakten Wert in der Regel vernachlässigbar und birgt den Vorteil einer einfacheren Berechnung. Bei komplexen Schleifscheibenprofilen ist zur exakten Beschreibung theoretisch die abschnittsweise Definition des Überdeckungsgrades oberflächentangentential zum Schleifbelag erforderlich. Wie die Untersuchungen zeigen, ist der Einfluss des Überdeckungsgrades nicht so dominant auf das Abrichtergebnis, so dass der Aufwand bei der Berechnung und der Programmierung der Maschinensteuerung in keinem Verhältnis zum Nutzen stehen.

Der Überdeckungsgrad  $U_d$  ist – neben der radialen Zustellung  $f_{rd}$  – eine Stellgröße, welche die Ausprägung der Schleifscheibentopographie beeinflussen kann. Aus dem kinematischen Zusammenhang lässt sich eine theoretisch erreichbare Glättungstiefe  $R_{ps,theo}$  der Schleifbelagstopographie in Abhängigkeit des Überdeckungsgrades  $U_d$  beim Punktcrushieren und dem Radius der Verrundung am Umfang der Crushierrolle  $r_R$  ableiten. Bei einem Verschleiß der Crushierrolle ist dies jedoch nur schwer möglich, da die Eingriffsbreite nicht ermittelt werden kann (Bild 5.3).



He/36121 © IFW

**Bild 5.3:** Berechnung der theoretischen Glättungstiefe des Schleifbelags

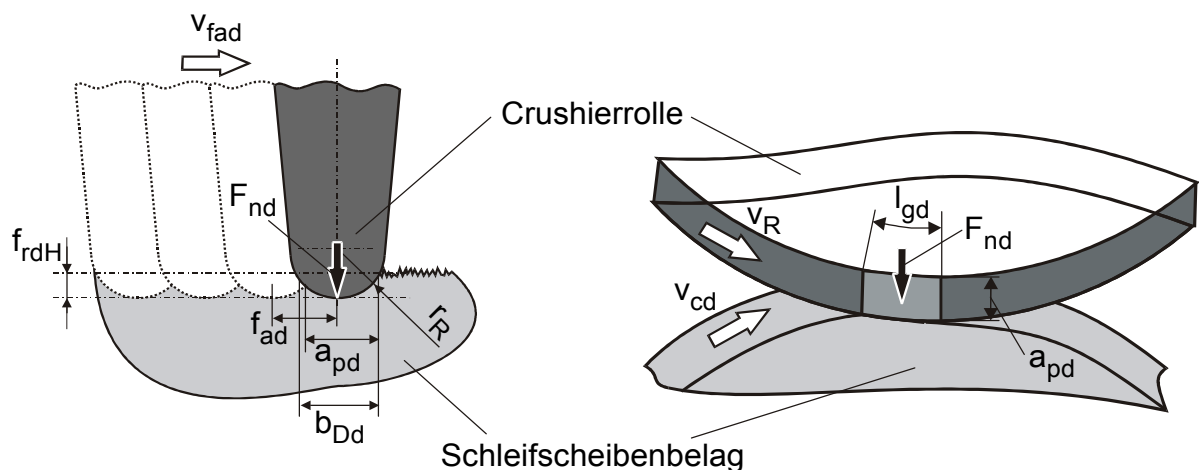
Das Geschwindigkeitsverhältnis beim Abrichten  $q_d$  ist eine weitere charakterisierende Größe. Es errechnet sich als Quotient der Umfangsgeschwindigkeit des Abrichtwerkzeuges  $v_R$  und der Schleifscheibe  $v_{cd}$  im Kontaktpunkt:

$$q_d = \frac{v_R}{v_{cd}} \quad (5.4)$$



Allgemein kann bezüglich des Geschwindigkeitsverhältnisses zwischen dem Gegenlaufabrichten ( $q_d < 0$ ) und dem Gleichlaufabrichten ( $q_d > 0$ ) unterschieden werden. Beim Gegenlaufabrichten bewegen sich die beiden Wirkpartner Abrichtwerkzeug und Schleifscheibe mit einer Relativgeschwindigkeit gegeneinander, wodurch die Kontaktzeiten relativ kurz sind. Durch die dabei wirkenden Scherkräfte kann die Schleifscheibentopographie stark eingeebnet werden. Der dadurch erzeugte geringe Kornüberstand lässt zwar einen Schleifprozess zu, welcher geeignet ist geringe Werkstückrauheiten zu erzeugen. Gleichzeitig neigt der Belag aber dazu, sich mit den abgespannten Werkstückpartikeln relativ schnell zuzusetzen. Dies kann zu einem stark instationären Prozessverhalten führen [Fran87]. Beim Gleichlaufabrichten rollen die Wirkpartner mit einer definierten Relativgeschwindigkeit  $v_{drel}$  in gleicher Richtung aufeinander ab. Dies kann zu längeren Kontaktzeiten, einer Verringerung der Scherkräfte und damit einem stärkeren Einfluss der Druckbelastung führen. Dabei ist zu beachten, dass bei konstantem Geschwindigkeitsverhältnis  $q_d$  die Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern proportional mit einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe beim Abrichten  $v_{cd}$  ansteigt.

Beim Punktcrushieren wird ein Geschwindigkeitsverhältnis von  $q_d = 1$  eingestellt, so dass keine Relativgeschwindigkeit  $v_{drel}$  zwischen dem Abrichtwerkzeug und der Schleifscheibe auftritt. Nach den genannten Definitionen handelt es sich hiermit um ein Gleichlaufabrichten. Aufgrund der Kinematik dominiert die in radialer Richtung wirkende Druckbelastung, welche für das Aufbrechen der Bindungsbrücken und – in Abhängigkeit von der Kornspezifikation – das Splintern der Schleifkörner und damit die Ausbildung von Sekundärschneiden verantwortlich ist.



bezogene Normalkraft beim Punktcrushieren

$$F'_{nd} = \frac{F_{nd}}{a_{pd}}$$

flächenbezogene Normalkraft beim Punktcrushieren

$$F''_{nd} = \frac{F_{nd}}{a_{pd} \cdot l_{gd}} = \frac{F'_{nd}}{l_{gd}}$$

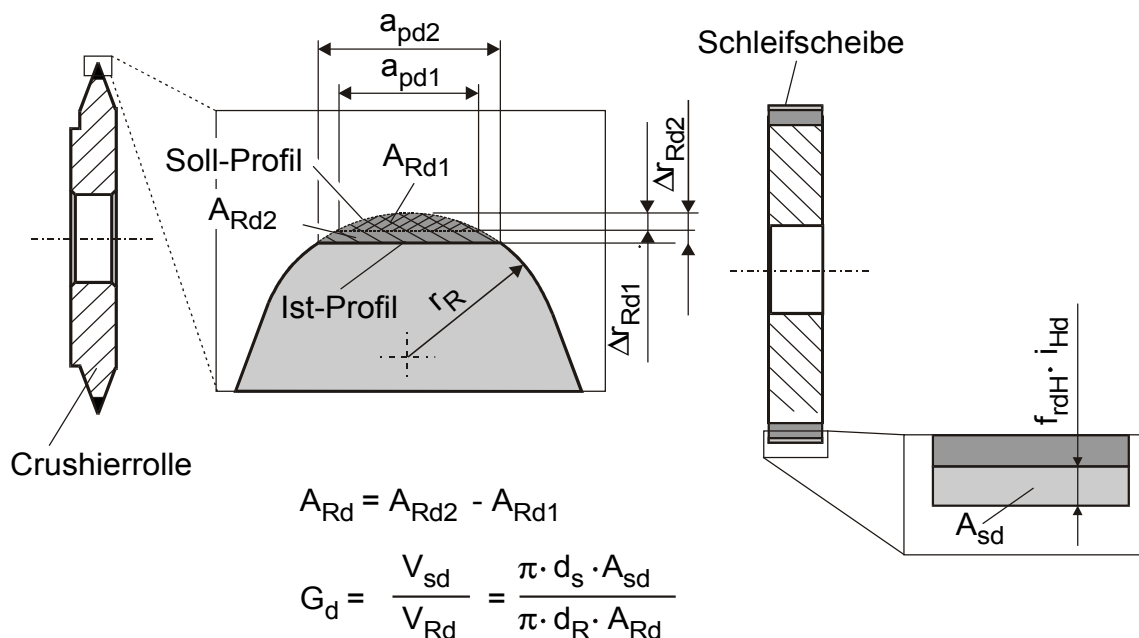
Randbedingungen:  $f_{ad} \ll r_R$ ,  $a_{pd} \approx b_{Dd}$

He/36122 © IFW

**Bild 5.4:** Berechnung der bezogenen Normalkräfte beim Punktcrushieren

Die Angabe der beim Punktcrushieren auftretenden Normalkräfte erfolgt, neben der Angabe der Absolutwerte, auch in der Form von bezogenen bzw. flächenbezogenen Kräften. Dies gewährleistet eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse unabhängig von den real gegebenen Geometrien des Abrichtwerkzeuges. Die bezogene Abrichtnormalkraft  $F'_{nd}$  berücksichtigt die Eingriffsbreite der Crushierrolle  $a_{pd}$ . Bei der flächenbezogene Abrichtnormalkraft  $F''_{nd}$  geht zusätzlich noch die geometrische Kontaktlänge  $l_{gd}$  mit in die Berechnung ein (Bild 5.4). Randbedingung für eine Berechnung der flächenbezogenen Abrichtnormalkraft muss sein, dass die axiale Zustellung  $f_{ad}$  wesentlich größer ist als der Radius der Crushierrolle  $r_R$ . Zur einfacheren Berechnung wird die Eingriffsbreite  $a_{pd}$  mit der Wirkbreite  $b_{Dd}$  der Crushierrolle gleichgesetzt.

Mit Hilfe des Gütefaktors  $G_d$  lässt sich die Wirtschaftlichkeit und Effektivität des Abrichtprozesses bewerten. Dieser berechnet sich aus dem Quotienten des abgetragenen Schleifscheibenvolumens  $V_{sd}$  (Nutzvolumen) im Verhältnis zum abgetragenen Volumen an der Crushierrolle  $V_{Rd}$  (Verschleißvolumen) während des Abrichtprozesses. Diese Volumina lassen sich bei geradprofiligen Schleifscheiben (Typ 1A1) aus den jeweiligen Querschnittsflächen multipliziert mit dem Umfang der Schleifscheibe bzw. der Crushierrolle ermitteln (Bild 5.5). Ein hoher Gütefaktor beschreibt somit einen Abrichtprozess, welcher sich durch einen geringen Verschleiß an der Crushierrolle auszeichnet.



He/34049 © IFW

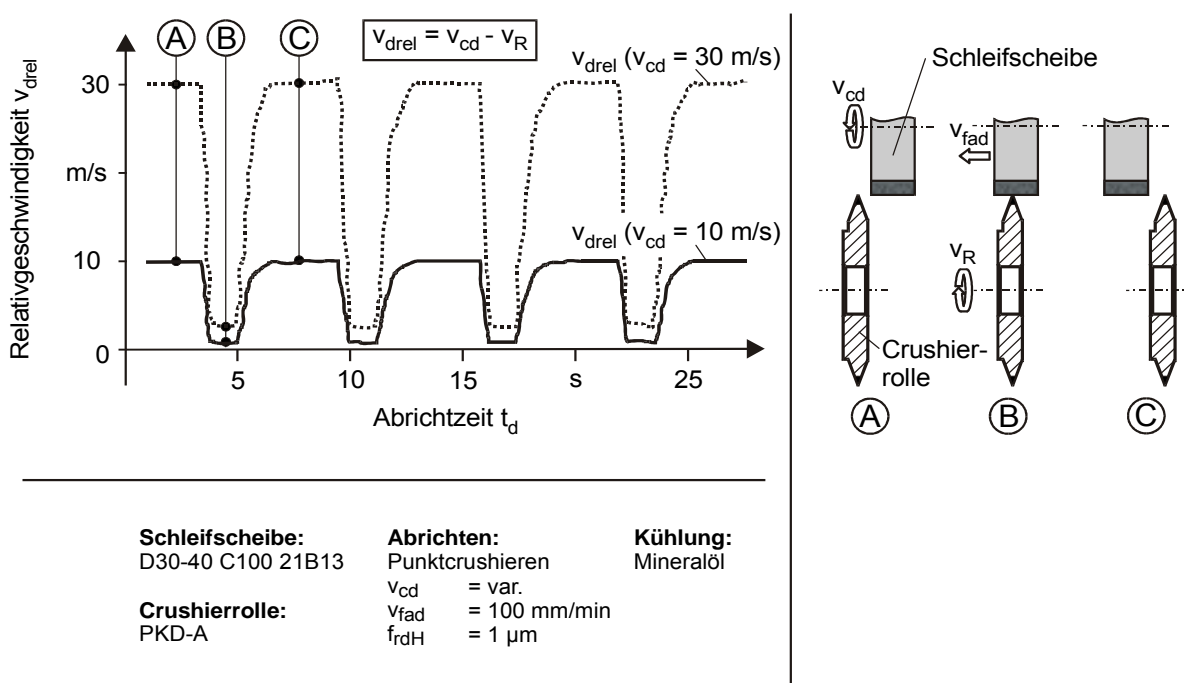
**Bild 5.5:** Bestimmung des Gütefaktors beim Punktcrushieren

## 6 Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten

Die Untersuchungen zum Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Abrichtprozess sowie die erzielbare Synchronisationsgüte und das Einsatzverhalten der verschiedenen Antriebskonzepte für die Crushierrolle werden im Folgenden erläutert. Mit Hilfe der entwickelten Drehfrequenzregelung für die Crushierrolle lässt sich nicht nur eine Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten der Wirkpartner erzielen, sondern es kann auch eine definierte Relativgeschwindigkeit  $v_{drel} \neq 0$  eingestellt werden. Dadurch lässt sich gezielt der Einfluss der Reibung und des auftretenden Schlupfes beim Abrichtprozess auf das Verschleißverhalten der unterschiedlich spezifizierten Crushierrollen ermitteln und das Einsatzverhalten ungetriebener Crushierrollen simulieren. Da sich ein Verschleiß des Abrichtwerkzeuges bei der Profilveränderung unmittelbar auf die Genauigkeit des zu erzeugenden Schleifscheibenprofils auswirkt, sind diese Kenntnisse von großer Bedeutung.

### 6.1 Einfluss des Antriebskonzeptes auf die Relativgeschwindigkeit

Bild 6.1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Relativgeschwindigkeit  $v_{drel}$  bei Verwendung der freilaufenden Crushierrolle ohne eigenen Antrieb beim Abrichten einer 1A1-Schleifscheibe in mehreren Hieben bei zwei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten der Schleifscheibe.

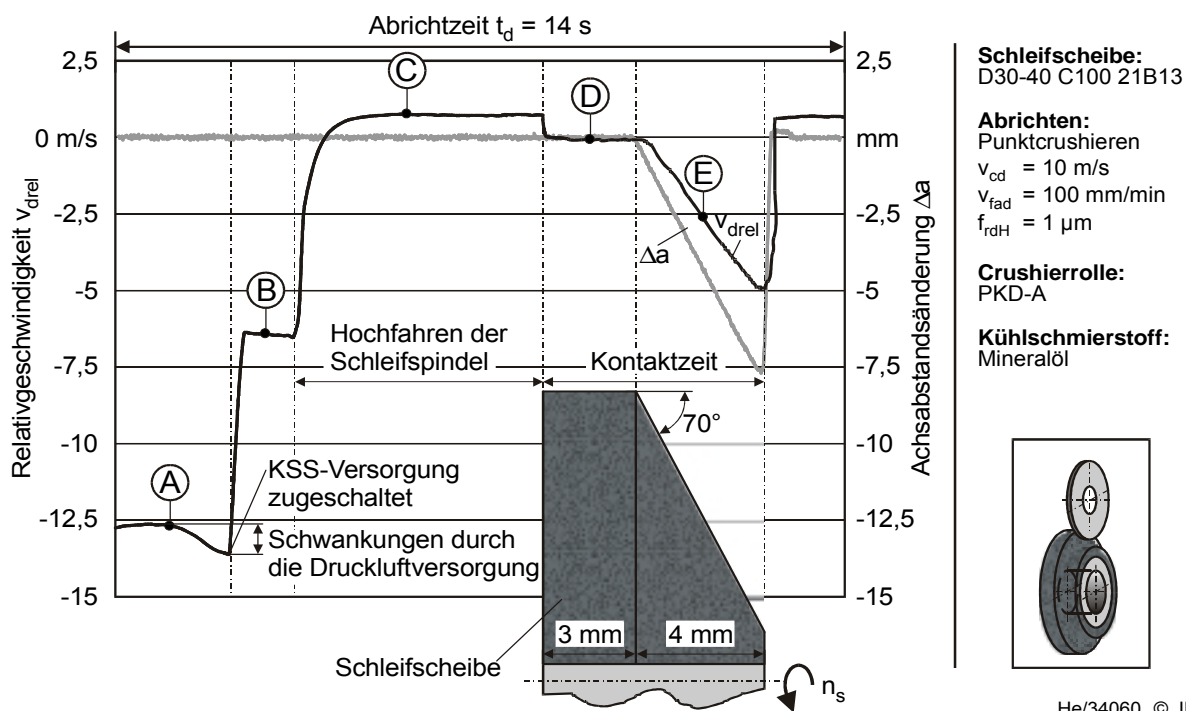


He/35170 © IFW

**Bild 6.1:** Verlauf der Relativgeschwindigkeit bei freilaufender Crushierrolle

Hierbei lassen sich drei charakteristische Bereiche unterteilen: Zunächst befindet sich die rotierende Schleifscheibe mit der in Ruhestellung befindlichen Crushierrolle nicht im Eingriff, so dass die Relativgeschwindigkeit mit der Schnittgeschwindigkeit

der Schleifscheibe identisch ist (A). Bei Kontakt der Wirkpartner wird die Crushierrolle aufgrund der auftretenden Reibkräfte beschleunigt, so dass die Crushierrolle dann durch die Schleifscheibe angetrieben wird. Aufgrund des Schlupfes zwischen den Reibpartnern kommt es zu keiner vollständigen Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten. Die Verdreifachung der Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe von  $v_{cd} = 10 \text{ m/s}$  auf  $v_{cd} = 30 \text{ m/s}$  resultiert aufgrund der veränderten Reibungsverhältnisse in einer Verschlechterung der Synchronisationsgüte, so dass eine etwa doppelt so hohe Relativgeschwindigkeit auftritt (B). Nach dem Austritt der Schleifscheibe aus dem Kontakt kommt es zu einem relativ schnellen Abbremsen der Crushierrolle bis hin zum Stillstand (C). Wesentliche Ursache hierfür ist die Reibung der auf hohe Steifigkeit und Präzision ausgelegten und vorgespannten Wälzlagerung. Beim nächsten Crushierhub muss das Abrichtwerkzeug somit wieder aus der Ruhelage beschleunigt werden. Die dabei durch den Anfangsschlupf jeweils wirkenden Reibkräfte bei der Beschleunigung der Crushierrolle können als Hauptursache für den besonders bei freilaufenden Crushierrollen auftretenden Verschleiß des Abrichtwerkzeuges angesehen werden.



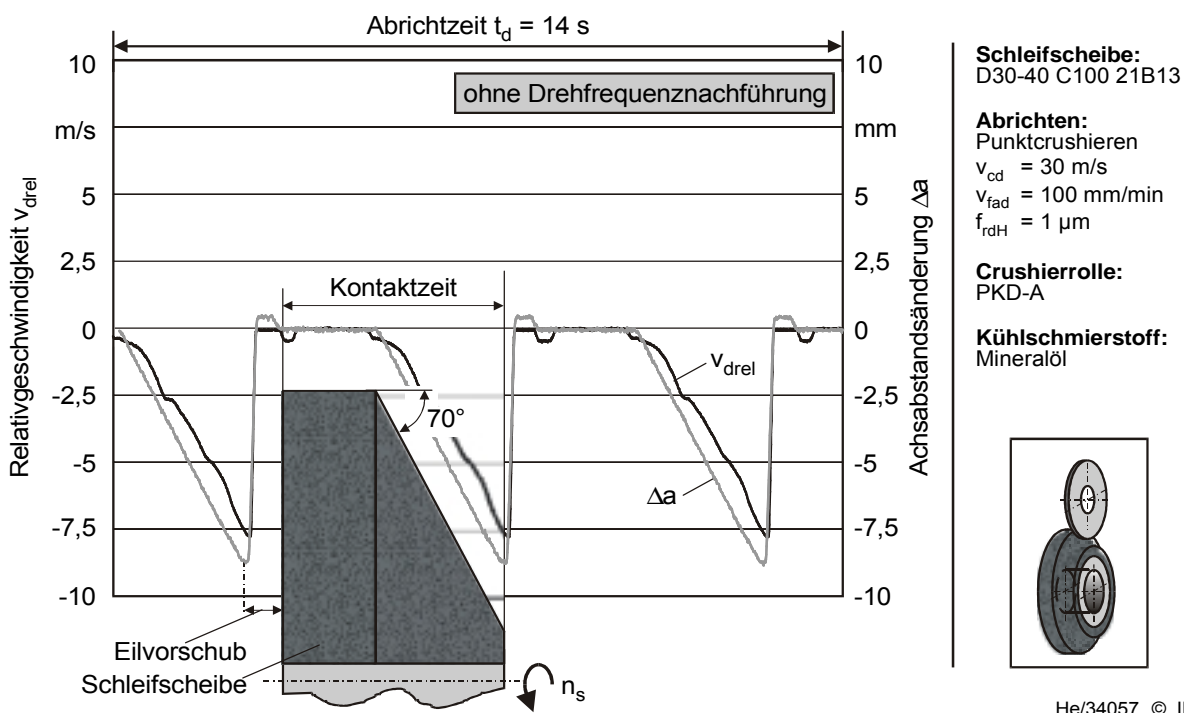
**Bild 6.2:** Relativgeschwindigkeit bei druckluftangetriebener Crushierrolle

Der Einsatz eines Druckluftmotors zum Antrieb der Crushierrolle zielt darauf ab, die bei dem freilaufenden Crushiersystem erforderliche Beschleunigung aus der Ruhelage heraus bei jedem einzelnen Abrichthub zu vermeiden. Bild 6.2 zeigt die Relativgeschwindigkeit  $v_{drel}$  und die Achsabstandsänderung  $\Delta a$  für die verschiedenen Bereiche beim Punktcrushieren einer Schleifscheibe, welche einen zylindrischen Abschnitt und einen um  $70^\circ$  geneigten Konturabschnitt besitzt. Nach dem Erstkontakt zwischen Crushierrolle und Schleifscheibe, während des Crushierens der Zylinder-

fläche (D), ergibt sich eine bessere Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten als bei Verwendung der freilaufenden Crushiervorrichtung, so dass nahezu keine Relativgeschwindigkeit gemessen werden kann. Dies ist auf die sehr leichtgängige und nicht vorgespannte Lagerung der Achse des Druckluftmotors zurückzuführen, so dass dem Antrieb durch die Schleifscheibe, auch aufgrund der geringen Leistung des Druckluftmotors, ein geringer Widerstand entgegengebracht wird. Beim Crushieren der um  $70^\circ$  geneigten Kontur verschlechtert sich die Synchronisation (E). Die schlechteren Kontaktbedingung zwischen Crushierrolle und Schleifscheibe entlang der steilen Flanke erhöhen den Schlupf, so dass eine Relativgeschwindigkeit auftritt.

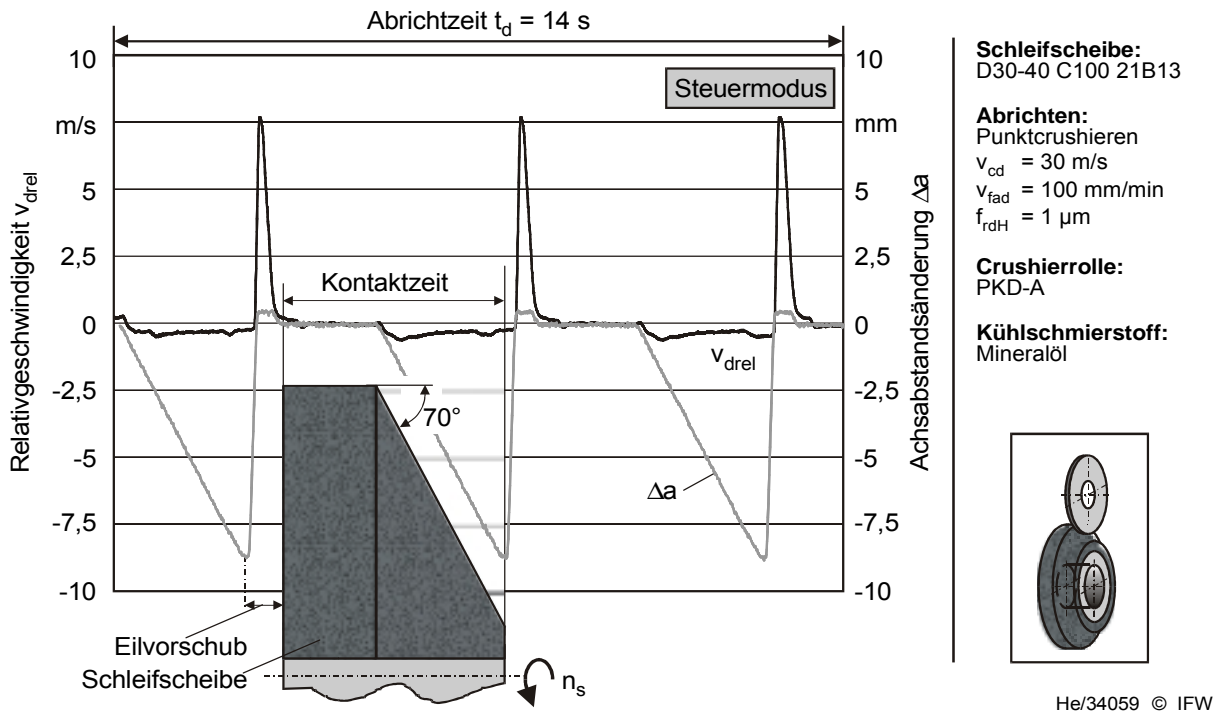
Schwierigkeiten mit der Synchronisation beim Einsatz dieses Systems zeigen sich bereits vor dem Erstkontakt der beiden Wirkpartner. So sorgen schon geringe Druckluftschwankungen im Versorgungssystem für eine signifikante Änderung der Drehfrequenz des Antriebsmotors (A). Die auftretenden Kräfte durch den zugeschalteten Kühlschmierstoffstrom bremsen den Druckluftmotor sogar so stark ab, dass eine Reduzierung der Drehfrequenz um etwa 50 % möglich ist (B). Aufgrund dieser Sensibilität gegenüber äußeren Einwirkungen wird das exakte Einstellen der benötigten Drehfrequenz des Druckluftmotors erschwert.

Eine vollständige Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeit von Crushierrolle und Schleifscheibe in jedem Berührungspunkt, speziell für die Einsatzvorbereitung komplexer Schleifscheibenprofile, wird nur mit einem angetriebenen System mit Drehfrequenzregelung erreicht (technische Details siehe Kapitel 4.2.2). Um eine Beurteilung der Synchronisationsgüte durch die Drehfrequenzregelung vornehmen zu können, wird zunächst in einem Referenzversuch der Verlauf der Relativgeschwindigkeit bei Antrieb der Crushierrolle ohne Drehfrequenznachführung aufgezeichnet. Die Rotationsgeschwindigkeit der Crushierrolle ist dabei so eingestellt, dass zu Beginn des Versuches die Relativgeschwindigkeit  $v_{drel}$  im Berührungspunkt zwischen der Crushierrolle und der Zylinderfläche der Schleifscheibe gleich Null beträgt. Dieser Verlauf – in Abhängigkeit von der Achsabstandsänderung  $\Delta a$  – ist in Bild 6.3 über die Abrichtzeit  $t_d$  dargestellt. Zu erkennen sind drei unterschiedliche Phasen, welche sich zyklisch wiederholen. Die Achsen der Maschine verfahren zunächst im Eilvorschub, um die Crushierrolle mit der Schleifscheibe in Kontakt zu bringen. Beim Crushieren der Zylinderfläche ändert sich der Achsabstand nicht und das Auftreten einer Relativgeschwindigkeit kann nahezu vermieden werden. Während des Abfahrens der steilen Schleifscheibenflanke verringert sich der Achsabstand kontinuierlich. Hierbei kann eine Selbstsynchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten aufgrund der Reibkräfte zwischen den Wirkpartnern nicht festgestellt werden. Die relativ geringe Leistung der verwendeten Hochfrequenzspindel reicht aus, um die Drehfrequenz des Abrichtwerkzeuges konstant zu halten. Ein Abbremsen des Abrichtwerkzeuges durch den Eingriff mit der Schleifscheibe findet nicht statt. Dies resultiert in einer betragsmäßig nahezu linearen Zunahme der Relativgeschwindigkeit bei Verringerung des Achsabstandes.



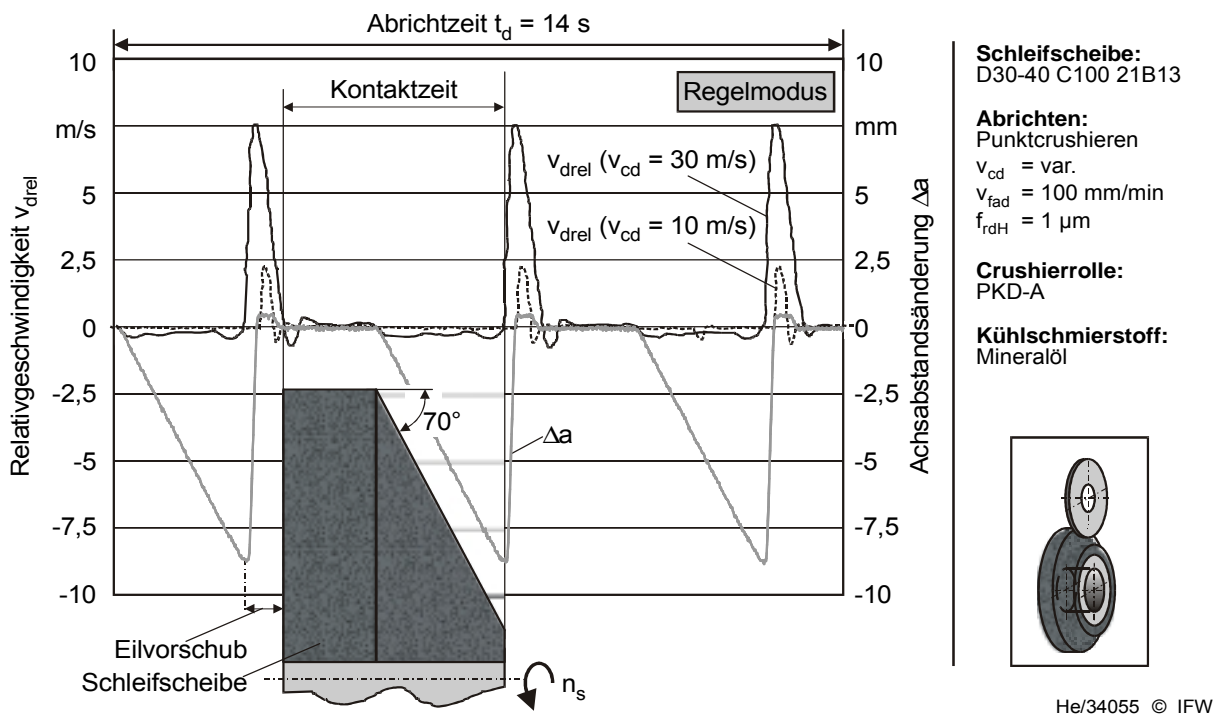
**Bild 6.3:** Relativgeschwindigkeit bei konstantem Antrieb der Crushierrolle

Die entstehende Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern bei Steuerung der Drehfrequenz der Crushierrolle ist in Bild 6.4 dargestellt. Die durch potentiometrische Wegmessung erfasste Änderung des Achsabstandes wird als Eingangssignal in die Steuerungselektronik eingespeist. Aufgrund des in dem "PCC-Crush"-System gespeicherten Durchmessers der Crushierrolle und des Ausgangsdurchmessers der Schleifscheibe sowie der Messung der aktuellen Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe wird an den Frequenzumformer ein Signal für die Soll Drehzahl der Crushierrolle ausgegeben. Eine Rückkopplung des realen Drehfrequenz-Signals der Crushierrolle in das System findet im Steuermodus nicht statt. Bereits in diesem Modus kann das Auftreten einer Relativgeschwindigkeit stark minimiert werden. Während es beim Abrichten des zylindrischen Abschnitts der Schleifscheibe zu einer vollständigen Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten kommt, tritt beim Abfahren der steilen Flanke – dem eigentlich kritischen Bereich, da hier permanent nachgesteuert werden muss – eine Relativgeschwindigkeit von etwa  $v_{drel} = -0,5 \text{ m/s}$  auf. Dies entspricht bei einer Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe von  $v_c = 30 \text{ m/s}$  einem Geschwindigkeitsverhältnis von  $q_d = 1,017$ . Aufgrund der Trägheit der rotierenden Massen der Crushierspindel und der Reaktionszeit der Steuerungseinheit und der Hochfrequenzspindel kommt es beim Verfahren der Achsen im Eilvorschub (um zur Ausgangsposition für den nächsten Crushierzyklus zu gelangen) zu einer höheren Relativgeschwindigkeit. Während dieser Zeit befinden sich die Wirkpartner jedoch nicht im Eingriff. Im Vergleich zum ungeregelten System lässt der gesamte Verlauf der Relativgeschwindigkeit eine erhebliche Reduzierung des Verschleißes am Abrichtwerkzeug erwarten.



**Bild 6.4:** Relativgeschwindigkeit bei Steuerung der Drehfrequenz der Crushierrolle

Im Regelmodus wird zusätzlich die reale Drehfrequenz der Crushierrolle gemessen, mit der berechneten Sollfrequenz verglichen und nachgeregelt. Hierdurch wird eine Relativgeschwindigkeit während des Abrichtens nahezu vermieden (Bild 6.5).

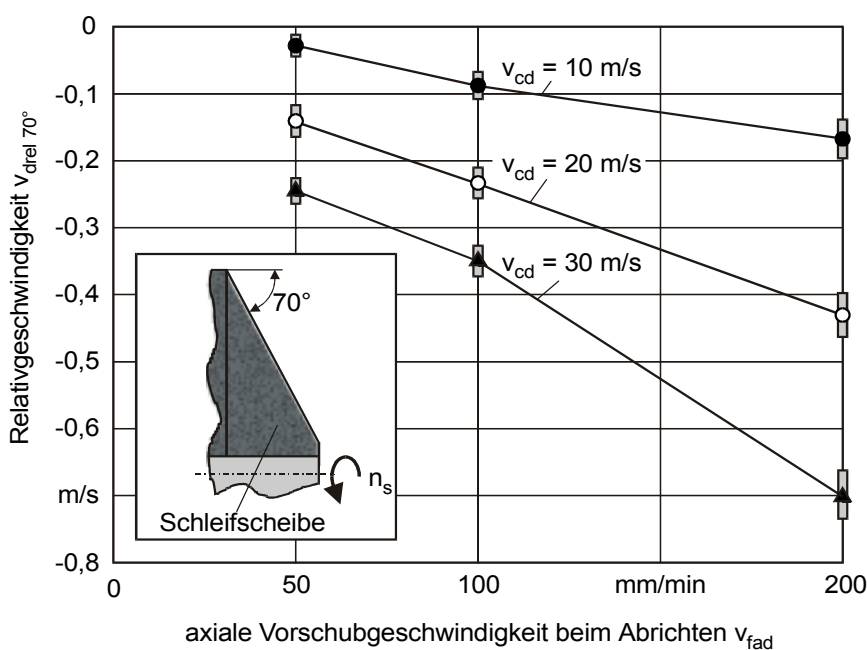


**Bild 6.5:** Einfluss der Regelung auf die Relativgeschwindigkeit

Die betragsmäßig maximal auftretende Relativgeschwindigkeit beträgt etwa  $v_{cdrel} = 0,35$  m/s. Auch im geregelten Modus kommt es zu einem Überschwingen der



Relativgeschwindigkeit, wenn die Achsen stark beschleunigt bzw. abgebremst werden. Im Eilvorschub wird innerhalb einer relativ kurzen Zeit der Achsabstand vergrößert. Dadurch gibt das Regelsystem einen Impuls, die Umfangsgeschwindigkeit der Crushierrolle im fiktiven Berührungspunkt anzupassen. Dies resultiert in einer starken Beschleunigung der Abrichtspindel. Sowohl dieser Effekt als auch die Relativgeschwindigkeit können durch eine Verringerung der Schnittgeschwindigkeit erheblich gesenkt werden. Bei einer Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe von  $v_{cd} = 10$  m/s wird auch im Bereich der steilen Flanke der Schleifscheibe nur eine sehr geringe Relativgeschwindigkeit von  $v_{cdrel} = -0,09$  m/s zwischen den Wirkpartnern detektiert. Je niedriger die Drehfrequenz der Schleifscheibe gewählt wird, desto geringer muss der Antrieb der Crushierrolle bei einer Achsabstandsänderung nachgeregelt werden. Der Überschwing-Effekt beim Beschleunigen für den Eilvorschub verhält sich proportional zur Schnittgeschwindigkeit. Entgegen der üblichen Praxis, Schleifscheiben bei gleicher Schnittgeschwindigkeit wie im Schleifprozess abzurichten, wirkt sich eine Abweichung hiervon durch Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit beim Abrichten positiv auf die Regelungsgüte beim Punktcrushieren aus.

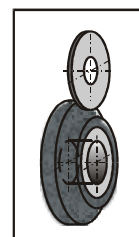


**Schleifscheibe:**  
D30-40 C100 21B13

**Abrichten:**  
Punktcrushieren  
 $v_{cd} = \text{var.}$   
 $v_{fad} = \text{var.}$   
 $f_{rdH} = 1 \mu\text{m}$

**Crushierrolle:**  
PKD-A

**Kühlschmierstoff:**  
Mineralöl



He/34056 © IFW

**Bild 6.6:** Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Relativgeschwindigkeit

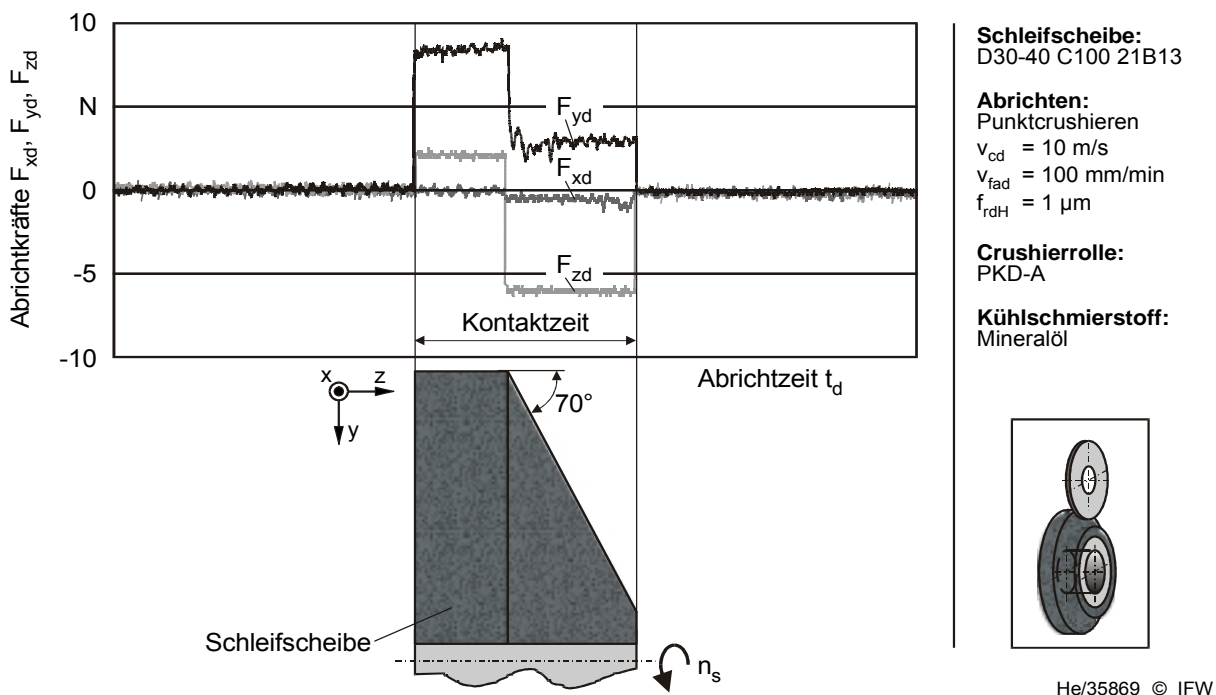
Neben der Schnittgeschwindigkeit lässt sich die Höhe der auftretenden Relativgeschwindigkeit auch durch die Wahl der axialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fad}$  beeinflussen. So ist in Bild 6.6 die Relativgeschwindigkeit  $v_{drel 70^\circ}$  beim Abrichten des steilen Flankenbereichs mit einem Konturneigungswinkel von  $\beta = 70^\circ$  im Regelmodus in Abhängigkeit der axialen Vorschubgeschwindigkeit für jeweils drei verschiedene Schnittgeschwindigkeiten der Schleifscheibe dargestellt. Eine Verringerung der axialen Vorschubgeschwindigkeit bietet eine größere Zeitspanne zur Nachregelung



der Hochfrequenzspindel, welche die Crushierrolle antreibt. Hierdurch verbessert sich die Synchronisationsgüte. Bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit  $v_{cd}$  steigt der Einfluss der axialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fad}$  auf die Synchronisationsgüte signifikant an.

## 6.2 Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Abrichtprozess

Der Einfluss der Synchronisationsgüte der Umfangsgeschwindigkeiten auf den Abrichtprozess lässt sich anhand der auftretenden Prozesskräfte und der sich einstellenden Gütefaktoren beim Abrichten, welche das Verschleißverhalten der Crushierrolle charakterisieren, analysieren. Zunächst ist ein typischer Kraftverlauf bei geregelter Drehfrequenz der Crushierrolle in Bild 6.7 dokumentiert und zeigt die Absolutkräfte  $F_{xd}$ ,  $F_{yd}$  und  $F_{zd}$  beim Punktcrushieren entsprechend dem Koordinatensystem der Schleifmaschine. Die eingesetzte Schleifscheibe D30-40 wird mit einer Crushierrolle vom Typ PKD-A abgerichtet.

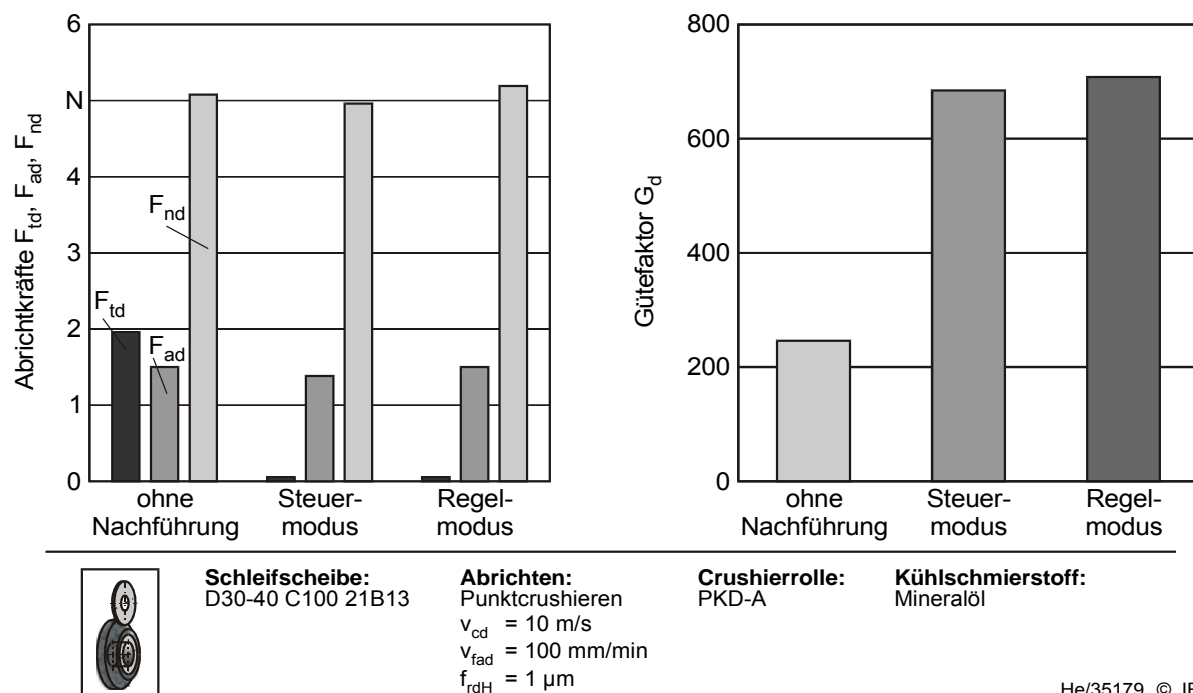


**Bild 6.7:** Verlauf der Prozesskräfte beim Punktcrushieren

Beim Punktcrushieren der zylindrischen Schleifbelagsfläche ist die senkrecht zum Schleifbelag wirkende Kraft  $F_{yd}$  betragsmäßig am größten. Sie ist hauptverantwortlich für die Rissinitiiierung in den keramischen Bindungsbrücken. Die Kraftkomponente  $F_{zd}$  resultiert aus der axialen Vorschubbewegung der Crushierrolle und der dabei auftretenden Reibung. Bedingt durch die hohe Synchronisationsgüte bei Regelung der Drehfrequenz des Abrichtwerkzeuges bleibt die Kraft  $F_{xd}$ , welche aufgrund der wirkenden Reibung durch die auftretende Relativgeschwindigkeit entsteht, nahezu konstant bei einem Wert von annähernd  $F_{xd} = 0 \text{ N}$ . Beim Punktcrushieren der

Kegelmantelfläche mit einem Flankenwinkel von  $70^\circ$  verändern sich diese Abrichtkräfte. Die axial wirkende Kraftkomponente  $F_{zd}$  steigt betragsmäßig – im Vergleich zum Niveau beim Abrichten der Zylinderfläche – an, während gleichzeitig die Abrichtkraft  $F_{yd}$  abnimmt.

Links im Bild 6.8 sind die auftretenden Kräfte entlang der Kegelmantelfläche aufgetragen, welche aufgrund der trigonometrischen Beziehungen in die Kraftkomponenten normal zur Schleifbelagsoberfläche  $F_{nd}$ , parallel zur axialen Vorschubbewegung  $F_{ad}$  und tangential zum Umfang der Crushierrolle im Berührungspunkt mit der Schleifscheibe  $F_{td}$  umgerechnet sind. Dabei wird deutlich, dass die Normal- und die Axialkräfte durch die Art des Antriebs der Crushierrolle nicht beeinflusst werden. Die Tangentialkraft wird im wesentlichen durch die zwischen den Wirkpartnern auftretende schlupfbedingte Reibung verursacht und ist für den Verschleiß des Abrichtwerkzeuges verantwortlich. Eine Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten führt zu einer erheblichen Reduzierung der wirkenden Tangentialkräfte. Diese ist so gering, dass sie unterhalb des Messbereiches der Kraftmesssensoren liegt. Die Unterschiede zwischen dem gesteuerten und dem geregelten Antrieb der Crushierrolle sind nicht signifikant.



**Bild 6.8:** Einfluss des Antriebskonzepts der Crushierrolle auf die Abrichtkräfte und den Gütefaktor

Der Einfluss des Antriebskonzeptes auf den Verschleiß des Abrichtwerkzeuges ist rechts in Bild 6.8 dargestellt. Ohne Nachführung der Drehfrequenz der Crushierrolle lässt sich nur ein relativ geringer Gütefaktor von  $G_d = 250$  erreichen, welcher in der beim Abfahren der Flanke auftretenden Relativgeschwindigkeit von bis zu  $v_{cdrel} =$

7,5 m/s und der dadurch verursachten Reibung zwischen den Wirkpartnern seine Ursache hat. Eine erhebliche Verbesserung des Verschleißverhaltens des Abrichtwerkzeuges lässt sich durch eine Drehfrequenznachführung der angetriebenen Crushierrolle erzielen. Aufgrund der Reduzierung des Schlupfes kann der Gütefaktor fast verdreifacht werden, so dass im geregelten Modus ein Wert von  $G_d = 710$  erreicht wird. Ein größerer Unterschied der Gütefaktoren bei Nachführung der Drehfrequenz im Steuer- bzw. im Regelmodus kann dabei nicht nachgewiesen werden, da beide Modi zu einer Relativgeschwindigkeit im Kontaktpunkt von annähernd Null führen.

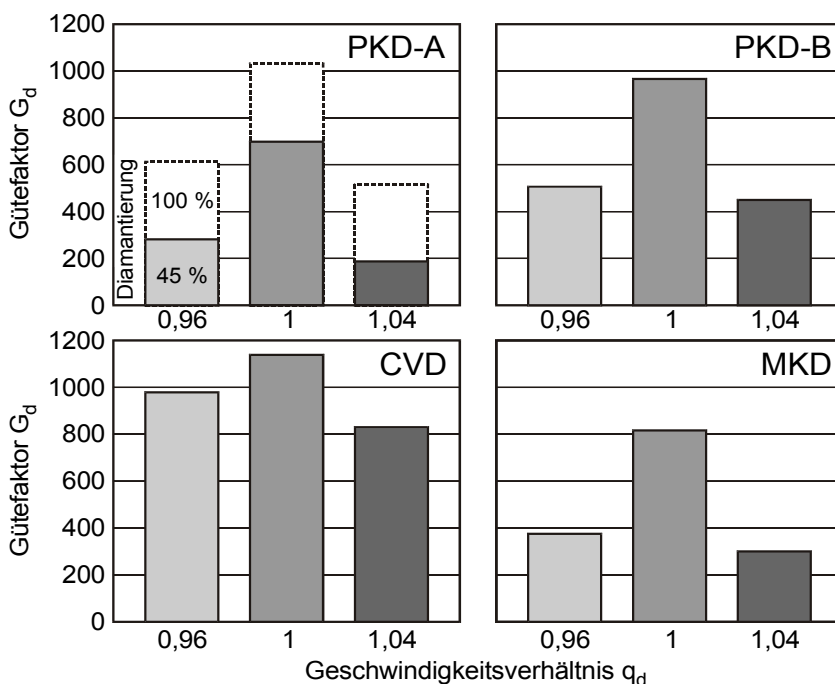
Die Ergebnisse machen deutlich, dass bereits eine relativ geringe Relativgeschwindigkeit zu einer signifikanten Verschlechterung des Gütefaktors – und damit des Verschleißverhaltens und der Formstabilität der Crushierrolle – führt. Eine reibungsbedingte Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten ist nicht ausreichend, um das Verfahrenspotenzial voll auszuschöpfen. Bei der freilaufenden Crushierrolle, wie bei dem nicht-nachgeführten Antrieb, treten ähnlich hohe Relativgeschwindigkeiten auf. Nur der Einsatz eines Regelungssystems ermöglicht auch bei steilen Konturneigungswinkeln und damit verbundenen relativ großen und schnellen Achsabstandsänderungen zwischen den Wirkpartnern eine ausreichende Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten. Bei der Realisierung des idealen Geschwindigkeitsverhältnisses von  $q_d = 1$  kann eine erhebliche Reduzierung des Abrichterverschleißes erreicht werden.

Zur detaillierten Analyse des Einflusses der Relativgeschwindigkeit auf den Abrichtverschleiß werden zusätzliche Untersuchungen mit Hilfe des geregelten Antriebssystems durchgeführt. Diese erfolgen mit einer 1A1-Schleifscheibe der Spezifikation D30-40 bei identischen Stellgrößen, wie sie bei den Untersuchungen der Antriebskonzepte gewählt wurden. Im Gegensatz zu den bisher dargestellten Untersuchungen wird mit Hilfe des Regelungssystem eine definierte Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern eingestellt. Bild 6.9 zeigt neben den Gütefaktoren für das ideale Geschwindigkeitsverhältnis von  $q_d = 1$  auch die Auswirkungen auf den Abrichterverschleiß bei der Wahl eines Geschwindigkeitsverhältnisses von  $q_d = 0,96$  bzw.  $q_d = 1,04$ .

Zunächst ist auffällig, dass die erzielten Gütefaktoren bei vollständiger Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten sehr stark vom verwendeten Diamantmaterial der Crushierrolle abzuhängen scheinen. Während mit der mit einzelnen PKD-Diamanten besetzten Rolle vom Typ PKD-A auch unter idealen Bedingungen nur ein Gütefaktor von  $G_d = 710$  erreicht werden kann, ist die Verschleißfestigkeit eines CVD-beschichteten Abrichtwerkzeuges im Vergleich zu den eingesetzten Rollen am größten, so dass ein Gütefaktor von  $G_d = 1140$  erzielt wird. Unabhängig von der eingesetzten Crushierrolle führt eine relativ geringe Abweichung von der idealen Synchronisation

( $\pm 4\%$ ) zu einem deutlich höheren Verschleiß am Abrichter und damit einer Reduzierung des Gütefaktors um bis zu mehr als die Hälfte.

Ein Geschwindigkeitsverhältnis von  $q_d = 1,04$  verursacht in der Regel einen höheren Verschleiß als ein Geschwindigkeitsverhältnis von  $q_d = 0,96$ . Ursache hierfür ist darin zu sehen, dass bei  $q_d = 1,04$  die Umfangsgeschwindigkeit der Crushierrolle  $v_R$  im Kontaktpunkt größer ist als die der Schleifscheibe  $v_C$ . Dadurch kommt es zu einem ständigen Abbremsen der Rolle durch die Schleifscheibe, so dass durch die auftretenden Reibkräfte der Verschleiß erzeugt wird. Hingegen ist bei einem Geschwindigkeitsverhältnis von  $q_d = 0,96$  die Umfangsgeschwindigkeit der Crushierrolle zwar zunächst langsamer als die der Schleifscheibe. Aufgrund der geringen Leistung der Hochfrequenzspindel wird das Abrichtwerkzeug aber von der Schleifscheibe mit beschleunigt. Dies wiederum reduziert die Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern.

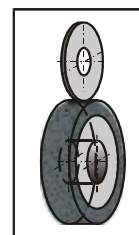


**Schleifscheibe:**  
D30-40 C100 21B13

**Abrichten:**  
Punktcrushieren  
 $v_{cd} = 10$  m/s  
 $V_{fad} = 100$  mm/min  
 $f_{rdH} = 1$   $\mu$ m  
 $i_{Hd} = 1000$

**Crushierrolle:**  
var.

**Kühlschmierstoff:**  
Mineralöl



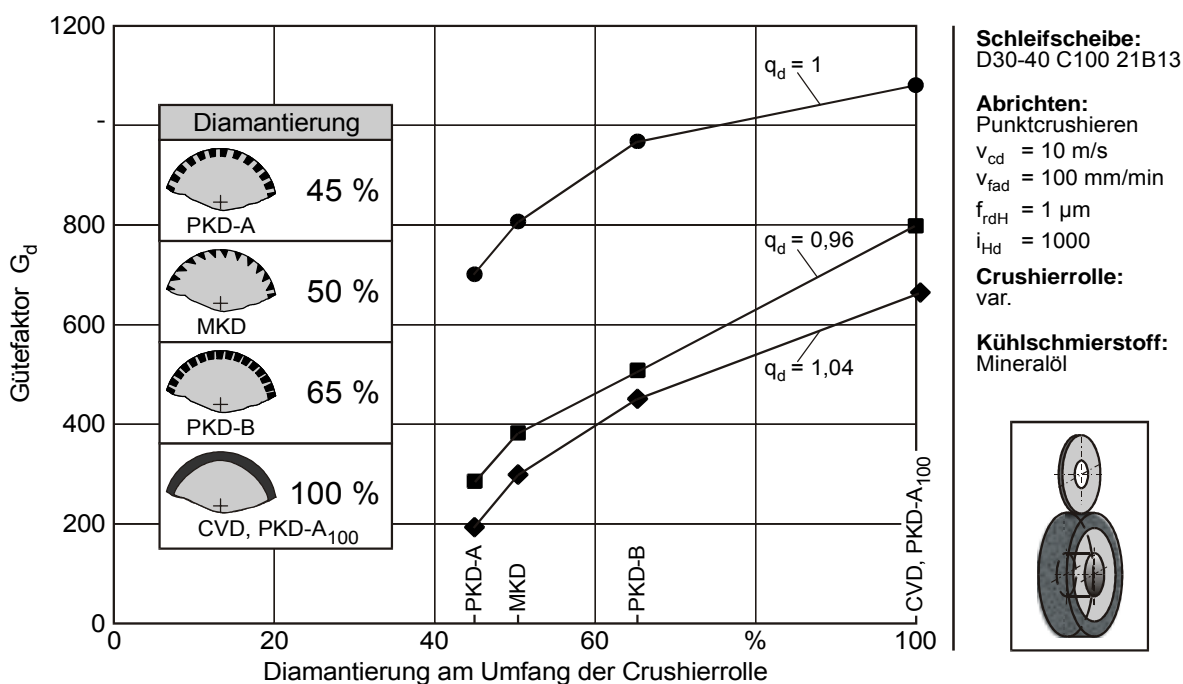
He/35178 © IFW

**Bild 6.9:** Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Gütefaktor

Vergleicht man das Verschleißverhalten der Crushierrolle vom Typ PKD-A mit dem der PKD-B-Crushierrolle so fällt zunächst ein Widerspruch auf. Die verwendeten Diamantstäbchen vom Typ PKD-B sind im Sinterverfahren mit metallischer Bindephase hergestellt und weisen eine geringere Härte als die nach dem CVD-Verfahren hergestellten PKD-A-Diamanten auf. Trotzdem ist der Verschleiß am PKD-B-Abrichtwerkzeug geringer. Dieser Widerspruch lässt sich auflösen, wenn man den Gütefaktor beim Abrichten in Abhängigkeit der Diamantierung am Umfang der Crushierrolle betrachtet (Bild 6.10). Dabei werden die Unterschiede in den Härten der verwendeten Diamantmaterialien ignoriert.

Zusätzlich kommt hier noch ein Abrichtwerkzeug zum Einsatz, dessen Umfangsfläche zu 100 % mit PKD-A-Diamanten belegt ist. So ergibt sich bei einer Belegung von 100 % dementsprechend das Ergebnis als Mittelwert der Gütefaktoren bei der Analyse der beiden Crushierrollen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind auch in Bild 6.9 eingezeichnet.

Da die verwendeten Diamantsorten nicht in den selben Abmessungen vorliegen und auch der Setzabstand bei den Einzeldiamanten variiert, ist der prozentuale Anteil der Umfangsfläche, welcher mit Diamant besetzt, bei jeder der eingesetzten Crushierrollen unterschiedlich. Er variiert zwischen 45 % beim standardmäßigen PKD-A-Abrichtwerkzeug und 100 % bei der nach dem CVD-Verfahren beschichteten Crushierrolle. Unabhängig von der Synchronisationsgüte beim Punktcrushieren kann der Verschleiß der Crushierrolle durch eine Erhöhung der Diamantanteils am Umfang verringert werden. Bei auftretender Relativgeschwindigkeit ( $q_d = 0,96$  bzw.  $q_d = 1,04$ ) bewirkt eine Verdoppelung des Diamantanteils von 50 % auf 100 % auch ein Steigerung der Standzeit des Abrichtwerkzeuges um den Faktor zwei. Bei vollständiger Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeit der Wirkpartner liegt dieser Faktor bei 1,6.



He/36132 © IFW

**Bild 6.10:** Einfluss der Diamantierung der Crushierrolle auf den Gütefaktor

## 7 Punktcrushieren geradliniger Schleifscheibenprofile

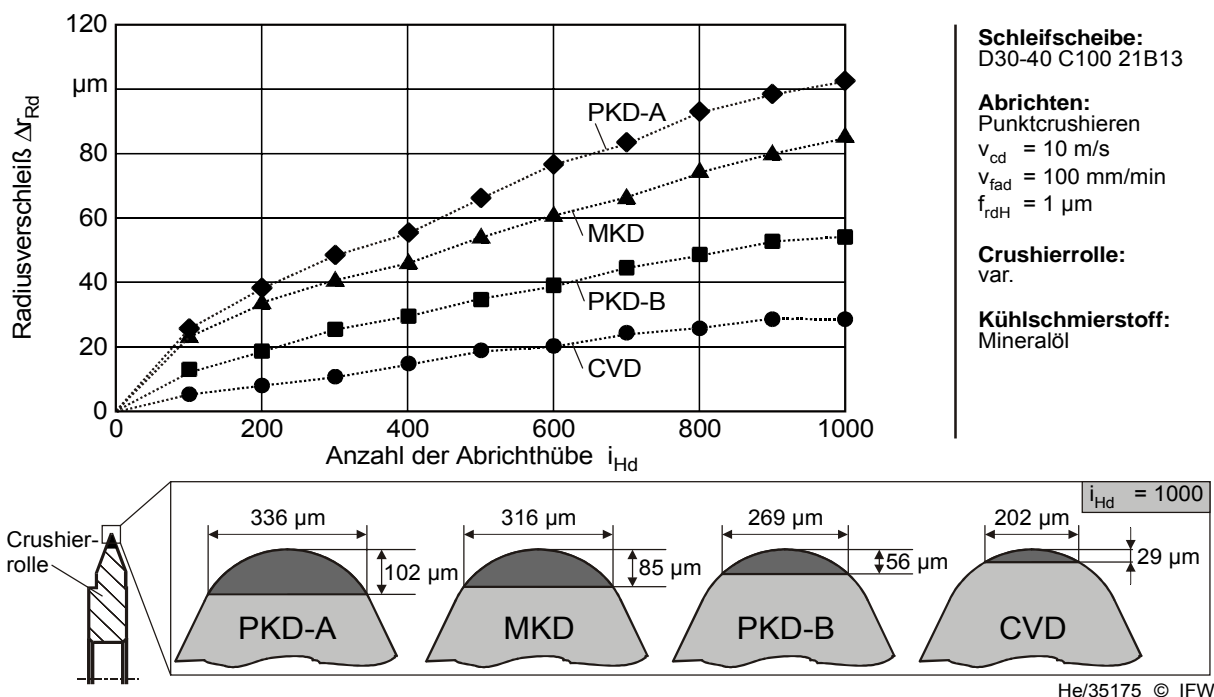
Der Einfluss der Stell- und Systemgrößen beim Abrichtprozess Punktcrushieren ist unter verschiedenen Gesichtspunkten zu betrachten: Wenn bei der Fertigung eines Bauteils der Schleifprozess als Endbearbeitungsverfahren eingesetzt wird, werden an das Arbeitsergebnis hinsichtlich Maß- und Formgenauigkeit sowie Oberflächenqualität hohe Anforderungen gestellt. Neben dem Schleifscheibenverschleiß, der Schleifscheibenspezifikation und den Stellgrößen beim Schleifprozess wird die Profilgenauigkeit und Oberflächengüte des herzustellenden Werkstückes durch die Wahl des Abrichtprozesses und dessen Stellgrößen beeinflusst. So kann durch die Einsatzvorbereitung die Schleifscheibentopographie gezielt auf die anschließende Schleifbearbeitung abgestimmt werden, indem die Schneidengeometrie und der vorhandene Spanraum durch den Abrichtprozess verändert werden. Bedingt durch den Verschleiß des Abrichters können aber Profilfehler auf der Schleifscheibe erzeugt werden, welche sich dann beim Schleifen auf dem Werkstück abbilden. Die Kenntnis dieses Verschleißverlaufes des Abrichtwerkzeuges, welcher neben den Stellgrößen beim Abrichten durch die Spezifikationen der Crushierrolle und der Schleifscheibe beeinflusst wird, bildet die Voraussetzung für die Auslegung des Abrichtprozesses. In den folgenden Unterkapiteln wird daher auf den Einfluss der System- und Stellgrößen sowohl auf das Verschleißverhalten der eingesetzten Crushierrollen als auch auf die Ausbildung der Schleifscheibentopographie eingegangen. Sämtliche Untersuchungen wurden, sofern nicht explizit etwas anderes angegeben ist, mit angetriebener Crushierrolle unter Regelung der Drehfrequenz bei einem Geschwindigkeitsverhältnis von  $q_d = 1$  durchgeführt. Der Gesamtabrichtbetrag  $a_{edg}$  liegt bei allen Untersuchungen sehr viel höher, als dies im praktischen Einsatz des Abrichtsystems notwendig wäre. Dann würden jeweils nur wenige Mikrometer abgerichtet werden. Die Wahl eines hohen Gesamtabrichtbetrages soll primär verhindern, dass vorausgegangene Untersuchungen mit der selben Schleifscheibe das aktuelle Ergebnis verfälschen.

### 7.1 Einfluss der System- und Stellgrößen

#### 7.1.1 Crushierrollen- und Schleifscheibenspezifikation

Auch unter idealen Bedingungen bei der Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten von Schleifscheibe und Crushierrolle beim Punktcrushieren kommt es zu einem Verschleiß am Abrichtwerkzeug. In Bild 7.1 ist der Verlauf des Radiusverschleißes beim Punktcrushieren einer D30-40-Schleifscheibe mit unterschiedlichen Crushierrollen zu sehen. Unabhängig von der verwendeten Spezifikation des Abrichtwerkzeuges ist der Anfangsverschleiß beim Einsatz einer neuen Crushierrolle mit einem Spitzenradius von  $r_R = 0,2$  mm besonders ausgeprägt und geht dann mit zunehmender Anzahl der Abrichthübe  $i_{Hd}$  in einen linearen bis degressiven Verlauf über. Die nach dem CVD-Verfahren hergestellte und mit einer am Umfang geschlos-

senen Diamantbeschichtung versehene Crushierrolle weist den geringsten Verschleiß auf. Nach insgesamt 1000 Abrichthüben mit einer Zustellung von jeweils  $f_{rdH} = 1 \mu\text{m}$  ist der Spitzenradius nur um  $29 \mu\text{m}$  zurückgesetzt worden. Dadurch ergibt sich ein ebenes Plateau am Umfang mit einer Breite von  $202 \mu\text{m}$ . Das schlechteste Verschleißverhalten hingegen zeigt die mit einzelnen PKD-Diamanten besetzte Crushierrolle vom Typ PKD-A. Bei identischen Abrichtbedingungen ist der Radiusverschleiß mehr als dreimal so hoch wie bei Einsatz der vollständig diamantbeschichteten CVD-Rolle. Aufgrund der Geometrie am Umfang stellt sich dabei eine Plateaubreite von  $336 \mu\text{m}$  ein. Nicht nur der Einsatz härterer Diamantspezifikationen sondern auch eine Erhöhung der Setzdichte der Einzeldiamanten kann dieses Verschleißverhalten erheblich verbessern. So kann der Radiusverschleiß an der PKD-B-Rolle, bei welcher der Setzabstand der Diamanten gegenüber der PKD-A-Rolle um durchschnittlich  $0,5 \text{ mm}$  reduziert ist, fast halbiert werden. Der Einsatz monokristalliner Diamanten (MKD), welcher in den Herstellkosten erheblich über denen von polykristallinen Diamanten liegt, bringt keine wesentlichen Vorteile.

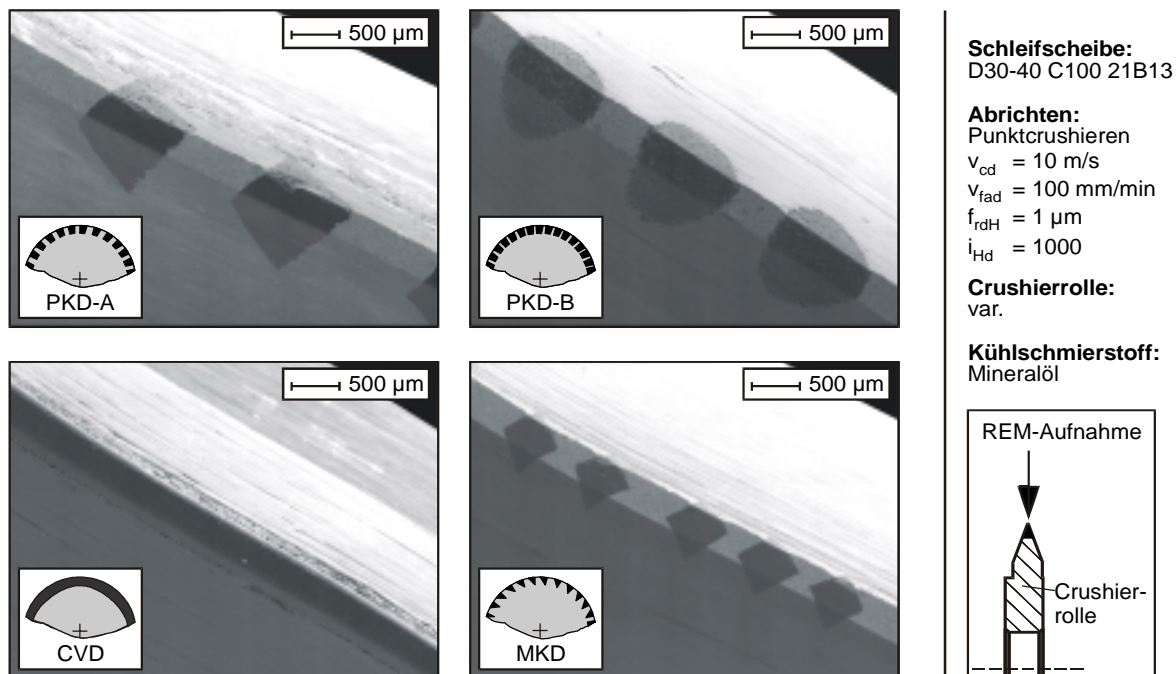


**Bild 7.1:** Radiusverschleiß bei unterschiedlichen Crushierrollenspezifikationen

Bild 7.2 zeigt die REM-Aufnahmen der Crushierrollen nach dem Einsatz. Sowohl im Vor- als auch im Rücklauf bei der axialen Vorschubbewegung sind die Abrichtwerkzeuge mit der Schleifscheibe im Eingriff. Dabei kommen beide Seiten der Crushierrolle jeweils in Erstkontakt mit dem Schleifbelag. Dadurch bildet sich keine ausgeprägte Verschleißkante sondern ein ebenes Plateau aus. Daraus lässt sich auch schließen, dass die Crushierrolle über die gesamte Eingriffsbreite während des Prozesses gleichmäßig belastet wird. Bei den mit Einzeldiamanten bestückten Crushierrollen verschleischen das als Bindungsmaterial fungierende Hartmetall und die darin eingebetteten Diamanten gleichmäßig. Ein Absatz zwischen diesen un-



terschiedlich harten Werkstoffen oder einzelne Ausbrüche des Hartmetalls können nicht detektiert werden. Ein Grund hierfür ist auch in der geringen Zustellung pro Abriechhub von  $f_{rdH} = 1 \mu\text{m}$  zu sehen.



He/35174 © IFW

**Bild 7.2:** Verschleißbildung bei unterschiedlichen Crushierrollenspezifikationen

Betrachtet man die Einzeldiamanten bzw. die Diamantbeschichtung der eingesetzten Crushierrollen in stärkerer Vergrößerung zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede im Verschleißverhalten (Bild 7.3). Die Oberfläche der PKD-A-Crushierrolle ist durch feinste Ausbrüche und Absplitterungen am Diamanten gekennzeichnet, welche sich bevorzugt in Drehrichtung der Crushierrolle ausbreiten und so als Folge des Eingriffs mit den Diamantschneiden der Schleifscheibe charakterisiert werden können. Auch bei der Regelung auftretende geringfügige Abweichungen vom idealen Geschwindigkeitsverhältnis  $q_d = 1$  sowie Beschleunigungen der Crushierrolle durch das Regelungssystem infolge der Veränderung des Achsabstandes der beiden Wirkpartner sind hierfür eine Ursache. Zusätzlich sind an der Oberfläche vereinzelt plastisch verformte Materialablagerungen zu erkennen, welche mechanisch mit dem Diamanten verklammert sind (s. Pfeil). Hierbei handelt es sich offenbar um ausgebrochenes Bindungsmaterial aus der Schleifscheibe.

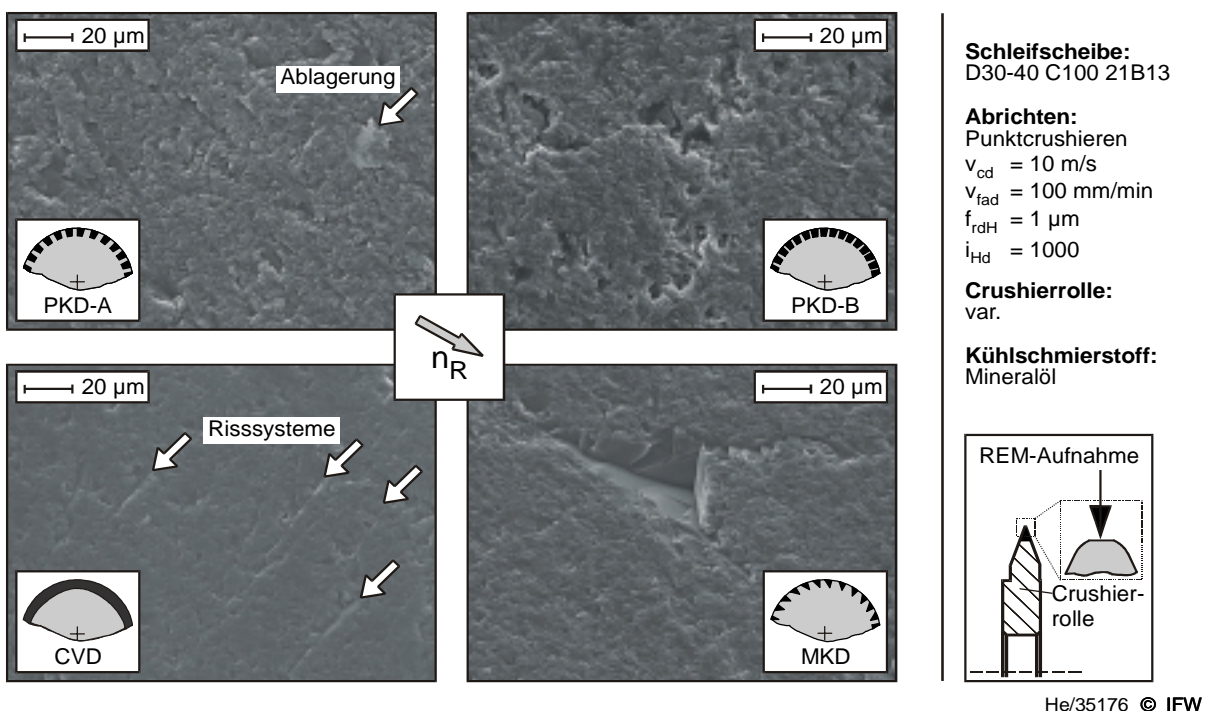
Bei der PKD-B-Crushierrolle ergibt sich ein etwas abweichendes Verschleißbild. Die Form der Mikrosplitterungen ist intensiver ausgeprägt und es kommt zu verstärkten Ausbrüchen an der Oberfläche. Dies kann auf eingebrachte Defekte bei der Herstellung der PKD-Diamanten zurückgeführt werden.

Das CVD-beschichtete Abrichtwerkzeug zeichnet sich nach dem Einsatz durch eine wesentlich glattere Oberfläche aus. Auffällig jedoch sind quer zur Drehrichtung der Crushierrolle verlaufende Rissysteme (s. Pfeile). Diese sind im wesentlichen auf



das Herstellverfahren der CVD-Beschichtung zurückzuführen, bei dem man überwiegend statistisch ausgerichtete Diamantkristalle erhält. Einzelne Kristalle entstehen zunächst aus anfangs isolierten Keimen und wachsen nach Erreichen eines Radius, welcher der Hälfte des mittleren Keimabstandes entspricht, zu einem geschlossenen polykristallinen Film zusammen. Das dreidimensionale Kristallwachstum geht damit in einen eindimensionalen Wachstumsprozess über. Bei auftretender Belastung – wie etwa im Crushierprozess – treten dann Risse an den Stellen auf, an denen der Zusammenhalt der einzelnen Kristalle am geringsten ist.

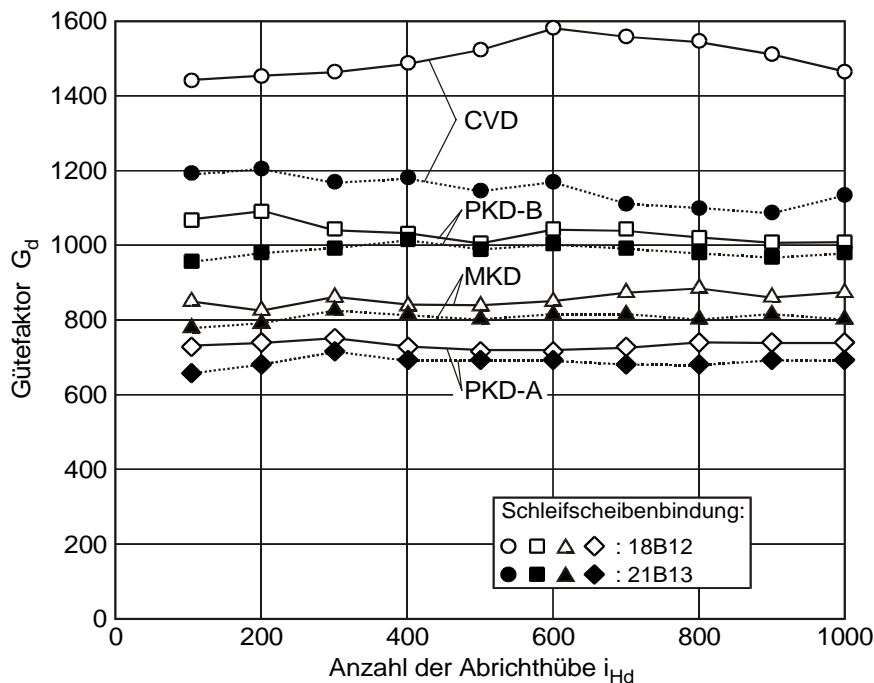
Die mit einzelnen MKD besetzte Crushierrolle ist, ähnlich wie die PKD-Werkzeuge, durch Mikrosplitterungen an der Oberfläche gekennzeichnet. Hinzu kommen aber größere Ausbrüche, welche aufgrund ihrer winkligen Ausprägung entlang der Netzebenen des Kristallgitters zu verlaufen scheinen.



**Bild 7.3:** Mikrotopographie unterschiedlicher Crushierrollenspezifikationen

Betrachtet man den Verlauf des Verschleißes an den vier eingesetzten Crushierrollen nicht absolut in Form der Reduzierung am Radius und der Ausbildung der Plateaubreite am Umfang, sondern berechnet die jeweiligen Gütefaktoren  $G_d$ , so ergibt sich der in Bild 7.4 dargestellte Verlauf. Abhängig von der verwendeten Crushierrollenspezifikation liegen die Gütefaktoren jeweils auf nahezu konstantem Niveau. Anhand des Verlaufes des Radiusverschleißes in Bild 7.1 ist zunächst zu vermuten, dass der Verschleiß einer Crushierrolle im Neuzustand mit ausgeprägtem Radius am Umfang größer ist als nach Ausbildung eines Plateaus. Es zeigt sich jedoch, dass das Verschleißvolumen pro Abrichthub konstant ist. Da bei diesen Untersuchungen eine konstante axiale Vorschubgeschwindigkeit von  $v_{fad} = 100 \text{ mm/min}$  eingestellt

wurde, erhöhen diese verschleißbedingten Abflachungen jeweils die Eingriffsbreite  $a_{pd}$  der Crushierrolle und damit den Überdeckungsgrad  $U_d$ .

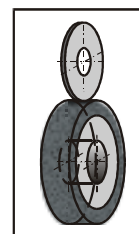


**Schleifscheibe:**  
D30-40 C100 ...

**Abrichten:**  
Punktcrushieren  
 $v_{cd} = 10$  m/s  
 $v_{fad} = 100$  mm/min  
 $f_{rdH} = 1$   $\mu$ m

**Crushierrolle:**  
var.

**Kühlschmierstoff:**  
Mineralöl



He/35173 © IFW

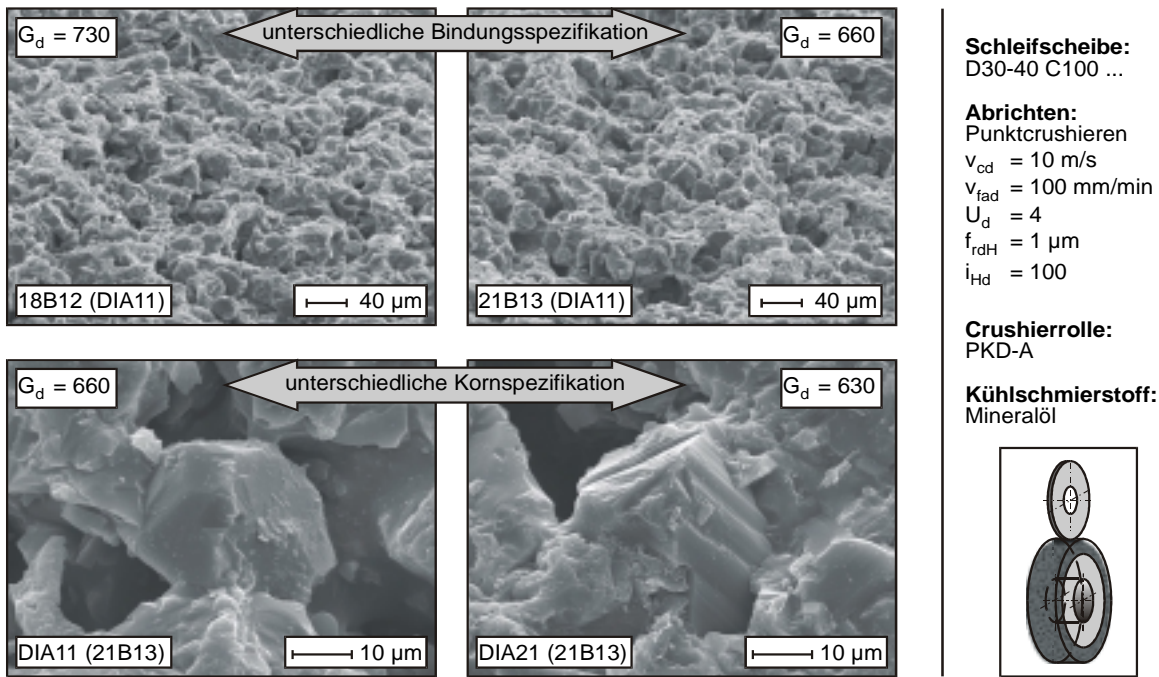
**Bild 7.4:** Gütefaktoren beim Abrichten mit unterschiedlichen Crushierrollen

Zusätzlich spiegelt Bild 7.4 den Einfluss der Bindungshärte der Schleifscheibe auf das Verschleißverhalten der Abrichtwerkzeuge wider. Korngröße und Kornspezifikation der Schleifscheibe sind hierbei identisch. Unabhängig von der verwendeten Crushierrolle führt der Einsatz der härteren Schleifscheibenbindung vom Typ 21B13 zu einem stärkeren Verschleiß am Abrichtwerkzeug und damit einem geringeren Gütefaktor  $G_d$ . Eine Ursache hierfür ist in dem höheren Widerstand der Bindung gegenüber Kornausbruch zu sehen, so dass steigende Beanspruchungen am Crushierwerkzeug entstehen.

Neben der Bindungshärte und der Korngröße kann auch die Kornspezifikation das Verschleißverhalten am Abrichtwerkzeug beeinflussen. Bild 7.5 gibt einen visuellen Eindruck unterschiedlicher Spezifikationen (Korngröße jeweils D30-40) nach dem Punktcrushieren wider. Die Schleifbeläge variieren dabei sowohl im Bindungsmaterial als auch im Korntyp. Zwar führt eine Veränderung der Bindungshärte zu unterschiedlichem Crushierrollenverschleiß, jedoch weisen die Schleifscheiben bei der Verwendung der Bindungsmaterialien vom Typ 18B12 bzw. 21B13 ähnliche Oberflächentopographien auf (Bild 7.5, oben).

Der Einfluss einer Variation des Diamantkorntyps kann anhand von REM-Aufnahmen belegt werden. Der Einsatz des DIA21-Korns führt zu einem geringfügig schlechteren Gütefaktor als die Verwendung des Diamantkorntyps DIA11 (Bild 7.5, unten). Die blockige Kristallstruktur des DIA11-Korns hat zur Folge, dass bei einer durch die Crushierrolle wirkenden Normalkraft das Korn selbst nur wenig angegriffen,

sondern komplett aus der Bindungsmatrix herausgebrochen wird. Dieser Effekt erhöht das abgetragene Nutzvolumen an der Schleifscheibe und damit den Gütefaktor des Punktcrushierprozesses. Dagegen sind am Diamantkorn vom Typ DIA21 deutliche Mikrosplitterungen zu erkennen.

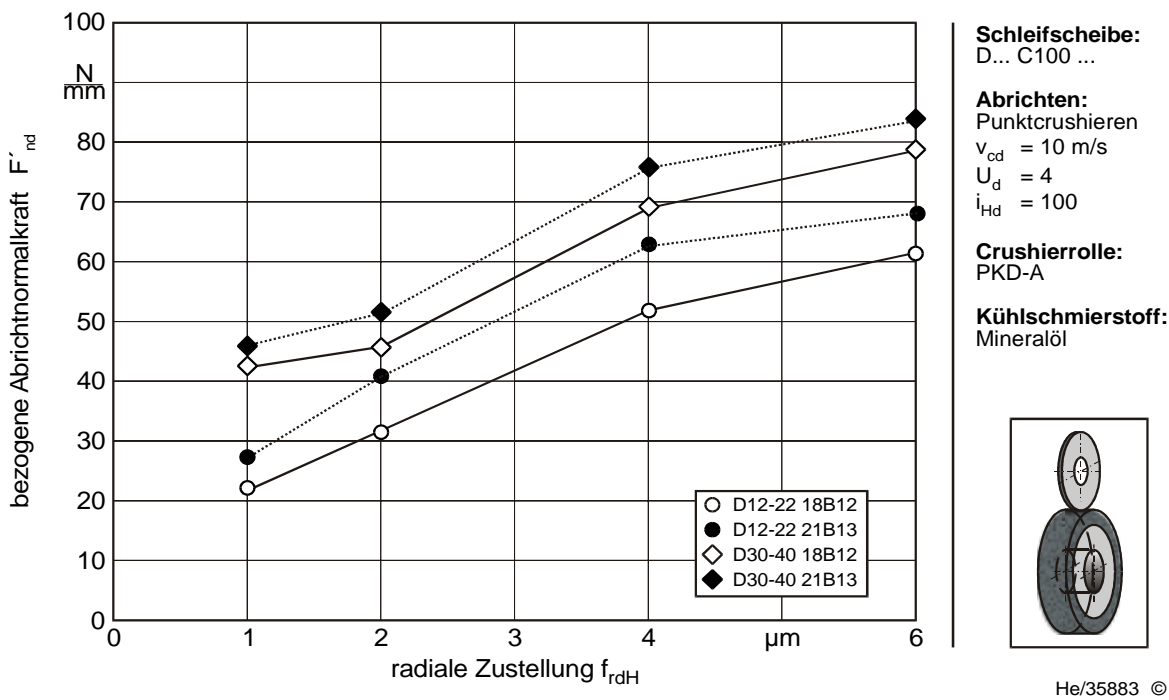


He/35870 © IFW

**Bild 7.5:** Einfluss der Bindungs- und Kornspezifikation der Diamantschleifscheibe

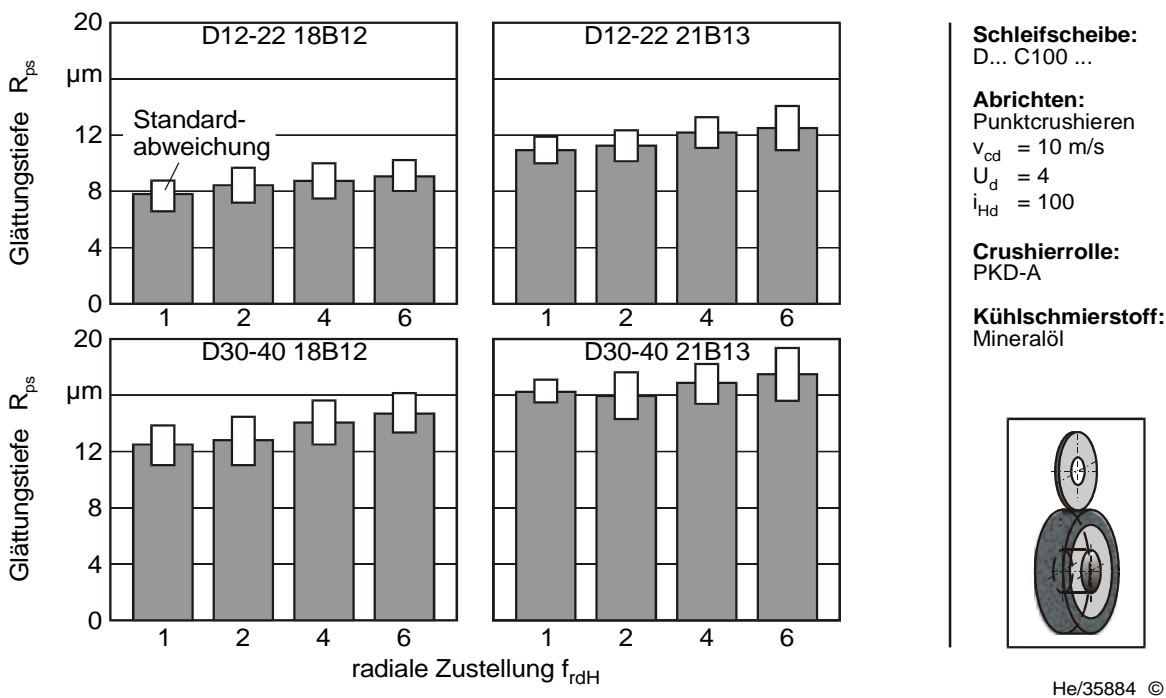
### 7.1.2 Radiale Zustellung

Durch die Variation der radialen Zustellung pro Crushierzyklus  $f_{rdH}$  kann der Abrichtprozess sowie dessen Ergebnis beeinflusst werden. In Bild 7.6 ist der Verlauf der bezogenen Normalkraft beim Punktcrushieren beim Einsatz der PKD-A-Crushierrolle für unterschiedliche Schleifscheibenspezifikationen dargestellt. Um die Reproduzierbarkeit der Untersuchungen zu gewährleisten und eine Beeinflussung der Ergebnisse durch zuvor eingebrachte Schädigungen (beispielsweise Mikrorisse in den Bindungsbrücken) im Schleifbelag zu vermeiden, werden pro Stellgrößenkombination jeweils einhundert Abrichthübe durchgeführt. Unabhängig von der verwendeten Schleifscheibenspezifikation (Variation von Korngröße und Bindungshärte) kommt es mit zunehmender radialer Zustellung zu einer Erhöhung der bezogenen Normalkräfte, deren Verlauf sich oberhalb von  $f_{rdH} = 4 \text{ }\mu\text{m}$  leicht degressiv verhält. Dabei führt die Verwendung von Schleifscheiben mit dem härteren Bindungstyp 21B13 zu größeren Normalkräften, da die einzelnen Körner besser in der Matrix gehalten werden und dieses Bindungsmaterial einen höheren Verschleißwiderstand aufweist. Eine Erhöhung der Korngröße von D12-22 auf D30-40 führt bei gleicher Bindungsspezifikation ebenfalls zu einer Erhöhung der bezogenen Abrichtnormalkraft, da das Einzelkorn aufgrund der wesentlich größeren Oberfläche durch stärkere keramische Bindungsbrücken in der Matrix gehalten wird.



**Bild 7.6:** Einfluss der radialen Zustellung auf die Crushierkräfte

Die sich ausbildende Oberflächentopographie der verschiedenen Schleifbeläge wird anhand der Glättungstiefe  $R_{ps}$  in Bild 7.7 beschrieben. Allen Messwerten gemein ist, dass die Standardabweichung relativ gering ausfällt.



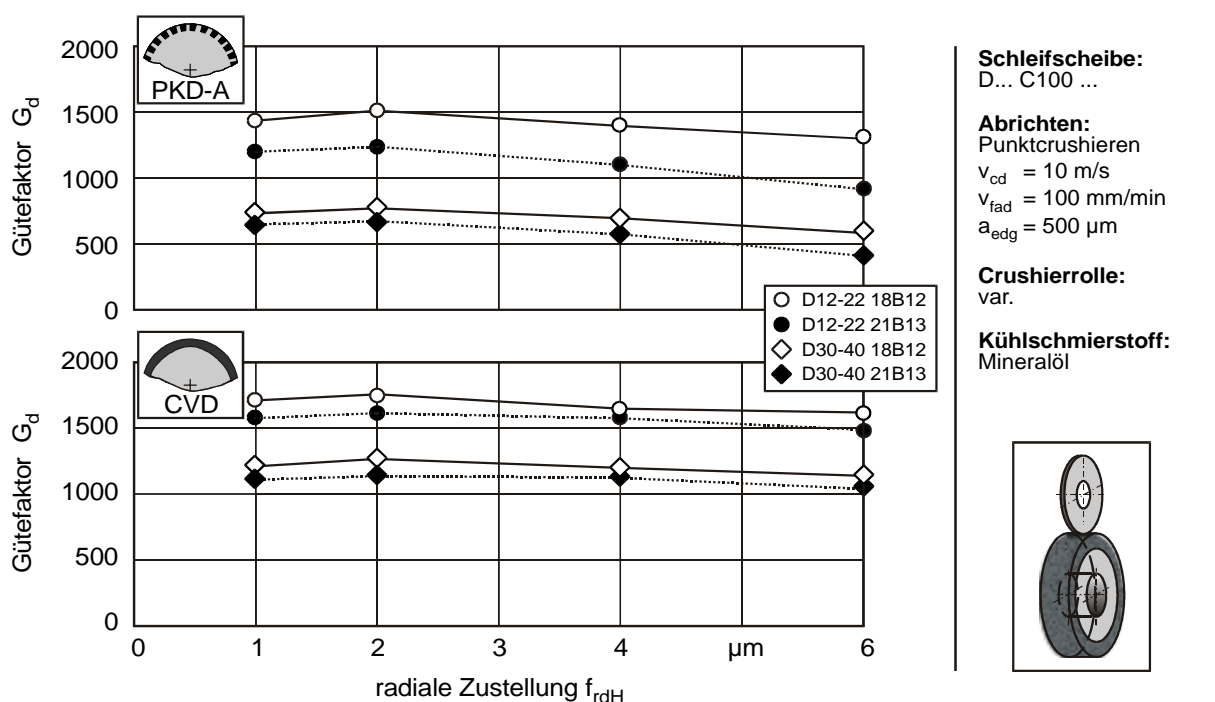
**Bild 7.7:** Einfluss der radialen Zustellung auf die Glättungstiefe des Schleifbelags

Aufgrund der offenporigen Beschaffenheit des keramisch gebundenen Schleifbelags hat die Variation der radialen Zustellung im Bereich  $f_{rdH} = 1 \dots 6 \mu\text{m}$  auf die Glät-

tungstiefe  $R_{ps}$  nur einen relativ kleinen Einfluss. Tendenziell führt eine Steigerung der radialen Zustellung zu einer geringen Erhöhung der Glättungstiefe. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung der Messwerte fällt aber auf, dass diese Steigerung innerhalb des Streubereiches der Einzelmessungen liegt. Der Crushierprozess zeigt sich relativ unempfindlich gegenüber Änderungen dieser Stellgröße.

Einen deutlichen Einfluss auf die Glättungstiefe hat jedoch die Spezifikation des Schleifbelags: Ein größeres Korn im Schleifbelag führt zu einer raueren Schleifscheibentopographie. Unabhängig von der Korngröße bildet sich bei Verwendung des festeren Bindungstyps 21B13 eine rauere Schleifbelagstopographie aus. Mit Steigerung der Verschleißfestigkeit der Bindung geht eine Steigerung der Sprödigkeit der keramischen Bindungsbrücken einher. Dies führt bei der punktuellen Belastung durch die Crushierrolle zu größeren Ausbrüchen.

Der Einfluss der radialen Zustellung auf den Gütefaktor beim Punktcrushieren ist in Bild 7.8 für das PKD-A- und das CVD-Abrihtwerkzeug wiedergegeben. Ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Zustellung und dem Gütefaktor kann nicht festgestellt werden.

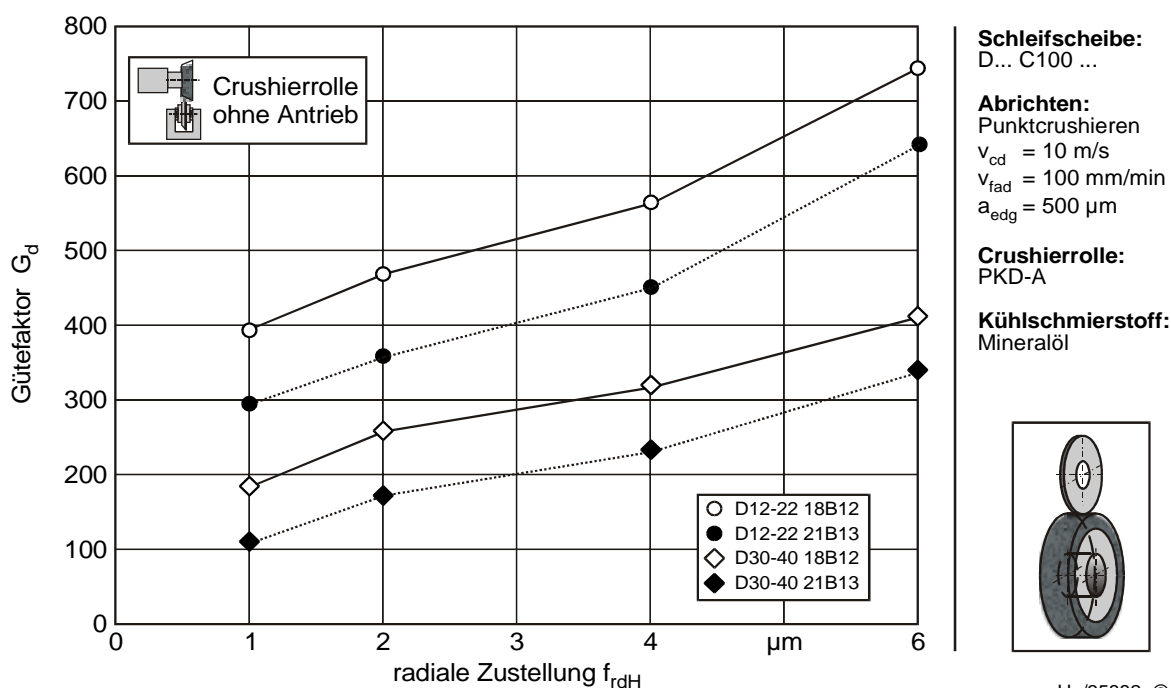


**Bild 7.8:** Einfluss der radialen Zustellung auf den Gütefaktor beim Punktcrushieren

Eine Verdoppelung der radialen Zustellung von  $f_{rdH} = 1 \mu\text{m}$  auf  $f_{rdH} = 2 \mu\text{m}$  führt bei Einsatz beider Crushierrollen nur zu einer leichten Erhöhung des Gütefaktors. Eine weitere Zunahme der radialen Zustellung erhöht den Verschleiß an der Crushierrolle und führt damit zu einer geringfügigen Reduzierung des Gütefaktors. Hier wirken zwei verschiedene Phänomene zusammen, deren Auswirkungen auf das Gesamtergebnis unterschiedlich ausgeprägt sind. Eine Erhöhung der radialen Zustellung wirkt sich prinzipiell zunächst positiv auf den Gütefaktor aus, da pro Abrihthub ein größe-



res Volumen des Schleifbelages abgetragen werden kann. So ist – unverändertes Verschleißverhalten der Crushierrolle vorausgesetzt – mit zunehmender radialer Zustellung eine proportionale Steigerung des Gütefaktors zu erwarten. Zumal die Anzahl der Crushierhübe und damit die Kontaktzeit zwischen den Wirkpartnern durch die Erhöhung der radialen Zustellung zur Erzielung des selben Gesamtabrichtbetrages (in diesem Fall  $a_{edg} = 500 \mu\text{m}$ ) vermindert werden kann. Allerdings nimmt die Gesamtbelastung der Crushierrolle zu, da sich die Kontaktfläche zwischen den Wirkpartnern vergrößert. Eine Erhöhung der radialen Zustellung von  $f_{rdH} = 1 \mu\text{m}$  auf  $f_{rdH} = 6 \mu\text{m}$  führt, abhängig von der verwendeten Schleifscheibe, zu einer Verdoppelung bis Verdreifachung der Normalkraft (s. Bild 7.6). Diese Belastung dominiert, so dass der Gütefaktor sinkt. Allerdings variiert das Verhalten der beiden eingesetzten Crushierrollen. So fällt auf, dass der Gütefaktor beim Punktcrushieren mit der CVD-Crushierrolle nicht so stark von der Bindungshärte und der Korngröße der verwendeten Schleifscheibe abhängig ist, wie dies etwa beim Einsatz des PKD-A-Abrichtwerkzeuges der Fall ist. Insgesamt gesehen kann die radiale Zustellung  $f_{rdH}$  aber in einem breiten Spektrum variiert werden, ohne dass sich der Gütefaktor nennenswert verändert. Durch die Wahl einer hohen Zustellung kann so die Abrichtzeit verkürzt werden, ohne den Verschleiß am Abrichtwerkzeug deutlich zu erhöhen.



He/35882 © IFW

**Bild 7.9:** Einfluss der radialen Zustellung auf den Gütefaktor beim Punktcrushieren mit freilaufender Crushierrolle

Die Gewichtung dieser Einflussfaktoren und damit das Resultat beim Punktcrushieren kann sich verändern, wenn – neben der Spezifikation des Abrichtwerkzeuges – die Randbedingungen für den Abrichtprozess variiert werden. So zeigt Bild 7.9 den Einfluss der radialen Zustellung auf den Gütefaktor beim Punktcrushieren unter

Verwendung des nichtangetriebenen, freilaufenden Abrichtwerkzeuges. Zum Einsatz kommt die Crusherrolle vom Typ PKD-A. Zwar liegen die Gütefaktoren insgesamt niedriger als bei Einsatz des geregelten Crushiersystems, jedoch führt eine Erhöhung der radialen Zustellung zu einer deutlichen Verbesserung des Gütefaktors. Ursache hierfür ist im wesentlichen, dass der Verschleiß der Crusherrolle beim nichtangetriebenen System durch den Schlupf zwischen Abrichtwerkzeug und Schleifbelag beim jeweiligen Erstkontakt zu Beginn eines jeden Crusherhubes bestimmt wird.

Eine Erhöhung der radialen Zustellung und damit eine Verringerung der Anzahl der Crusherhübe zur Erreichung des selben Gesamtabrichtbetrages führt so zu einer deutlichen Reduzierung des Verschleißes am Abrichtwerkzeug und steigert den Gütefaktor des Abrichtprozesses. Gleichzeitig wird die für das Abrichten benötigte Zeit deutlich verkürzt. Für die Einsatzvorbereitung von Schleifscheiben, bei denen keine erhöhten Anforderungen an die Genauigkeit bestehen oder zum Vorprofilieren und Erreichen des Scheibenrundlaufs kann der Einsatz dieser einfachen, nichtangetriebenen und damit kostengünstigeren Crushiervorrichtung eine wirtschaftliche Alternative sein.

### 7.1.3 Überdeckungsgrad

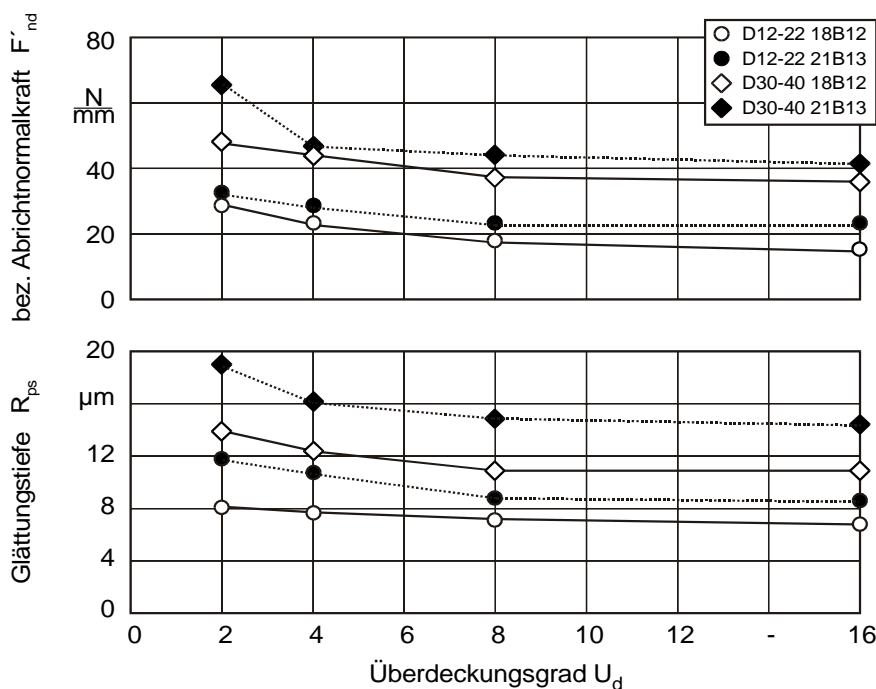
Wie die Untersuchungen zeigen (Bild 7.10), ist die Übertragung der theoretisch berechneten Schleifbelagstopographie (s. Bild 5.3, links) auf das tatsächliche Ergebnis des Abrichtprozesses nur hinsichtlich des prinzipiellen Verlaufs möglich. Ursachen hierfür sind sowohl in der Beschaffenheit des Schleifbelags als auch in der Geometrie und den Eingriffsverhältnissen des Abrichtwerkzeuges zu sehen. Da es bereits nach einer relativ geringen Anzahl von Abrichthüben zum Verschleiß in Form einer Fase am Umfang der Crusherrolle kommt (s. Bild 7.1), ändern sich die Eingriffsverhältnisse grundlegend (s. Bild 5.3, rechts).

Tendenziell sinkt jedoch unabhängig von der verwendeten Schleifscheibe die Glättungstiefe  $R_{ps}$  der Schleifscheibenoberfläche mit zunehmendem Überdeckungsgrad, da es durch mehrfaches Überfahren der selben Abschnitte des Schleifbelags mit der Crusherrolle zu einer Einebnung des Belages kommt. Parallel hierzu sinkt die bezogene Normalkraft beim Punktcrushieren. Bei einem höheren Überdeckungsgrad wird die axiale Verfahrensgeschwindigkeit reduziert, so dass beim Abrichtprozess die Kontaktzeit erhöht und dementsprechend pro Zeiteinheit weniger Schleifscheibenvolumen durch die Crusherrolle abgetragen wird. Besonders deutlich werden diese Effekte bei einer Steigerung des Überdeckungsgrades von  $U_d = 2$  auf  $U_d = 4$ . Bei einer weiteren Erhöhung des Überdeckungsgrades tritt nur eine geringfügige Veränderung der Prozesskraft bzw. der Glättungstiefe des Schleifbelages auf.

Mit der gröberen Körnung D30-40 wird eine rauere Schleifscheibentopographie erzeugt als bei Einsatz der feinkörnigeren Schleifscheiben. Unabhängig vom Bindungstyp liegen die Kräfte für die D30-40-Schleifscheiben höher als bei der Spezifi-

kation D12-22. Ursache hierfür ist wiederum in den höheren Kornhaltekräften zu sehen, da das größere Korn eine größere Oberfläche für die Anbindung von Bindungsbrücken bietet.

Die härtere Bindung vom Typ 21B13 bedingt eine höhere bezogene Normalkraft beim Punktcrushieren als der Bindungstyp 18B12. Dementsprechend ist die Anzahl der Ausbrüche bei den 21B13-Schleifscheiben auch höher, was sich wiederum in den erhöhten Werten für die Glättungstiefe widerspiegelt.


**Schleifscheibe:**

D... C100 ...

**Abrichten:**

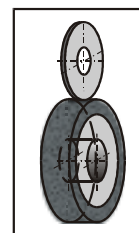
Punktcrushieren

 $v_{cd} = 10 \text{ m/s}$ 
 $f_{rdH} = 1 \mu\text{m}$ 
 $i_{Hd} = 100$ 
**Crushierrolle:**

PKD-A

**Kühlschmierstoff:**

Mineralöl



He/34892 © IFW

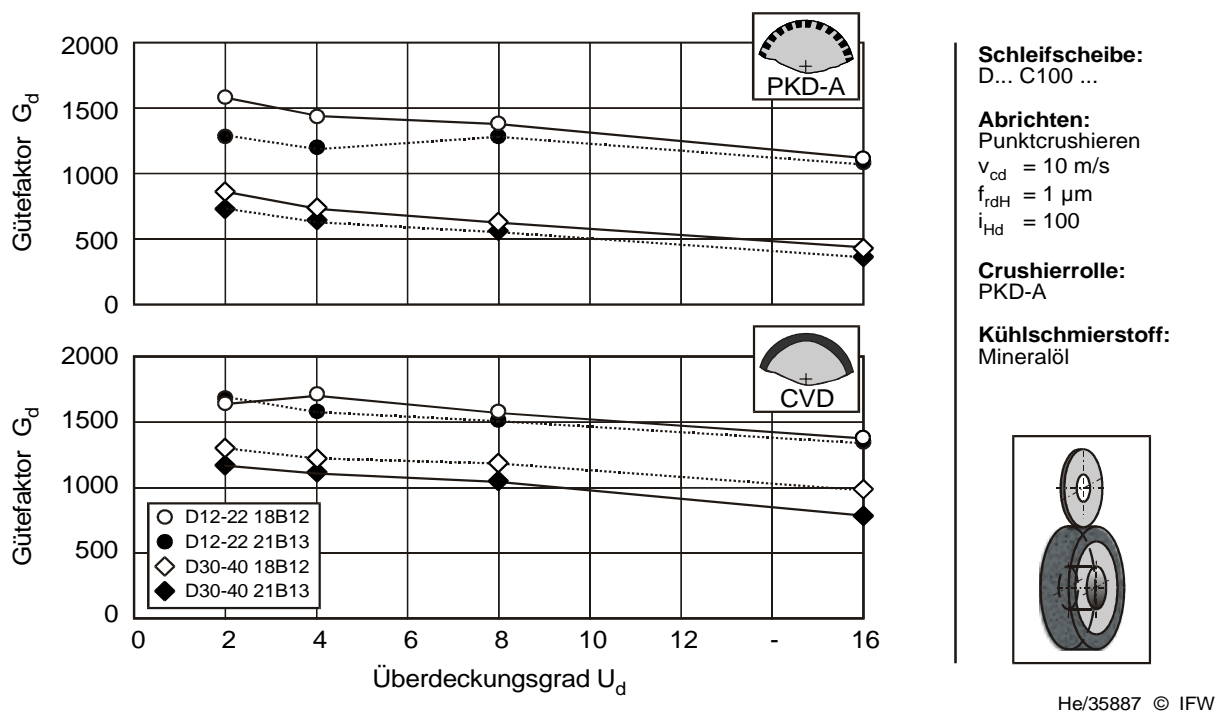
**Bild 7.10:** Auswirkungen des Überdeckungsgrades auf Normalkraft und Topographie

Unabhängig von der verwendeten Crushierrolle und der Schleifscheibenspezifikation wird das Verhältnis von abgetragenem Volumen an der Schleifscheibe zum Verschleißvolumen am Abrichtwerkzeug nur geringfügig vom Überdeckungsgrad beeinflusst. So verändert sich der Gütefaktor innerhalb des gewählten Bereichs für den Überdeckungsgrad von  $U_d = 2 \dots 16$  nur wenig (Bild 7.11). Tendenziell zeigt sich nur ein leichter Rückgang des Gütefaktors, welcher sich nahezu proportional zur Erhöhung des Überdeckungsgrades verhält. Die Ursache hierfür ist wiederum in den Kontaktbedingungen zwischen den Wirkpartnern zu sehen. So führt eine Erhöhung des Überdeckungsgrades, welche bei unveränderter Rollengeometrie durch eine Reduzierung der axialen Vorschubgeschwindigkeit erreicht wird, zwar zu einer Verringerung der Belastung der Crushierrolle (s. Bild 7.10). Gleichzeitig wird aber die Kontaktzeit von Abrichtwerkzeug und Schleifscheibe erhöht. Die damit länger einwirkende mechanische Belastung führt zu einem erhöhten Verschleiß.

Zur Verkürzung der Abrichtzeit kann daher mit einem niedrigen Überdeckungsgrad von beispielsweise  $U_d = 4$  gearbeitet werden, ohne dass sich die Glättungstiefe des Schleifbelages – und damit der offenporige Charakter – negativ verändert. Gleichzei-



tig kann dadurch die Standzeit des Abrichtwerkzeuges erhöht werden, wie die ermittelten Gütefaktoren beim Punktcrushieren in Bild 7.11 belegen.

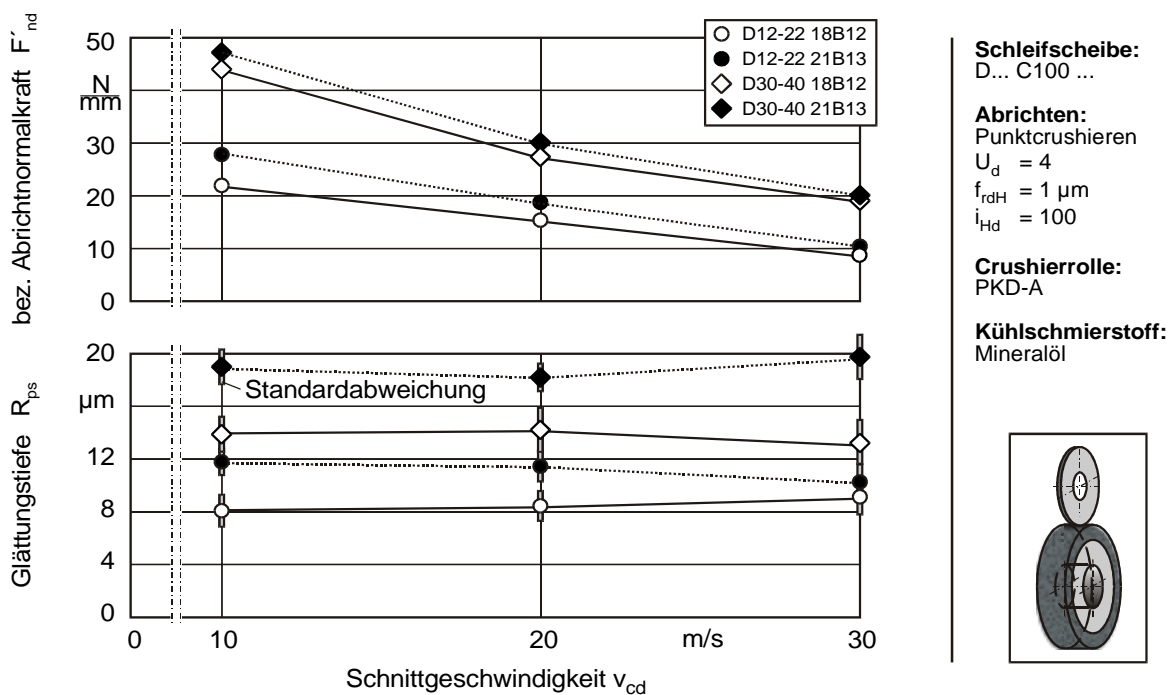


**Bild 7.11:** Auswirkungen des Überdeckungsgrades auf den Gütefaktor

#### 7.1.4 Schnittgeschwindigkeit

Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit  $v_{cd}$  beim Punktcrushieren wirkt sich primär auf die Prozesskraft aus (Bild 7.12). So kann durch eine Verdreifung der Schnittgeschwindigkeit von  $v_{cd} = 10 \text{ m/s}$  auf  $v_{cd} = 30 \text{ m/s}$  die bezogene Abrichtnormalkraft  $F'_{nd}$  um etwa den Faktor 2,5 gesenkt werden. Ausschlaggebend für diese Reduzierung sind die auftretenden dynamischen Effekte. Bei höherer Umfangsgeschwindigkeit wird das keramische Bindungssystem im Berührungspunkt einer stärkeren Stoßbeanspruchung unterzogen. Da dieses spröde Bindungsmaterial jedoch wesentlich schlechtere Dämpfungseigenschaften besitzt als dies beispielsweise bei einer elastischen Kunstharzbindung der Fall ist, kommt es zu einer Überlastung der keramischen Bindungsbrücken. So wird das Schleifkorn bei schon wesentlich niedrigeren Kräften aus der Bindungsmatrix gelöst.

Ein Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Topographie des Schleifbelags kann nicht nachgewiesen werden. So verändert sich die Glättungstiefe  $R_{ps}$  nur minimal. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung der einzelnen Messungen lässt sich daraus keine Tendenz ableiten (Bild 7.12, unten).



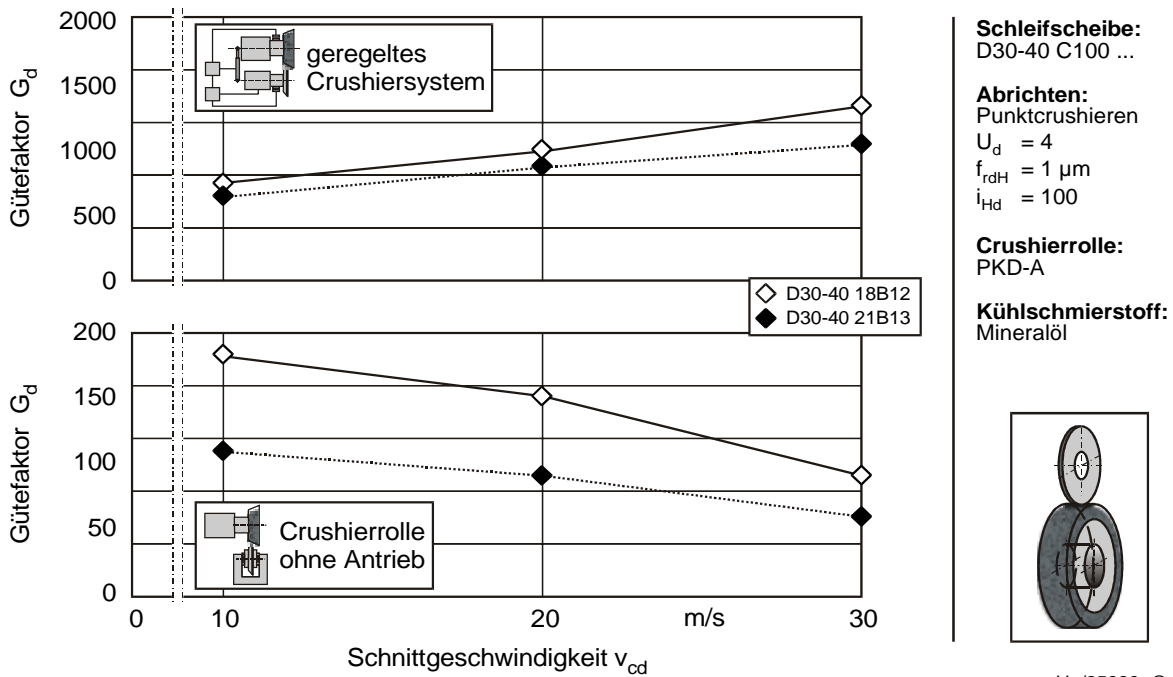
**Bild 7.12:** Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf Normalkraft und Topographie

Die Auswirkungen der Schnittgeschwindigkeit auf den Gütefaktor hängen, wie auch bei der Variation der radialen Zustellung  $f_{rdH}$ , stark vom Antriebskonzept beim Punktcrushieren ab. Bei Einsatz des geregelten Systems zum Antrieb der Crusherrolle führt eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit zu einer Verbesserung des Verschleißverhaltens des Abrichters und damit zu einer Erhöhung des Gütefaktors. Im oberen Teil von Bild 7.13 wird dies anhand des Punktcrushierens der D30-40-Schleifscheibe mit beiden Bindungsspezifikationen bei Einsatz des PKD-A-Abrichtwerkzeuges deutlich.

So scheint auf den ersten Blick ein Punktcrushieren bei hoher Schnittgeschwindigkeit mit geregeltem System durchaus sinnvoll zu sein. Allerdings wird beim Abrichten des 1A1-Profiles der Schleifscheiben keine nennenswerte Anforderung an das Regelungssystem gestellt, da sich der Achsabstand nur im Rahmen der radialen Zustellung pro Abrichthub – und damit im Mikrometerbereich – verändert. Bei Profilschleifscheiben muss hingegen mit der Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit das Auftreten einer Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern in Kauf genommen werden. Diese reduziert jedoch den Gütefaktor (s. Bild 6.5 und Bild 6.9). Ferner sagt der Gütefaktor nichts über die Schädigung der Bindungsstrukturen, welche durch die höhere dynamische Belastung möglich ist, aus. Inwieweit daher eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit zur Rissbildung in den Bindungsbrücken und einer damit einhergehenden geringeren Stabilität des Schleifbelags führt, wird anhand von Untersuchungen zum Punktcrushieren von Profilschleifscheiben (Kap. 9) untersucht.

Bei Einsatz der nichtangetriebenen Crusherrolle führt eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit zu einer erheblichen Verringerung des Gütefaktors. Die Ursache hier-

für ist in dem hohen Schlupf zwischen den Wirkpartnern zu sehen. Bei einer höheren Schnittgeschwindigkeit neigt die Crushierrolle zum „Durchrutschen“. So dauert der Beschleunigungsvorgang insgesamt länger und die dabei auftretende Reibung sorgt für ein höheres Verschleißvolumen.



**Bild 7.13:** Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Gütefaktor

Die Auswirkungen der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Systemgrößen (Schleifscheibenspezifikation und Antriebsart der Crushierrolle) sowie Stellgrößen (radiale Zustellung, Überdeckungsgrad und Schnittgeschwindigkeit) auf die Prozess- und Ausgangsgrößen beim Punktcrushieren (Gütefaktor, Abrichtnormalkraft, Glättungstiefe des Schleifbelags) sind in Bild 7.14 zusammengefasst.

Dabei geben die eingezeichneten Pfeile qualitativ den Einfluss der jeweiligen System- bzw. Stellgröße auf die in den Spalten angegebenen Größen bei Einsatz des geregelten Crushiersystems wider. Beim Überdeckungsgrad zeigt sich nur im unteren Bereich bis  $U_d = 4$  ein nennenswerter Einfluss auf die jeweilige Prozess- bzw. Ergebnisgröße, weshalb die Bewertung in zwei Bereiche unterteilt ist.

Bei den Angaben zur Beeinflussung des Gütefaktors beim Punktcrushieren sind zum Vergleich die zusätzlichen Ergebnisse für den Einsatz der nichtangetriebenen Crushierrolle extra gekennzeichnet, da diese Ergebnisse von den übrigen abweichen. Es zeigt sich, dass das Antriebskonzept der Crushierrolle einen deutlichen Einfluss auf den Abrichtprozess und dessen Ergebnis besitzt.

	Gütefaktor beim Punktcrushieren $G_d$	bez. Abricht- normalkraft $F'_{nd}$	Glättungstiefe des Schleifbelags $R_{ps}$
<b>Systemgrößen</b>			
Erhöhung der Korngröße der Schleifscheibe	↓	↑	↑
Erhöhung der Bindungshärte der Schleifscheibe	↓	↑	↑
<b>Stellgrößen</b>			
Erhöhung der radialen Zustellung $f_{rdH}$	→ ↑ *	↑	→
Erhöhung des Überdeckungsgrades $U_d$	↓ →	↓ →	↓ →
Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit $v_{cd}$	→ ↑ *	↓	→

\*) nichtangetriebene Crushierrolle

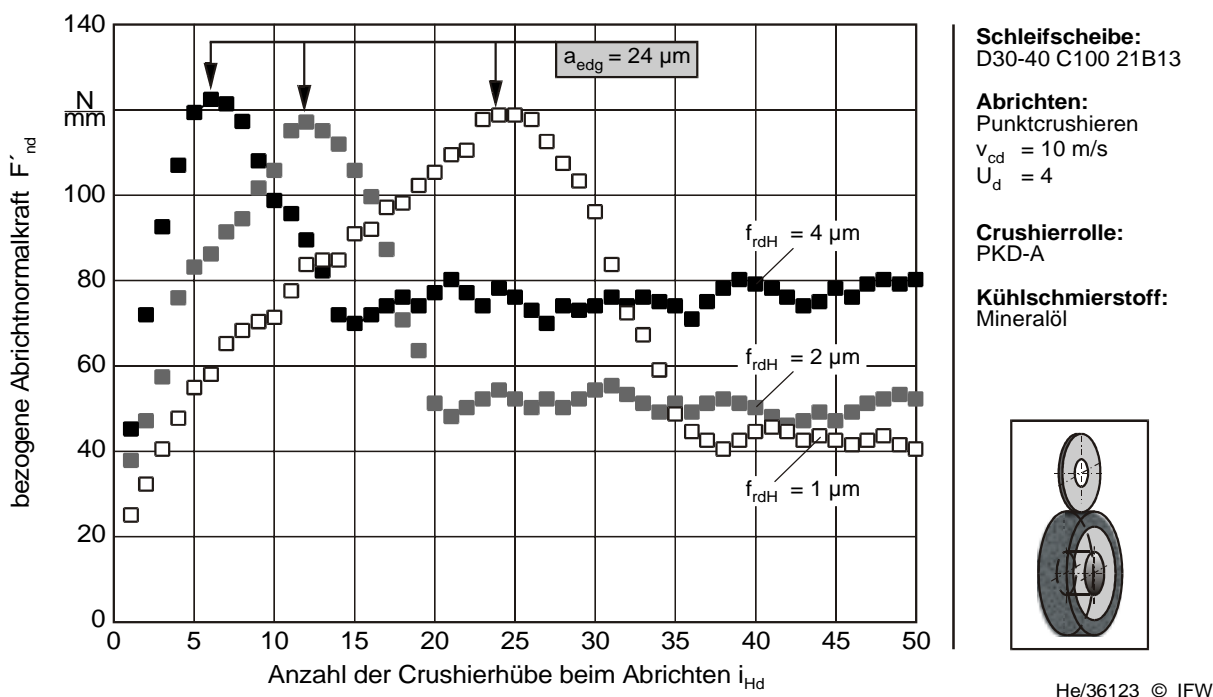
He/35890 © IFW

**Bild 7.14:** Auswirkungen der Stell- und Systemgrößen beim Punktcrushieren

### 7.1.5 Weitere Einflussfaktoren

Neben den genannten System- und Stellgrößen gibt es weitere Einflussfaktoren, welche sich auf den Abrichtprozess auswirken können. Für die vorangegangenen Untersuchungen ist die Anzahl der Abrichthübe mit  $i_{Hd} = 100$  bzw. der Gesamtabrichtbetrag mit  $a_{edg} = 500 \mu\text{m}$  relativ hoch gewählt worden, um Einflüsse vorangegangener Prozesse auszuschließen. In der Praxis wird eine wesentlich geringere Anzahl von Crushierhüben angestrebt, um die Nebenzeit für die Einsatzvorbereitung der Schleifscheiben zu reduzieren und nicht mehr Schleifbelag als nötig abzutragen. Jedoch zeigt Bild 7.15 anhand der auftretenden bezogenen Normalkräfte, dass eine bestimmte Anzahl von Abrichthüben notwendig ist, um einen stationären Prozess beim Punktcrushieren zu erreichen. Zum Einsatz kommt hier eine D30-40-21B13-Schleifscheibe, welche mit der PKD-A-Crushierrolle abgerichtet wird. Die radiale Zustellung pro Crushierhub beträgt  $f_{rdH} = 1 \mu\text{m}$ ,  $2 \mu\text{m}$  und  $4 \mu\text{m}$ . Das Abrichtwerkzeug wird zu Beginn jeweils nur soweit zugestellt, dass die ersten Crushierhübe ohne Kontakt zwischen den Wirkpartnern durchgeführt werden, um bei Erstkontakt eine zu große radiale Zustellung zu vermeiden. Die Zählung der Crushierhübe beginnt dementsprechend erst mit dem Auftreten einer Normalkraft bzw. wird durch den Acoustic Emission Sensor in der Crushierspindel detektiert. Unabhängig von der Zustellung pro Crushierhub steigen die Kräfte zunächst bis zum Erreichen eines Maximums annähernd linear an. Danach erfolgt ein degressiver Verlauf bis auf ein relativ konstantes Niveau mit nur geringer Streuung der Messwerte.

Auffällig ist nicht nur die Tatsache, dass diese Maximalkraft mit einem Wert von etwa  $F'_{nd} = 120 \text{ N/mm}$  unabhängig von der radialen Zustellung auf dem selben Niveau liegt. Diese Maximalkraft tritt auch jeweils bei einem Gesamtabrichtbetrag von  $a_{edg} = 24 \mu\text{m}$  auf. Somit handelt es sich nicht um eine prozessspezifische Größe, welche durch die Stellgrößen beeinflusst wird. Haupteinflussfaktor ist die Steifigkeit des Aufbaus in der Maschine. So erfolgt zu Beginn des Abrichtprozesses nicht nur ein Abtrag am Schleifbelag, sondern das System kann durch den Kontakt der Wirkpartner elastisch verformt werden. Dies hat einen Anstieg der Normalkraft zur Folge. Nach Erreichen der Maximalkraft wird aufgrund der Überlastung des Bindungssystems zunächst der vorgeschädigte Schleifbelag abgetragen, so dass die Abrichtkraft reduziert wird. Schließlich pendelt sich der Prozess auf einem annähernd konstanten Kraftniveau ein, welches durch – allerdings geringe – periodische Schwankungen charakterisiert ist. Bis dies erreicht wird sind jedoch bis zu 40 Crushierhübe notwendig.

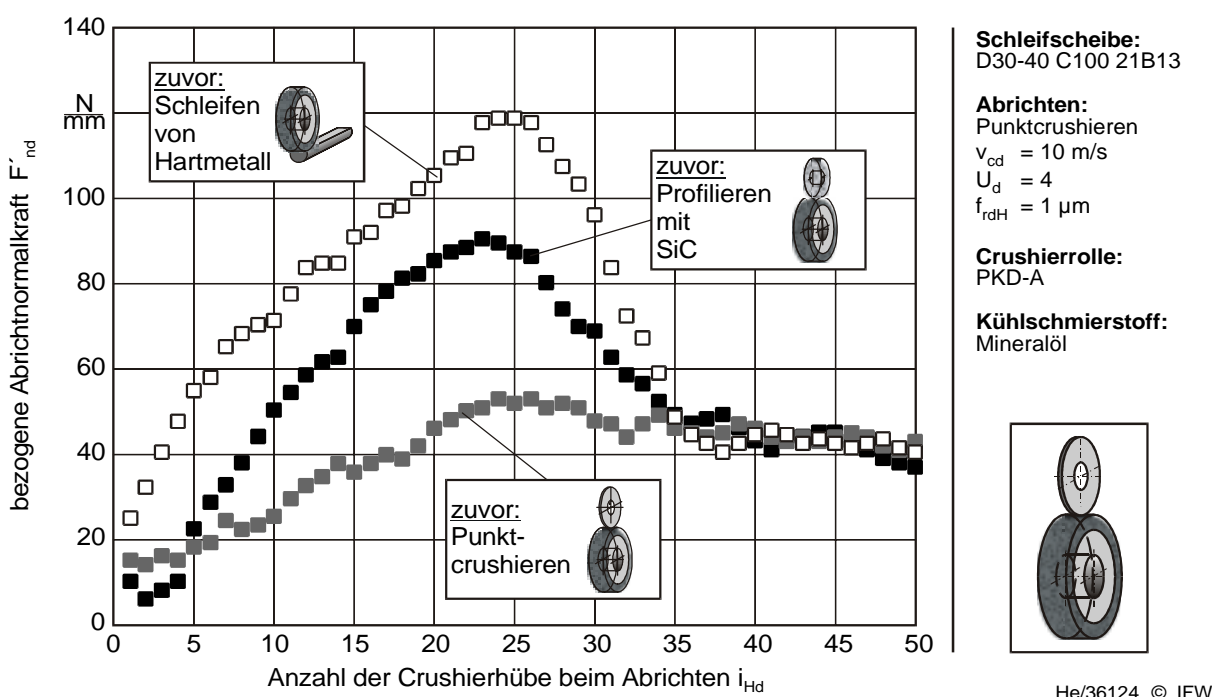


**Bild 7.15:** Auswirkungen der Anzahl der Crushierhübe auf die Abrichtnormalkraft

Um schon nach wenigen Abrichthüben einen stationären Prozess zu erreichen ist es notwendig, einen möglichst steifen Aufbau des Crushiersystems in der Schleifmaschine zu realisieren. Durch eine Verkürzung der Ausraglänge der Crushierspindel in der Halterung kann dies schon beeinflussen werden, da die elastische Verformung in der vierten Potenz von der Ausraglänge abhängt, wenn man einen idealen Biegebalken zu Grunde legt. So können die Abrichtzeiten reduziert und eine höhere Effektivität und Wirtschaftlichkeit erreicht werden.

Neben dem Aufbau des Crushiersystems beeinflusst auch der Ausgangszustand der Schleifscheibe den Abrichtprozess. So zeigt Bild 7.16 den Verlauf der bezogenen

Normalkräfte beim Punktcrushieren in Abhängigkeit des unmittelbar vor dem Abrichten durchgeführten Prozesses. Während der prinzipielle Kraftverlauf identisch ist, zeigen sich deutliche Unterschiede in der Höhe des Kraftmaximums. Die höchste bezogene Normalkraft tritt auf, wenn zuvor mit der Schleifscheibe Hartmetall zerspannt wurde. Eine vorangegangene Profilierung der Schleifscheibe durch eine fliehkraftgebremste Siliziumkarbid-Rolle (SiC) reduziert die maximale bezogene Abrichtnormalkraft auf etwa  $F'_{nd} = 90$  N/mm. Wurde die Schleifscheibe zuvor nicht zum Schleifen eingesetzt, sondern nur punktcrushiert, so tritt die niedrigste maximale bezogene Abrichtnormalkraft mit  $F'_{nd} = 62$  N/mm auf. Nach einem Gesamtabrichtbeitrag von etwa  $a_{edg} = 35$   $\mu\text{m}$  stellt sich ein identisches Kraftniveau ein.



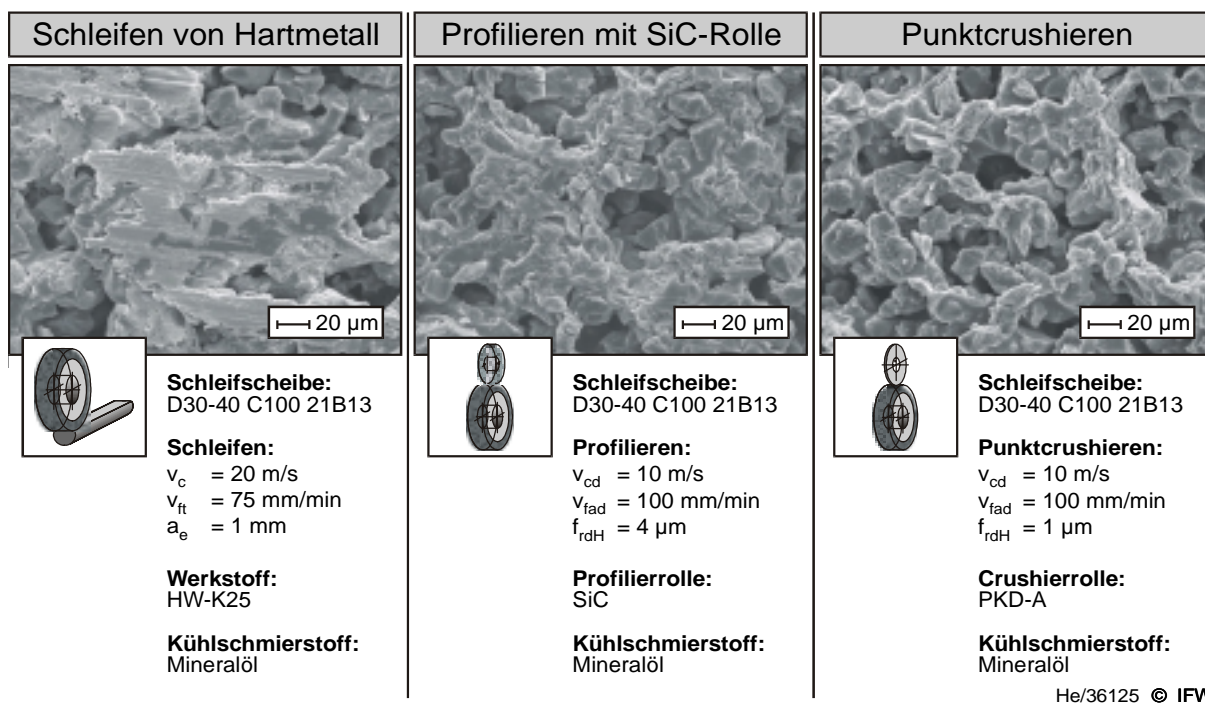
**Bild 7.16:** Einfluss des Ausgangszustandes der Schleifscheibe auf die Abrichtnormalkraft

Zurückzuführen sind diese Unterschiede auf die Veränderung der Schleifscheibentopographie durch den jeweils zuvor durchgeführten Prozess. So werden beim Schleifen von Hartmetall die abgespannten Partikel in den offenporigen Belag gedrückt und verursachen eine Verdichtung der Schleifscheibenoberfläche und einen Festigkeitsanstieg. Das Vorprofilieren mit der SiC-Rolle verursacht, bedingt durch den Linienkontakt der Wirkpartner und den hohen Verschleiß des Abrichtwerkzeuges, ein Eindringen der keramischen Bindungsbrücken und ein Zusetzen der Poren des Schleifbelags mit Siliziumkarbid-Partikeln. Aufgrund der geringen Zustellung beim Abrichten werden die Partikel jedoch nicht so stark in den Belag gedrückt. Beim Punktcrushieren wird das flächige Eindringen von Material in den Schleifbelag vermieden. Aufgrund der punktuellen Berührung der Wirkpartner können ausgebrochene Partikel des Schleifbelags (Bindungsmaterial und Schleifkörner) unmittelbar



vom Kühlschmierstoff herausgespült werden. Der minimale Verschleiß des Abrichtwerkzeuges verhindert ein Zusetzen des Belags mit Fremdpartikeln.

Die aufgrund des vorausgegangenen Prozesses unterschiedlich ausgebildeten Topographien der Schleifscheibenbeläge sind in Bild 7.17 anhand von REM-Aufnahmen einer D30-40-Schleifscheibe dokumentiert. In der linken Aufnahme sind sehr gut großflächige Zusetzungen mit Hartmetall zu sehen. Ein Spanraum steht nur noch eingeschränkt zur Verfügung. Vergleicht man die beiden Aufnahmen daneben mit einander, so wird der Einfluss des Abrichtprozesses deutlich. Bis auf die Zustellung, vor allem bedingt durch den Einsatz unterschiedlicher Abrichtwerkzeuge, sind die Stell- und Systemgrößen hierbei identisch. Durch das Punktcrushieren wird, im Gegensatz zum Abrichten mit der SiC-Rolle, eine Offenporigkeit der keramisch gebundenen Schleifscheibe geschaffen. So stehen scharfe Diamantschneiden in Kombination mit einem großen Spanraum zur Verfügung.



**Bild 7.17:** Verschiedenartig ausgebildete Schleifbelagstopographien

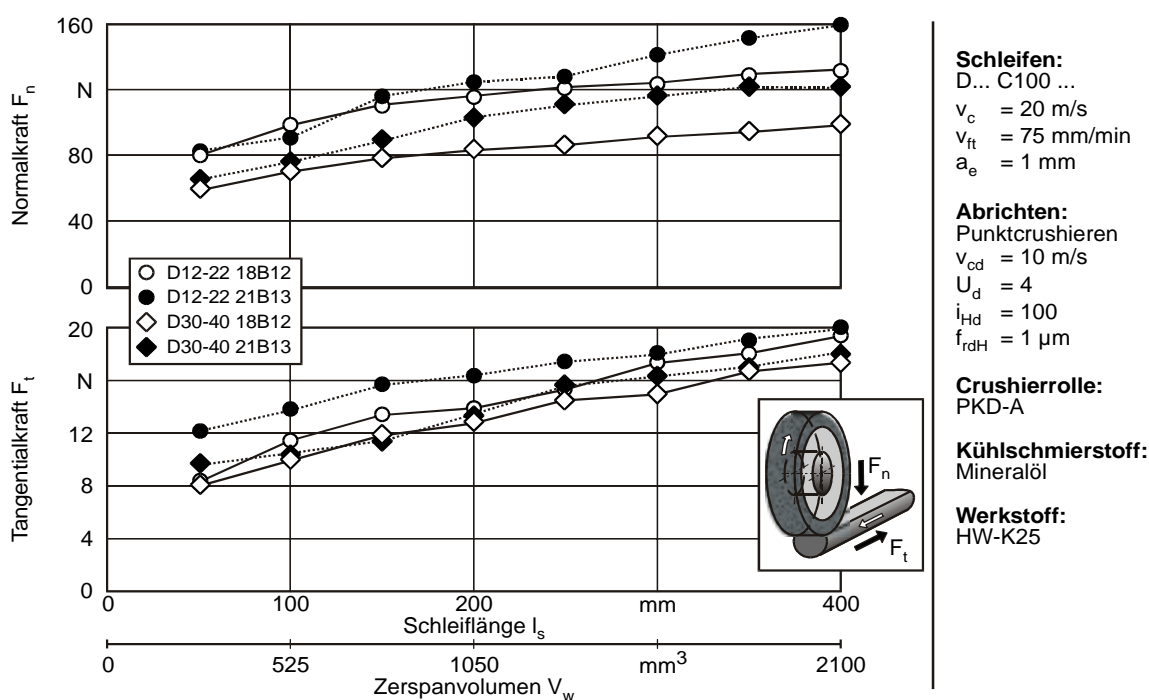
## 7.2 Einsatzverhalten der Diamantschleifscheiben nach dem Crushieren

Die Untersuchungen zum Einsatzverhalten punktcrushierter Diamantschleifscheiben sollen sowohl den Einfluss der Schleifscheibenspezifikation als auch den der Stellgrößen beim Punktcrushieren auf das Schleifergebnis analysieren. Dies erfolgt durch einen Tiefschleifprozess. Dabei werden rundgeschliffene Hartmetallrohlinge in Längsrichtung mit einer Zustellung von  $a_e = 1 \text{ mm}$  bei einer Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 20 \text{ m/s}$  und einer tangentialen Vorschubgeschwindigkeit von  $v_{ft} = 75 \text{ mm/min}$  bearbeitet. Nach der Bearbeitung einer Nut wird der Rohling um  $90^\circ$  gedreht, um die nächste Nut zu Schleifen. So lassen sich pro Rohling insgesamt vier

Nuten realisieren und die Eingriffsbreite  $a_p$  der Schleifscheibe bleibt jeweils identisch. Diese Stellgrößen werden für alle Untersuchungen konstant gehalten. Der gewählte Referenzprozess ermöglicht einerseits aufgrund der erzeugten ebenen Flächen am Hartmetall eine einfache Analyse der erzeugten Bauteiloberflächen und -randzonen. Andererseits sind die Kinematik und die Stellgrößen an die Gegebenheiten beim Werkzeugschleifen zur Bearbeitung der Spannuten angelehnt. Aufgrund dieser Randbedingungen und der Werkstückgeometrie muss jedoch auf die Angabe bezogener Ergebnisgrößen verzichtet werden, da das Kriterium der Orthogonalität nicht erfüllt wird. Dieses setzt entlang einer gedachten Linie, senkrecht zur Hauptvorschubsrichtung, gleiche Eingriffsverhältnisse und konstante Kontaktbedingungen voraus [Salj91].

### 7.2.1 Einfluss der Schleifscheibenspezifikation

Während des Tiefschleifprozesses steigen die Normal- und Tangentialkräfte kontinuierlich an (Bild 7.18). Dabei liegt das Kraftniveau der feinkörnigen Schleifscheiben D12-22 etwas höher als beim Schleifen mit der D30-40-Spezifikation. Dies ist auf die mit steigender Korngröße sinkende Anzahl der aktiv am Zerspanprozess beteiligten Schleifkörner zurückzuführen. Der Einsatz des härteren Bindungsmaterials 21B13 führt, unabhängig von der Korngröße, zu einem höheren Kraftniveau. Die größere Verschleißfestigkeit dieses Bindungstyps hat zur Folge, dass die einzelnen Diamantkörner länger in der Bindungsmatrix gehalten werden können. Dadurch steigt die Möglichkeit der Bildung von Verschleißflächen durch Abstumpfen der Körner. Dies verändert die Kontaktfläche und verursacht ein Ansteigen der Bearbeitungskräfte.

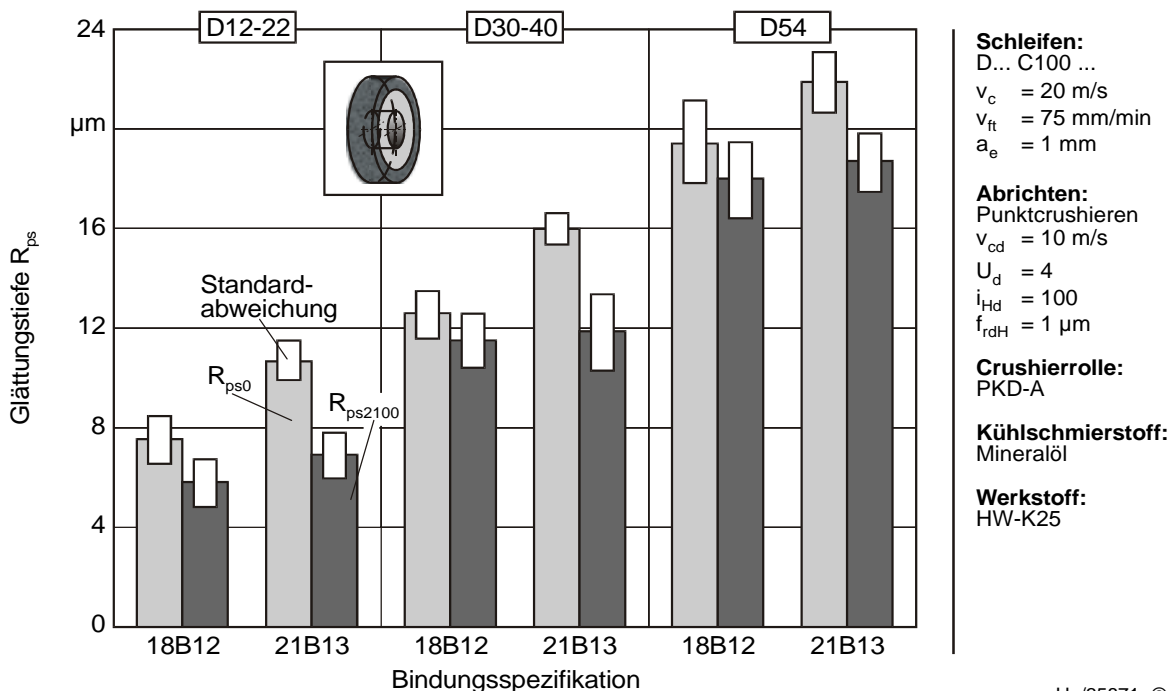


He/34900 © IFW

**Bild 7.18:** Einfluss der Schleifscheibenspezifikation auf die Schleifkräfte



In Bild 7.19 ist der Einfluss der Schleifscheibenspezifikationen auf die Glättungstiefe des Schleifbelags  $R_{ps}$  und die Veränderung der Topographie durch den Schleifeinsatz dargestellt. Zusätzlich zu den bisher verwendeten Korngrößen ist noch das Ergebnis für die Korngröße D54 – ebenfalls in den zwei Bindungsspezifikationen – abgebildet. Zu erkennen ist, dass durch den Schleifprozess eine Einebnung der Schleifscheibentopographie erfolgt. Betrachtet man jede verwendete Korngröße für sich, so ist festzustellen, dass die jeweiligen Glättungstiefen  $R_{ps2100}$  nach einem zerspannten Werkstückvolumen von  $V_W = 2100 \text{ mm}^3$  auf gleichem Niveau liegen. Dies ist unabhängig vom Ausgangszustand und den abweichenden Glättungstiefen sowie der verwendeten Bindungshärte. Neben dem Verschleiß am einzelnen Schleifkorn ist die Zusetzung des offenporigen Schleifscheibenbelags mit abgespannten Werkstückpartikeln hierfür verantwortlich. Das Niveau der Glättungstiefe verhält sich dabei proportional zur Korngröße des eingesetzten Schleifbelages.



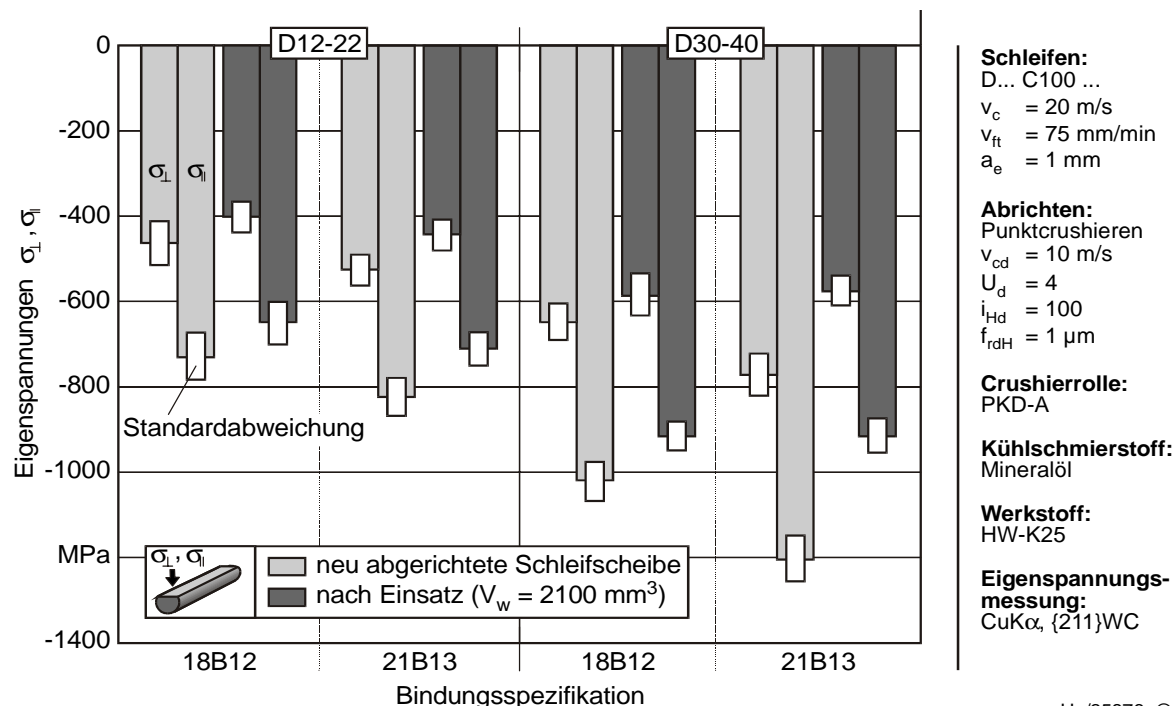
He/35871 © IFW

**Bild 7.19:** Einfluss der Schleifscheibenspezifikation auf die Schleifbelagstopographie

Der Einfluss der Schleifscheibenspezifikation auf den Eigenspannungszustand senkrecht und parallel zur Bearbeitungsrichtung in der Randzone der Werkstücke ist in Bild 7.20 zusammengefasst. Der Einsatz der neu abgerichteten grobkörnigeren D30-40-Schleifscheibe führt zu höheren Druckeigenspannungen als das Schleifen mit der D12-22-Scheibe. Dies ist auf die, bei sonst gleichen Prozessbedingungen, größere Einzelkornspannungsdicke beim Einsatz der D30-40-Scheibe und die daraus resultierende höhere mechanische Belastung des Werkstoffes zurückzuführen. Nach längerem Einsatz der Schleifscheiben ist, unabhängig von der Spezifikation, jeweils ein Rückgang der Druckeigenspannungen zu verzeichnen. Aufgrund der Verschleißmechanismen, wie der Zusetzung des Spanraumes mit Werkstückpartikeln, steigt

die Reibung in der Kontaktzone. Die dadurch entstehende Erwärmung, welche für die Initiierung thermisch bedingter Zugeigenspannungen verantwortlich ist, überlagert sich mit den mechanischen Effekten und führt so zu den reduzierten Druckeigenspannungen. Der Einsatz einer härteren Bindung führt bei einer neu abgerichteten Schleifscheibe zunächst zu höheren Druckeigenspannungen. Aufgrund der geringeren Elastizität dieser Bindung ist die mechanische Belastung des Bauteils durch die Schleifkörner höher. Während des Einsatzes der Schleifscheiben nimmt der Einfluss der Verschleißmechanismen zu, so dass nach einem Zerspanvolumen von jeweils  $V_w = 2100 \text{ mm}^3$  der Einfluss der unterschiedlichen Bindungstypen nicht mehr zum Tragen kommt. Die parallel zur Vorschubrichtung gemessenen Eigenspannungen liegen immer oberhalb der senkrecht zur Vorschubrichtung der Schleifscheibe gemessenen Eigenspannungen, was seine wesentliche Ursache in dem Eindringen der einzelnen Schleifkörner in die Oberfläche und den damit initiierten Druckspannungen hat.

Die Veränderung der Schleifbelagstopographie beim Schleifen und der Einfluss der Korngröße und der Bindungshärte auf die Oberflächengüte des Bauteils ist unter Berücksichtigung der Stellgrößen beim Punktcrushieren in den folgenden Kapiteln dargestellt.



He/35876 © IFW

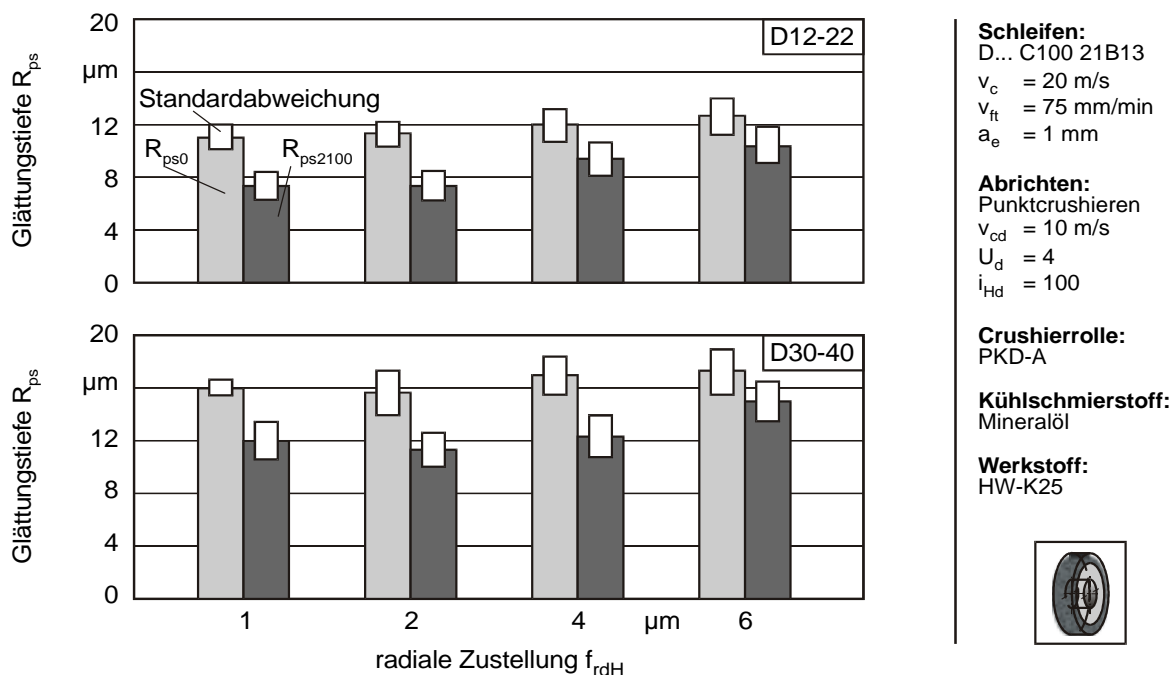
**Bild 7.20:** Einfluss der Schleifscheibenspezifikation auf die Eigenspannungen

### 7.2.2 Einfluss der radialen Zustellung beim Punktcrushieren

In Bild 7.21 sind die Glättungstiefen der Schleifscheiben mit der Bindungsmatrix vom Typ 21B13 dargestellt. Die hellgrauen Balken geben die Glättungstiefe  $R_{ps0}$  des

Schleifbelags direkt nach dem Punktcrushieren an. Die dunkelgrauen Balken zeigen die  $R_{ps2100}$ -Werte nach dem Schleifeinsatz.

Unabhängig von den Stellgrößen bei der Einsatzvorbereitung stellen sich nach dem Schleifeinsatz die Glättungstiefen im Bereich von etwa  $R_{ps2100} = 7 \dots 11 \mu\text{m}$  für die D12-22-Schleifscheibe bzw. etwa  $R_{ps2100} = 11 \dots 15 \mu\text{m}$  für die D30-40-Schleifscheibe ein. Beim Schleifen durchläuft der Prozess in der Regel zunächst eine instationäre Phase. Hierbei ändert sich die Schneidenraumbeschaffenheit permanent. Schließlich geht der Schleifprozess in eine stationäre Phase über, in welcher die Struktur des Schleifbelags im wesentlichen nur durch die Stellgrößen beim Schleifen bestimmt wird. Berücksichtigt man die Standardabweichungen der messwerte, so hat nach einem Zerspanvolumen von  $V_W = 2100 \text{ mm}^3$  die Einsatzvorbereitung mit einer radialen Zustellung im Bereich von  $f_{rdH} = 1 \dots 6 \mu\text{m}$  keinen Einfluss mehr auf die Ausbildung der Schleifbelagstopographie.



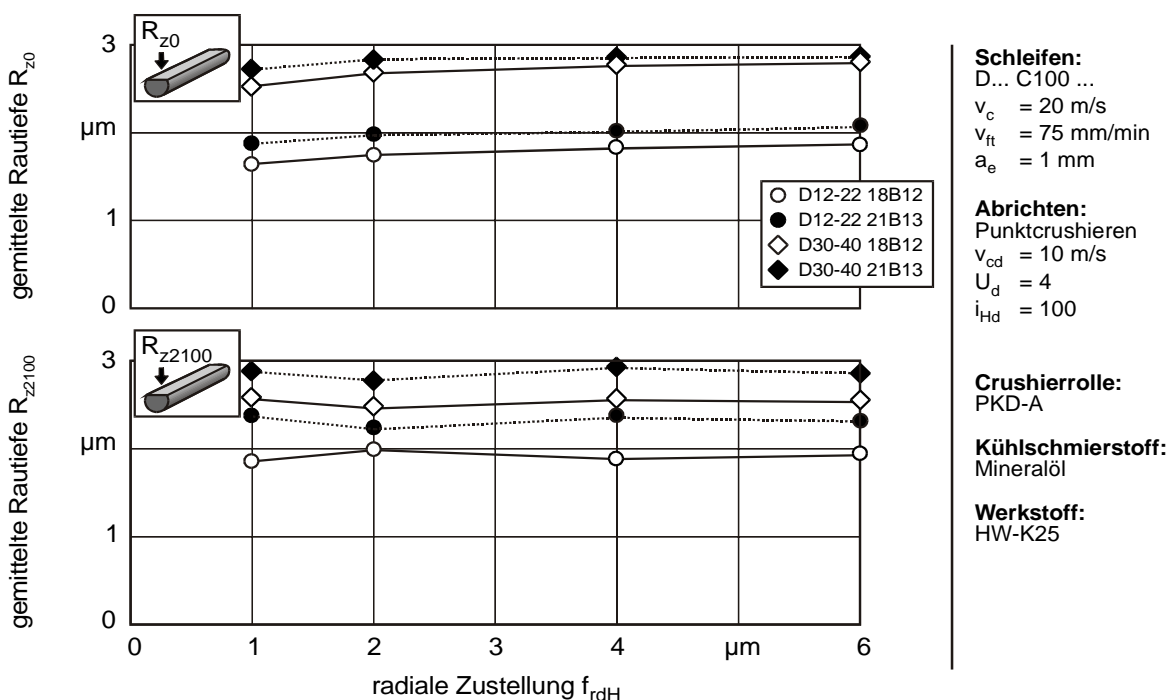
He/35885 © IFW

**Bild 7.21:** Einfluss der radialen Zustellung auf die Schleifbelagstopographie

Der Einfluss der radialen Zustellung beim Punktcrushieren auf die Oberflächengüte der bearbeiteten Bauteile wird in Bild 7.22 anhand der gemittelten Rautiefe  $R_z$  wiedergegeben. Betrachtet man zunächst die Rautiefen  $R_{z0}$  jeweils unmittelbar zu Beginn des Schleifprozesses am ersten bearbeiteten Bauteil, so zeigt sich, dass die Einsatzvorbereitung mit höherer radialer Zustellung zu einer schlechteren Oberflächengüte führt. Dies gilt vor allem für eine Erhöhung der radialen Zustellung von  $f_{rdH} = 1 \mu\text{m}$  auf  $f_{rdH} = 2 \mu\text{m}$ . Eine weitere Steigerung im Bereich  $f_{rdH} > 2 \mu\text{m}$  führt zu keiner signifikanten Veränderung der Oberflächengüte. Dieses Ergebnis korreliert mit den nach dem Punktcrushieren gemessenen Glättungstiefen  $R_{ps}$  des Schleifbelages. Neben

der radialen Zustellung  $f_{rdH}$  beim Punktcrushieren beeinflusst die Korngröße des Schleifbelages die Oberflächengüte des Bauteils.

Nach längerem Einsatz der Schleifscheiben und jeweils einem Zerspanvolumen von  $V_W = 2100 \text{ mm}^3$  relativiert sich der Einfluss der Abrichtbedingungen jedoch. So bleiben die Oberflächengüten trotz einer Variation der radialen Zustellung auf konstantem Niveau und werden im wesentlichen nur durch die Schleifscheibenspezifikation – Korngröße und Bindungshärte – beeinflusst. So führt bei gleicher Korngröße der Einsatz von Schleifscheiben mit dem härteren Bindungstyp 21B13 zu einer raueren Oberfläche. Die einzelnen Diamantkörner können bei diesem Bindungstyp besser in der Matrix gehalten werden, so dass auch weiter hervorstehende Körner nicht gleich ausbrechen, sondern an der Zerspanung des Hartmetalls teilhaben.



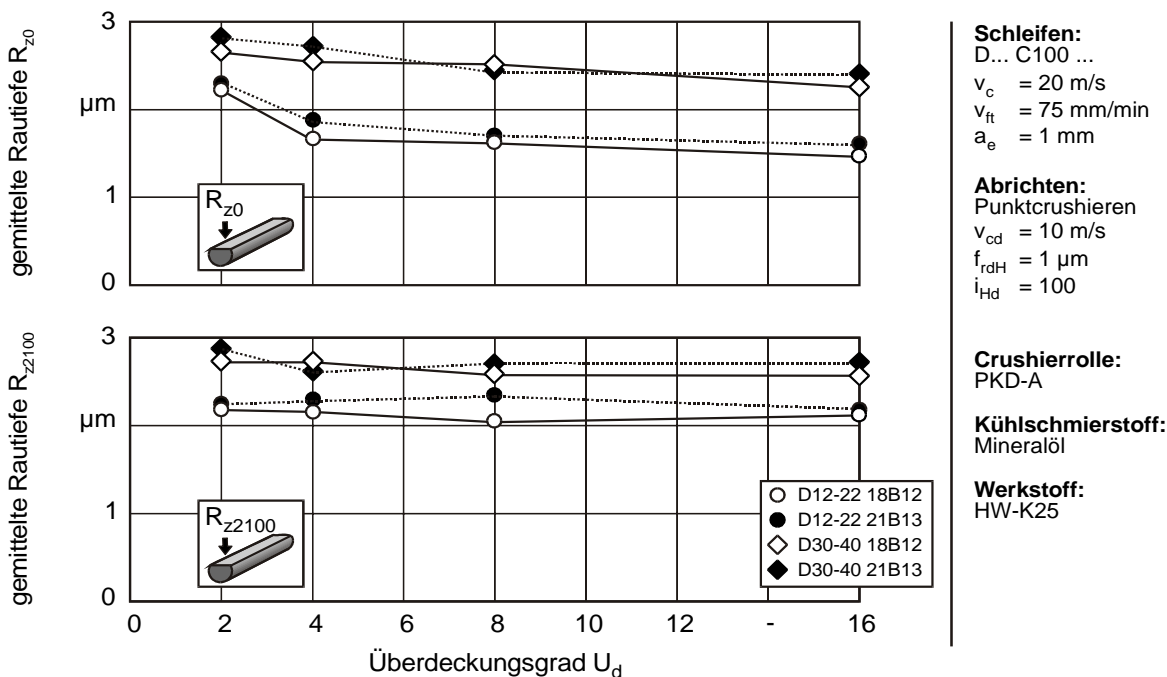
He/36116 © IFW

**Bild 7.22:** Einfluss der radialen Zustellung beim Punktcrushieren auf die Oberflächengüte des geschliffenen Bauteils

### 7.2.3 Einfluss des Überdeckungsgrades beim Punktcrushieren

In Bild 7.23 ist der Einfluss des Überdeckungsgrades beim Punktcrushieren auf die gemittelte Rautiefe  $R_z$  des bearbeiteten Hartmetalls dargestellt. Betrachtet man das Ergebnis des Prozesses mit neu abgerichteter Schleifscheibe, so zeigt sich eine Verbesserung der Oberflächengüte des Werkstücks mit steigendem Überdeckungsgrad. Signifikante Veränderungen treten jedoch nur bei einer Variation des Überdeckungsgrades im Bereich  $U_d \leq 4$  auf. Die erzielten Rauheitskenngrößen nach einem Zerspanvolumen von  $V_W = 2100 \text{ mm}^3$  entsprechen bei einem Überdeckungsgrad von  $U_d > 4$  jenen, welche mit der neu abgerichteten Scheibe erzielt werden. Bei höheren Überdeckungsgraden liegen die Werte nach einem Zerspanvolumen von

$V_W = 2100 \text{ mm}^3$  ebenfalls auf diesem Niveau. Dies belegt, dass durch das Punktcrushieren eine Schleifbelagstopographie erzeugt werden kann, welche den Anforderungen des Schleifprozesses von Beginn an entspricht. Bei höheren Überdeckungsgraden passt sich der Schleifbelag während der Einschleifphase mit zunehmendem Zerspanvolumen an die Schleifbedingungen an, indem durch einen Freischleifprozess der notwendige Spanraum erzeugt wird. So sollte beim Punktcrushieren mit möglichst geringen Überdeckungsgraden gearbeitet werden, um kurze Abrichtzeiten zu erzielen.

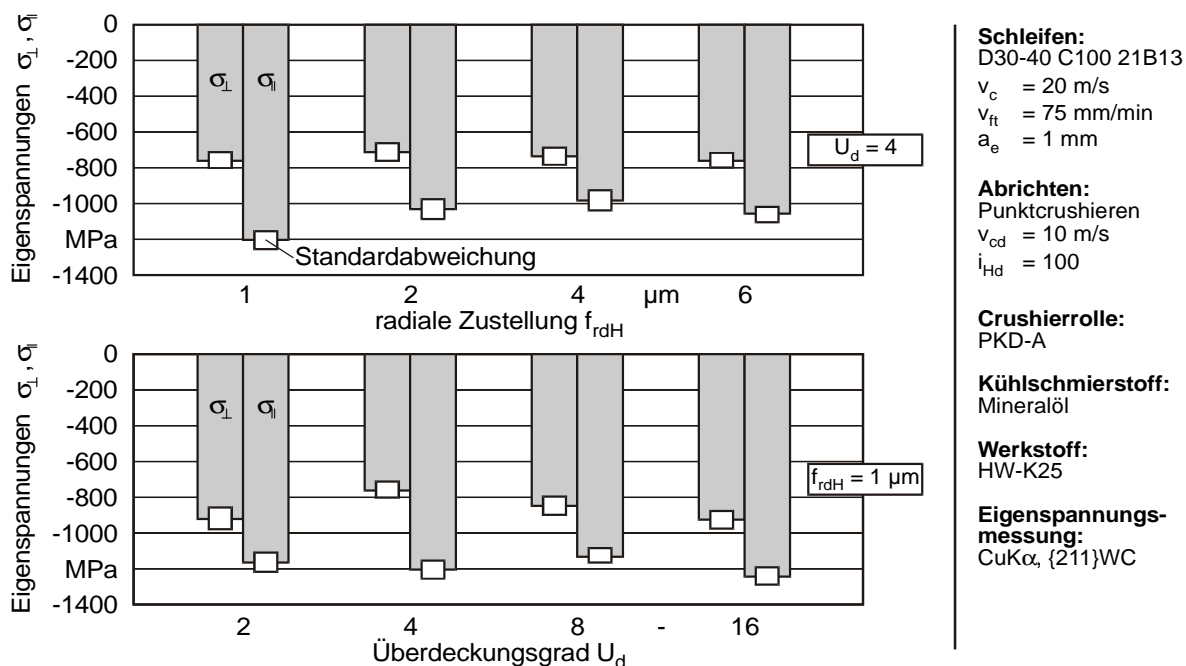


He/36117 © IFW

**Bild 7.23:** Einfluss des Überdeckungsgrades beim Punktcrushieren auf die Oberflächengüte des geschliffenen Bauteils

Eine Korrelation zwischen den sich ausbildenden Eigenspannungen im Werkstück und der gewählten radialen Zustellung bzw. dem Überdeckungsgrad beim Punktcrushieren ist nicht möglich, wie Bild 7.24 für den Einsatz einer neu abgerichteten D30-40-Schleifscheibe zeigt.

Insgesamt ist festzustellen, dass das Resultat des Schleifprozesses primär durch die Schleifscheibenspezifikation bestimmt wird. Abweichende Ausgangszustände der Schleifscheibentopographien, bedingt durch die variierten Stellgrößen bei der Einsatzvorbereitung, werden durch den Schleifprozess selbst ausgeglichen, so dass deren Einfluss nach einer Einschleifphase in den Hintergrund tritt.



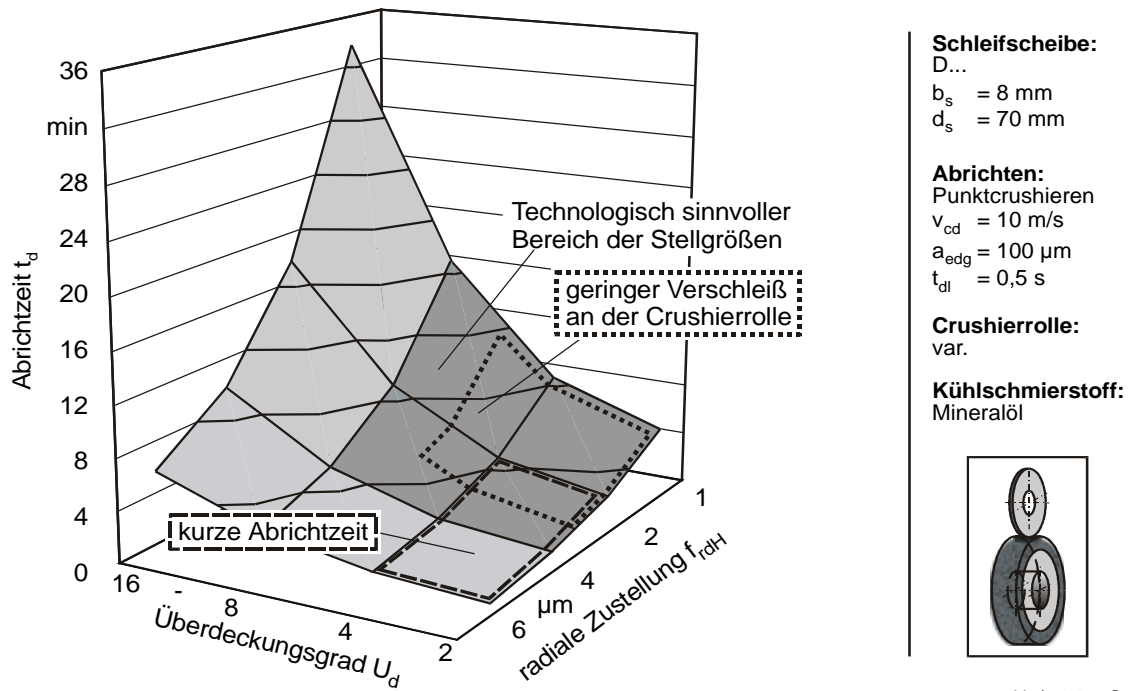
He/36135 © IFW

**Bild 7.24:** Einfluss der Stellgrößen auf den Eigenspannungszustand der Werkstücke

### 7.2.4 Optimierung der Abrichtzeit

Neben den technologischen Aspekten ist bei der Einsatzvorbereitung auch die Abrichtzeit zu berücksichtigen. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint die Wahl eines geringen Überdeckungsgrades  $U_d$  und einer höheren Zustellung  $f_{rdH}$  zunächst sinnvoll, da diese beiden technologischen Größen die Abrichtzeit  $t_d$  direkt beeinflussen. Für die Berechnungen der Abrichtzeiten des in Bild 7.25 gezeigten Falls wurde ein zu erreichender Gesamtabrichtbetrag von  $a_{edg} = 100$   $\mu\text{m}$  zugrunde gelegt. Die Schleifscheibe hat eine Breite von  $b_s = 8$  mm und einen Durchmesser von  $d_s = 70$  mm. Pro Leerhub zum Erreichen der neuen Startposition für den nächsten Abrichthub wird angenommen, dass eine Zeit von  $t_{dI} = 0,5$  s benötigt wird.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten müssen aber – neben diesem zeitlichen Aspekt – auch die anderen relevanten Faktoren berücksichtigt werden. So konnte gezeigt werden, dass der Verschleiß der Crushierrolle durch die Wahl der Stellgrößen beeinflusst werden kann. Ein niedriger Überdeckungsgrad  $U_d$  und eine niedrige radiale Zustellung  $f_{rdH}$  reduzieren die Belastung des Abrichtwerkzeuges und minimieren so dessen Verschleiß. Dies ist notwendig, um im Präzisionsbereich die Formgenauigkeit des zu erzeugenden Schleifscheibenprofils gewährleisten zu können. Hinzu kommt, dass die Crushierrolle selbst und ein Nachschleifen zur Wiederherstellung des Rollenprofils am Umfang relativ kostenintensiv sind. Ein weiterer Aspekt bei der Prozessauslegung sind die anfallenden Maschinenkosten, da die Schleifmaschine während des Abrichtprozesses für die eigentliche Produktion belegt ist.



**Bild 7.25:** Zielkonflikt zwischen technologischen und wirtschaftlichen Anforderungen

Dieser Zielkonflikt zwischen technologischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Punktcrushieren muss unter Berücksichtigung der weiteren Anforderungen und Randbedingungen an die Einsatzvorbereitung betrachtet werden, um den Prozess insgesamt effektiv zu gestalten.

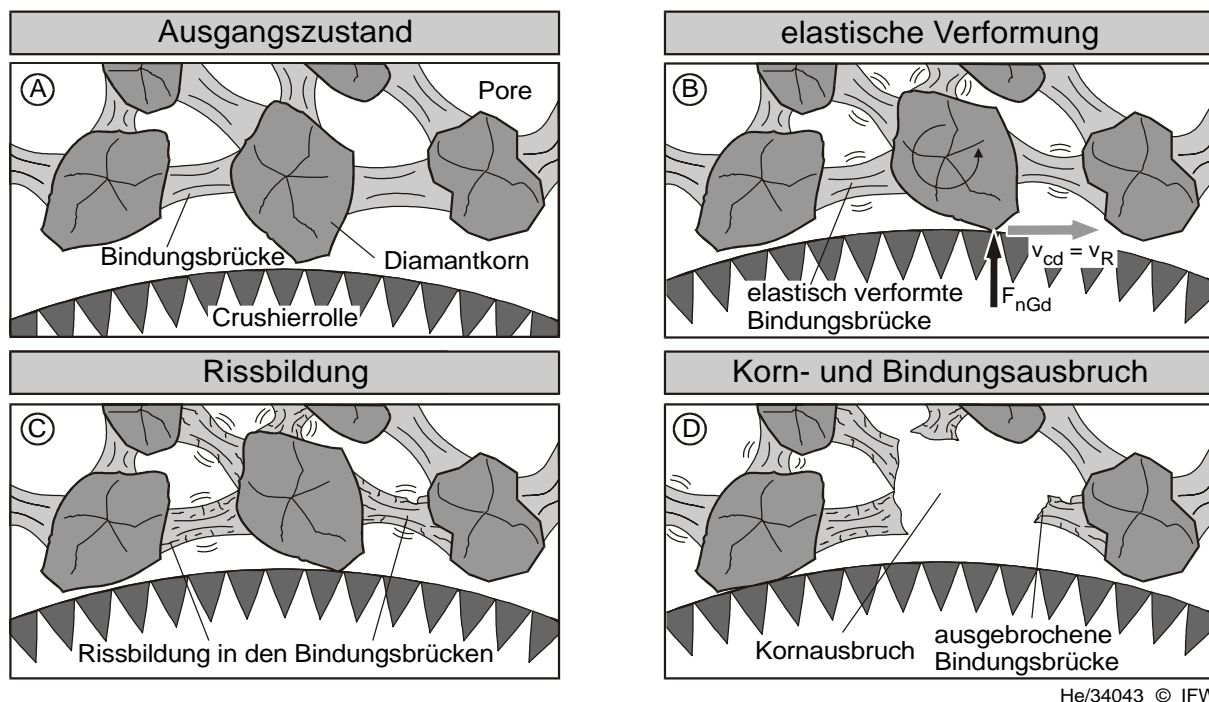


## 8 Modellbetrachtungen der Wirkmechanismen beim Punktcrushieren

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Untersuchungen zeigen die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Ausbildung der Schleifbelagstopographie beim Punktcrushieren bzw. auf das Einsatzverhalten der Schleifscheiben. Um deren Auswirkungen auf das Ergebnis beim Punktcrushieren quantifizieren zu können, soll ein Modellansatz entwickelt werden, mit welchem sich die Belastung der Bindungsbrücken in der Schleifscheibenmatrix durch die Crushierrolle abschätzen lässt. Hierfür ist zunächst eine modellhafte Beschreibung der Schleifscheibenstruktur inklusive der Kornverteilung im Belag sowie der Bindungsbrücken und Porenräume notwendig. Auf Basis dieses Strukturmodells und unter Berücksichtigung der realen Eingriffsverhältnisse der Wirkpartner beim Punktcrushieren soll dann die Belastung des Schleifbelags beim Abrichten ermittelt werden.

### 8.1.1 Strukturmodell eines mehrschichtigen Schleifbelags

Um ein Modell der Schleifscheibenstruktur aufzustellen, welches die wesentlichen Charakteristika des Belags enthält und damit eine wirklichkeitsnahe Abbildung des Abrichtprozesses ermöglicht, sind die Wirkmechanismen beim Punktcrushieren zu berücksichtigen. Bild 8.1 zeigt eine einfache zweidimensionale Modellvorstellung der Wirkmechanismen.



**Bild 8.1:** Wirkmechanismen beim Punktcrushieren

Teil A in Bild 8.1 zeigt die beiden Wirkpartner im kontaktfreien Ausgangszustand. Die Schleifscheibe besteht aus den Diamantkörnern, den keramischen Bindungsbrücken



und den Poren. In einer ersten Vereinfachung bleiben die real im Belag vorhandenen Stützkörner unberücksichtigt und werden – auch aufgrund ihres Materials (SiC) – den keramischen Bindungsbrücken zugeordnet.

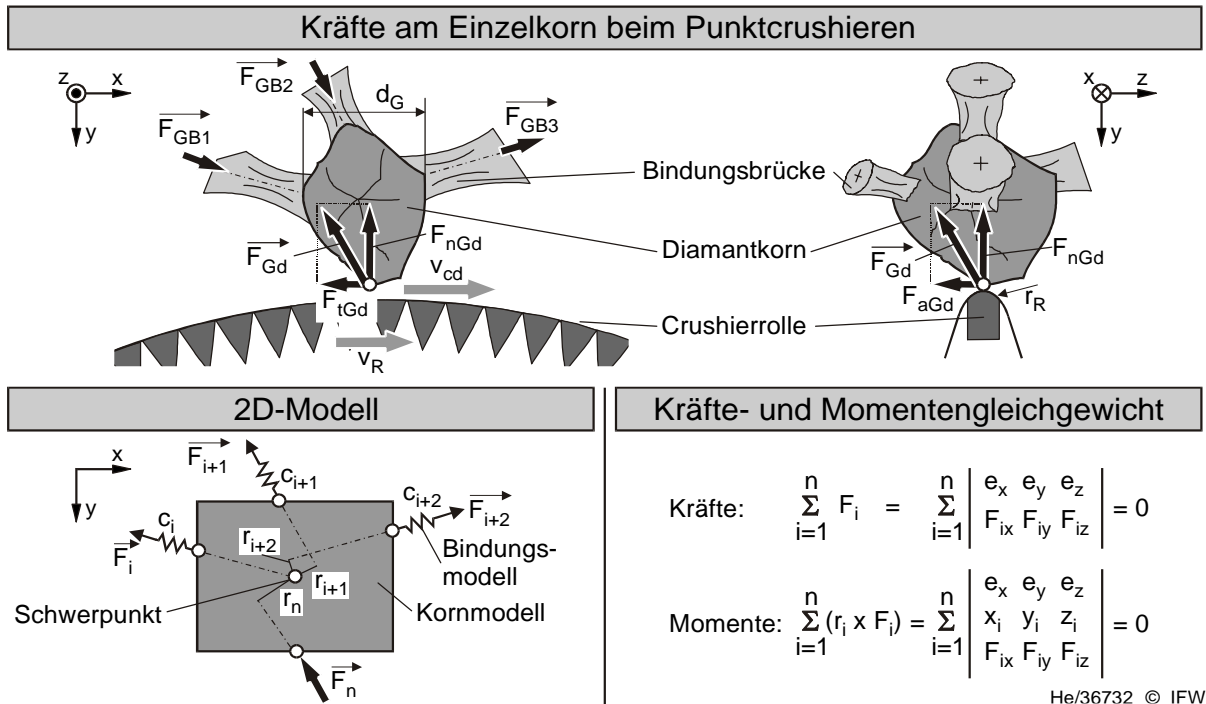
Nach dem Erstkontakt zwischen Schleifscheibe und Crushierrolle kommt es idealerweise zu einer vollständigen Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten im Berührungspunkt beider Wirkpartner ( $v_{Cd} = v_R$ ). Die auftretende Normalkraft am einzelnen Schleifkorn  $F_{nGd}$  führt zu einer elastischen Verformung der umgebenden Bindungsbrücken. Aufgrund der spröden Beschaffenheit des keramischen Bindungsmaterials ist der Einfluss dieses Effektes jedoch als gering anzusehen (B).

Eine Erhöhung der Belastung, welche beispielsweise durch eine Steigerung der radialen Zustellung hervorgerufen wird, führt zu Schädigungen des Schleifbelags. Dabei ist die Art dieser Schädigung sowohl vom Bindungs- als auch vom Schleifkornmaterial abhängig. Möglich sind sowohl Rissbildungen an den Bindungsstegen (C) als auch Kornsplitterungen am Schleifkorn. Je höher jedoch die Zähigkeit des Schleifkorns ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer Kornsplitterung. So zeigen die REM-Aufnahmen in Bild 7.5, dass der Einsatz von Diamant als Schleifkorn primär zu Rissbildungen an den keramischen Bindungsstegen führt und die noch vorhandenen Schleifkörner weitgehend unversehrt sind. Zudem nimmt mit sinkender Korngröße die Wahrscheinlichkeit der Kornsplitterung ab. Dies ist im Herstellprozess und der kristallinen Struktur der Schleifkörner begründet. So werden Mikrokorngrößen vielfach durch mechanisches Zerkleinern größerer Diamantkörner hergestellt. Die Rissinitiierung beim Brechen erfolgt dabei bevorzugt aufgrund von Fehlstellen oder zuvor eingebrachten Dotierungen bzw. entlang der Spaltebenen im Diamanten. Je kleiner die dabei gewonnenen Schleifkörner sind, desto geringer ist die Anzahl der noch verbleibenden Fehlstellen und Dotierungen im Mikrokorn. Dies erhöht die Härte des Schleifkorns [Bene01].

Mit fortschreitendem Prozess kommt es schließlich zum vollständigen Zerschneiden der Bindungsbrücken. Dies führt, je nach Ausmaß der Schädigungen, zum Herauslösen einzelner Körner oder ganzer Korngruppen aus dem Schleifbelag und bewirkt so das Freisetzen neuer Schneiden bzw. die gewünschte Profilerneuerung (D).

Die Notwendigkeit von Vereinfachungen in der Beschreibung des Schleifbelags durch eine Modellvorstellung ergibt sich aus der Einschränkung, dass eine exakte mathematische Beschreibung der realen Schleifbelagstopographie in der Regel zu komplex und daher nicht möglich ist. Die Schleifkörner sind im Belag statistisch regellos verteilt, die Abmessungen der einzelnen Schneiden streuen innerhalb eines durch die Korngrößenangabe definierten Bereichs und ihre Form kann stark variieren. Dadurch ergibt sich pro Schleifkorn eine individuelle Anzahl, Richtung sowie Länge und Form der angreifenden Bindungsbrücken. Bild 8.2 zeigt für den Belastungsfall ein aus den realen Bedingungen abgeleitetes vektorielles Kraft-Federmodell und die zugehörigen Gleichungen zur Berechnung der Kräfte- und Momentengleich-

gewichte an einem einzelnen Schleifkorn. Pro Kraftvektor muss individuell der Betrag und die Richtung berücksichtigt werden.

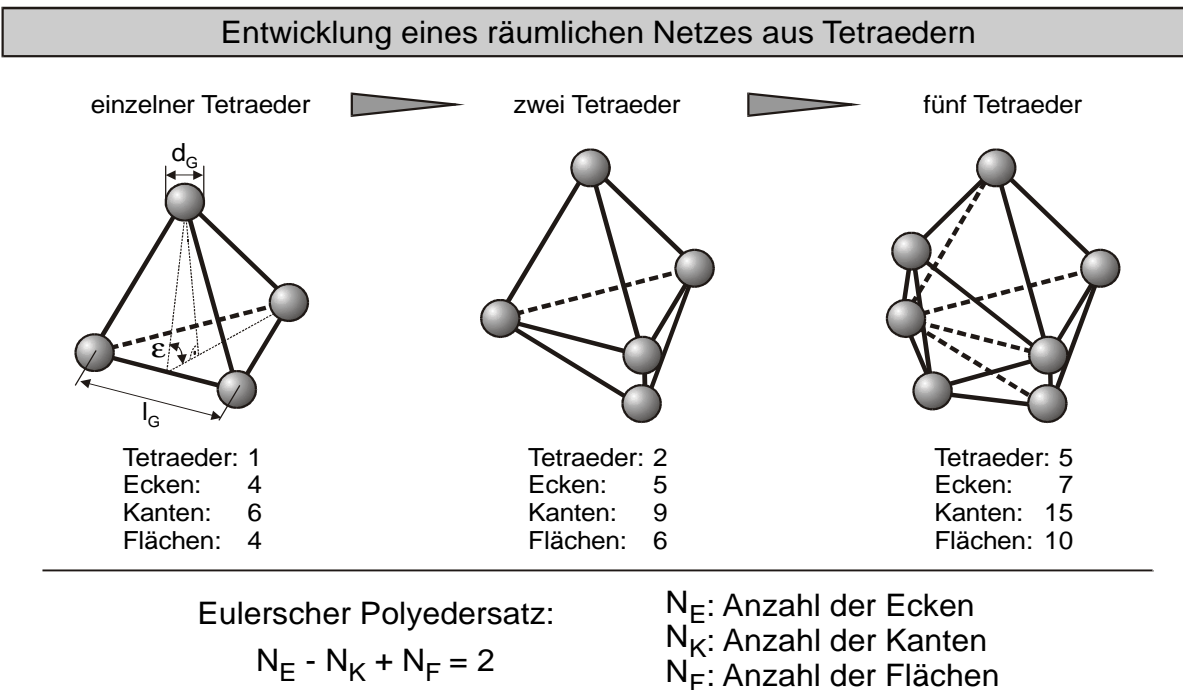


**Bild 8.2:** Kräfte am Einzelkorn beim Punktcrushieren

Die Definition eines vereinfachten Strukturmodells des Schleifscheibenbelags soll sich auf die wesentlichen Grundeigenschaften, wie die Korngröße, die Kornkonzentration und damit den durchschnittlichen Abstand zwischen den einzelnen Körnern, sowie den volumetrischen Bindungs- und Porenanteilen konzentrieren. Voraussetzung für diesen Modellansatz ist, dass die Diamantkörner im Schleifbelag gleichmäßig verteilt sind, so dass es auch keine Unterschiede in der Konzentration in axialer und radialer Richtung der Schleifscheibe gibt.

Als kleinstes dreidimensionales Element zur Beschreibung der Kornverteilung kann dann ein Tetraeder (regulärer Polyeder aus vier gleichseitigen Dreiecken) verwendet werden [Çina95]. An jedem Eckpunkt dieses Volumenelements befindet sich ein Schleifkorn, welches vereinfacht als Kugel mit dem mittleren Diamantkorndurchmesser  $d_G$  dargestellt ist. So entspricht der Abstand zwischen den Mittelpunkten zweier Schleifkörnern  $l_G$  der Kantenlänge des Tetraeders. Jede Kante stellt eine, als zylindrisch angenommene, Bindungsbrücke dar. Auf jeder Seitenfläche kann immer wieder ein weiteres Tetraeder errichtet werden, so dass insgesamt ein räumliches Netz entsteht (Bild 8.3). Für einen regulären Polyeder muss dabei der Eulersche Polyedersatz erfüllt sein [BroS91]. Zu beachten ist dabei, dass nur äußere Flächen und Kanten des Körpers in die Berechnung eingehen (Der Körper aus fünf Tetraedern hat zwar insgesamt 16 Verbindungsstege zwischen den Kugeln, aber nur 15 äußere Kanten).

Eine vollständig raumfüllende Anordnung aus Tetraedern ist real so allerdings nicht erreichbar, da der Neigungswinkel zwischen einer Seiten- und einer Grundfläche im Tetraeder, der sogenannte Böschungswinkel, mit  $\varepsilon = 70,5^\circ$  nicht einem ganzzahligen Teil von  $360^\circ$  entspricht. So besteht beispielweise ein aus sieben Eckpunkten gebildeter Körper nicht nur, wie in Bild 8.3 dargestellt, aus fünf regelmäßigen Tetraedern mit der Kantenlänge  $l_G$ , sondern enthält auch einen kleinen, verzerrten Tetraeder [Hart01]. Dieser kann aufgrund seines geringen Volumens bei der Modellbildung jedoch vernachlässigt werden.



He/36127 © IFW

**Bild 8.3:** Räumliches Netz aus Volumenelementen mit äquidistanter Kantenlänge

Mit dieser Annahme lässt sich die Tetraeder-Konstante  $k_T$  bestimmen, welche das Verhältnis aus Anzahl der Schleifkörner  $N_G$  (entspricht der Anzahl der Ecken  $N_E$ ) zur Anzahl der durch diese Eckpunkte gebildeten zusammenliegenden Tetraeder  $N_T$  beschreibt:

$$k_T = \frac{N_E}{N_T} = \frac{N_G}{N_T} = 1,4 \quad (8.1)$$

Mit dem mittleren Kornabstand  $l_G$  als Kantenlänge des einzelnen Tetraeders lässt sich dessen Volumen  $V_T$  berechnen:

$$V_T = \frac{\sqrt{2} \cdot l_G^3}{12} \quad (8.2)$$

Die Schneidendichte  $N_{GV}$  pro Volumeneinheit des Schleifbelags lässt sich einerseits aus dem Quotienten der Anzahl der Schleifkörner  $N_G$  geteilt durch das Schleifbe-

lagsvolumen  $V_S$  berechnen. Dabei wird von einer Schneide pro Schleifkorn ausgegangen.

$$N_{GV} = \frac{N_G}{V_S} \quad (8.3)$$

Andererseits lässt sich die Schneidendichte auch durch die Diamantkonzentration  $C$ , die Dichte der Diamanten  $\rho_G$  und die mittlere Korngröße  $d_G$  bestimmen. Dabei werden die Diamanten wiederum als kugelförmige Körper betrachtet:

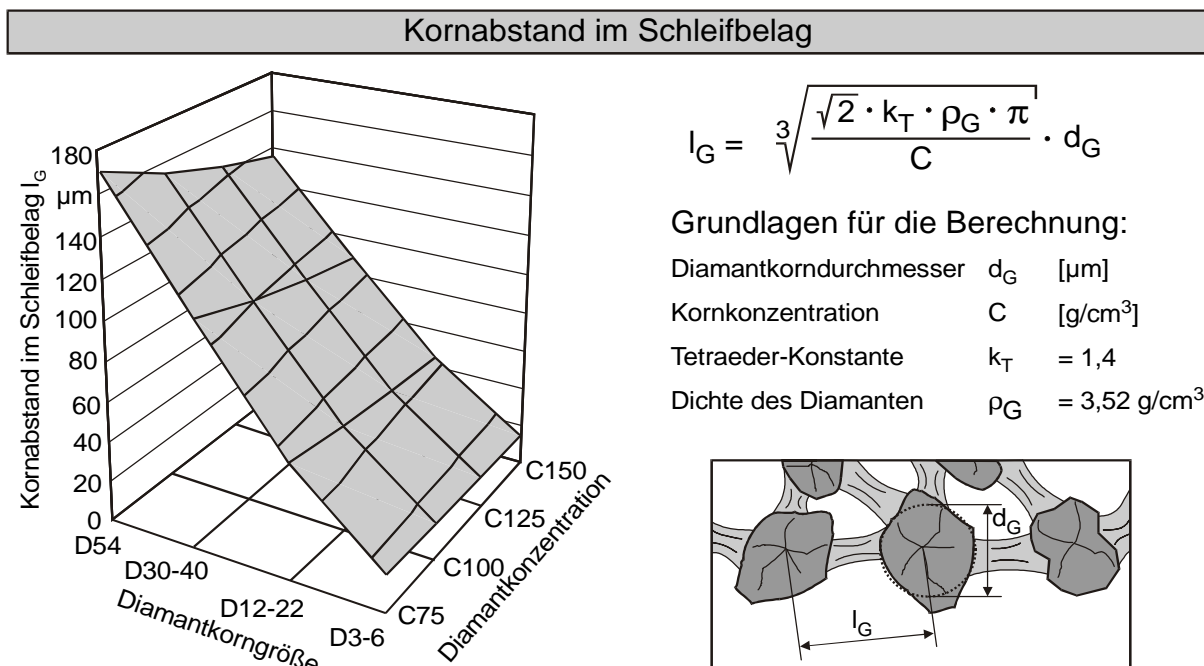
$$N_{GV} = \frac{6 \cdot C}{\rho_G \cdot \pi \cdot d_G^3} \quad (8.4)$$

Durch Einsetzen von (8.1) in (8.3) und unter der Annahme, dass das Schleifbelagsvolumen  $V_S$  das Produkt aus der Anzahl der zusammenliegenden Tetraeder  $N_T$  und dem Volumen eines einzelnen Tetraeders  $V_T$  ist, ergibt sich dann:

$$N_{GV} = \frac{k_T \cdot N_T}{N_T \cdot V_T} \quad (8.5)$$

Wird nun (8.2) in (8.5) eingesetzt und mit (8.4) gleichgesetzt, so erhält man den durchschnittlichen Kornabstand  $l_G$  im Schleifbelag:

$$l_G = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{2} \cdot k_T \cdot \rho_G \cdot \pi}{C} \cdot d_G} \quad (8.6)$$



**Bild 8.4:** Berechnung des Kornabstands im Schleifbelag

Bild 8.4 zeigt den berechneten Kornabstand im Schleifbelag in Abhängigkeit von der Kornkonzentration und der Diamantkorngröße. Dabei ist zu beachten, dass eine Kornkonzentration, wie sie üblicherweise nach DIN 69800 angegeben wird, zunächst umgerechnet werden muss [DIN69800]. So enthält eine Schleifscheibe mit der Konzentration C100 einem Diamantanteil von 4,4 Karat/cm<sup>3</sup>. Ein Karat entspricht 0,2 g. Dementsprechend bedeutet C100 einen Diamantgehalt von 0,88 g/cm<sup>3</sup>. Andere Schleifscheibenkonzentrationen können dann proportional auf dieser Basis bestimmt werden. Da für Mikrokorngrößen unterhalb von D46 keine Klassifizierung nach dem FEPA-Standard oder nach DIN 848 existiert, erfolgt die Korngrößenangabe der Schleifscheiben in der Praxis häufig durch die Angabe des Korngrößenbereiches [DIN848, FEPA61]. Für die Berechnung und Darstellung in Bild 8.4 wird jeweils die mittlere Korngröße des entsprechenden Bereiches gewählt. Die angenommene Dichte des Diamanten von  $\rho_G = 3,52 \text{ g/cm}^3$  entspricht der von Naturdiamant [Psch79]. Deutlich zu erkennen ist, dass der Kornabstand hauptsächlich von der Diamantkorngröße abhängt. Eine Erhöhung der Diamantkonzentration beispielsweise einer D30-40-Schleifscheibe von C100 auf C150 reduziert den Kornabstand nur um knapp 13 %.

Um ein vollständiges Modell der Struktur des Schleifbelags zu erhalten, ist die Kenntnis des Durchmessers der Bindungsstege  $d_B$  notwendig. Da eine Berechnung auf Basis des dreidimensionalen Tetraedermodells recht komplex ist, wird zur Vereinfachung das dreidimensionale Modell zunächst auf ein zweidimensionales projiziert. Um dem Grundsatz nach einer gleichmäßigen Verteilung der Diamanten im Schleifbelag gerecht zu werden, wird dabei ein Gitter aus gleichseitigen Dreiecken verwendet. Dieses Gitter baut sich aus der Anzahl der Ecken pro Lage  $N_{EL}$  und der Anzahl der Lagen  $N_L$  auf. Bild 8.5 zeigt links oben die Draufsicht auf dieses Gitter. Um daraus eine räumliche Struktur zu generieren, wird die Anzahl  $N_R$  an Gittern im Abstand der Länge der Bindungsbrücken  $l_G$  hintereinander angeordnet und durch senkrechte Gitterstäbe (bzw. Bindungsbrücken) miteinander verbunden. Die Anzahl der Ecken eines Gitter lässt sich berechnen aus:

$$N_E = N_{EL} \cdot N_L \quad (8.7)$$

Die Anzahl der Kanten (Verbindungen zwischen den Eckpunkten des Gitters; entspricht den Bindungsbrücken) ergibt sich zu:

$$N_K = (N_{EL} - 1) \cdot N_L + [(N_L - 1) \cdot (2 \cdot N_{EL} - 1)] \quad (8.8)$$

Das Verhältnis von Kanten (Bindungsbrücken) zu Eckpunkten (Schleifkörnern) im Gitter  $k_G$  lässt sich dann durch die Grenzwertbildung ermitteln:

$$\begin{aligned}
 k_G &= \frac{N_K}{N_E} = \lim_{N_{EL}, N_L \rightarrow \infty} \frac{(N_{EL} - 1) \cdot N_L + [(N_L - 1) \cdot (2 \cdot N_{EL} - 1)]}{N_{EL} \cdot N_L} \\
 &= \lim_{N_{EL}, N_L \rightarrow \infty} \frac{3 \cdot (N_{EL} \cdot N_L) - 2 \cdot (N_{EL} + N_L) + 1}{N_{EL} \cdot N_L} = 3 \quad (8.9)
 \end{aligned}$$

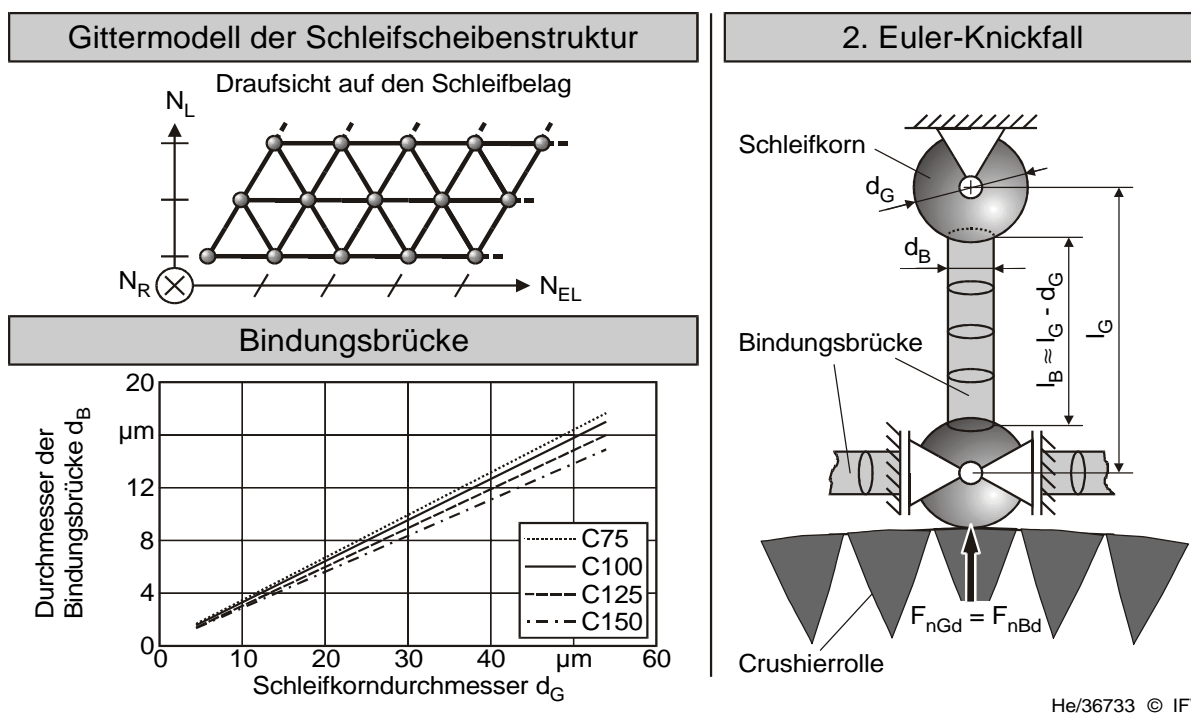
Werden nun beliebig viele Gitter hintereinander gelegt, so erhöht sich das Verhältnis um den Faktor 1 auf  $k_G = 4$ .

Die näherungsweise Gleichung zur Bestimmung des Volumens einer zylindrischen Bindungsbrücke lautet:

$$V_B \approx \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_B^2 \cdot (l_G - d_G) \quad (8.10)$$

Wird nun vorausgesetzt, dass die volumetrischen Anteile von Bindung, Korn, und Poren bei der keramisch gebundenen Schleifscheibe räumlich gleichmäßig verteilt sind (siehe auch: Dreistoffkoordinatensystem zur Beschreibung des Schleifbelags, Bild 2.2), so lässt sich der Durchmesser  $d_B$  der Bindungsbrücke berechnen:

$$d_B = \sqrt{\frac{d_G^3}{6 \cdot (l_G - d_G)}} \quad (8.11)$$



**Bild 8.5:** Randbedingungen für die Modellvorstellung

### 8.1.2 Kritische Belastung der Bindungsbrücken

Zur Berechnung der kritischen Belastung, welche zum Bruch der Bindungsbrücke und damit zum Kornausbruch führt, wird davon ausgegangen, dass primär die oberste Kornlage die Kräfte aufnehmen muss. Die darunter liegenden Kornlagen werden, auch aufgrund der geringen Nachgiebigkeit keramischer Bindungen und der daraus resultierenden minimalen elastischen Verformung [Egge01], als starr betrachtet. Die senkrecht angeordneten Bindungsbrücken, welche die einzelnen Körner miteinander verbinden, werden als Stabwerk angesehen, dessen Komponenten nur Normalkräfte aufnehmen können. Unter diesen Voraussetzungen kann die Kraft, welche zum Ausknicken führt und damit als identisch mit der den Bruch auslösenden Kraft der Bindung angesehen wird, durch den zweiten Euler-Knickfall angenähert werden (Bild 8.5, rechts). Die notwendige Voraussetzung, dass die Länge der Bindungsbrücke sehr viel größer ist als deren Durchmesser ( $l_B \gg d_B$ ), ist gegeben. Die allgemeine Formel, in welche der Elastizitätsmodul  $E$ , das axiale Flächenträgheitsmoment  $I$  und die Knicklänge  $l_k$  eingeht, lautet für diesen Fall:

$$F_{krit} = \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{l_k^2} \quad (8.12)$$

Das axiale Flächenträgheitsmoment  $I_B$  der Bindungsbrücke mit idealer kreisrunder Querschnittsfläche berechnet sich zu:

$$I_B = \frac{\pi \cdot d_B^4}{64} \quad (8.13)$$

Mit (8.12) und (8.13) ergibt sich die kritische Bruchkraft  $F_{Bkrit}$  in der Bindungsbrücke zu:

$$F_{Bkrit} = \frac{E_B \cdot d_B^4 \cdot \pi^3}{64 \cdot (l_G - d_G)^2} \quad (8.14)$$

Durch Einsetzen von (8.6) und (8.11) lässt sich die Formel auf die grundsätzlichen Angaben eines Schleifbelags, wie beispielsweise die Korngröße oder die Konzentration, zurückführen:

$$F_{Bkrit} = \frac{d_G^2 \cdot E_B \cdot \pi^3}{\left[ \sqrt{48} \cdot \left( 3 \sqrt[3]{\frac{\sqrt{2} \cdot k_T \cdot \rho_G \cdot \pi}{C}} - 1 \right) \right]^4} \quad (8.15)$$

Um von einer einwirkenden Normalkraft  $F_{nd}$  beim Punktcrushieren auf die Belastung der einzelnen Bindungsbrücke  $F_{nBd}$  schließen zu können ist die Kenntnis der Kontaktfläche zwischen Schleifbelag und Crushierrolle notwendig. Hierfür kann auf die

Zusammenhänge für das Außenrundscheifen zurückgegriffen werden [Töns95]. Die Länge der geometrischen Kontaktfläche beim Abrichten berechnet sich dann zu:

$$l_{gd} = \sqrt{f_{rdH} \cdot \left( \frac{d_s \cdot d_R}{d_s + d_R} \right)} \quad (8.16)$$

Die Kontaktfläche beim Abrichten  $A_{kd}$  zwischen den beiden Wirkpartnern lässt sich unter der Berücksichtigung der in Kapitel 5 beschriebenen Randbedingungen durch folgenden Term bestimmen:

$$A_{kd} \approx l_{gd} \cdot b_{gd} \approx l_{gd} \cdot a_{pd} = a_{pd} \cdot \sqrt{f_{rdH} \cdot \frac{d_s \cdot d_R}{d_s + d_R}} \quad (8.17)$$

Die Anzahl der innerhalb dieser Kontaktfläche liegenden Bindungsbrücken  $N_{BAkd}$ , auf welche sich die Beanspruchung durch die einwirkende Normalkraft  $F_{nd}$  verteilt, kann unter der Annahme des in Bild 8.5 (links oben) beschriebenen Schichtenmodells aus Ebenen mit zusammenhängenden gleichseitigen Dreiecken und unter der Voraussetzung einer gleichmäßig verteilten Belastung berechnet werden:

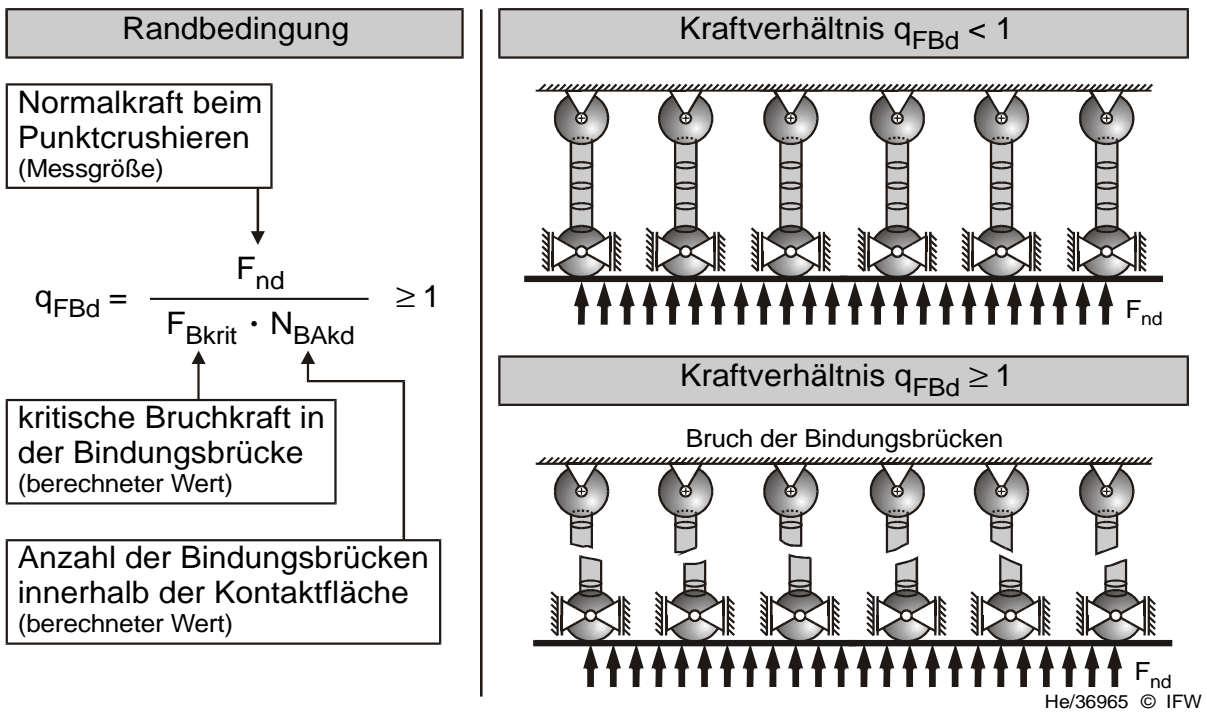
$$\begin{aligned} N_{BAkd} &= N_{GV} \cdot l_G \cdot A_{kd} \\ &= \sqrt{f_{rdH} \cdot \frac{d_s \cdot d_R}{d_s + d_R}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sqrt{2} \cdot k_T \cdot C^2}{(\rho_G \cdot \pi)^2} \cdot \frac{6 \cdot a_{pd}}{d_G^2}} \end{aligned} \quad (8.18)$$

Die Randbedingung, welche erfüllt sein muss, damit es zum Bruch der einzelnen Bindungsbrücke kommt, lässt sich damit durch folgendes Kraftverhältnis  $q_{FBd}$  beschreiben:

$$q_{FBd} = \frac{F_{nBd}}{F_{Bkrit}} = \frac{F_{nd}}{F_{Bkrit} \cdot N_{BAkd}} \geq 1 \quad (8.19)$$

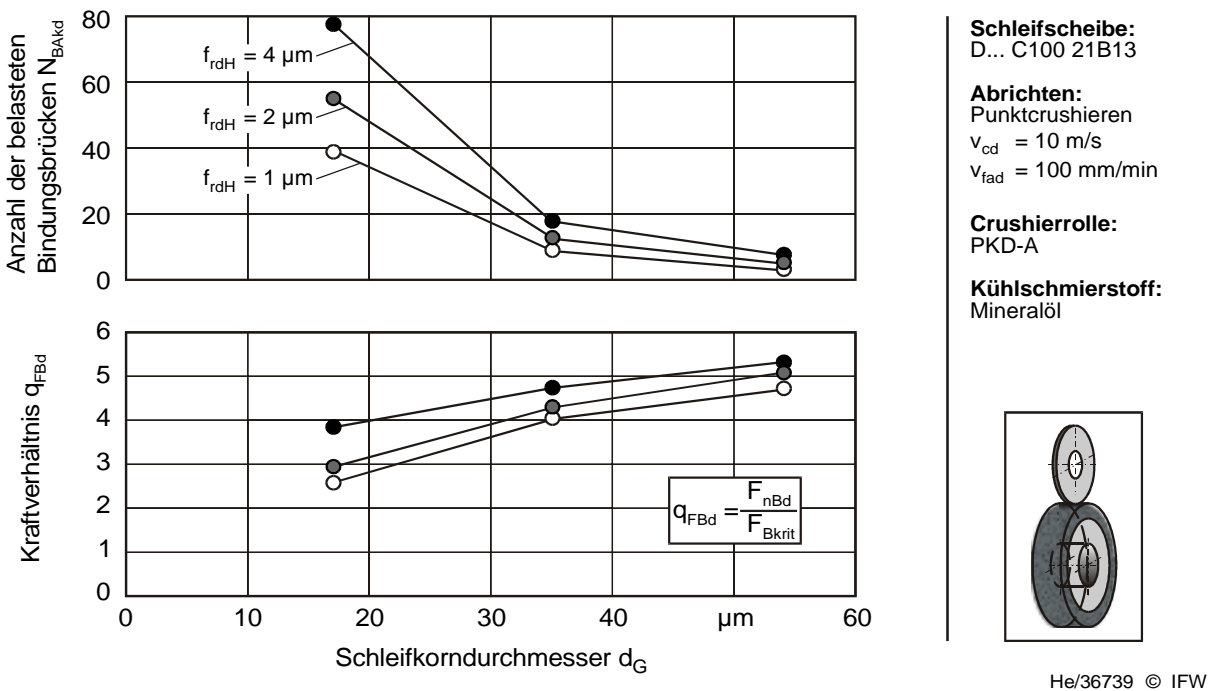
Die Normalkraft beim Punktcrushieren  $F_{nd}$  verteilt sich auf die Anzahl  $N_{BAkd}$  der in der Kontaktzone befindlichen senkrecht angeordneten Bindungsbrücken. Dabei muss die kritische Bruchkraft in der jeweiligen Bindungsbrücke  $F_{Bkrit}$  überschritten werden, um einen Bruch und damit einen Abtrag des Schleifbelages zu erreichen (Bild 8.6). Sowohl durch eine höhere Normalkraft beim Abrichten als auch durch eine Reduzierung der in der Kontaktzone befindlichen Bindungsbrücken wird die Belastung der einzelnen Bindungsbrücke erhöht.





**Bild 8.6:** Bruch der Bindungsbrücken im Schleifbelag

Den Einfluss der Korngröße im Schleifbelag auf die Anzahl der innerhalb der Kontaktfläche zwischen Crushierrolle und Schleifscheibe liegenden Bindungsbrücken sowie das Kraftverhältnis beim Punktcrushieren zeigt Bild 8.7.

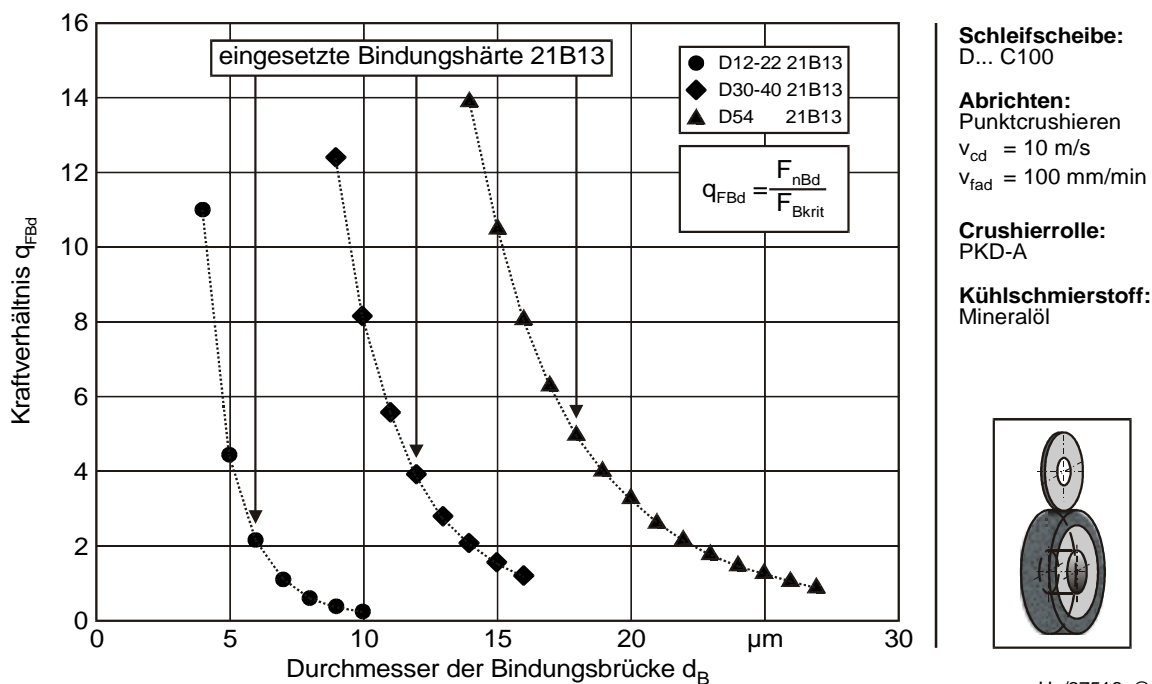


**Bild 8.7:** Anzahl der belasteten Bindungsbrücken und Kraftverhältnis

Mit zunehmender Korngröße nimmt die Anzahl der belasteten Bindungsbrücken stark ab, während der Durchmesser der Bindungsbrücken (s. Bild 8.5) aber nur linear

ansteigt. Dies hat zur Folge, dass in einem grobkörnigeren Schleifbelag die Belastung der einzelnen Bindungsbrücke steigt. Dabei wird für die Berechnungen ein Elastizitätsmodul von  $E_B = 100 \text{ GPa}$  für die keramische Bindung angenommen [SalS82]. Diese Belastung der Bindungsmatrix spiegelt sich im Quotienten aus der realen Kraft an der Bindungsbrücke und der theoretisch erforderlichen Kraft wider (Bild 8.7, unten). Zwar steigt mit zunehmender Zustellung beim Abrichten die Anzahl der Bindungsbrücken in der Kontaktfläche an. Jedoch erhöht sich parallel dazu die Abrichtkraft derart stark, dass sich die Belastung der einzelnen Bindungsbrücke vergrößert.

Eine Veränderung der Härte des Schleifscheibenbelags wird häufig durch eine Verstärkung bzw. Verringerung der Dicke der Bindungsstege erzielt. Unter der Annahme, dass sich die Abrichtkräfte bei einer geringen Veränderung der Bindungsbrücken nicht verändern, sind die berechneten Kraftverhältnisse  $q_{FBd}$  für die Schleifscheiben D12-22, D30-40 und D54 in Bild 8.8 angegeben. Eingezeichnet sind zusätzlich die jeweils standardmäßig eingesetzten Bindungstypen 21B13.



**Bild 8.8:** Einfluss der Durchmesser der Bindungsbrücken auf das Kraftverhältnis

Bereits eine geringe Reduzierung der Bindungshärte – und damit der Dicke der Bindungsstege – führt zu einer erheblichen Steigerung der Belastung der einzelnen Bindungsbrücken, welche sich in dem höheren Kraftverhältnis widerspiegelt. So erfolgt bei Einsatz der weniger verschleißfesten Bindungstypen 18B12 ein stärkere Belastung der Matrix. Auf die Formgenauigkeit generierter Schleifscheibenprofile hat diese Belastung einen entscheidenden Einfluss. Mit zunehmender Krafteinwirkung ist zudem zu erwarten, dass auch tieferliegende Bindungsbrücken im Schleifbelag überlastet werden und dies aufgrund der initiierten Risse zu einem Ausbruch ganzer

Kornlagen führen kann. Dies spiegelt sich in einer schlechteren Profilhaltigkeit des Schleifbelages wider und wird durch Untersuchungen zum Punktcrushieren von Profilschleifscheiben im nachfolgenden Kapitel verifiziert. Der Einsatz feinkörniger Schleifbeläge kann diese Belastung reduzieren und somit die Formgenauigkeit des Profils verbessern. Im folgenden Kapitel soll daher bei den Untersuchungen besonders der Einfluss der Korngröße im Schleifbelag analysiert werden.

Mit Hilfe dieses Modells können so die wirkenden Belastungen auf die Bindungsstruktur der Schleifscheibe beim Punktcrushieren ermittelt werden. Dies kann bei der Auswahl und Anpassung des Schleifwerkzeuges genutzt werden, um einen schädigungsarmen Abrichtprozess mit definiertem und möglichst geringem Abtrag zu ermöglichen. Dabei muss aber auch erwähnt werden, dass aufgrund des Modellansatzes die abgeleiteten Aussagen mit Unsicherheiten behaftet sind. Diese liegen einerseits in der Berechnung der Bruchkräfte der Bindungsbrücken und der Reduzierung der wirkenden Belastung auf statische Normalkräfte. Trotz dieser Vereinfachungen haben die ermittelten Kraftverhältnisse aber eine realistische Größenordnung.

Hauptunsicherheitsfaktor bei dieser Modellberechnung ist jedoch die Schleifscheibe selbst. Ausreichende Angaben zum Aufbau und zur genauen Zusammensetzung des Schleifbelages sind von den Herstellern nicht in dem Maße zu bekommen, wie sie für eine exakte Beschreibung notwendig wären. Dies ist jedoch eine Grundvoraussetzung, um das Modell weiter entwickeln zu können. Die Berücksichtigung dynamischer Kräfte sowie Schwankungen in der Porosität des Schleifbelages sind sicherlich Einflussfaktoren, welche bei zukünftigen Modellansätzen mit einfließen sollten.

## 9 Punktcrushieren von Profilschleifscheiben

Das Kapitel 7 beschreibt die grundlegenden Einflüsse der System- und Stellgrößen beim Punktcrushieren zylindrischer Schleifscheiben vom Typ 1A1. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine relativ einfache Analyse des Abrichtprozesses hinsichtlich der erzeugten Schleifscheibentopographien und des Verschleißverhaltens der Abrichtwerkzeuge. Mit Hilfe des Modellansatzes in Kapitel 8 kann zusätzlich die Belastung der Schleifscheibe im Abrichtprozess abgeschätzt werden. In der Praxis wird der Einsatz des Punktcrushierens zur Einsatzvorbereitung von 1A1-Schleifscheiben jedoch weniger Anwendung finden, da es hierfür kostengünstigere konventionelle Abrichtverfahren gibt.

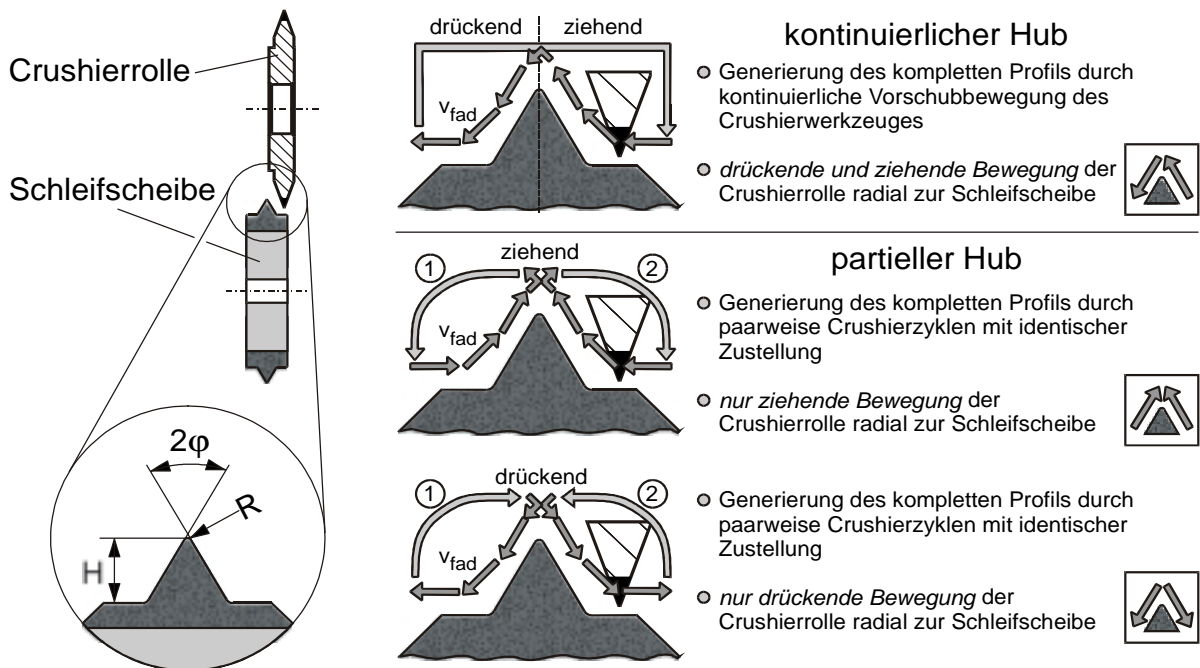
Bei der Einsatzvorbereitung von Profilschleifscheiben, für die das Punktcrushieren aufgrund seiner hohen Flexibilität besonders geeignet ist, treten zusätzliche Anforderungen auf, welche sowohl die Wahl der Stellgrößen als auch der Schleifscheibenspezifikation beeinflussen können. Hier sind vor allem die Aspekte der Profilhaltigkeit und der erreichbaren Profilradien am Schleifbelag von besonderer Bedeutung. Dabei muss ein grundlegender Zielkonflikt bei der Auslegung eines Schleifprozesses hinsichtlich der Wahl der Schleifscheibenspezifikation berücksichtigt werden. Um eine hohe Zerspanleistung zu erzielen, ist der Einsatz möglichst grobkörniger Schleifscheiben erstrebenswert. So liegen die Prozesskräfte beim Einsatz grobkörniger Schleifscheiben insgesamt auf niedrigerem Niveau und steigen mit zunehmendem Zerspanvolumen geringer an als bei der Verwendung feinkörniger Schleifscheiben.

Gerade im Bereich extrem kleiner Radien und Profilhöhen an den Schleifscheibenprofilen ist aber der Einsatz feinkörniger Schleifscheiben notwendig, um die Profilgenauigkeit und Formhaltigkeit der Schleifscheibe gewährleisten zu können. Bei der Verwendung von grobkörnigen Schleifscheiben besteht die Gefahr, dass beispielsweise Profilspitzen sowie Radien und Absätze des Profils nur durch wenige Schleifkörner ausgeprägt werden. Beim Ausbruch einzelner Körner wird die Profilhöhe drastisch reduziert und es können Formfehler an den zu bearbeitenden Werkstücken entstehen.

Ein typischer Anwendungsfall für Profilschleifoperationen im Werkzeugbereich sind Schleifscheibenprofile für die Herstellung von metrischen Gewinden nach DIN 13 [DIN13]. An die Schleifscheiben werden hohe Ansprüche hinsichtlich Maß- und Formgenauigkeit gestellt. Daher soll bei den folgenden Untersuchungen der makroskopische Verschleiß der Schleifbeläge im Vordergrund stehen. Das gewählte Basisprofil des Schleifscheibenbelags lehnt sich an die Anforderungen zur Profilierung von Schleifscheiben zum Schleifen metrischer Gewindegeometrien an und wird durch die Höhe des Profils  $H$ , den Radius an der Profilspitze  $R$  und einen konstanten Flankenwinkel von  $2\varphi = 60^\circ$  definiert (Bild 9.1, links). Bei den Untersuchungen wird die Soll-Profilhöhe mit  $H_{\text{Soll}} = 800 \mu\text{m}$  konstant gehalten.

## 9.1 Strategie beim Abrichten

Bei der Profilgenerierung durch NC-gesteuertes Abfahren der gewünschten Kontur der Schleifscheibe mittels der angetriebenen und synchronisierten Crushierrolle können verschiedene Strategien unterschieden werden (Bild 9.1, rechts).



He/30628 © IFW

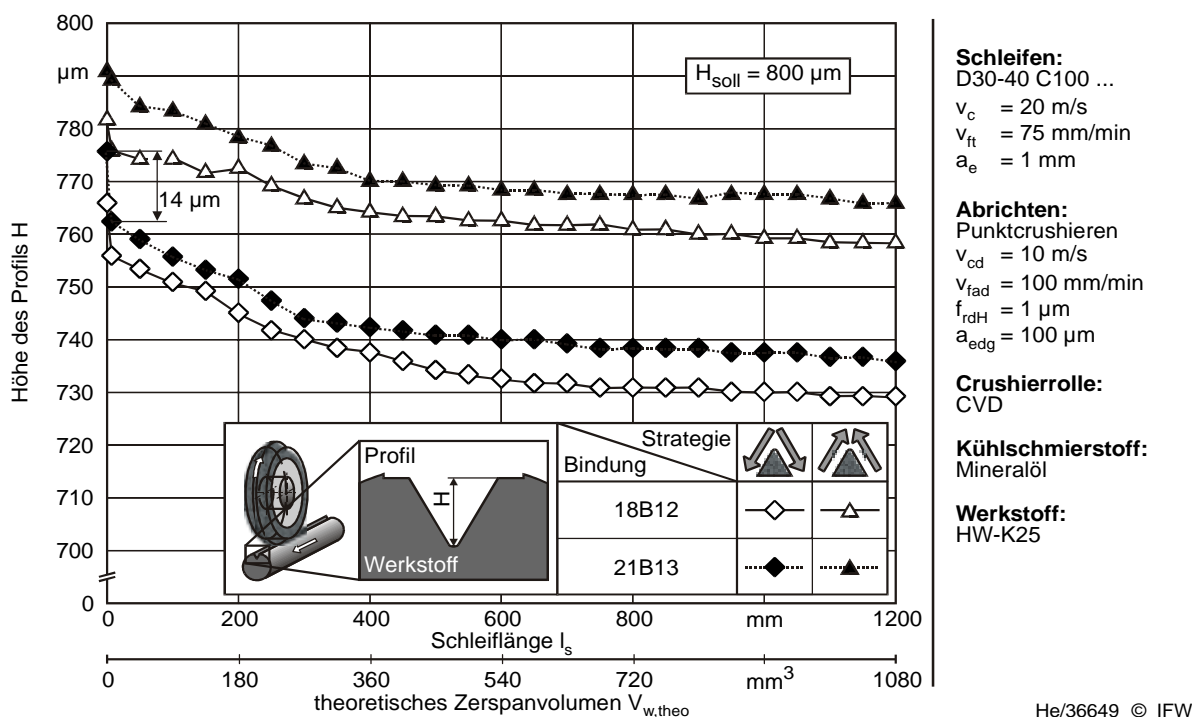
**Bild 9.1:** Basisprofil der Profilschleifscheibe und Strategien zur Profilgenerierung

Beim Abrichten mit kontinuierlichem Hub wird das komplette Profil abgefahren und anschließend das Abrichtwerkzeug radial um den Betrag  $f_{rd}H$  zugestellt. Dies kann mehrfach wiederholt werden, bis das gewünschte Schleifscheibenprofil hergestellt bzw. regeneriert ist. So lassen sich beliebig komplexe Profile mit relativ geringem Programmieraufwand generieren. Ein Nachteil dieser Strategie liegt darin, dass die Flanken eines Profils einer unterschiedlichen Belastung ausgesetzt werden. Beim kontinuierlichen Abfahren des Profil verändert sich der Achsabstand der beiden Wirkpartner Crushierrolle und Schleifscheibe. Eine Erhöhung dieses Abstandes geht mit einer ziehenden, eine Verringerung mit einer drückenden Belastung der Schleifscheibenflanke durch die Vorschubbewegung des Abrichtwerkzeug einher.

Um den Einfluss dieser Belastungsarten auf die Bindungsmatrix untersuchen zu können, werden im folgenden die Schleifscheibenprofile mittels partiellem Hub hergestellt. Dabei wird das Profil durch paarweise Crushierzyklen mit identischer Zustellung abgefahren, bevor eine radiale Zustellung des Abrichtwerkzeuges erfolgt und sich der Vorgang wiederholt. Je nach Wahl der Richtung der axialen Vorschubbewegung kann so zwischen ausschließlich drückender oder ziehender Belastung durch die Crushierrolle entlang des Schleifscheibenprofils unterschieden werden. Der drückende Modus hat den Nachteil, dass aufgrund der zwei Teilhübe der Abtrag an der Konturspitze, von wo aus die Abrichtbewegung der Crushierrolle beginnt,

nicht genau definiert ist. Für komplexere Belagkonturen, wie beispielsweise mehrgängige Wälzschnecken oder Gewindeschleifscheiben, welche durch mehrere Stufen die Endkontur erzeugen, ist der Einsatz des unterbrochenen Hubes zum Abrichten schwieriger, da der Konturenzug dann in mehrere Einzelabschnitte zerlegt werden muss. Dies erhöht den Programmieraufwand und kann an den jeweiligen Übergangsstellen zwischen den Konturabschnitten zu Profilfehlern führen. Wie beim Abrichten der geradlinigen Schleifscheibenprofile wird auch hier der Gesamtabrichtbetrag  $a_{edg}$  wesentlich höher gewählt als in der Praxis üblich, um zu verhindern, dass vorausgegangene Untersuchungen mit der selben Schleifscheibe das Ergebnis – beispielsweise durch entstandene tiefergehende Schädigungen in der Bindungsmatrix – verfälschen.

Die Ausbildung der Höhe des Profils  $H$  beim Abrichten einer D30-40-Schleifscheibe mit den beiden unterschiedlich verschleißfesten Bindungsmaterialien 18B12 und 21B13 ist in Bild 9.2 zu sehen. Parallel zu den Grundlagenuntersuchungen zum Punktcrushieren erfolgt die Charakterisierung der Profilhaltigkeit durch einen Tief-schleifprozess von rundgeschliffenen Hartmetallrohlings in Längsrichtung.



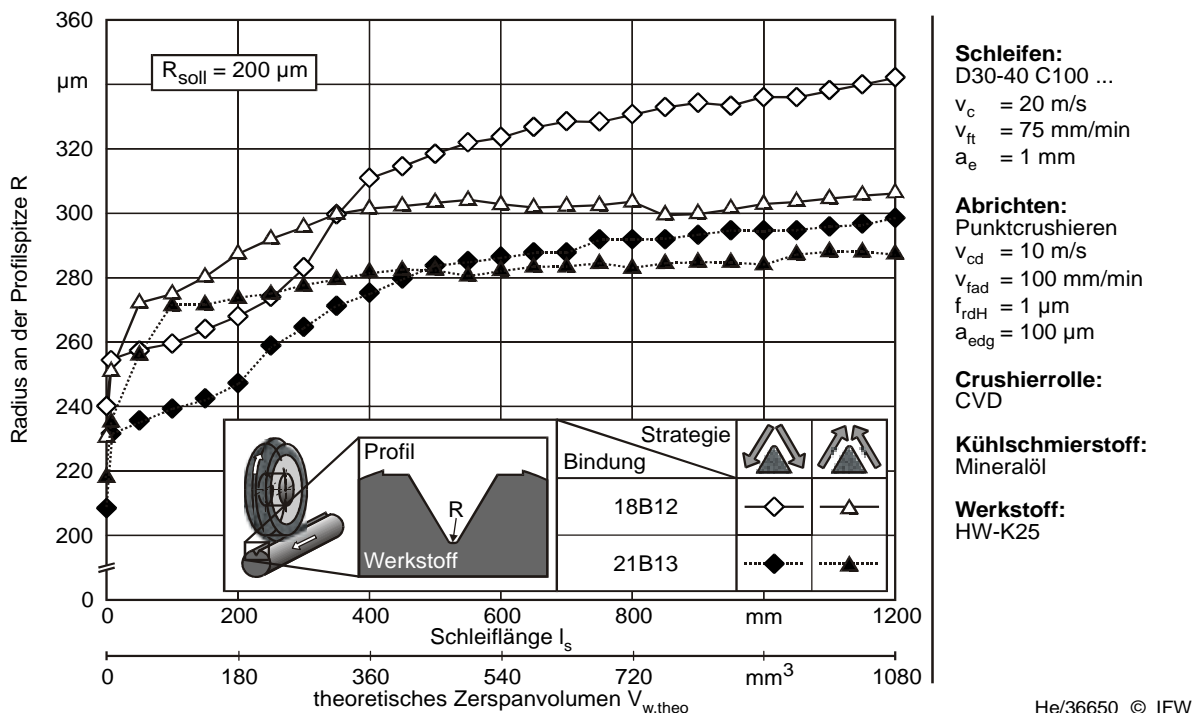
He/36649 © IFW

**Bild 9.2:** Einfluss der Crushierstrategie auf die Profilhöhe

Zunächst fällt auf, dass unabhängig von der verwendeten Schleifscheibe und der angewandten Abrichtstrategie die Sollhöhe der Profils  $H_{soll} = 800$   $\mu$ m nicht erreicht wird. Das Äquidistantenproblem bei der Programmierung des Verfahrenweges der Crushierrolle unter Berücksichtigung der Verrundung am Umfang des Abrichtwerkzeuges wurde berücksichtigt und scheidet daher als Ursache aus. Offensichtlich werden durch das Punktcrushieren Risse in der Bindungsmatrix initiiert, welche zu partiellen Ausbrüchen und damit einhergehend zu einer Reduzierung der angestreb-

ten Profilhöhe führen. Diese Hypothese wird durch das Verschleißverhalten der Profilschleifscheiben unmittelbar zu Beginn des Schleifprozesses gestützt. Die jeweils erste Messung zur Erfassung des Profils im Hartmetall wurde bei einer Schleiflänge von etwa  $l_s = 2 \text{ mm}$  durchgeführt. Innerhalb dieser kurzen Beanspruchungszeit wird die Profilhöhe um bis zu  $\Delta H = 14 \mu\text{m}$  gegenüber der Ausgangshöhe reduziert. Auf das Eintauchen der Schleifscheibe in das Hartmetall kann dies nicht zurückgeführt werden, da die jeweils bearbeitete Nutenlänge 50 mm beträgt und der starke Verschleiß nur zu Beginn der Bearbeitung der ersten Nut zu beobachten ist.

Durch Abrichten mit unterbrochenem Hub bei ziehender Bewegung der Crusherrolle radial zur Schleifscheibe kann eine deutlich bessere Profilhaltigkeit der Schleifscheibe erzielt werden. So ist der Anfangsverschleiß geringer als bei einer drückenden Bewegung des Abrichtwerkzeuges. Unabhängig von der verwendeten Schleifscheibe und der Abrichtstrategie stabilisiert sich der Profilverschleiß ab einer Schleiflänge von etwa  $l_s = 400 \text{ mm}$  bzw. einem theoretischen Zerspanvolumen von etwa  $V_{w,theo} = 360 \text{ mm}^3$ . Dabei wird als theoretisches Zerspanvolumen jenes Volumen bezeichnet, welches unter idealen Bedingungen – also keinem Profilverschleiß der Schleifscheibe – zerspannt würde. Die Reduzierung der Profilhöhe nach einem theoretischen Zerspanvolumen von  $V_{w,theo} = 1080 \text{ mm}^3$  kann bis zu 5 % betragen. Der vom Schleifscheibenhersteller als Bindungsmatrix mit erhöhter Verschleißfestigkeit angegebene Typ 21B13 führt zu einer besseren Profilhaltigkeit der Schleifscheibe als der Einsatz der weicheren Bindung 18B12.

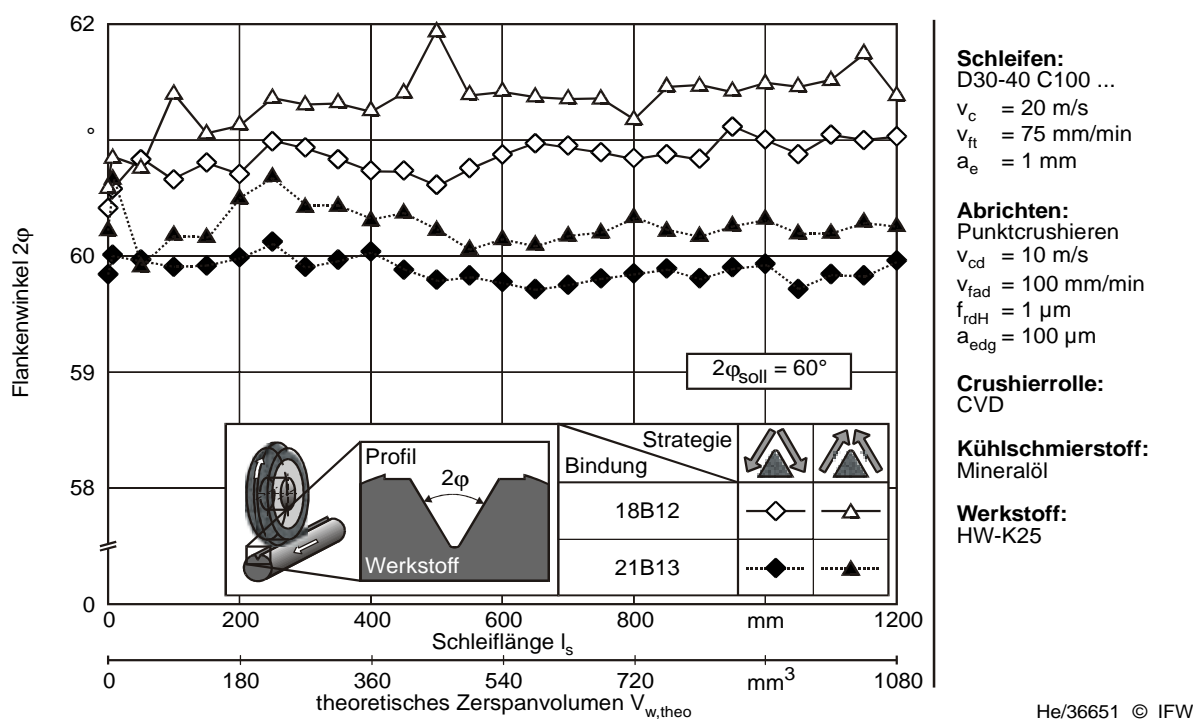


**Bild 9.3:** Einfluss der Crusherstrategie auf den Radius an der Profilspitze

Auch bei der Ausbildung der Radien an der Profilspitze der Schleifscheiben kann eine Abhängigkeit von der eingesetzten Abrichtstrategie beobachtet werden (Bild



9.3). Die geringere Belastung der Bindungsmatrix durch die ziehende Bewegung der Crusherrolle spiegelt sich in einer tendenziell besseren Formhaltigkeit des Radius wider. Durch eine Erhöhung der Härte der Bindungsmatrix der Schleifscheibe wird der Sollwert für den Radius von  $R_{\text{Soll}} = 200 \mu\text{m}$  besser angenähert und die verschleißbedingte Verrundung an der Profilschleifscheibe fällt geringer aus. Insgesamt ist der Verschleiß jedoch relativ hoch, so dass ab einem theoretischen Zerspanvolumen von  $V_{\text{W,theo}} = 360 \text{ mm}^3$  der Radius  $R$  75 ...110  $\mu\text{m}$  oberhalb des Sollwertes liegt. Für die Charakterisierung des Verschleißverhaltens der Profilschleifscheiben ist vorrangig der Anfangsverschleiß von Interesse. Um den Aufwand der Schleifuntersuchungen zu reduzieren, werden die weiteren Untersuchungen teilweise nur bis zu einer Schleiflänge von  $l_s = 400 \text{ mm}$  bzw. einem theoretischen Zerspanvolumen von  $V_{\text{W,theo}} = 360 \text{ mm}^3$  durchgeführt.



**Bild 9.4:** Einfluss der Crushierstrategie auf den Flankenwinkel des Profils

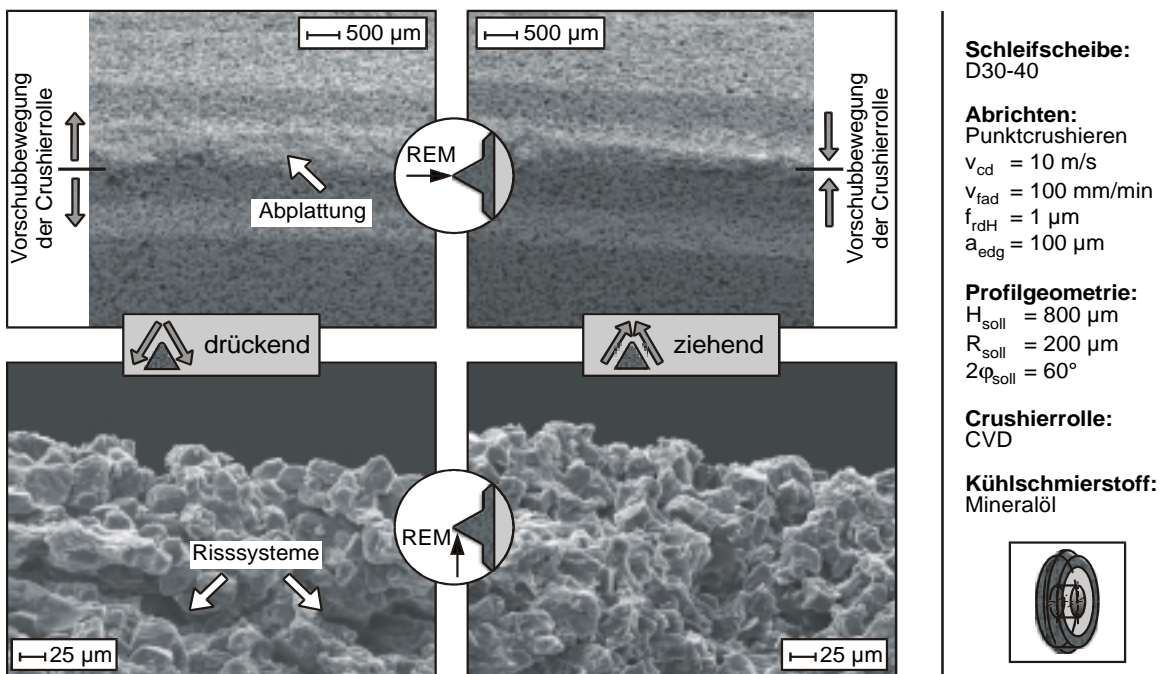
Die Veränderung des Flankenwinkels  $2\phi$  der Profilschleifscheibe während der Bearbeitung des Hartmetalls zeigt sich uneinheitlich (Bild 9.4). So ist beispielsweise keine Korrelation zwischen der Abrichtstrategie und der Veränderung des Flankenwinkels möglich. Ein kontinuierlicher Verschleiß der Makrogeometrie, welcher zu einer Erhöhung des Flankenwinkels führen müsste, ist nicht erkennbar. Die Veränderung des Flankenwinkels über den gesamten Einsatzbereich der Schleifscheibe beträgt maximal  $\Delta 2\phi_{\text{max}} = 1^\circ 21'$  (D30-40, Bindungstyp 18B12, ziehend abgerichtet). Der Verschleiß findet hauptsächlich an der Profilschleifscheibe statt und führt zu einer Veränderung der Profilhöhe und des Radius. Hier ist die Belastung auf die einzelnen Körner im Bindungsverbund am größten. Der Einsatz des verschleißfesteren Bindungstyps 21B13 führt zu einer besseren Ausbildung des Flankenwinkels, so dass



der Sollwert von  $2\varphi_{\text{soll}} = 60^\circ$  nahezu erreicht wird und nur eine maximale Abweichung von  $\Delta 2\varphi_{\text{max}} = 0^\circ 42'$  aufweist. Für die weiteren Untersuchungen bleibt der Verlauf des Flankenwinkels daher unberücksichtigt.

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen belegen die Auswirkungen der unterschiedlichen Abrichtstrategien auf die Profilausbildung (Bild 9.5). Aufgenommen ist jeweils das Profil in der Draufsicht und in der Seitenansicht. In den oberen beiden REM-Aufnahmen ist in der Mitte die Profilspitze mit ihrer Verrundung zu erkennen. Davon ausgehend fallen die Flanken des Schleifscheibenprofils ab. Die sich daran anschließenden ebenen Flächen bilden die Basis des bis zu 800  $\mu\text{m}$  hohen Profils.

Der Schleifbelag wird bei drückender Belastung durch die Crushierrolle stärker geschädigt (Bild 9.5, links). Die Profilspitze ist durch eine Vielzahl von Ausbrüchen, deren Ausdehnungen sowohl in der Breite als auch in der Tiefe relativ groß sind, gekennzeichnet. So kommt es partiell zu starken Abplattungen an der Profilspitze. Die Profilsollhöhe von  $H_{\text{soll}} = 800 \mu\text{m}$  wird nur an einzelnen Abschnitten annähernd erreicht. Die wenigen Kornlagen, welche den Radiusbereich ausbilden, werden beim Schleifprozess stark belastet, brechen aus und führen zu einer kurzfristigen Reduzierung der Profilhöhe zu Beginn des Schleifprozesses (s. Bild 9.2). Begünstigt wird dies durch Rissysteme (s. Markierungen in Bild 9.5 links unten) in der Bindungsmatrix, welches durch die wirkenden Kräfte beim Punktcrushieren initiiert wird und die Belastbarkeit des Schleifscheibenprofils mindert.

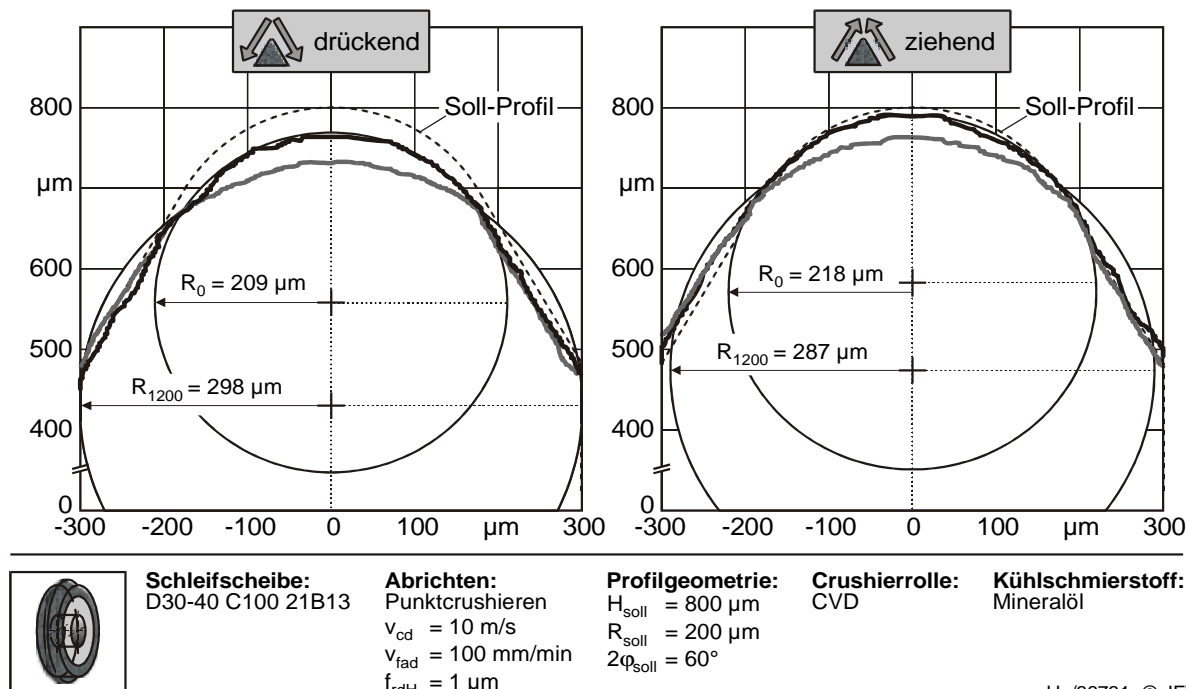


He/36652 © IFW

**Bild 9.5:** Einfluss der Strategie beim Punktcrushieren auf die Profilausbildung

Bei einer ziehenden Bewegung des Crushierwerkzeuges entlang der Flanken des Schleifscheibenprofils tritt eine geringere Schädigung der Bindungsbrücken auf, so

dass weniger Ausbrüche vorhanden sind. Die Profilspitze ist insgesamt gleichmäßiger und vollständiger ausgebildet (Bild 9.5, rechts). Dies kann auch anhand der Original-Messschiebe der Schleifscheiben bzw. der Profile der geschliffenen Nuten belegt werden. Bild 9.6 zeigt diese Verläufe für die D30-40-Schleifscheibe mit der härteren Bindungsmatrix vom Typ 21B13 und ermöglicht einen direkten Vergleich der Profilausbildung sowie des Profilver schleißes.  $R_0$  bezeichnet den Radius der Profilspitze unmittelbar nach dem Punktcrushieren und  $R_{1200}$  nach dem Schleifprozess mit einer Schleiflänge von  $l_s = 1200$  mm. Zusätzlich eingezeichnet sind das Soll-Profil und die Best-fit-Kreise, mit welchen die Verrundungsradien ermittelt werden. Zu Ermittlung der Radien wurden die in Graphit eingeschliffenen Profile abgetastet. Der jeweilige Best-fit-Kreis wird so an den gemessenen Radius des Profils angepasst, dass die Quadrate der Abweichungen in der Summe minimal sind. Zwar weist die Schleifscheibe unmittelbar nach dem Punktcrushieren im drückenden Modus einen etwas kleineren Radius an der Profilspitze auf, als dies nach dem Abrichten im ziehenden Modus der Fall ist. Aufgrund der durch das Abrichten erzielten Vorschädigung der Bindungsbrücken, steigt der Verschleiß aber stärker an, so dass nach einem theoretischen Zerspanvolumen von  $V_{w,theo} = 1200$  mm<sup>3</sup> der Verschleiß insgesamt größer ist, als bei der im ziehenden Modus punktcrushierte Schleifscheibe.



**Bild 9.6:** Original-Messschiebe mit eingepassten Best-fit-Kreisen

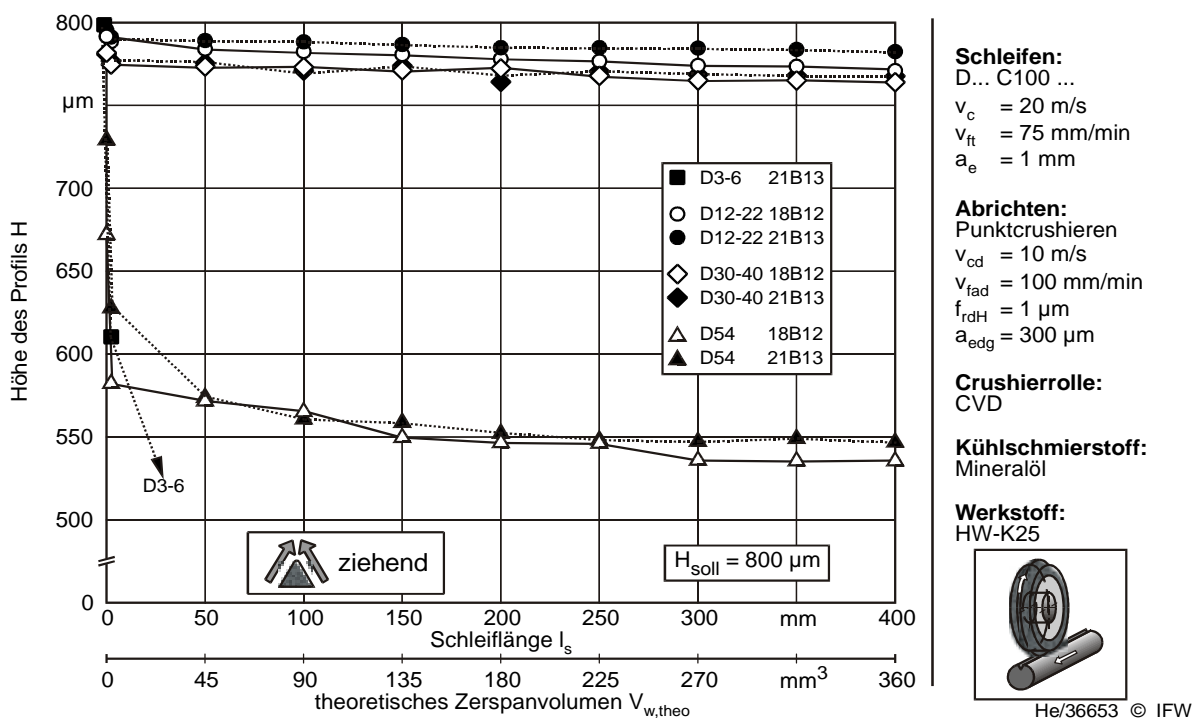
## 9.2 Schleifscheibenspezifikation

Die Wahl der Diamantkorngröße des Schleifbelags hat einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit des herzustellenden Profils sowie die Formhaltigkeit wäh-

rend des Schleifprozesses. Für die Analyse dieses Einflusses wird nur mit ziehender Vorschubbewegung der Crushierrolle abgerichtet, da die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass mit dieser Strategie die besten Ergebnisse erzielt werden können. Zusätzlich zu den standardmäßig verwendeten Schleifscheibenkörnungen D30-40 und D12-22 wird das Spektrum der eingesetzten Schleifscheiben um die Körnungen D3-6 und D54 nach unten bzw. oben erweitert.

In Bild 9.7 ist der Einfluss sowohl der Korngröße als auch der Bindungshärte auf die Ausbildung und den Verlauf der Profilhöhe der Schleifscheiben dargestellt. Der Einsatz der sehr feinkörnigen Schleifscheibe D3-6 stellt sich als nicht praktikabel heraus. Zwar lässt sich dieses Schleifwerkzeug gut crushieren, so dass die geforderte Profilhöhe von  $H_{\text{soll}} = 800 \mu\text{m}$  nahezu exakt erreicht wird. Im Einsatz versagt die Scheibe aber unmittelbar. So ist die Profilhöhe nach einer Schleiflänge von nur  $l_s = 2 \text{ mm}$  bereits um 23 % auf  $H = 610 \mu\text{m}$  reduziert. Schließlich ist das gesamte Schleifscheibenprofil abgetragen.

Mit der verhältnismäßig grobkörnigen D54-Schleifscheibe lässt sich die geforderte Profilhöhe ebenfalls nicht erreichen. Schon das durch Punktcrushieren hergestellte Profil weist starke Abweichungen von der Sollgeometrie auf. Vor allem der Anfangsverschleiß während des Schleifprozesses bei Verwendung dieser Korngröße ist sehr hoch. Da nur wenige Schleifkörner die Profilschulter ausbilden, führt das Ausbrechen einzelner Körner beim Abrichten oder Schleifen sofort zu einer deutlichen Reduzierung der Profilhöhe. Mit Hilfe der verschleißfesteren Bindung vom Typ 21B13 – im Vergleich zur Bindung 18B12 – lässt sich dieser Effekt nur geringfügig verbessern.

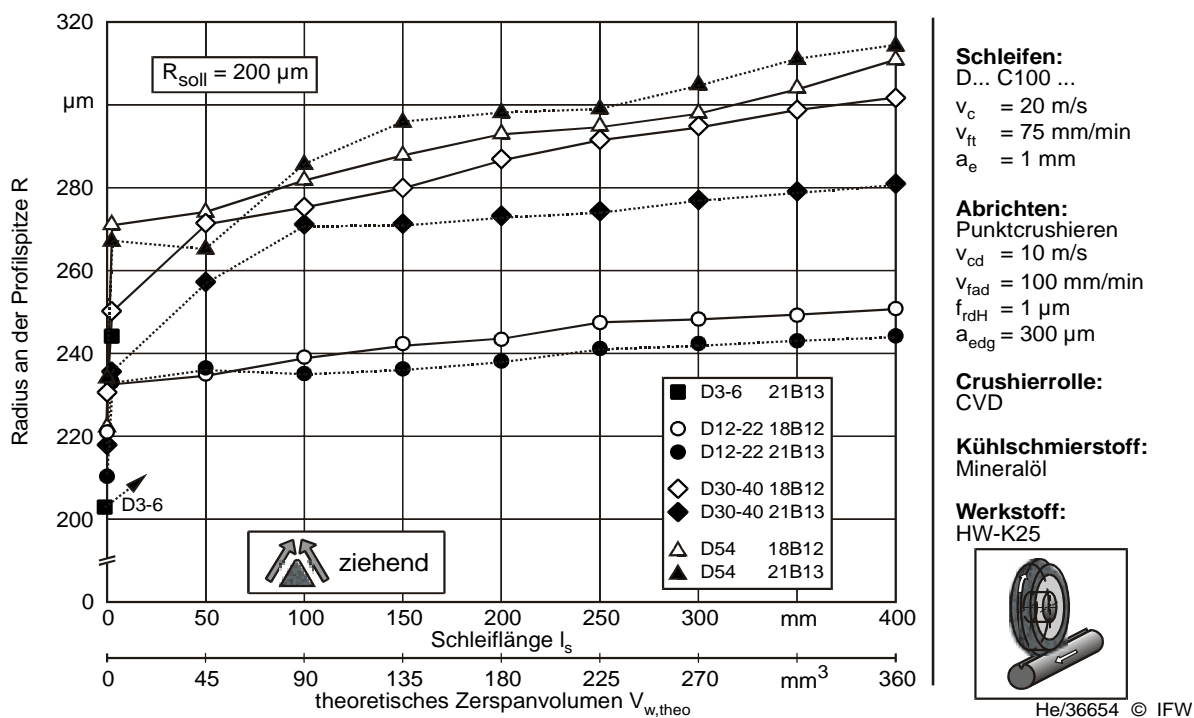


**Bild 9.7:** Einfluss der Schleifscheibenspezifikation auf die Profilhöhe

Der Einsatz einer D12-22-Schleifscheibe führt zu einem quasistationären Prozessverlauf mit gleichbleibender geringer Abnahme der Profilhöhe während des gesamten Schleifprozesses. Das Verschleißverhalten der beiden D30-40-Schleifscheiben ist nur geringfügig schlechter. Mit der härteren Bindungsmatrix vom Typ 21B13 kann das Ergebnis leicht verbessert werden. Gemein ist den Verschleißverläufen, dass sie durch einen relativ geringen Anfangsverschleiß charakterisiert werden können.

Die Ausbildung des Radius an der Profilschleifscheibe verhält sich parallel zu den bei der Entwicklung der Profilhöhe gemachten Beobachtungen. Der verhältnismäßig große Abtrag der oberen Kornlagen bei Verwendung der D54-Schleifscheibe, welcher für die Abnahme der Profilhöhe verantwortlich ist, spiegelt sich in einer starken Verrundung der Profilschleifscheibe wider (Bild 9.8).

Abgesehen von der sehr feinkörnigen D3-6-Schleifscheibe, deren Bindungsmatrix aufgrund der Zusetzungen überlastet wurde, ist der Radiusverschleiß stark abhängig von der verwendeten Korngröße. Bei gleicher Korngröße verringert auch hier die härtere Bindungsmatrix den Verschleiß durch Abtrag der Kornlagen. Der Anfangsverschleiß ist jedoch auch bei Einsatz der D12-22-Schleifscheibe relativ hoch, so dass nach wenigen Millimetern Schleiflänge die Verrundung an der Profilschleifscheibe bereits bei gut  $R = 230 \mu\text{m}$  liegt.



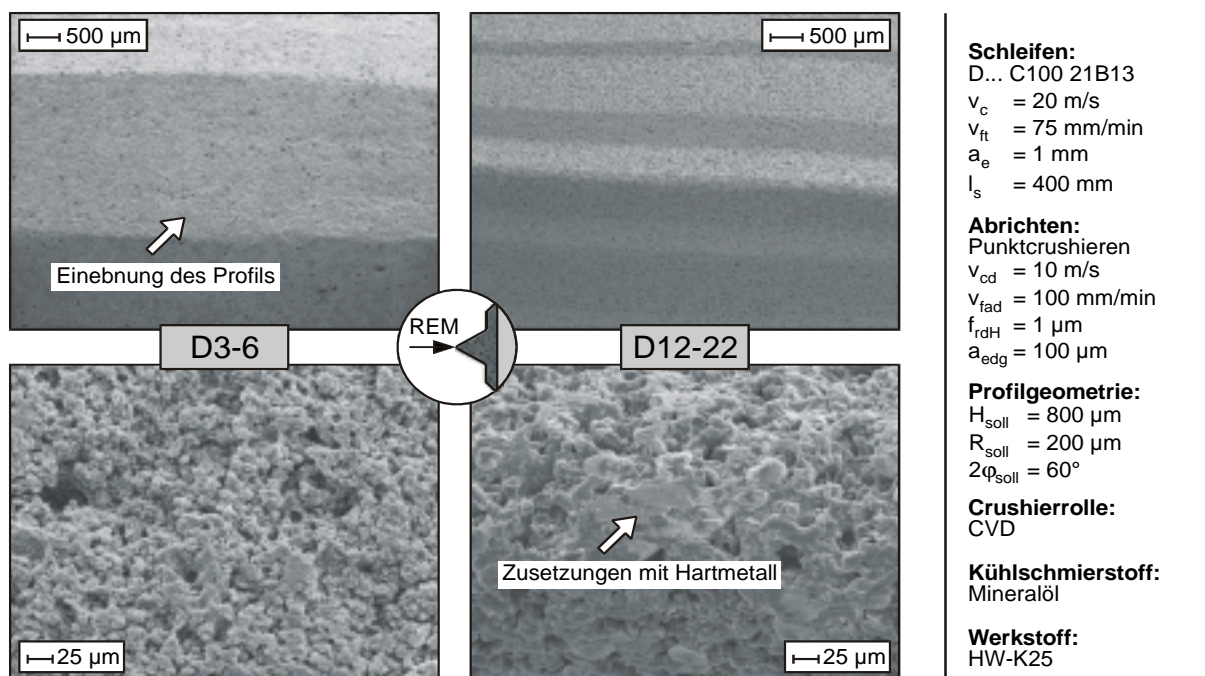
**Bild 9.8:** Einfluss der Schleifscheibenspezifikation auf den Radius an der Profilschleifscheibe

Wie die Untersuchungen an 1A1-Schleifscheiben zeigen (s. Kap. 7.1.5), können die abgespannten Hartmetallpartikel, welche während des Schleifprozesses in den offenporigen Belag gedrückt werden, zwar eine Verdichtung und somit eine Festigkeitssteigerung des Schleifbelags bewirken. Die Verringerung des Spanraums erhöht

jedoch die Reibflächen, führt zu einer stärkeren Belastung des Schleifscheibengefüges und fördert so den Verschleiß der Schleifscheibe.

Die Aufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskopie verdeutlichen, dass sich die kleinen Porenräume im Schleifbelag der D3-6-Schleifscheibe zusetzen und so kein ausreichender Spanraum zur Verfügung steht (Bild 9.9, links). Die dadurch wirkenden Reibkräfte im Schleifprozess überlasten die Bindungsmatrix und führen zur Einebnung des Schleifscheibenprofils bzw. zum Ausbruch ganzer Kornlagen.

Anhand der D12-22-Schleifscheibe ist zu erkennen, dass bei den Verschleißmechanismen die Zusetzungen stark dominiert (Bild 9.9, rechts). Hingegen wird der Profilverschleiß primär durch Kornausbruch verursacht. Dies korreliert zu den in Kap. 7.1.1 durchgeführten Untersuchungen zum Punktcrushieren von geradlinigen 1A1-Schleifscheiben.



He/36655 © IFW

**Bild 9.9:** Einfluss der Schleifscheibenspezifikation auf die Profilausbildung

### 9.3 Radiale Zustellung

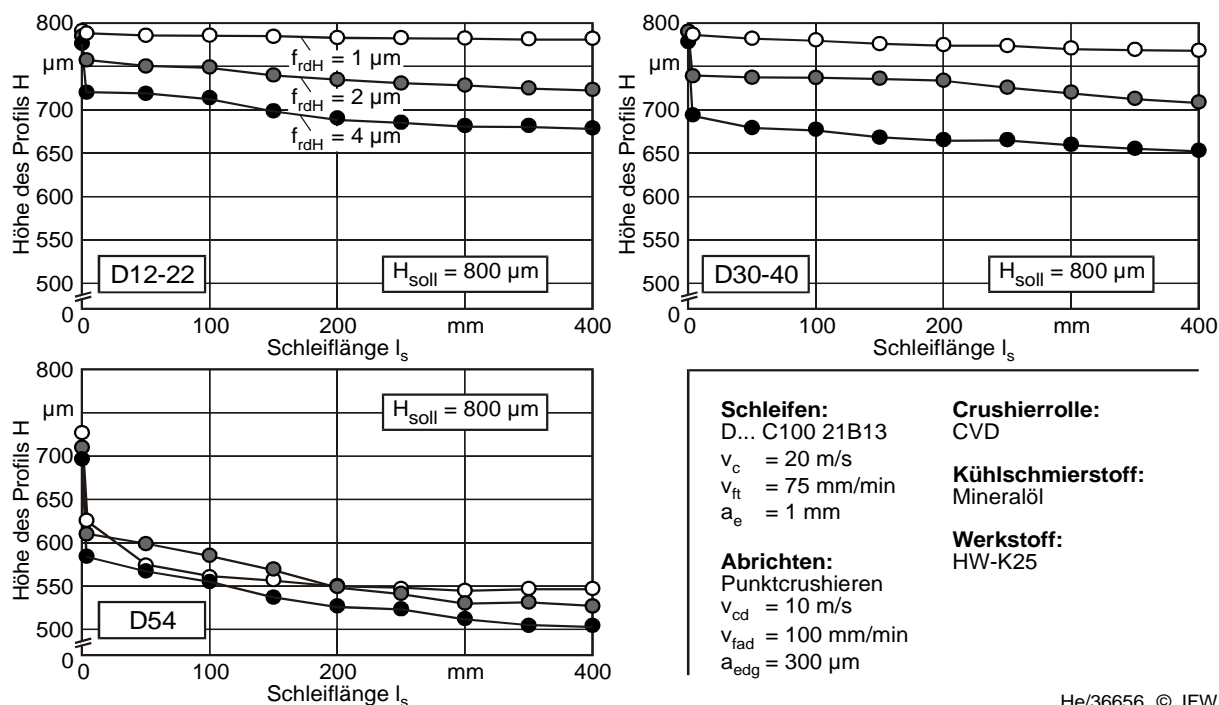
Wie anhand der Untersuchungen zum Abrichten von 1A1-Schleifscheiben gezeigt werden kann, hat die Wahl der radialen Zustellung  $f_{rdH}$  beim Punktcrushieren einen wesentlichen Einfluss sowohl auf das Abrichtergebnis als auch auf die Abrichtzeit und damit unmittelbar auf die Wirtschaftlichkeit. Bild 9.10 zeigt den Einfluss dieser Stellgröße für die Schleifbeläge der Körnungen D12-22, D30-40 und D54 beim Abrichten von Profilschleifscheiben anhand der Ausbildung der Profilhöhe  $H$ .

Unabhängig von der Korngröße des Schleifbelags führt eine Erhöhung der radialen Zustellung zu einer Reduzierung der Profilhöhe. Insbesondere der Anfangsver-



schleiß während des Schleifens wird durch die radiale Zustellung stark beeinflusst. So führt eine radiale Zustellung von  $f_{rdH} = 4 \mu\text{m}$  auch bei der relativ feinkörnigen D12-22-Schleifscheibe zu einem Anfangverschleiß von  $\Delta R = 57 \mu\text{m}$  und liegt damit um den Faktor 19 höher als bei einer radialen Zustellung von  $f_{rdH} = 1 \mu\text{m}$ . Bei Einsatz der D54-Schleifscheibe liegt bei einer radialen Zustellung von  $f_{rdH} = 4 \mu\text{m}$  die Profilhöhe nach dem Punktcrushieren bereits bei nur  $H = 700 \mu\text{m}$ . Hinzu kommt dann noch ein Anfangverschleiß des Radius von etwa  $\Delta R = 120 \mu\text{m}$ .

Nach dem relativ starken Anfangverschleiß, welcher innerhalb der ersten wenigen Millimeter Schleiflänge erfolgt, stellt sich ein quasistationäres Prozessverhalten mit geringem und gleichbleibendem Verschleiß ein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zunächst die durch die erhöhte radiale Zustellung geschädigte Bindungsmatrix durch den Schleifprozess abgetragen wird. Der anschließende Verschleißverlauf hängt von weiteren Einflussfaktoren, wie etwa der Schleifscheibenspezifikation, ab.



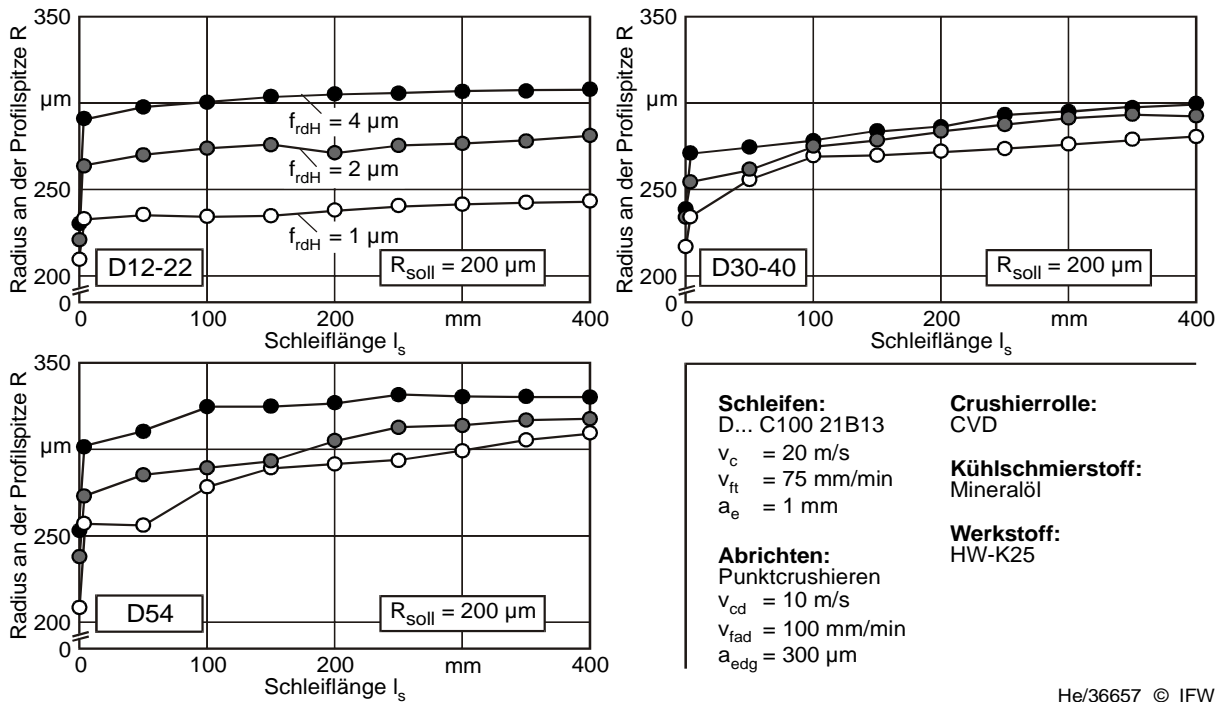
He/36656 © IFW

**Bild 9.10:** Einfluss der radialen Zustellung auf die Profilhöhe

Mit zunehmender Korngröße wird der Einfluss der radialen Zustellung auf die Profilausbildung und den Verschleiß zu Beginn des Schleifprozesses tendenziell geringer. Dies spiegelt sich nicht nur bei der Ausbildung der Profilhöhe  $H$  sondern auch beim Verschleißverlauf des Radius an der Profilspitze  $R$  wider (Bild 9.11).

Eine radiale Zustellung von  $f_{rdH} = 4 \mu\text{m}$  führt, unabhängig von der Wahl der Korngröße des Schleifbelags, zu einer schnellen Verrundung des Radius zu Beginn des Schleifprozesses. Dies wird besonders bei der D12-22-Schleifscheibe deutlich, wo innerhalb einer Schleiflänge von wenigen Millimetern eine Radiuszunahme an der

Profilspitze um  $\Delta R = 64 \mu\text{m}$  erfolgt. Das dann ausgebildete Profil bleibt während des restlichen Schleifeinsatzes annähernd konstant.

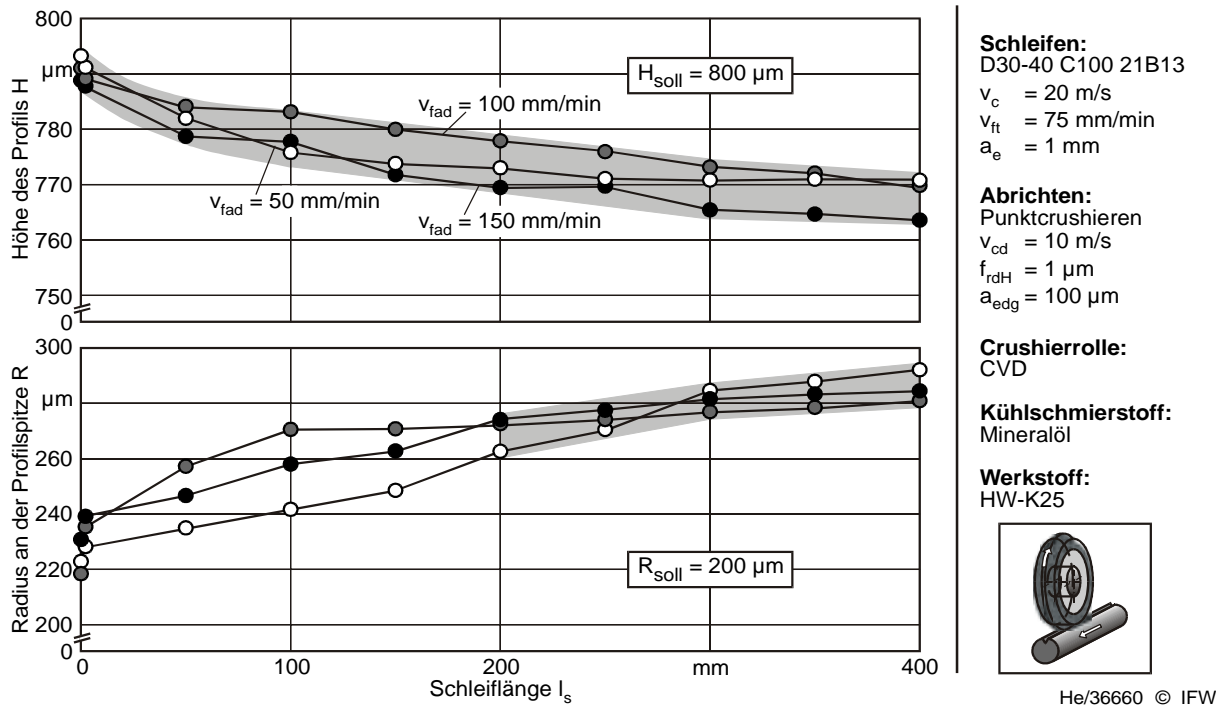


He/36657 © IFW

**Bild 9.11:** Einfluss der radialen Zustellung auf den Radius an der Profilspitze

#### 9.4 Axiale Vorschubgeschwindigkeit

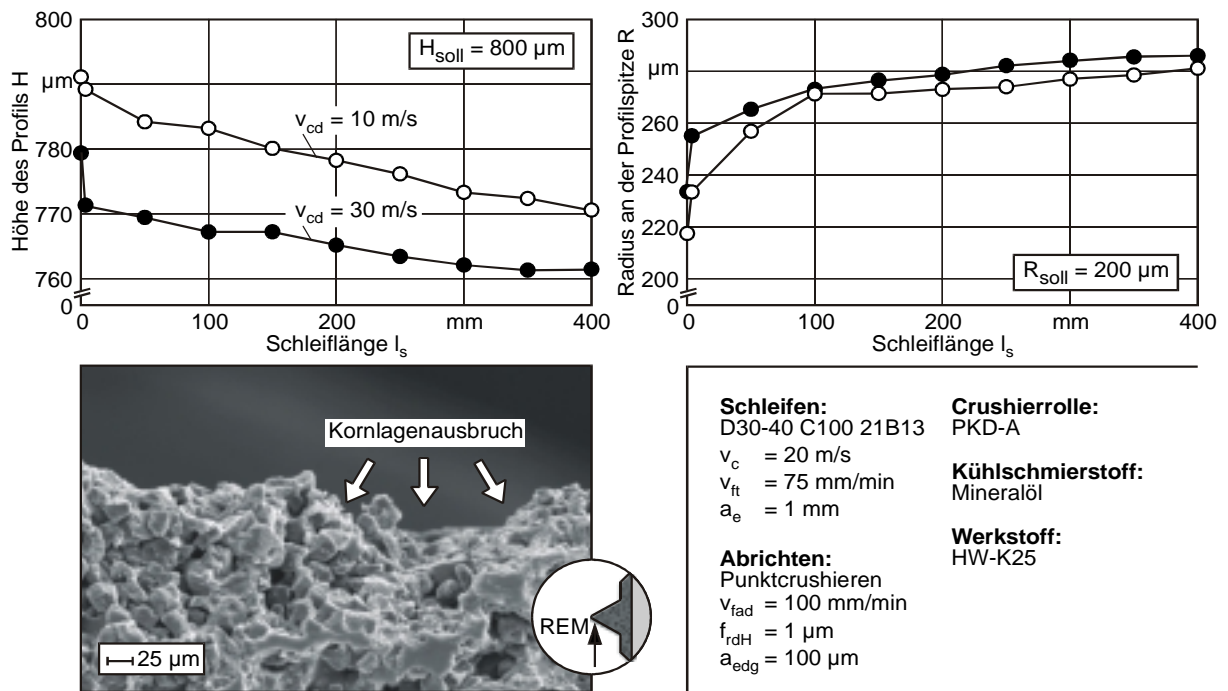
Die Wahl der axialen Vorschubgeschwindigkeit – und damit auch des Überdeckungsgrades – beim Punktcrushieren kann die Ausbildung des Schleifscheibenprofils ebenfalls beeinflussen. Bild 9.12 zeigt für unterschiedliche axiale Vorschubgeschwindigkeit beim Abrichten die Profilausbildung beim Schleifen am Beispiel einer D30-40-Schleifscheibe. Dabei wird deutlich, dass sowohl für die Höhe des Profils als auch für den Radius an der Profilspitze keine eindeutige Korrelation zwischen der Variation dieser Stellgröße und dem Abrichtergebnis möglich ist. Beide Größen (der Radius erst nach einer Einschleifphase von 200 mm) liegen innerhalb eines eng begrenzten Toleranzbandes. Dieses Ergebnis deckt sich mit den an gradlinigen Profilen durchgeführten Untersuchungen zum Punktcrushieren, bei denen nur eine geringe Beeinflussung der Schleifbelagstopographie durch eine Variation des Überdeckungsgrades analysiert werden konnte (s. Kap. 7.1.3).



**Bild 9.12:** Einfluss der axialen Vorschubgeschwindigkeit auf die Profilausbildung

### 9.5 Schnittgeschwindigkeit

Die Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe beim Abriechen  $v_{cd}$  ist eine weitere Stellgröße, welche die Ausbildung der Schleifbelagstopographie beeinflussen kann.



**Bild 9.13:** Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Profilausbildung



Wie die Untersuchungen in Kap. 7.1.4 zeigen, geht mit einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit eine Reduzierung der Abrichtnormalkraft einher. Dies ist auf die höheren dynamischen Effekte zurückzuführen, welche eine Schädigung der spröden Bindungsmatrix und damit ein Ausbrechen von Kornverbänden erleichtern.

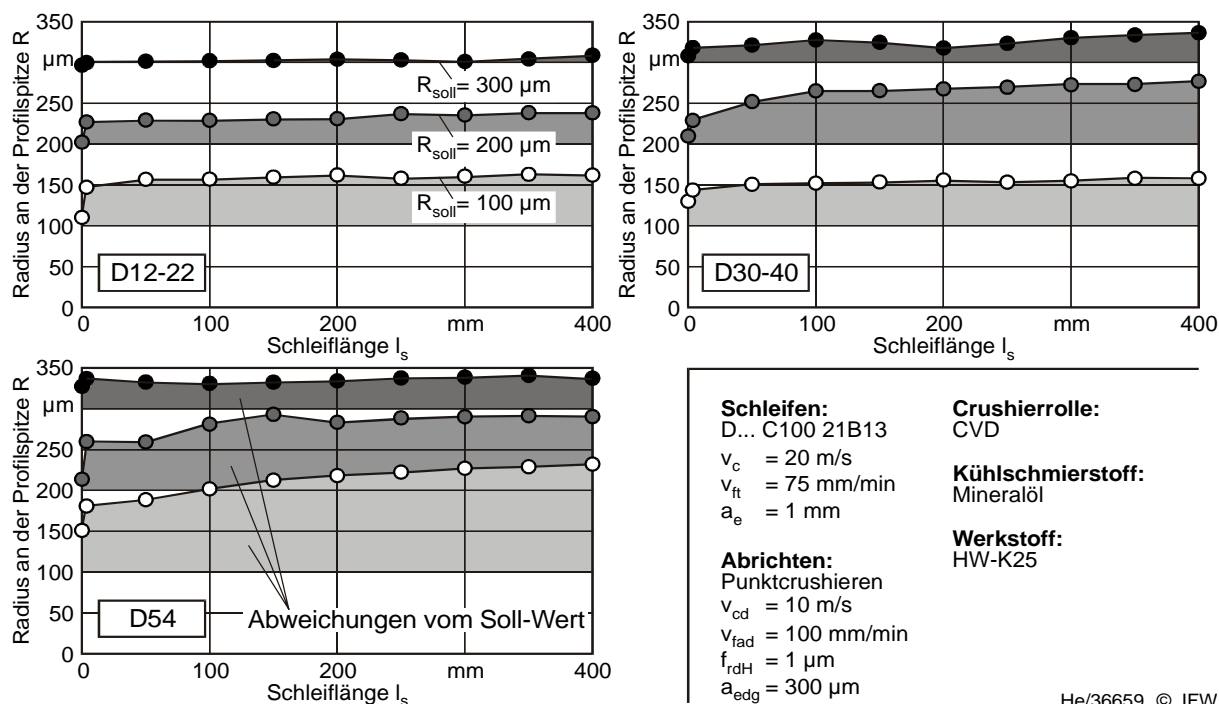
Dieser Sachverhalt spiegelt sich beim Punktcrushieren von Profilschleifscheiben wieder. So führt eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit beim Abrichten einer D30-40-Schleifscheibe von  $v_{cd} = 10$  m/s auf  $v_{cd} = 30$  m/s zu einer verschlechterten Profilausbildung (Bild 9.13). Sowohl der Radius als auch die Profilhöhe weichen deutlich von den Soll-Werten ab. Aber auch die Formhaltigkeit des Schleifscheibenbelags ist beeinträchtigt und es stellt sich ein deutlich stärkerer Anfangsverschleiß durch den Schleifprozess ein. Betrachtet man den Verlauf des Radius, so wird der erhöhte Anfangsverschleiß aufgrund des Schleifprozesses teilweise wieder ausgeglichen. Nach einer Schleiflänge von  $l_s = 400$  mm beträgt der Unterschied zwischen den beiden Radien nur noch  $5 \mu\text{m}$ . Die REM-Aufnahme unten links in Bild 9.13 zeigt einen charakteristischen Ausschnitt des Bereichs der Profilschleifscheibe unmittelbar nach dem Abrichtprozess, welche von Ausbrüchen ganzer Kornlagen gekennzeichnet ist.

## 9.6 Schleifscheibenprofil

Von besonderem Interesse ist der Einfluss der Art des Schleifscheibenprofils auf dessen Form- und Maßgenauigkeit sowie Profilhaltigkeit. Spitze Profile mit kleinen Radien sind anfälliger gegen stoßende oder seitliche Belastungen, so dass beim Abrichten bzw. beim Einsatz der Geometrie am Schleifbelag Grenzen gesetzt sind. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die Korngröße der Schleifscheibe prinzipiell einen Einfluss auf die Profilausbildung hat (s. Kap. 9.2). Anhand der Variation des Radius an der Profilschleifscheibe ist für die Schleifscheibenkörnungen D12-22, D30-40 und D54 die Verschleißentwicklung verschiedener Schleifscheibenprofile in Bild 9.14 dargestellt.

Dabei lassen sich unabhängig von der Korngröße unterschiedliche Zusammenhänge erkennen. Je größer der programmierte Verrundungsradius an der Profilschleifscheibe  $R_{\text{Soll}}$  gewählt ist, desto geringer ist die prozentuale Abweichung vom tatsächlich erreichten Wert. Gleichzeitig sinkt auch der Anfangsverschleiß des Profils während des Schleifprozesses erheblich. So beträgt dieser beispielsweise beim Punktcrushieren einer D12-22-Schleifscheibe und dem Generieren eines Radius an der Profilschleifscheibe von  $R_{\text{Soll}} = 300 \mu\text{m}$  nur  $\Delta R = 3 \mu\text{m}$ . Nach einer Schleiflänge von  $l_s = 400$  mm (theoretisches Zerspanvolumen von  $V_{w,\text{theo}} = 360 \text{ mm}^3$ ) beträgt die Abweichung vom Soll-Wert nur  $\Delta R = 14 \mu\text{m}$ . Dies ist auf die bessere gegenseitige Abstützung der einzelnen Körner an der Profilschleifscheibe innerhalb der Bindungsmatrix zurückzuführen. Je größer der Verrundungsradius, desto mehr kann das Einzelkorn auch durch seitlich angreifende Bindungsbrücken im Kornverbund gehalten werden.

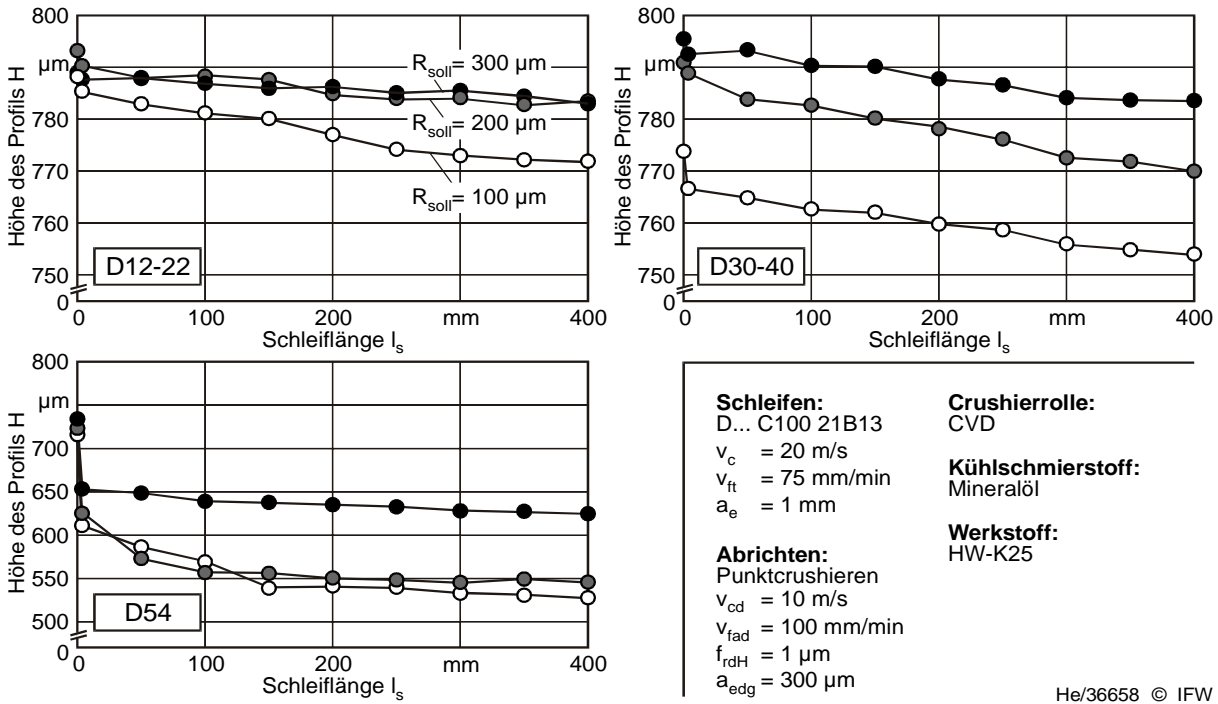
Auch bei der Variation des Radius an der Profilspitze bestätigt sich, dass mit einem feinkörnigeren Schleifscheibenbelag das gewünschte Profil genauer generiert werden kann. Während beispielsweise mit der D12-22-Schleifscheibe der Soll-Radius von  $R_{\text{Soll}} = 300 \mu\text{m}$  durch Punktcrushieren exakt erreicht wird, beträgt die Abweichung bei Einsatz der D54-Schleifscheibe  $\Delta R = 32 \mu\text{m}$ .



**Bild 9.14:** Variation des Radius an der Profilspitze

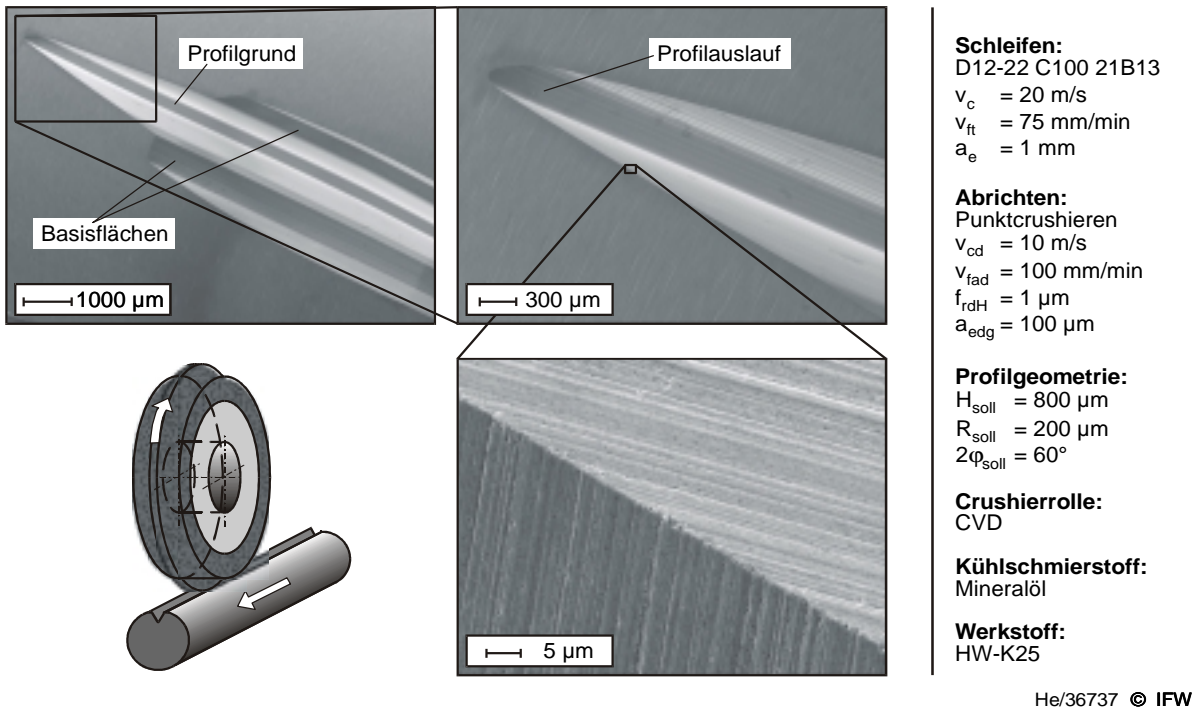
Ferner zeigt sich, dass die Abweichungen vom Soll-Profil mit abnehmendem Verrundungsradius steigen. Je kleiner der Radius, desto weniger Diamantkörner und Bindungsbrücken sind an der Profilausbildung beteiligt. Der Ausbruch einzelner Körner aus der Bindungsmatrix führt dann schnell zu einem deutlichen Profilver-schleiß. So steigt, begünstigt durch mögliche Risse in den keramischen Bindungsbrücken, welche während des Abrichtens initiiert werden, vor allem der Anfangsver-schleiß beim Schleifeinsatz.

Dementsprechend verbessert ein größerer Verrundungsradius an der Profilspitze auch die Profilhaltigkeit des Schleifscheibenbelags hinsichtlich der Profilhöhe (Bild 9.15). So liegt die Profilhöhe beim Punktcrushieren und Schleifen mit der D30-40-Schleifscheibe nach einer Schleiflänge von  $l_s = 400 \text{ mm}$  bei  $H = 784 \text{ mm}$ , wenn ein Verrundungsradius von  $R_{\text{Soll}} = 300 \mu\text{m}$  generiert wird. Die Reduzierung auf einen Soll-Wert von  $R_{\text{Soll}} = 100 \mu\text{m}$  führt nach einem Schleifeinsatz unter den selben Bedingungen nur noch zu einer Profilhöhe von  $H = 754 \text{ mm}$ . Bei Einsatz der D54-Schleifscheibe kann ein geringerer Profilver-schleiß erst mit einem Verrundungsradius von  $R_{\text{Soll}} = 300 \mu\text{m}$  erreicht werden. Kleinere Radien führen zu stärkeren Ausbrüchen, so dass die Profilhöhe auf bis zu  $H = 532 \text{ mm}$  reduziert wird. Die besten Ergebnisse werden wiederum mit der feinkörnigen D12-22-Schleifscheibe erzielt.



**Bild 9.15:** Einfluss der Variation des Radius an der Profilspitze auf die Profilhöhe

Einen visuellen Eindruck eines geschliffenen Profils in Hartmetall geben die REM-Aufnahmen in Bild 9.16 wider.



**Bild 9.16:** Geschliffenes Profil in Hartmetall

Oben links zu sehen ist das Ende einer Nut von 50 mm Länge, welche mit einer punktcrushierten D12-22-Schleifscheibe hergestellt wurde. Ober- und unterhalb des Profilgrundes sind jeweils die durch die zylindrischen Umfangsflächen der Schleif-

scheibe entstandenen ebenen Basisflächen des Profils zu sehen. Am Ende dieser Nut hebt die Schleifscheibe senkrecht vom Bauteil ab, wodurch der spitze Profilauslauf entsteht. In der Vergrößerung unten rechts ist der Randbereich der geschliffenen Nut abgebildet. Gut zu erkennen ist die scharfe Abgrenzung zum unbearbeiteten Bereich des rundgeschliffenen Hartmetallrohlings. Größere Kantenschädigungen in Form von Ausbrüchen sind nicht nachweisbar.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass der Einsatz keramisch gebundener Diamantschleifscheiben für komplexe Profilschleifaufgaben prinzipiell möglich ist. Mittels Punktcrushieren können die Profile der Schleifscheiben für diese Aufgabe generiert werden. Abweichungen in der Profil- und Formgenauigkeit hängen wesentlich von der Schleifscheibenspezifikation ab. Der Einsatz feinkörniger Diamantschleifscheiben kann diese Fehler jedoch stark reduzieren. Eine Weiterentwicklung der keramischen Bindungssysteme zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit wird mittelfristig einen Einsatz des Punktcrushierens auch im Hochpräzisionsbereich ermöglichen.

## 10 Folgerungen für die Praxis

### 10.1 Prozessauslegung und wirtschaftliche Aspekte

Aus der Bewertung der in dieser Arbeit diskutierten Ergebnisse ergeben sich einige Anforderungen an das Punktcrushieren und den Einsatz keramisch gebundener Diamantschleifscheiben, die wesentliche Kriterien für die Realisierung eines effektiven Abrichtprozesses unter industriellen Einsatzbedingungen darstellen.

Die Qualität der Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten der beiden Wirkpartner Crushierrolle und Schleifscheibe beim Punktcrushieren hat einen entscheidenden Einfluss auf den Verschleiß des Abrichtwerkzeuges. Bereits das Auftreten einer geringen Relativgeschwindigkeit beim Abrichten ( $\pm 4\%$  Abweichung von der idealen Synchronisation) kann sich negativ auswirken, da die hierdurch initiierte Veränderung des Crushierrollenprofils die Maß- und Formgenauigkeit der Schleifscheibenprofile und die Wirtschaftlichkeit des Abrichtprozesses beeinflusst. In der Anschaffung kostengünstigere Systeme, bei denen die Crushierrolle nur über die Reibkräfte von der Schleifscheibe angetrieben wird und die ohne größeren Installationsaufwand in den Maschinenraum integriert werden können, genügen den Anforderungen im Präzisionsbereich daher nicht.

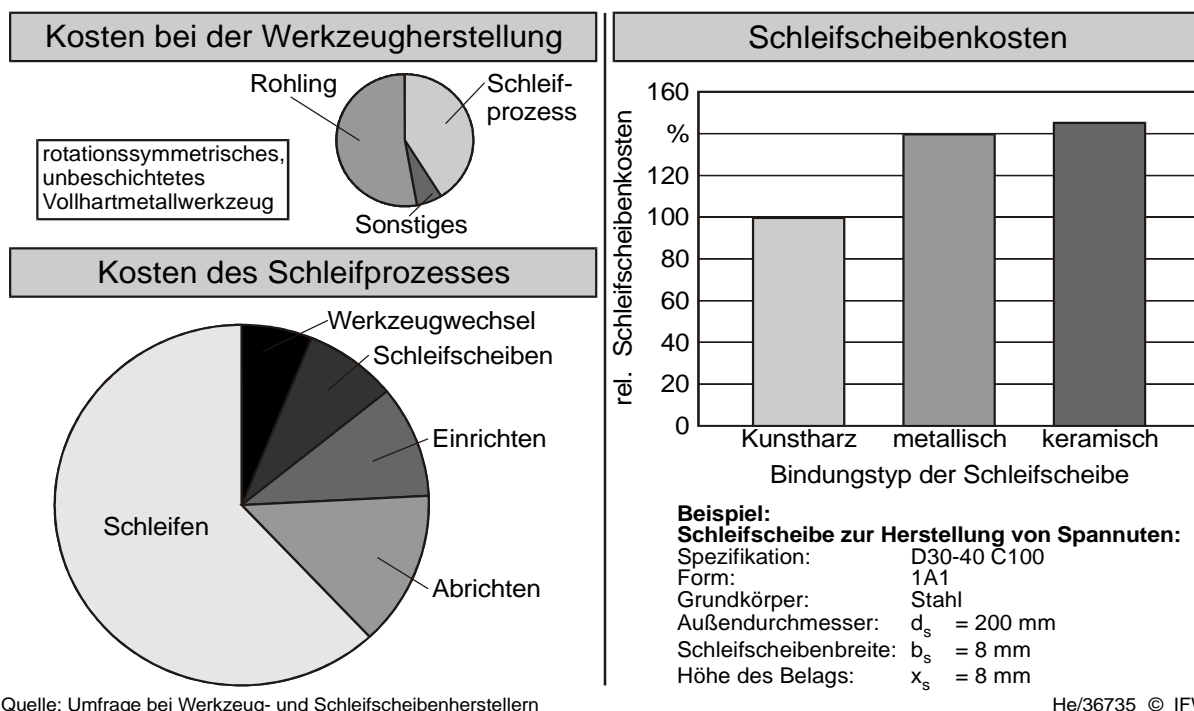
Das im Rahmen dieser Arbeit realisierte geregelte System, welches eine effektive Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten beim Punktcrushieren ermöglicht, hat einen modularen Aufbau. Da die Sensorik unabhängig von der Maschinensteuerung arbeitet, können größere Kosten beim nachträglichen Einbau des Systems in die Schleifmaschine vermieden werden. Die – gegenüber nicht angetriebenen bzw. nicht geregelten Systemen – höheren Investitionskosten für die Regeleinheit und die notwendige Hochfrequenzspindel amortisieren sich aufgrund der wesentlich verbesserten Standzeit der Abrichtwerkzeuge relativ schnell. Ferner können durch den Einsatz des Punktcrushierens in der Schleifmaschine gegebenenfalls Investitionskosten für eine externe Abrichtmaschine entfallen.

Durch eine geeignete Wahl der Crushierrolle hinsichtlich der Art und Dichte der Diamantierung kann der Verschleiß zusätzlich minimiert werden. Eine regelmäßige Kontrolle des Verschleißzustandes der Crushierrolle, um die Notwendigkeit eines eventuellen Nachschleifens der Kontur des Abrichtwerkzeuges rechtzeitig zu detektieren, ist jedoch erforderlich.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass ein möglichst steifer Einbau der Crushierspindel im Maschinenraum notwendig ist, um ein präzises Abrichterergebnis zu erzielen. So sind prinzipiell beim Einsatz keramisch gebundener Schleifscheiben durch zu hohe Elastizitäten im Aufbau verursachte Schwingungen zu vermeiden, da die Bindungsmatrix sensibel reagiert und es leicht zur Rissinitiierung und zu Schädigungen des Schleifbelags kommen kann.

Von der gängigen Regel, dass die Schleifscheibe bei gleicher Schnittgeschwindigkeit wie die beim Schleifeinsatz abgerichtet wird, sollte abgewichen werden. Eine Reduzierung der Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe beim Punktcrushieren verbessert die Regelungsgüte des Systems und erhöht damit die Standzeit des Abrichtwerkzeuges. Ein gut ausgewuchtetes Schleifwerkzeug ist eine zwingende Voraussetzung für dieses Vorgehen.

Für das Generieren von Schleifscheibenprofilen mit geringen Höhen und kleinen Radien empfiehlt sich der Einsatz feinkörniger Schleifscheiben, da die Maß- und Formgenauigkeit besser erreicht werden kann und der Ausbruch einzelner Schleifkörner wesentlich geringere Abweichungen vom Soll-Profil zur Folge hat. Grenzen sind jedoch durch die dabei ebenfalls reduzierten Spanräume der Schleifscheibe und das damit einhergehende höhere Risiko der Zusetzung des Schleifbelages gesetzt.

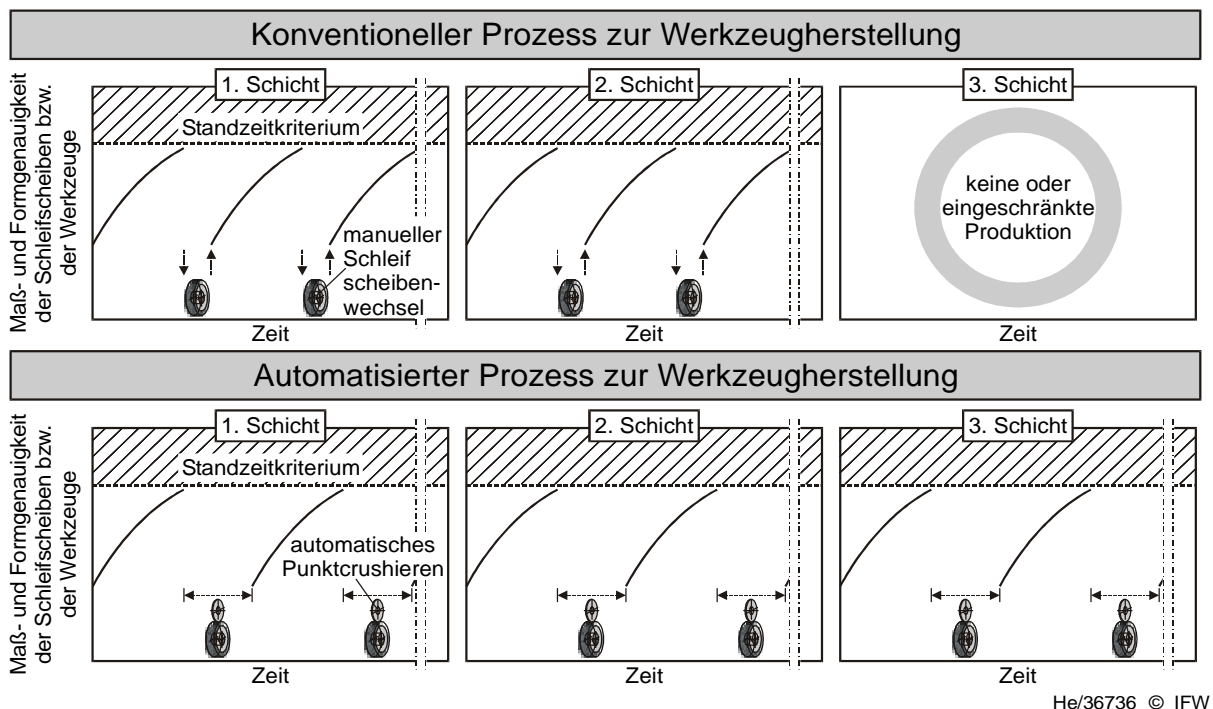


**Bild 10.1:** Herstellung eines unbeschichteten Vollhartmetallwerkzeuges

Der erfolgreiche Einsatz des Punktcrushierens erfordert neben der Substitution der konventionellen Abrichttechnologie in der Maschine durch das Crushiersystem auch das Bewusstsein, dass es sich hierbei um ein anderes Konzept der Schleifbearbeitung handelt. So bedingen die Wirkmechanismen beim Punktcrushieren den Einsatz von Schleifscheiben mit einer spröden Bindungsmatrix. Gerade im Werkzeugbereich, welcher aufgrund seiner Vielfalt ein potentiell großes Einsatzgebiet des Punktcrushierens darstellt, wird heute vielfach mit kunstharzgebundenen Schleifscheiben gearbeitet. Das Argument der geringeren Kosten für diesen Schleifscheibentyp relativiert sich jedoch, wenn man den gesamten Herstellungsprozess betrachtet. In Bild 10.1 sind die Zusammenhänge hierbei beispielhaft für ein rotationssymmetrisches, unbeschichtetes Vollhartmetallwerkzeug dargestellt. Gut die Hälfte der Kos-

ten für ein Werkzeug wird allein durch den Hartmetallrohling festgelegt. Die Kosten des Schleifprozesses teilen sich in das eigentliche Schleifen, das Abrichten und Einrichten, den Werkzeugwechsel und die Schleifscheiben auf. So entfallen nur etwa 3 % der Gesamtkosten eines Werkzeuges auf die Schleifscheiben. Der – gegenüber kunstharzgebundenen Schleifscheiben – um etwa 50 % höhere Preis für eine metallisch oder keramisch gebundene Schleifscheibe ist daher nicht dominierend.

Da das Punktcrushieren vor allem für das Abrichten *in* der Schleifmaschine konzipiert ist, sind andere Aspekte bei der wirtschaftlichen Betrachtung von Bedeutung. Vorteile sind vor allem in der besseren Einhaltung der Toleranzen der Schleifscheibe zu sehen, da diese nicht demontiert werden muss und Ungenauigkeiten im Rundlauf so vermieden werden. Ferner können auch komplexe und verschleißanfällige Schleifscheibenprofile in Intervallen abgerichtet werden, so dass die Einhaltung enger Toleranzen am Werkzeug gewährleistet ist. Als Nachteil ist sicherlich zu sehen, dass die Schleifmaschine durch den Abrichtprozess belegt wird und in dieser Zeit für die eigentliche Produktion nicht zur Verfügung steht (Bild 10.2). Die Anzahl und Dauer der notwendigen Abrichtzyklen ist stark abhängig von den einzuhaltenden Toleranzen bzw. den definierten Standzeitkriterien.



**Bild 10.2:** Konventioneller und automatisierter Prozess zur Werkzeugherstellung

Die durch das Punktcrushieren gegebene Möglichkeit eines automatisierten, manlosen Mehrschichtbetriebes kann diesen Nachteil aber mehr als kompensieren, da auch die Fertigung von eng tolerierten Werkzeugen ohne manuellen Eingriff, wie Scheibenwechsel oder Modifizierung des Schleifprogramms, möglich ist. Bei Einsatz der konventionellen Abrichttechnologie werden in der dritten – und in der Regel nicht besetzten – Schicht beim Werkzeughersteller gegenwärtig häufig gar keine Werk-

zeuge oder nur Standardwerkzeuge geschliffen, an die keine besonders hohen Anforderungen hinsichtlich der Maßgenauigkeiten gestellt werden. Maßabweichungen, bedingt durch den Profilverschleiß der Schleifscheiben, werden dabei in Kauf genommen. Das Spektrum der gefertigten Werkzeuge ist dadurch jedoch stark beschränkt. Der Einsatz des Punktcrushierens kann die Flexibilität in der Fertigungsplanung erhöhen, da diese Einschränkung entfällt.

## **10.2 Ausblick auf weitere Entwicklungen und Einsatzgebiete**

Die Untersuchungen zeigen, dass ein Zielkonflikt bei der Auswahl der für den Prozess geeigneten Schleifscheiben bezüglich der Bindungshärte bestehen kann. Je härter die Bindungsmatrix, desto geringer ist der Verschleiß der Schleifscheibe durch Kornausbruch im Schleifprozess. Gleichzeitig steigt aber die Beanspruchung der Crushierrolle beim Punktcrushieren, was sich negativ auf die Effektivität des Abrichtprozesses auswirkt. Zusätzlich zeigen die Analysen zum Punktcrushieren von Profilschleifscheiben, dass mit den eingesetzten Schleifscheiben das gewünschte Profil nicht immer erreicht wird bzw. einem Verschleiß unterliegt.

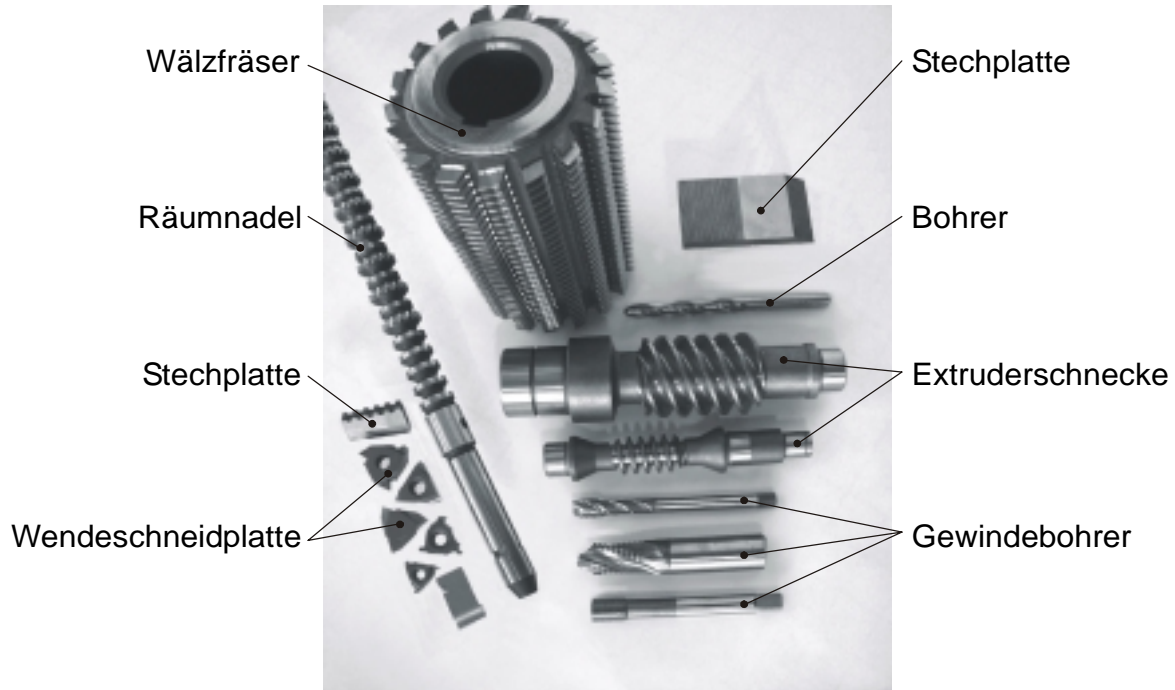
Der für die Untersuchungen gewählte Durchmesser der Schleifscheiben hat vor allem analysetechnische Gründe. Bei größeren Durchmessern, wie sie in der Praxis eingesetzt werden, verbessert sich in der Regel die seitliche Stützwirkung der Schleifkörner im Bindungsgefüge während die Last pro Einzelkorn verringert wird. Trotz dieser Einschränkung wird klar, dass zukünftige Arbeiten vorrangig die Weiterentwicklung der keramischen Bindungssysteme vorantreiben müssen. Es besteht hier ein deutliches Verbesserungspotential, um die Formhaltigkeit der Schleifscheiben bei gleichzeitig guter Profilierbarkeit zu steigern. Diese Entwicklungsarbeiten haben einen entscheidenden Einfluss auf die industrielle Verbreitung des Punktcrushierens. Eine Alternative zu den keramischen Bindungen kann der Einsatz spröder, metallischer Bindungen sein. Grundsätzliche Untersuchungen zur Beeinflussung des Crushierrollenverschleißes aufgrund der Schleifscheibenspezifikation sind hierbei notwendig.

Erste Untersuchungen zum Einsatz des Punktcrushierens bei keramisch gebundenen CBN-Schleifscheiben zeigen weitere Anwendungsfelder dieses Verfahrens auf. Aufgrund der erhöhten Neigung der CBN-Körner zur Mikrosplitterung, führt die punktuelle Belastung bei der Einsatzvorbereitung vermehrt zur Ausbildung zusätzlicher Schneiden am Schleifkorn. Die – im Vergleich zu Diamant – etwas geringere Härte von CBN lässt eine weitere Verringerung des Verschleißes am Abrichtwerkzeug erwarten.

Die Integration der notwendigen Sensorik und Regelungskomponenten für das Punktcrushieren in die Steuerung sowie die Erstausrüstung von Schleifmaschinen mit diesem System führt zu einer Reduzierung der Investitionskosten für das Abrichtsystem und wird so die Akzeptanz in der industriellen Produktion erhöhen.



Zukünftige Anwendungsgebiete des Punktcrushierens liegen vorrangig in der Einsatzvorbereitung von Profilschleifscheiben für die Herstellung von Bauteilen und Werkzeugen mit komplexen Geometrien. Hier bietet sich ein breites Spektrum, für das einige Beispiele in Bild 10.3 zu sehen sind.



He/30627 © IFW

**Bild 10.3:** Anwendungsspektrum für das Punktcrushieren:  
Herstellung von Werkzeugen mit komplexen Geometrien

## 11 Zusammenfassung

Das Punktcrushieren ist ein neu entwickeltes Abrichtverfahren zur Einsatzvorbereitung von Diamantschleifscheiben mit sprödharten Bindungen. Im Gegensatz zum Vollcrushieren wird das Schleifscheibenprofil durch ein NC-gesteuertes Abfahren der Kontur mittels einer Diamantformrolle erzeugt. Dabei ist die Kontur der Crushierrolle unabhängig von den zu erzeugenden Geometrien. Aufgrund der Punktberührung sowie der Synchronisation der Umfangsgeschwindigkeiten von Schleifscheibe und Abrichter wird eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern vermieden. Dies minimiert den Verschleiß des Abrichtwerkzeuges und bietet die Möglichkeit zur Erzeugung hoher Formgenauigkeiten bei gleichzeitig hoher Flexibilität hinsichtlich des gewünschten Schleifscheibenprofils.

Trotz des großen Potenzials dieses Verfahrens hat sich das Punktcrushieren in der industriellen Praxis bisher nicht nennenswert durchgesetzt. Hauptursachen hierfür sind das Fehlen eines geeigneten Regelsystems zur Synchronisation der Wirkpartner sowie nicht hinreichende Kenntnisse über die den Prozess beeinflussenden System- und Stellgrößen.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Beitrag zum grundlegenden Verständnis der Wirkmechanismen und Einflussgrößen beim Punktcrushieren zu leisten, um somit eine Basis für eine verbesserte Einsatzvorbereitung von Diamantschleifscheiben zu schaffen. Hierzu enthält die vorliegende Arbeit vier Themenschwerpunkte, welche sich mit der Synchronisation der Wirkpartner, dem Punktcrushieren von geradlinigen Schleifscheibenprofilen, einer Modellbetrachtung der Wirkmechanismen sowie dem Punktcrushieren von Profilschleifscheiben befassen.

Zum Abrichten von Diamantschleifscheiben werden unterschiedliche Antriebskonzepten für die Crushierrolle mit Reibschluss, Druckluftantrieb und einer geregelten Hochfrequenzspindel untersucht. Nur das geregelte System gewährleistet eine weitgehende Vermeidung einer Relativgeschwindigkeit zwischen den Wirkpartnern. Das im Rahmen dieser Arbeit realisierte System zur Drehfrequenzregelung hat einen modularen Aufbau. Durch Untersuchungen mit definierten Relativgeschwindigkeiten kann nachgewiesen werden, dass bereits geringfügige Abweichungen von einer idealen Drehfrequenzsynchronisation zwischen den Wirkpartnern zu einem deutlichen Anstieg des Verschleißes an der Crushierrolle führen. Der Gütefaktor beim geregelten Punktcrushieren kann – abhängig von der Diamantierung der Crushierrolle – bis etwa auf das dreifache verbessert werden.

Untersuchungen zum Punktcrushieren geradliniger Schleifscheibenprofile analysieren den Einfluss der System- und Stellgrößen auf die Ausbildung der Schleifscheibentopographie und den Verschleiß des Abrichters. Hierbei kommen sowohl Crushierrollen mit unterschiedlicher Diamantbelegung als auch Diamantschleifscheiben mit unterschiedlicher Korngröße und keramischer Bindungsmatrix zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Gütefaktor beim Punktcrushieren unabhängig vom

ausgebildeten Verschleißplateau am Umfang der Crushierrolle einstellt. Die vollständig mit Diamant belegte CVD-Rolle führt zum geringsten Verschleiß. Eine Erhöhung der Bindungshärte der Schleifscheibe bedingt einen größeren Verschleiß des Abrichtwerkzeuges.

Beim Abrichten können zwar die radiale Zustellung pro Abrichthub, der Überdeckungsgrad oder die Schnittgeschwindigkeit in einem weiten Bereich variiert werden. Der Crushierprozess zeigt sich aber weitgehend relativ unempfindlich gegenüber Änderungen dieser Stellgrößen. Aufgrund der offenporigen Struktur der keramisch gebundenen Schleifscheibe wird die sich ausbildende Schleifbelagstopographie wesentlich durch die Spezifikation des Schleifwerkzeuges (Korngröße und Bindungshärte) bestimmt.

Die Abrichtzeit kann durch die Wahl einer hohen Zustellung bzw. eines geringen Überdeckungsgrades drastisch verkürzt werden. Die Auswirkungen auf die Schleifbelagstopographie sind dabei, ebenso wie auf das Verschleißverhalten der Crushierrolle, relativ gering. Bei Einsatz einer freilaufenden Crushierrolle kann eine Steigerung der radialen Zustellung sogar eine deutliche Abnahme des Abrichterverschleißes bewirken.

Der Ausgangszustand der Schleifscheiben vor dem Abrichten hat ebenfalls einen Einfluss auf das Punktcrushieren. So können die durch die in der vorausgegangenen Schleifbearbeitung abgespannten Werkstoffpartikel zu einer Zusetzung der offenporigen Bindungsmatrix führen. Dies hat eine Verdichtung der Struktur des Schleifbelags zur Folge, was sich wiederum auf das Punktcrushieren durch deutlich erhöhte Prozesskräfte auswirkt.

Analysen zum Einsatzverhalten der Schleifscheiben zeigen den Einfluss des Abrichtprozesses und der Schleifscheibenspezifikation auf das Schleifergebnis am Beispiel des Tiefschleifens von Hartmetall. Insgesamt ist jedoch festzustellen, dass das Resultat des Schleifprozesses primär durch die Schleifscheibenspezifikation bestimmt wird. Dies spiegelt sich sowohl in den ermittelten Oberflächen- als auch Randzoneneigenschaften wider. Abweichende Ausgangszustände der Schleifbelagstopographien, welche durch die Variation der Stellgrößen bei der Einsatzvorbereitung hervorgerufen sind, werden durch den Schleifprozess selbst ausgeglichen. So tritt deren Einfluss nach einer Einschleifphase in den Hintergrund.

Zur Vertiefung des Verständnisses der Wirkmechanismen beim Punktcrushieren wird ein Strukturmodell der Schleifscheibe inklusive der Kornverteilung im Belag sowie der Bindungsbrücken und Porenräume entwickelt. Auf Basis dieses Modells lassen sich die Belastungen durch die Crushierrolle auf die Bindungsbrücken in der Schleifscheibenmatrix abschätzen. Dies kann bei der Auswahl und Entwicklung der Schleifwerkzeuge genutzt werden, um einen schädigungsarmen Abrichtprozess mit definiertem Abtrag des Belags zu ermöglichen und eine übermäßige Schädigung der Bindungsmatrix durch eine Überlastung beim Abrichten zu vermeiden.

Die Untersuchungen zum Punktcrushieren von Profilschleifscheiben beschreiben die Möglichkeiten aber auch die Grenzen des Verfahrens zur Profilvergenerierung bei Diamantschleifscheiben. Am Beispiel von Profilformen, wie sie beispielsweise zur Herstellung von Gewindewerkzeugen benötigt werden, wird der Einfluss der Stell- und Systemgrößen auf die Maß- und Formgenauigkeit des Schleifscheibenprofils analysiert. Auch durch die Strategie bei der Profilvergenerierung kann die Belastung der Bindungsbrücken im Schleifbelag und damit die Genauigkeit des herzustellenden Profils beeinflusst werden. Schleifuntersuchungen erlauben eine Beurteilung des Profilverleißes. Vor allem die Herstellung kleiner Radian stellen eine Herausforderung dar. Der Einsatz feinkörniger Schleifscheiben bietet hierbei Vorteile hinsichtlich der erreichbaren Profilvergenauigkeit. Grenzen sind jedoch durch die dabei ebenfalls reduzierten Spanräume der Schleifscheibe und das damit einhergehende höhere Risiko der Zusetzung des Schleifbelages gesetzt.

Abschließend werden technische und wirtschaftliche Aspekte sowie die Möglichkeiten zur Prozessautomatisierung bei der Einsatzvorbereitung von Diamantwerkzeugen durch Punktcrushieren am Beispiel der Herstellung von Vollhartmetallwerkzeugen dargestellt.

## 12 Literatur

- [Alth81] Althaus, P. G.: Abrichten und Profilieren von keramisch gebundenen Bornitridscheiben zum Innenschleifen, IDR 15 (1981) 4, S. 219-225
- [ArdM02] Ardelt, T.; Meyer, H.-R.: Effizientes Abrichten mit gleich harten Wirkpartnern, Werkstatt und Betrieb 3 (2002), S. 44-48
- [BaiG99] Bailey, M. W.; Garrad, R.; Juchem, H. O.: Characteristics of diamond and their effect on grinding behaviour, IDR 59 (1999) 580, S. 10-19
- [Barn85] Barnard, J. M.: Creep Feed Grinding Using Crushform and Dressable Superabrasive Wheels, Konferenz-Einzelbericht: Superabrasives 85, 22.-25.4.1985, Chicago, U.S.A., S. 9.45-9.65
- [Bene01] Benea, C.: Interner Bericht der Warren Diamond Powder Company, Olyphant, U.S.A., 2001
- [Blei83] Bleich, R.: Wirtschaftliches Produktionsschleifen durch reproduzierbare Abrichttechniken, Veröffentlichung Nr. 477 zur Tagung „Fortschritte in der Abrichttechnik“, 19.10.1983, Haus der Technik, Essen, S. 27-34
- [Bors74] Borse, D.: Innenschleifen von Schnellarbeitsstahl, VDI-Nachrichten 24 (1974) 16, S. 34
- [BreN98] Breiter, M.; Nutsch, G.: Einfluß der Prozeßparameter bei der Diamantsynthese mit einem DC-Plasmastrahl, 43<sup>rd</sup> International Scientific Colloquium, 21.-24.9.1998, Technical University of Ilmenau, S. B313 1-6
- [Brev96] Brevern, P. von: Untersuchungen zum Tiefschleifen von Hartmetall unter besonderer Berücksichtigung von Schleiföl als Kühlschmierstoff, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1996
- [Brit76] Britsch, H. B.: Die Keramik der Schleifscheiben, Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 53 (1976) 5, S. 143-149
- [BroS91] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig & Verlag Nauka, Moskau, 1991
- [Buch65] Buchner, S.: Schleifscheibenhärte und Bindungsmenge bei keramischen Schleifscheiben, Keramische Zeitschrift 17 (1965) 2, S. 92-94
- [Chri01] Christoffel, K.: Entwicklungstendenzen bei Werkzeugen und Schneidstoffen, Spanende Fertigung, 3. Ausgabe, Vulkan-Verlag, Essen, 2001, S. 203-212
- [Çina95] Çinar, M.: Einsatzvorbereitung und Verschleißentwicklung keramisch gebundener CBN-Schleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Bremen, 1995

- [CoeO99] Coelho, R. T.; Oliveira, J. F. G. de; Campos, G. P. de: Experimental and Theoretical Study of the Temperature Distribution on Diamond Dressing Tools for Precision Grinding, 3<sup>rd</sup> International Machining & Grinding, 4.-7.10.1999, Cincinnati, Ohio, U.S.A., S. 1-14
- [DenH02] Dennis, P.; Hessel, D.; Völz, D.: Profilschleifen mit punktcrushierbaren Diamant- und CBN-Schleifscheiben, 4. Seminar „Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, 25.4.2002, Villingen-Schwenningen, S.10.1-10.15
- [DenK99] Dennis, P.; Kaiser, M.: Profile grinding with dressable diamond and cBN wheels, IDR 59 (1999) 582, S. 214-218
- [Drey00] Dreyer, K.: Pulvermetallurgie und Einsatzgebiete der Hartmetalle, DGM-Seminar Pulvermetallurgie, 22. /23.5.2000, Aachen, S. 1-29
- [Egge01] Egger, R.: Planschleifen von Keramik mit zyklodischer Wirkbewegung, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2001
- [Eich97] Eichhorn, H.: Drehzahlsynchronisation der Wirkpartner beim Abrichten und Schleifen, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1997
- [Falk98] Falkenberg, Y.: Elektroerosives Schärfen von Bornitridschleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1998
- [Ferl92] Ferlemann, F.: Schleifen mit höchsten Schnittgeschwindigkeiten, Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1992
- [FraM98] Frank, H.; Mewes, D.; Schulz, S.: Festigkeit von Schleifkörpern aus gebundenem Schleifmittel, Cfi/Ber. DKG 75 (1998) 1/2, S. 44-49
- [Fran36] Franz, W.: Die Schleifeigenschaften keramisch gebundener Korundschleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1936
- [Fran87] Franke, S.: CNC-gesteuertes Abrichten von profilierten Schleifscheiben, Konferenz-Einzelbericht: Feinbearbeitung – Schlüsseltechnologien für die Fabrik der Zukunft – 5. Int. Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium, Braunschweig, 8.-10.4.1987, S. 32.1-32.20
- [Frie02] Friemuth, T.: Herstellung spanender Werkzeuge, Habilitationsschrift, Universität Hannover, 2002
- [Frie99] Friemuth, T.: Schleifen hartstoffverstärkter keramischer Werkzeuge, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1999
- [Frit97] Fritsch, A.: Schleifen von Cermets, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1997

- [Fuch67] Fuchs, H.: Untersuchungen über den volumetrischen Aufbau keramisch gebundener Schleifkörper, unter besonderer Berücksichtigung der Struktur und deren Auswirkung auf das schleiftechnische Verhalten beim Außenrund-Einsteichschleifen, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1967
- [Gärt82] Gärtner, W.: Untersuchungen zum Abrichten von Diamant- und Bornitridschleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1982
- [Geis80] Geisweid, G.: Untersuchungen zum Profilieren und Abrichten von Diamant- und Bornitridschleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1980
- [Grab88] Grabner, T.: Leistungspotential keramisch gebundener CBN-Schleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1988
- [Graf99] Graf, W.: CBN und Diamant, Informationsbroschüre der WST Winterthur Schleiftechnik AG, Winterthur, 1999
- [Graf99a] Graf, W.: Diamant-Abrichtwerkzeuge, Informationsbroschüre der WST Winterthur Schleiftechnik AG, Winterthur, 1999
- [Graf99b] Graf, W.: Poröse, keramische Schleifscheiben für hohe Abtragsraten, Schweizer Präzisions-Fertigungstechnik 107 (1999) 5, S. 30-33
- [GreK83] Grewe, H.; Kolaska, J.: Werkstoffkunde und Eigenschaften von Hartmetallen und Schneidkeramik, VDI-Z 125 (1983) Nr. 18, S. 699-709
- [Götz68] Götz, F.: Diamanten und Diamantwerkzeuge zum Abrichten von Schleifkörpern, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1968
- [Grün88] Grün, F.-J.: Kinematische und technologische Grundlagen des Fräsabrichtens, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1988
- [Guil27] Guillaume, A.: Charakter und Eigenschaften keramischer Schleifmittelbindungen sowie Härteprüfung von Schleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Hochschule Berlin, 1927
- [Hart01] Hartke, B.: Strukturübergänge in atomaren und molekularen Clustern, Chemiedozententagung, 18.-21.3.2002, Leipzig, S. C32.1-C32.54
- [HauM82] Haupt, D.; Möckel, R.: Zusammenhang zwischen Härte und mechanischen Kenngrößen keramisch gebundener Hochleistungsschleifkörper, Fertigungstechnik und Betrieb 32 (1982) 5, S. 291-293
- [Hert94] Hertsch, H.: Mikroelastisch gebundene CBN- und Diamantschleifscheiben, Werkstatt und Betrieb 127 (1994) 11, S. 876-878
- [Heue92] Heuer, W.: Außenrundscheifen mit kleinen keramisch gebundenen CBN-Schleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1992

- [HolS88] Holz, R.; Sauren, J.: Schleifen mit Diamant und CBN, Vulkan-Verlag, Essen, 2. Auflage 1988
- [Howa76] Howard, R. L.: Diamond roller dressers, Machinery and Production Engineering 128 (1976) 3300, S. 218-222
- [Huan01] Huang, H.: Effects of truing/dressing intensity on truing/dressing efficiency and grinding performance of vitrified diamond wheels, Journal of Materials Processing Technology 117 (2001) 1/2, S. 9-14
- [JacM01] Jackson, M. J.; Mills, B.: Vitrification heat treatment and dissolution of quartz in grinding wheel bonding systems, British Ceramic Transactions 100 (2001) 1, S. 1-8
- [Jaco79] Jacobs, U.: Beitrag zum Einsatz von Schleifscheiben mit kubisch-kristallinem Bornitrid als Schleifstoff, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1979
- [Joun67] Joung, B.: Die Graphitisierung von Diamanten bei der Herstellung von Diamantwerkzeugen, Diamant-Information, De Beers Industrial Diamond Division, München, 1967, S. 1-6
- [JucC83] Juchem, H. O.; Cooley, B. A.: Einsatzvorteile keramisch gebundener Abrasive Boron Nitride-Werkzeuge, IDR 17 (1983) 4, S. 191-196
- [Juch86] Juchem, H. O.: Hochleistungsschleifen für die Metallbearbeitung, IDR 20 (1986) 4, S. 196-207
- [Kais03] Kaiser, M.: Präzision durch Diamant, Produktinformationen zur Abrichttechnologie, Dr. Kaiser Diamantwerkzeuge, Celle, 2003
- [Kais96] Kaiser, M.: Verfahren und Vorrichtung zum Abrichten von Schleifscheiben mit profilierter Arbeitsfläche, Offenlegungsschrift, DE 4436741 A1, 18.04.1996
- [Kamm91] Kammermeyer, S.: Einflüsse des Abrichtens von Schleifscheiben mit rotierenden Werkzeugen, Werkstatt und Betrieb 124 (1991) 6, S. 493-496
- [Karp01] Karpuschewski, B.: Sensoren zur Prozessüberwachung beim Spanen, Habilitationsschrift, Universität Hannover, 2001
- [Kirm75] Kirmse, W.: Praktische Anwendungen von Diamant-Abrichtrollen, IDR 9 (1975) 1, S. 19-27
- [Kloc82] Klocke, F.: Gewindeschleifen mit Bornitridschleifscheiben, Carl Hanser Verlag, München, 1982
- [KloM02] Klocke, F.; Merbecks, T.: Charakterisierung von keramisch gebundenen cBN-Schleifscheiben, Teil 1: IDR 36 (2002) 3, S. 242-251, Teil 2: IDR 36 (2002) 4, S. 309-318



- [Köni89] König, W.: Fertigungsverfahren - Band 2: Schleifen, Honen, Läppen, 2. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [KönL80] König, W.; Lauer-Schmaltz, H.: Technologische Voraussetzungen für das Hochgeschwindigkeitsschleifen mit Diamant- und CBN-Schleifscheiben, Industrie Anzeiger 102 (1980) 46, S. 30-35
- [KönS94] König, W.; Schulz, A.: Abrichten von CBN-Schleifscheiben mit Diamantformrollen, IDR 28 (1994) 4, S. 234-240
- [KraT93] Kraack, K. E.; Trinks, V.: Entwicklung keramischer Schleifscheiben-Bindemittel mit niedrigen Brenntemperaturen, Cfi/Ber. DKG 70 (1993) 8, S. 399-401
- [Kraf75] Kraft, W.: Konstruktive Tendenzen bei Diamant-Abrichtrollen, IDR 9 (1975) 1, S. 28-36
- [Krie97] Krieg, G.: Konditionieren konventioneller und hochharter Schleifscheiben, Konferenz Einzelbericht des Deutschen Industrieforums für Technologie: „Wirtschaftliche Schleifverfahren - Stand und Entwicklungstendenzen in der Schleiftechnik“, 14./15.5.1997, Mettmann, S. 2-35
- [Krue35] Krue, P.: Grundlegende Erkenntnisse über das Schleifen von Hartstoffen, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1935
- [KünK98] Künanz, K.; Knösel, E.; Franke, A.: Diagnose zur Bewertung des Leistungsvermögens von Schleifwerkzeugen, IDR 32 (1998) 3, S. 206-217
- [Lang98] Langelüddecke, R.: CBN und Diamant, Betriebstechnik aktuell 39 (1998) 9, S. S10-S13
- [Lieb96] Liebe, I.: Auswahl und Konditionierung von Werkzeugen für das Außenrund-Profilschleifen technischer Keramiken, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1996
- [LieK01] Lierse, T.; Kaiser, M.: Abrichten von Schleifwerkzeugen für die Verzahnung, IDR 35 (2001) 4, S. 297-310
- [Lier98] Lierse, T.: Mechanische und thermische Wirkungen beim Schleifen keramischer Werkstoffe, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1998
- [Link92] Linke, K.: Kennwerte keramisch gebundener Schleifscheiben aus kubischem Bornitrid, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1992
- [LunH68] Lundblad, E. G.; Hagelquist, L.: Entwicklung eines neuen Herstellverfahrens für metallgebundene Diamant-Schleifscheiben, Diamant-Information, De Beers Industrial Diamond Division, München, 1968, S. 2-5

- [Lutz85] Lutz, G.: Superharte Schleifmittel Diamant und CBN: Möglichkeiten und Grenzen, Schleifen + Trennen 112 (1985), S. 9-14
- [MakA02] Maksoud, T.; Attia, T.; Koura, M.: Automatic Truing and Dressing of Grinding Wheels, Abrasives Magazine Feb./Mar. 2002, S. 5-11
- [Manc81] Mancina, R.: Neues profilierbares Bindungssystem für Diamant- und CBN-Schleifscheiben, IDR 15 (1981) 2, S. 101-103
- [Marz01] Marzenell, C.: Verzahnungshonen mit Diamantwerkzeugen, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2001
- [MewM99] Mewes, D.; Mewes, O.; Schulz, S.: Festigkeit kunstharzgebundener Schleifkörper, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 30 (1999) 3, S. 145-150
- [MewS99] Mewes, D.; Schulz, S.: Festigkeit keramisch gebundener Schleifkörper berechnen, MP Materialprüfung 41 (1999) 1-2, S. 20-23
- [Meye01] Meyer, H.-R.: CBN-Schleifscheiben wirtschaftlich abrichten, Werkstatt und Betrieb 1-2 (2001), S. 52-57
- [MeyK97] Meyer, H.-R.; Koch, N.; Giese, L.; Müller, J.: CBN- und Diamantwerkzeuge für Hochleistungsschleifprozesse, Konferenz-Einzelband: Schleiftechnik im Wettbewerb – Stand der Technik und Zukunftschancen des Fertigungsverfahrens, Schleiftechnisches Kolloquium, 9./10.10.1997, Aachen, S. 2.1-2.17
- [MeyS82] Meyer, H.-R.; Sauren, J.: Abrichten von Diamant- und CBN-Werkzeugen in der Serienfertigung, wt - Zeitschrift für industrielle Fertigung 72 (1982) Nr. 12, S. 667-672
- [MeyS84] Meyer, H.-R.; Sauren, J.: Abrichten von CBN- und Diamantschleifscheiben, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 52. Ausgabe, Vulkan-Verlag Essen, 1984, S. 241-253
- [Mink88] Minke, E.: Grundlagen der Verschleißausbildung an nicht-rotierenden Abrichtschneiden zum Einsatz an konventionellen Schleifwerkzeugen, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Bremen, 1988
- [Mink99] Minke, E.: Handbuch zur Abrichttechnik, Riegger Diamantwerkzeuge GmbH, Affalterbach, 1999
- [Mohr83] Mohr, H.: Neue Ergebnisse aus der Schleif- und Abrichttechnik, Vortragsveröffentlichung Nr. 477 zur Tagung „Fortschritte in der Abrichttechnik“, 19.10.1983, Haus der Technik, Essen, S. 34-44
- [NakH92] Nakagawa, T.; Hitoshi, O.: Mirror Surface Grinding Technique with Electrolytic In-Process Dressing, 2<sup>nd</sup> International Conference on Die and Mould Technology, 23.-25.9.1992, Singapore

- [Naoy93] Naoyuki, U.: Super High Speed Grinding with Vitrified CBN Wheels, 5<sup>th</sup> International Grinding Conference, 26.-28.10.1993, Cincinnati, Ohio, U.S.A., S. 93-348-1 - 93-348-27
- [Ohmo95] Ohmori, H.: Ultraprecision Grinding of Optical Materials and Components Applying ELID (Electrolytic In-Process Dressing), SPIE Vol. 2576, 1995, S. 26-45
- [Padb92] Padberg, H.-J.: Entwicklung anwendungsorientierter Bindungs-Systeme für Schleifwerkzeuge, Jahrbuch Schleifen Honen, Läppen und Polieren, 57. Ausgabe, Vulkan-Verlag, Essen, 1992, S. 196-211
- [Padb93] Padberg, H.-J.: Aufbau und Bindungsmatrix hochbeanspruchter keramisch gebundener Zerspanungswerkzeuge, Cfi/Ber. DKG 70 (1993) 11/12, S. 598-600
- [Pahl74] Pahlitzsch, G.: Bedeutung des Schneidflächenzustandes von Schleifscheiben für den Schleifprozeß, IDR 8 (1974) 3, S. 158-168
- [PetS68] Peters, J.; Snoeys, R.; Decnent, A.: Sonic testing of grinding. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Machine Tool Design and Research Conference, 1968, S. 1113
- [Psch79] Pschichholz, D.: Diamant - Graduierung, Gewinnung und Kauf, Rühle-Diebener-Verlag, Stuttgart, 1979
- [Rohd85] Rohde, G.: Beitrag zum Verhalten von keramisch-gebundenen Schleifscheiben im Abricht- und Schleifprozeß, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985
- [Salj83] Saljé, E.: Strahlschärfen für CBN- und Diamantschleifscheiben, VDI-Z 125 (1983) 15, S. 621-623
- [Salj91] Saljé, E.: Begriffe der Schleif- und Konditioniertechnik, Vulkan Verlag, Essen, 1991
- [SalS82] Salmang, H.; Scholze, H. : Keramik, Teil 1 und 2, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1982
- [Sche73] Scheidemann, H.: Einfluß der durch Abrichten mit zylindrischen und profilierten Diamantrollen erzeugten Schleifscheiben-Schneidfläche auf den Schleifvorgang, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1973
- [Schl82] Schleich, H.: Das Schärfen von Bornitrid-Schleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1982
- [SchL82] Schwämmle, J.; Lowin, R.: Profiltiefschleifen mit einprofilierten Diamant- und Bornitrid-Schleifscheiben, IDR 16 (1982) 2, S. 97-103

- [Schm68] Schmitt, R.: Abrichten von Schleifscheiben mit diamantbestückten Rollen, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1968
- [Schu96] Schulz, A.: Das Abrichten von keramisch gebundenen CBN-Schleifscheiben mit Formrollen, Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1996
- [Sen91] Sen, P.: Wheel dressing and natural diamond, IDR 51 (1991) 542, S. 32-38
- [Shih00] Shih, A. J.: An experimental investigation of rotary diamond truing and dressing of vitreous bond wheels for ceramic grinding, International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (2000) 1, S. 1755-1774
- [SpuL90] Spur, G.; Linke, K.: Materialkundliche Untersuchungen an keramisch gebundenen CBN-Schleifscheiben, Jahrbuch Schleifen Honen, Läppen und Polieren, 56. Ausgabe, Vulkan-Verlag Essen, 1990, S. 183-190
- [SpuL97] Spur, G.; Liebe, I.; Krieg, G.-H.: Profiling of Diamond Grinding Wheels with Silicon Carbide and Diamond Rollers, Production Engineering Vol. IV/2 (1997), S. 19-22
- [Spur89] Spur, G.: Keramikbearbeitung, Carl Hanser Verlag, München, 1989
- [StaF79] Stabenow, R.; Fixl, J.: Beziehungen zwischen volumetrischem Aufbau, Elastizitätsmodul und Schleifverhalten von keramisch gebundenen Korundschleifscheiben, Sprechsaal 12, 1979, S. 891
- [Stuff96] Stuff, D.: Einsatzvorbereitung keramisch gebundener CBN-Schleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1996
- [Syoj90] Syoij, K.: Studies on Truing of Diamond Vitrified Wheels (1<sup>st</sup> Report), Bull. Japan Society of Precision Engineering Vol. 24 (1990) 4, S. 252-257
- [TanI85] Tanaka, T.; Ikawa, N.; Ueno, N.; Okada, S.: A Ceramic Aspect of Vitrified Bond for Diamond Grinding Wheel, Bull. Japan Society of Precision Engineering Vol. 19 (1985) 3, S. 221-222
- [Thie86] Thies, J.: Bruchmechanische und zerstörungsfreie Untersuchungen an keramisch gebundenen Korundschleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1986
- [Timm01] Timm, J. H.: Laserkonditionieren von CBN- und Diamantschleifscheiben, Dr.-Ing. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2001
- [TönD02] Tönshoff, H. K.; Denkena, B.; Hessel, D.; Brandes, A.: Flexible and Fully Automated Intelligent Grinding System, Proceedings of the 35<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 13.-15.5.2002, Seoul, Süd-Korea, S. 555-560

- [TönF00] Tönshoff, H. K.; Friemuth, T.; Hessel, D.: Technologie des Werkzeugschleifens, Schleiftechnik im Wettbewerb: Stand der Technik und Zukunftschancen des Fertigungsverfahrens, 2. Schleiftechnisches Kolloquium, 9./10.11.2000, Bremen, S. 4.1-4.19
- [TönF01] Tönshoff, H. K.; Friemuth, T.; Hessel, D.: Crushing Process for Vitreous Bonded CBN and Diamond Grinding Wheels, Production Engineering VIII/1 (2001), S. 13-16
- [TönF95] Tönshoff, H. K.; Falkenberg, Y.; Mohlfeld, A.: Touch-Dressing, Konditionieren von keramisch gebundenen CBN-Schleifscheiben, IDR 29 (1995) 1, S. 43-48
- [TönG79] Tönshoff, H. K.; Geisweid, G.: Profiling of Diamond- and Boron Nitride Wheels, Annals of the CIRP 28 (1979) 1, S. 199-203
- [TönG81] Tönshoff, H. K.; Gärtner, W.: Übersicht über die Möglichkeiten und Grenzen des Profilierens und Abrichtens von Diamant- und Bornitrid-Schleifscheiben, IDR 15 (1981) 4, S. 212-218
- [Töns95] Tönshoff, H. K.: Spanen – Grundlagen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995
- [Töns95a] Tönshoff, H. K.: Werkzeugmaschinen – Grundlagen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995
- [Türi02] Türich, A.: Werkzeug-Profilierzeugung für das Verzahnungsschleifen, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2002
- [WarH94] Warnecke, G.; Hollstein, T.; König, W.; Spur, G.; Tönshoff, H. K.: Schleifen von Hochleistungskeramik – Werkstoff, Anwendung, Bearbeitung, Qualität, Abschlussbericht zum BMFT Verbundprojekt 02 FT 40780, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1994
- [WebZ02] Weber, L.; Zsak, G.: World Mining Data 2002, Federal Ministry of Economy and Labour of the Republic of Austria, Federal Mining Authority, Vol. 17, Wien, 2002
- [WecG81] Weck, M.; Gogrewe, H.-U.; Ernst, D.: Numerisch gesteuertes Abrichten von Profilschleifscheiben, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1981
- [Weis02] Weise, C.: Diamantenkunde – Faszination, Mythos und Technik, Diamond Business 1 (2002), S. 74-75
- [Weis02a] Weise, C.: Was sind Industriediamanten? – Eigenschaften, Anwendungen, Ausblicke, Diamond Business 2 (2002), S. 16-18
- [Wend03] N.N.: Diamond and CBN in Process, Produktinformation der Wendt GmbH, Meerbusch, 2003

- [Wend03a] N.N.: Diamant-Abrichtwerkzeuge, Produktinformation S-3 der Wendt GmbH, Meerbusch, 2003
- [Went57] Wentorf, R. H.: Cubic Form of Boron Nitride, The Journal of Chemical Physics 26 (1957) 4, S. 956
- [Wern94] Werner, F.: Hochgeschwindigkeitstriangulation zur Verschleißdiagnose an Schleifwerkzeugen, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1994
- [Wimm95] Wimmer, J.: Konditionieren hochharter Schleifscheiben zum Schleifen von Hochleistungskeramik, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1995
- [Wint03] N.N.: Winter Diamant-Abrichtrollen, Produktinformation der Saint-Gobain Diamantwerkzeuge GmbH & Co., Norderstedt, 2003
- [Wobk91] Wobker, H.-G.: Schleifen keramischer Schneidstoffe, Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 1991
- [Wood59] Woodbury, R. S.: History of the grinding machine, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, U.S.A., 1959
- [YegJ89] Yegenoglu, K.; Jansen, H.; Janssens, J. P.: Diamant-Abrichtrollen zur wirtschaftlichen Serienfertigung, Werkstatt und Betrieb 122 (1989) 9, S. 809-812
- [Zakh71] Zakharenko, I. P.: Cubic Boron Nitride Wheels Improve Thread-Grinding, Machine and Tooling 42 (1971) 1, S. 36-39

### **Normen und Richtlinien**

- [DIN13] DIN 13: Metrische ISO-Gewinde, Beuth-Verlag, Berlin, 1999
- [DIN848] DIN 848, Teil 1-2: Schleifmittelkörnungen aus Diamant und Bornitrid; Teil 1: Bezeichnung, Korngrößenverteilung; Teil 2: Prüfung der Makrokörnung, Beuth-Verlag, Berlin, 1988
- [DIN3327] DIN EN ISO 3327: Hartmetalle – Bestimmung der Biegebruchfestigkeit, Beuth-Verlag, Berlin, 2001
- [DIN3369] DIN ISO 3369: Undurchlässige Sintermetalle und Hartmetalle – Ermittlung der Dichte, Beuth-Verlag, Berlin, 1990
- [DIN3878] DIN ISO 3878: Hartmetalle – Vickers-Härteprüfung, Beuth-Verlag, Berlin, 1991

- [DIN4287] DIN EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit, Beuth-Verlag, Berlin, 1998
- [DIN4288] DIN EN ISO 4288: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, Beuth-Verlag, Berlin, 1998
- [DIN69800] DIN 69800, Teil 1-2: Schleifkörper mit Schleifbelag aus Diamant oder Bornitrid; Teil 1: Übersicht, Benennungen; Teil 2: Formschlüssel, Bezeichnung, Beuth-Verlag, Berlin, 1998
- [FEPA61] FEPA 61: Standard for Superabrasives Grain Sizes, 1997
- [FEPA64] FEPA 64: Standard for Diamond and CBN Grinding Wheels, 1992
- [ISO513] ISO 513: Anwendung von harten Schneidstoffen zur Zerspanung; Bezeichnung der Zerspanungs-Hauptgruppen und der Anwendungsgruppen, Beuth-Verlag, Berlin, 1991
- [ISO6983] ISO 6983: Numerische Steuerung von Maschinen; Programmformat und Definition von Adresswörtern, Beuth-Verlag, Berlin, 1982
- [VDI3394] VDI-Richtlinie 3394: Aufbau und Anwendungen von Schleifkörpern mit Diamant und kubisch kristallinem Bornitrid (CBN) für die Metallbearbeitung, VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, Düsseldorf, 1980

## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Dirk Hessel  
geb. am 20.11.1971  
in Zweibrücken  
verheiratet mit Karen Hertrich



### Schulbildung

1978 - 1981      Grundschule, Wehr/Baden  
1981 - 1982      Grundschule, Bad Honnef  
1982 - 1989      Siebengebirgsgymnasium, Bad Honnef  
1989 - 1991      Söderblom-Gymnasium, Espelkamp  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

### Wehrdienst

07/1991 - 06/1992      Grundwehrdienst in Hamburg

### Studium

10/1992 - 02/1998      Studiengang Maschinenbau an der Universität Hannover  
Vertiefungsrichtung: Entwicklungs- und Konstruktionstechnik  
Abschluss: Diplom-Ingenieur

### Berufstätigkeit

05/1996 - 01/1998      Wissenschaftliche Hilfskraft am  
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)  
der Universität Hannover unter der Leitung von  
Prof. Dr.-Ing. E. Doege

03/1998 - 04/2003      Projektingenieur und wissenschaftlicher Mitarbeiter am  
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)  
der Universität Hannover unter der Leitung von  
Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. K. Tönshoff und  
Prof. Dr.-Ing. B. Denkena

seit 07/2003              Entwicklungsingenieur bei  
Dr.-Ing. M. Kaiser Diamantwerkzeuge, Celle



Bisher sind in "Berichte aus dem IFW", der wissenschaftlichen Schriftenreihe des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Universität Hannover, folgende Titel erschienen:

- |              |  |
|--------------|--|
| Band 01/2002 | Berend Denkena (Hrsg.)<br>Produktionstechnik: Gestern – Heute – Morgen<br>Wissenschaftliches Kolloquium zu Ehren von<br>Prof. Hans Kurt Tönshoff |
| Band 02/2002 | Kirsten Tracht<br>Planung und Steuerung des Werkzeug- und Formenbaus<br>auf Basis eines integrierten Produktmodells                              |
| Band 03/2002 | Vanessa Uhlig<br>Informationstechnische Unterstützung von Entwicklungs-<br>kooperationen   |
| Band 04/2002 | Philipp Andrae<br>Hochleistungszerspanung von Aluminiumknetlegierungen   |
| Band 01/2003 | Berend Denkena (Hrsg.)<br>Antriebstechnik für die Fertigung,<br>Begleitband zum Seminar, Hannover 14./15. Mai 2003                               |
| Band 02/2003 | Gerrit Teunis<br>Engpassorientierte Werkstattsteuerung für teilautonome,<br>kooperative Fertigungen  |
| Band 03/2003 | Raouf Ben Amor<br>Thermomechanische Wirkmechanismen und Spanbildung bei<br>der Hochgeschwindigkeitszerspanung                                    |
| Band 04/2003 | Berend Denkena (Hrsg.)<br>Jahresbericht 2002 des Instituts für Fertigungstechnik und<br>Werkzeugmaschinen (nur auf Anfrage)                      |
| Band 05/2003 | Marc Bisping<br>Integrierte Produktstrukturen für den Werkzeugbau  |
| Band 06/2003 | Jochen Selle<br>Technologiebasierte Fehlerkorrektur für das<br>NC-Schlichtfräsen   |
| Band 07/2003 | Oliver Hillers<br>Fehlerklassifizierende Prozesskontrolle mittels multivariater<br>Statistik beim Laserstrahlschweißen                           |
| Band 08/2003 | Dirk Hessel<br>Punkcrushieren keramisch gebundener<br>Diamantschleifscheiben   |

Eine aktuelle Übersicht über alle bisher erschienenen Bände finden Sie auch auf unserer Homepage im Internet:

[www.ifw.uni-hannover.de/publikationen/](http://www.ifw.uni-hannover.de/publikationen/)

Ein Bestellformular finden Sie unter [www.pzh-gmbh.de/pzhgmbh/verlag](http://www.pzh-gmbh.de/pzhgmbh/verlag)

