

Frederik Vits

Tribologie beim Schleifen von polykristallinem Diamant



Tribologie beim Schleifen von polykristallinem Diamant

Tribology in Grinding of Polycrystalline Diamond

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Jan Frederik Vits

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Dezember 2019

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Frederik Vits

Tribologie beim Schleifen von polykristallinem
Diamant

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 5/2020



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Frederik Vits:

Tribologie beim Schleifen von polykristallinem Diamant

1. Auflage, 2020

Apprimus Verlag, Aachen, 2020

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-856-3

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Vorwort und Danksagung

Preamble and Acknowledgement

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.

Ich danke Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke herzlich für die wissenschaftliche Förderung, die Unterstützung meiner Tätigkeit am Institut und seine motivierende und wohlwollende Führung.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Bergs, Leiter des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen bedanke ich mich herzlich für die Durchsicht des Manuskripts sowie für die Übernahme des Koreferats. Ferner gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Jeschke für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Markert für den Beisitz in der Prüfungskommission.

Für die Förderung der Forschungsprojekte KL 500/140-1 „Analyse der Zerspanungs- und Abtragsmechanismen beim Schleifen hochharter Schneidstoffe am Beispiel von polykristallinem Diamant“ und KL500/193-1 „Analyse der Verschleißmechanismen beim PKD-Schleifen mit keramisch gebundenen Diamantschleifscheiben auf Basis eines Reibungsmodells“, die die Grundlage für diese Dissertation bilden, richtet sich mein Dank an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).

Weiterer Dank gilt Frau Jana Haas-Wittmüß (Element Six) und Dr.-Ing. Markus Weiß (Tyrolit) für die Diskussion meiner Forschungsergebnisse und die Bereitstellung von Versuchsmaterialien.

Meinen Kollegen am Werkzeugmaschinenlabor WZL danke ich für die gemeinsamen Jahre, auf die ich mit Freude zurückblicke. Insbesondere danke ich meinen Bürokollegen Dr.-Ing. Matthias Rasim, Daniel Müller, Moritz Jochums, Dr.-Ing. Sebastian Müller und Jannik Röttger sowie meinen lieben Kollegen Maximilian Lachenmaier, Dr.-Ing. Johannes Müller, Dr.-Ing. Christian Wirtz, Dr.-Ing. Patrick Mattfeld, Dr.-Ing. Daniel Trauth, Dr.-Ing. Florestan Schindler, Dr.-Ing. Janis Thiermann, Dr.-Ing. Michael Duscha, Dr.-Ing. Jens Stauder, Dr.-Ing. Sebastian Barth, Alexander Dehmer, Sebastian Prinz, Tobias Kaufmann, Christian Wrobel, Jan Rey, Timm Grünebaum, Alexander Beckers, Sebastian Apelt, Lennard Hermann, Marc Bredthauer, Marius Ohlert, Ulrich Müller, Peter Ritzerfeld, Guido Kochs-Theisen, Tanja Tebeck, Andreas Thönnessen, Silke Maier, Dr.-Ing. Anton Shirobokov, Robby Mannens, Rafael Hild, Thomas Kokott, Matthias Nick, Herman Voigts, Ingo Felix Weiser, Henric Breuer, Dr.-Ing. Andreas Feuerhack, Dr. rer. nat. Mario Kittel, Johanna Figgner und Thomas Pullen.

Zudem danke ich meinen studentischen Mitarbeitern Eduard Unruh, Ali Gür und Jon Elguezabal Blanco für ihre Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und Auswertung. Besonderer Dank gilt David Braun für seinen unermüdlichen Einsatz bei der Versuchsdurchführung und für die Diskussion der Versuchsergebnisse.

Für die Durchsicht des Manuskripts danke ich herzlichst Professor Dr.-Ing. Rudolf Vits, Dr.-Ing. Sebastian Barth, Maximilian Lachenmaier, Silke Maier und Dr.-Ing. Daniel Trauth.

Mein größtmöglicher Dank richtet sich an meine Eltern Rudolf und Sigrid Vits für die bedingungslose und liebevolle Unterstützung auf meinem Werdegang und den Rückhalt während meiner Zeit an der RWTH Aachen.

Waiblingen, Februar 2020

Jan Frederik Vits

Kurzzusammenfassung

Zerspanwerkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide aus polykristallinem Diamant PKD ermöglichen hohe Zerspanraten und Werkzeugstandzeiten für eine Vielzahl von Zerspanaufgaben. Die Formgebung dieser Zerspanwerkzeuge erfolgt mit den Fertigungsverfahren Lasern, Erodieren und Schleifen. Hohe Anforderungen an die Kantenschärftigkeit und die Oberflächengüte sowie eine geringe thermische Randzonenbeeinflussung der PKD-Schneide machen eine Schlichtbearbeitung mittels Schleifen notwendig. Das Schleifen von PKD ist jedoch durch geringe Zerspanraten und einen hohen Schleifscheibenverschleiß gekennzeichnet. Durch die Auslegung des Schleifprozesses können die Zerspanrate und der Schleifscheibenverschleiß beeinflusst werden. Die zuvor genannten Größen werden maßgeblich durch die thermischen und mechanischen Belastungen in der Kontaktzone beim Schleifen beeinflusst. Diese wiederum hängen von den tribologischen Eingangsgrößen Normalkraft und Relativgeschwindigkeit sowie von der PKD-Spezifikation ab. Die Auslegung eines effizienten Schleifprozesses erfordert demzufolge eine Vorhersage der thermischen und mechanischen Belastungen in Abhängigkeit von den tribologischen Eingangsgrößen und der PKD-Spezifikation sowie der resultierenden Schleifscheibenverschleiß- und Zerspanungsmechanismen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen mathematischen Zusammenhang zwischen den tribologischen Eingangsgrößen und den thermischen und mechanischen Belastungen beim Schleifen unterschiedlicher PKD-Spezifikationen herzuleiten und die bei den vorhergesagten thermischen und mechanischen Belastungen vorliegenden PKD-Zerspanungsmechanismen und Schleifscheibenverschleißmechanismen zu erklären. Hierzu wird der Schleifprozess zunächst in Form von Einkornreibtests abstrahiert und empirisch-analytische Modelle zur Vorhersage der thermischen und mechanischen Belastungen für einen Einkornkontakt abgeleitet. Diese Modelle werden in einem weiteren Schritt auf Basis von Schleifversuchen auf den Schleifprozess übertragen. Finite-Elemente-Simulationen, die auf diesen Modellen aufbauen, ermöglichen die Simulation der Temperaturen beim PKD-Schleifen für einzelne Kontaktflächen. Ferner werden die theoretischen Kontaktdrücke am Einzelkorn bestimmt. Des Weiteren werden die verschleißbedingte Veränderung der Schleifscheibentopographie und die Beeinflussung der PKD-Randzone durch den Schleifprozess untersucht und anhand der thermischen und mechanischen Belastungen in der Kontaktzone erklärt.

Diese Dissertation liefert somit einen Beitrag zum Verständnis der Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen den thermischen und mechanischen Belastungen in der Kontaktzone und den Schleifscheibenverschleiß- und Zerspanungsmechanismen in Abhängigkeit von den tribologischen Eingangsgrößen und der PKD-Spezifikation.

Abstract

Chipping tools with geometrically defined cutting edges made of polycrystalline diamond PCD enable high material removal rates and tool life for a large number of chipping tasks. The shaping of these chipping tools is carried out with the manufacturing processes laser cutting, eroding and grinding. High demands on the cutting edge and surface quality as well as a low thermal influence on the PCD-external-zone make finishing by grinding necessary. However, grinding PCD is characterized by low material removal rates and a high grinding wheel wear. The material removal rate and the grinding wheel wear can be influenced by the design of the grinding process. The aforementioned parameters are significantly influenced by the thermal and mechanical loads in the contact zone during grinding. These, in turn, depend on the tribological input variables normal force and relative velocity as well as the PCD-specification. The design of an efficient grinding process therefore requires a prediction of the thermal and mechanical loads as a function of the tribological input variables and the PCD-specification as well as the resulting grinding wheel wear and material removal mechanisms.

The aim of this thesis is to derive a mathematical relationship between the tribological input variables and the thermal and mechanical loads during grinding of different PCD-specifications and to explain the material removal and grinding wheel wear mechanisms present at the aforementioned thermal and mechanical loads. For this purpose, the grinding process is abstracted in the form of single grain friction tests and empirical-analytical models are derived to predict the thermal and mechanical loads for a single grain contact. In a further step, these models are transferred to the grinding process on the basis of grinding tests. Finite element simulations based on these models allow the simulation of temperatures during PCD-grinding for individual contact areas. Furthermore, the theoretical contact pressures for single grain contacts are determined. In addition, the wear-related change of the grinding wheel topography and the influence of the grinding process on the PCD-external-zone are investigated and explained on the basis of the thermal and mechanical loads in the contact zone.

This dissertation thus contributes to the understanding of the cause-effect relationships between the thermal and mechanical loads in the contact zone and the grinding wheel wear and material removal mechanisms as a function of the tribological input variables and the PCD-specification.

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse.....	9
2.1	Grundlagen eines tribologischen Systems	9
2.2	Kohlenstoff und seine Eigenschaften	12
2.3	Werkstoffphysik von Graphit und Diamant	14
2.3.1	Aufbau von Graphit	14
2.3.2	Eigenschaften von Graphit	15
2.3.3	Aufbau von Diamant.....	15
2.3.4	Eigenschaften von Diamant	16
2.3.5	Polykristalliner Diamant.....	18
2.3.6	Zwischenfazit	23
2.4	Schleifen von polykristallinem Diamant.....	23
2.4.1	Prozessgrößen beim PKD-Schleifen.....	26
2.4.2	Prozesssignatur beim PKD-Schleifen	29
2.4.3	Schleifscheibenverschleißmechanismen beim PKD-Schleifen.....	31
2.4.4	Zerspanungsmechanismen beim PKD-Schleifen	33
2.4.5	Zwischenfazit	37
2.5	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Problemstellung	38
3	Zielsetzung und Forschungsmethodik	41
4	Analyse der tribologischen Verhältnisse beim PKD-Schleifen auf Basis von Einkornreibuntersuchungen.....	45
4.1	Entwicklung eines Analogieprüfstandes.....	45
4.2	Versuchsmethodik der Einkornreibtests	47
4.3	Tribologische Verhältnisse für den Einkornkontakt	50
4.4	Modellhafte Beschreibung der tribologischen Verhältnisse für einen Einkorneingriff	54
4.5	Fazit zur Analyse der tribologischen Verhältnisse beim PKD-Einkornreiben	58
5	Analyse der tribologischen Verhältnisse beim PKD-Schleifen.....	61
5.1	Versuchsaufbau und Design of Experiments für die Schleifuntersuchungen.....	61
5.2	Tribologische Verhältnisse im Schleifprozess	66
5.3	Fazit zur Analyse der tribologischen Verhältnisse beim PKD-Schleifen.....	79
6	Finite-Elemente-Simulation der thermischen und mechanischen Belastungen beim PKD-Schleifen	83
6.1	Bestimmung der Materialkennwerte	84

6.1.1	Analyse der thermophysikalischen Eigenschaften von PKD und monokristallinem Diamant.....	85
6.1.2	Analyse der thermophysikalischen Eigenschaften des Schleifbelages.....	88
6.2	Aufbau des Finite-Elemente-Modells	90
6.3	Simulationsergebnisse und Validierung des Finite-Elemente-Modells	98
6.4	Fazit zur Simulation der thermischen und mechanischen Belastungen beim PKD-Schleifen	105
7	Schleifscheibenverschleiß beim PKD-Schleifen	107
7.1	Versuchsaufbau zur Analyse des Schleifscheibenverschleißes beim PKD-Schleifen	107
7.2	Ergebnisse der Schleifscheibenverschleißuntersuchungen	108
7.3	Fazit zur Analyse des Schleifscheibenverschleißes beim PKD-Schleifen	114
8	Analyse des Einflusses der tribologischen Verhältnisse auf die Werkstückrandzone	115
8.1	Analyse der geschliffenen Werkstückoberfläche	115
8.2	Analyse der geschliffenen Werkstückrandzone	120
8.2.1	Vorbereitung der Proben mit dem Focused Ion Beam Verfahren	120
8.2.2	Analyse der PKD-Randzone vor dem Schleifen	122
8.2.3	Analyse der geschliffenen PKD-Randzone	124
8.3	Analyse des Risswachstums im Diamanten	129
8.4	Fazit zur Analyse des Einflusses der tribologischen Verhältnisse auf die Werkstückrandzone	132
9	Erklärungsmodell für die Schleifscheibenverschleiß- und Zerspanungsmechanismen beim PKD-Schleifen	135
9.1	Erklärung der Zerspanungsmechanismen beim PKD-Schleifen	135
9.2	Erklärung der Schleifscheibenverschleißmechanismen beim PKD-Schleifen	137
9.3	Fazit und Handlungsempfehlungen für das PKD-Schleifen	140
10	Zusammenfassung und Ausblick	143
11	Literaturverzeichnis	151
12	Anhang	159

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Großbuchstaben

A	mm^2	Wärmedurchflossene Fläche <i>Heat permeated surface</i>
A_i	μm^2	Normalfläche von Korn i auf Nullniveau <i>Normal area of grain i on zero level</i>
A_{kontakt}	μm^2	Kontaktfläche eines Schleifkorns <i>Contact area of an abrasive grain</i>
$A_{\text{mittel,Korn}}$	μm^2	Mittlere Kontaktfläche eines Schleifkorns <i>Average contact area of an abrasive grain</i>
A_{reib}	mm^2	Reibfläche <i>Friction area</i>
E	MPa	E-Modul <i>YOUNG'S modulus</i>
E_b	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	Bindungsenergie <i>Bond energy</i>
F_A	N	Anpresskraft <i>Contact pressing force</i>
F_H	N	Haftreibungskraft <i>Static friction force</i>
F_n	N	Normalkraft <i>Normal force</i>
$F_{n,s}$	N	Schleifnormalkraft <i>Normal grinding force</i>
F''_n	$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	Flächenbezogene Normalkraft <i>Normal force related to the contact area</i>
$F''_{n,\text{grenz}}$	$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	Grenzwert der flächenbezogenen Normalkraft <i>Limit normal force related to the contact area</i>
F_s	N	Schleifkraft <i>Grinding force</i>

F_t	N	Tangentialkraft <i>Tangential force</i>
$F_{t,s}$	N	Schleiftangentialkraft <i>Tangential grinding force</i>
G	MPa	Schubmodul <i>Shear modulus</i>
G	-	Schleifverhältnis <i>Grinding ratio</i>
H_K	GPa	Härte nach KNOOP <i>KNOOP hardness</i>
K_{Ic}	MPa·m ^{0,5}	Risszähigkeit <i>Fracture toughness</i>
P''	W·mm ⁻²	Flächenbezogene Leistung <i>Area related power</i>
P_c	W	Schleifleistung <i>Grinding power</i>
P_k	-	Periode der Kornhöhenposition <i>Period of grain height position</i>
P_{Laser}	W	Laserleistung <i>Laser power</i>
$P_{\text{max,Laser}}$	W	Maximale Laserleistung <i>Maximum laser power</i>
$P_{\text{mittel,Laser}}$	W	Gemittelte Laserleistung <i>Average laser power</i>
P_r	W	Reibleistung <i>Friction power</i>
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom <i>Heat flux</i>
Q_w	mm ³ ·s ⁻¹	Zeitspanungsvolumen <i>Material removal rate</i>
Q'_w	mm ³ ·mm ⁻¹ ·s ⁻¹	bezogenes Zeitspanungsvolumen <i>Related material removal rate</i>

R^2	-	Bestimmtheitsmaß <i>Coefficient of determination</i>
Ra	μm	Arithmetischer Mittenrauwert <i>Arithmetical mean roughness</i>
Rp	μm	Glättungstiefe <i>Smoothing depth</i>
Rz	μm	Gemittelte Rautiefe <i>Average surface roughness</i>
Rz_K	μm	Kantenschartigkeit <i>Cutting edge roughness</i>
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur <i>Temperature</i>
T_0	$^{\circ}\text{C}$	Referenztemperatur <i>Reference temperature</i>
$T_{\text{max,Probe}}$	$^{\circ}\text{C}$	Maximale Oberflächentemperatur der Probe <i>Maximum surface temperature of the sample</i>
T_p	$^{\circ}\text{C}$	Prozesstemperatur <i>Process temperature</i>
$T_{\text{PKD,max}}$	$^{\circ}\text{C}$	Maximale PKD-Oberflächentemperatur <i>Maximum PCD-surface-temperature</i>
T_s	$^{\circ}\text{C}$	Schmelztemperatur <i>Melting temperature</i>
$T_{\text{SB,max}}$	$^{\circ}\text{C}$	Maximale Schleifbelagtemperatur <i>Maximum grinding layer temperature</i>
$T_{\text{SB,min}}$	$^{\circ}\text{C}$	Minimale Schleifbelagtemperatur <i>Minimum grinding layer temperature</i>
T_{μ}	μm	Schnitteinsatztiefe <i>Chipping depth of cut</i>
T_U	$^{\circ}\text{C}$	Umwandlungstemperatur <i>Conversion temperature</i>
$T_{U,D}$	$^{\circ}\text{C}$	Umwandlungstemperatur eines Diamantschleifkorns <i>Conversion temperature of a diamond abrasive grain</i>

$T_{U,PKD}$	°C	Umwandlungstemperatur von PKD <i>Conversion temperature of PCD</i>
V	-	Vergrößerungsfaktor des Laserscanningmikroskops <i>Magnification factor of the laserscanning microscope</i>
V_{Bindung}	mm ³	Bindungsvolumen der Schleifscheibe <i>Volume of the grinding wheel bonding</i>
V_E	mm ³	Volumen einer Elementarzelle <i>Volume of an elementary cell</i>
V_{mp}	ml·m ⁻²	Spitzenmaterialvolumen <i>Peak material volume</i>
$\dot{V}_{OI}$	mg·h ⁻¹	Ölvolumenstrom der Minimalmengenschmierung Oil volume flow rate of minimum quantity lubrication
V_{Pore}	mm ³	Porenvolumen der Schleifscheibe <i>Pore volume of the grinding wheel</i>
V_{PKD}	mm ³	PKD-Zerspanungsvolumen <i>Chipped PCD-material-volume</i>
V_K	mm ³	Volumen eines Schleifkorns <i>Volume of an abrasive grain</i>
V_{Korn}	mm ³	Kornvolumen der Schleifscheibe <i>Grain volume of the grinding wheel</i>
V_s	mm ³	Verschlissenes Schleifscheibenvolumen <i>Worn grinding wheel volume</i>
V_w	mm ³	Zerspanungsvolumen <i>Chipped material volume</i>

Kleinbuchstaben

a	10 ⁻⁶ ·m ² ·s ⁻¹	Temperaturleitfähigkeit <i>Thermal diffusivity</i>
a_0	nm	Identitätsabstand <i>Length of cell edge</i>
a_{CMX}	10 ⁻⁶ ·m ² ·s ⁻¹	Temperaturleitfähigkeit von CMX850 <i>Thermal diffusivity of CMX850</i>

a_{CTB}	$10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit von CTB010 <i>Thermal diffusivity of CTB010</i>
a_{CTM}	$10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit von CTM302 <i>Thermal diffusivity of CTM302</i>
a_e	μm	Zustellung pro Schleifhub <i>Depth of cut per grinding stroke</i>
a_{ed}	μm	Zustellung pro Abrichthub <i>Dressing depth of cut per stroke</i>
a_{Laser}	mm	Kantenlänge des Laserfokus <i>Edge length of the laser focus</i>
Δa_s	μm	Schleifscheibenaxialverschleiß <i>Axial grinding wheel wear</i>
a_{SB}	$10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit des Schleifbelages <i>Thermal diffusivity of the grinding layer</i>
b	nm	Gitterparameter <i>Lattice parameter</i>
b_{lam}	nm	Breite der FIB-Lamelle <i>Width of the FIB Lamella</i>
b_{PKD}	mm	Kantenlänge der PKD-Schneide <i>Length of the PCD-cutting-edge</i>
b_s	mm	Schleifbelagbreite <i>Width of grinding layer</i>
b_{SB}	mm	Breites des Schleifbelagsegmentes <i>Width of the grinding layer segment</i>
$b_{s, \text{eff}}$	mm	Eingriffsbreite <i>Engagement width</i>
c_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität <i>Specific heat capacity</i>
$c_{p, \text{CMX}}$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität von CMX850 <i>Specific heat capacity of CMX850</i>
$c_{p, \text{CTB}}$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität von CTB010 <i>Specific heat capacity of CTB010</i>

$c_{p,CTM}$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität von CTM302 <i>Specific heat capacity of CTM302</i>
$c_{p,SB}$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität des Schleifbelages <i>Specific heat capacity of the grinding layer</i>
d	mm	Abstand zwischen zwei Thermoelementen <i>Distance between two thermocouples</i>
$d_{Bohrung}$	μm	Durchmesser der Bohrung für Pyrometerfaser <i>Diameter of bore for pyrometer fiber</i>
d_g	nm	Gitterabstand <i>Lattice distance</i>
d_{ges}	mm	Gesamtdicke des Analogiewerkstückes <i>Total thickness of the analog workpiece</i>
d_{HM}	mm	Dicke des Hartmetallsubstrates <i>Thickness of the cemented carbide substrate</i>
d_K	μm	Größe der Diamantkörner im PKD <i>Size of the diamond grains of PCD</i>
d_{lam}	nm	Dicke der FIB-Lamelle <i>Thickness of the FIB Lamella</i>
d_{PKD}	mm	Dicke der PKD-Schicht <i>Thickness of the PCD-layer</i>
d_{Pyro}	mm	Durchmesser der Pyrometerfaser <i>Diameter of the pyrometer fiber</i>
d_{Ronde}	mm	Durchmesser einer PKD-Ronde <i>Diameter of a PCD-blank</i>
$d_{sk,max}$	μm	Maximale Eingriffsbreite eines Diamantschleifkorns <i>Maximum engagement width of a diamond abrasive grain</i>
d_{SLS}	mm	Schleifscheibendurchmesser <i>Grinding wheel diameter</i>
d_{TEM}	nm	Auflösevermögen des Transmissionselektronenmikroskops <i>Resolution of the transelectron microscope</i>

e	J	Energie <i>Energy</i>
e_c	J/mm ³	Spezifische Schleifenergie <i>Specific grinding energy</i>
e_{kin}	J/mm ³	Spezifische kinetische Energie der Späne <i>Specific kinetic energy of the chips</i>
e_r	J/mm ³	Spezifische Reibenergie <i>Specific friction energy</i>
e_{sp}	J/mm ³	Spezifische Schleifenergie zur Spanbildung <i>Specific grinding energy for chip formation</i>
e_v	J/mm ³	Spezifische Verformungsenergie <i>Specific deformation energy</i>
h	mm	Höhe des Analogiewerkstückes <i>Height of the analog workpiece</i>
h_{cu}	μm	Spanungsdicke <i>Chip thickness</i>
$h_{cu,krit}$	μm	Kritische Spanungsdicke <i>Critical chip thickness</i>
$h_{\bar{U}}$	mm	Auskraglänge <i>Projection length</i>
i_E	-	Elementarzellennummer <i>Elementary cell number</i>
k	-	Konstante im Einkorn-Reibmodell <i>Constant in single grain friction model</i>
k_{KSS}	-	Kühlschmierstofffaktor <i>Cooling lubricant factor</i>
k_s	-	Schleiffaktor <i>Grinding factor</i>
k_w	-	Werkstofffaktor <i>Material factor</i>
l	-	Konstante im Einkorn-Reibmodell <i>Constant in single grain friction model</i>