

Holger Reichenbächer

**Trennen mineralischer Werkstoffe
mit geometrisch bestimmten Schneiden**

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Franz Tikal
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Paucksch

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach
Prof. Dr. rer. nat. Klaus Vajen

Tag der mündlichen Prüfung

26. Mai 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2010
ISBN print: 978-3-89958-836-1
ISBN online: 978-3-89958-837-8
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-8379>

© 2010, **kassel university press** GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Bediensteter am Institut für Produktionstechnik und Logistik der Universität Kassel im Fachgebiet Produktionstechnik und Werkzeugmaschinen.

Dem Fachbereichsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Tikal, danke ich herzlich für seine Unterstützung und die hilfreichen Anregungen, die diese Arbeit ermöglichten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Paucksch danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie die eingehende Durchsicht des Manuskriptes.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach und Prof. Dr. rer. nat. Klaus Vajen danke ich für die Bereitschaft zur Teilnahme an der Prüfungskommission.

Mein Dank gilt weiter dem Kollegium des Instituts, das durch die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Danken möchte ich auch allen wissenschaftlichen und studentischen Mitarbeitern, sowie den Studien- und Diplomarbeitern für die wertvollen Anregungen und die tatkräftige Unterstützung beim Aufbau der Versuchslandschaft und bei der Durchführung experimenteller Untersuchungen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich stets unterstützt haben und mir immer das beste Vorbild waren. Meiner Familie und meinen Freunden danke ich dafür, dass sie stets an mich und mein Vorhaben glaubten.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Kathleen, für die vielen Jahre ihrer liebevollen Unterstützung und Geduld, sowie ihrer ständigen Bereitschaft ihre Ziele meinem großen unterzuordnen. Der Gedanke an sie und unsere gemeinsame Zukunft war mir stets ein Ansporn diese Arbeit erfolgreich zu beenden.

Verzeichnisse

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A_c	mm^2	Spanungsquerschnitt
$A_{c,n}$	mm^2	aktueller Spanungsquerschnitt
A_n	mm^2	aktuell gesamter, zerspanter Querschnitt
d	-	Dichtigkeitsgrad
\bar{d}		Effekt / Schätzwert für δ
δ		wahre Mittelwertdifferenz
ε	°	Angriffswinkel der Zerspankraft
F	N	Zerspankraft
F_a	N	Aktivkraft
F_c	N	Schnittkraft
F_D	N	Druckkraft
F_f	N	Vorschubkraft
F_N	N	Normalkraft
F_p	N	Passivkraft
F_R	N	Reibungskraft
F_T	N	Tangentialkraft
f	mm/U	Vorschub
f_z	μm	Zahnvorschub oder Zustellung pro Zyklus

Symbol	Einheit	Bezeichnung
k	-	Faktoranzahl
k_f	N/mm^2	spezifische Vorschubkraft
k_c	N/mm^2	spezifische Schnittkraft
m_{au}	g	Auftriebsgewicht
m_n	g	Nassgewicht
m_{tr}	g	Trockengewicht
n	-	aktuelle Zykluszahl
n_n	-	Stichprobengröße
N	-	Gesamtzahl der Werte
P	N/mm^2	Schnittdruck
p	%	Porosität (Gesteinseigenschaften)
p	-	Zahl der zugeordneten Faktoren (Versuchsplanung)
P_{NF}	N	auf Freifläche wirkende Zerspankraftkomponente (reibungsfrei)
P'_{NF}	N	tatsächlich auf Freifläche wirkende Zerspankraftkomponente (reibungsbefhafet)
P_{NS}	N	auf Spanfläche wirkende Zerspankraftkomponente (reibungsfrei)
P'_{NS}	N	tatsächlich auf Spanfläche wirkende Zerspankraftkomponente (reibungsbefhafet)
R	MPa	einaxiale Druckfestigkeit
R_{tf}	MPa	Biegefestigkeit
r	mm	Radius der Spanfläche
ρ	°	Reibungswinkel
ρ_{roh}	g/cm^3	Rohdichte
s^2		Varianz

Symbol	Einheit	Bezeichnung
s_d		Standardabweichung des Effekts
s_n		Standardabweichung einer Stichprobe
V_F	cm^3	Reinvolumen
V_H	cm^3	Hohlraumvolumen
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_c	$m/min, m/s$	Schnittgeschwindigkeit
$x_{n,i}$		Stichprobeneinzelwert
\bar{y}_n		Stichprobenmittelwert
z	-	Zähnezahl

Abkürzungen

Abkürzung Bedeutung

PKD	polykristalliner Diamant
	allgemein: chemical vapour deposition
CVD	in dieser Arbeit: aus der Dampfphase abgeschiedene Diamant – Dickschicht
CVD-E	elektrisch leitfähige Variante von CVD
exempl.	exemplarische Darstellung
GE	General Electric Company
HPHT	high pressure, high temperature (hoher Druck, hohe Temperatur)
CBN	kubisches Bornitrid
KSS	Kühlschmierstoff

Abbildungen

Abb. 2.1: Phasendiagramm des Kohlenstoffs /57/	4
Abb. 2.2: Presse zur Diamantsynthese /57/	5
Abb. 2.3: Diamant im Brillantschliff /113/.....	8
Abb. 2.4: allgemeines Schema einer galvanischen Bindung /3/.....	10
Abb. 2.5: galvanisch belegte Natursteinsäge /109/	10
Abb. 2.6: allgemeines Schema einer gesinterten Bindung.....	11
Abb. 2.7: Kreissägeblatt mit gesinterten Diamantsegmenten /109/.....	11
Abb. 2.8: PKD – Gefüge (links: Mischkorn, rechts: konstante Korngröße) /72/	12
Abb. 2.9: Formfräser mit PKD – Schneide /118/	14
Abb. 2.10: CVD-Diamant-Dünn- (links) und Dickschicht (rechts) /107/, /108/	15
Abb. 2.11: Diamantabscheidung aus der Gasphase /74/	16
Abb. 2.12: Lage der Lötstellen bei CVD– und PKD – Werkzeugen.....	18
Abb. 2.13: Kreislauf der Gesteine /87/	21
Abb. 2.14: wichtigste, gesteinbildende Minerale /91/, /119/.....	23
Abb. 2.15: Zerlegung der Zerspankraft F nach DIN 6584 /79/	30
Abb. 2.16: Winkel und Flächen einer Schneide /79/	32
Abb. 2.17: Materialtrennmechanismus beim Steinsägen mit segmentierten Diamantwerkzeugen /13/, /32/	34
Abb. 2.18: Phasen der Gesteinszerspanung /120/	37
Abb. 2.19: Kräfte bei der Gesteinszerspanung mit positivem und mit negativem Spanwinkel /120/	38
Abb. 2.20: Einfluss des Spanwinkels auf die Zerspankraft /120/.....	39
Abb. 4.1: Blockschaltbild der Signalverarbeitung /36/	49
Abb. 4.2: Arbeitsplatz zur Verschleißdokumentation	49
Abb. 4.3: PKD – Ronden ($\varnothing = 25$ mm)	51
Abb. 4.4: links: Werkzeughalter; Mitte: Erodieren einer PKD – Ronde; rechts: Schneidelement.....	52
Abb. 4.5: Abweichung der Winkellage der PKD – Elemente	53
Abb. 4.6: links: Schneidelement mit Aussparung zum Positionieren; rechts: gelötetes Werkzeug.....	54
Abb. 4.7: Schweißvorrichtung	54
Abb. 4.8: links: Verlauf des Schweißstroms, rechts: geschweißtes Werkzeug.....	55
Abb. 4.9: Prinzipskizze Schnitt- und Vorschubbewegung	56
Abb. 4.10: erste Version des Linearprüfstands	57
Abb. 4.11: neu entworfener Linearprüfstand	58
Abb. 4.12: Kinematik erster Linearprüfstand.....	59

Abb. 4.13: Kinematik neuer Linearprüfstand	61
Abb. 4.14: veränderte Reihenfolge der Schnittfugen.....	62
Abb. 4.15: Ausfallursachen bei gelöteten PKD - Elementen.....	64
Abb. 4.16: Zerspankräfte beim Schneiden von Nero Assoluto; Versuch auf dem ersten Linearprüfstand; $v_c=60$ m/min, $f_z=100$ μm (exemplarische Darstellung).....	65
Abb. 4.17: Zerspankräfte beim Schneiden von schwarzem Granit; Versuch auf dem Linearprüfstand; $v_c=50$ m/min; $f_z=30$ μm (exemplarische Darstellung).....	66
Abb. 4.18: Einfluss des Schnittvolumens auf die Vorschubkraft (exemplarische Darstellung der Diagrammerstellung).....	67
Abb. 4.19: Spanungsquerschnitt beim Einsatz halbkreisförmiger Schneiden in unterschiedlichen Zustellungssituationen	69
Abb. 4.20: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft (exempl.)	70
Abb. 4.21: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft; reduzierte Darstellung (exempl.)	71
Abb. 4.22: Einfluss des Schnittvolumens bei unterschiedlichen Zustellungen auf die spezifische Vorschubkraft (exempl.)	73
Abb. 4.23: Aufnahmen einer durch Ausbrüche und abrasiven Verschleiß gekennzeichneten Schneide	74
Abb. 4.24: Schneide in verschiedenen Verschleißzuständen	74
Abb. 4.25: Einfluss des Schnittvolumens auf den Verschleißfortschritt (exempl.).....	75
Abb. 4.26: von links: Nero Assoluto, Aalfanger Granit /117/, schwarzer Granit (gleicher Maßstab)	76
Abb. 4.27: Aalfanger Granit beim einachsigen Druckversuch.....	77
Abb. 4.28: schwarzer Granit beim einachsigen Druckversuch.....	77
Abb. 4.29: von links: Bianco Carrara Marmor, Ibbenbürener Sandstein (gleicher Maßstab)	78
Abb. 4.30: Einfluss des Schnittvolumens auf die Vorschubkraft (exemplarische Darstellung).....	80
Abb. 4.31: Einfluss des Schnittvolumens bei unterschiedlichen Werkstoffen auf die spezifische Schnittkraft	81
Abb. 4.32: Einfluss der Gesteinssorte auf die mittlere spezifische Schnittkraft im Eingriff.....	82
Abb. 4.33: Einfluss der Gesteinssorte auf die mittlere Streuung der spez. Schnittkraft im Eingriff.....	82
Abb. 4.34: Einfluss der Gesteinssorte auf den erstellten Kennwert der Steine	83
Abb. 4.35: Einfluss des Schnittvolumens auf die Vorschubkraft, kennwertbereinigt (exempl.)	84
Abb. 5.1: Schneidkörper mit eckiger Spanfläche, rechts nach Einsatz	86

Abb. 5.2: Schneidkörper mit kreisförmiger Spanfläche	86
Abb. 5.3: halbrunde Elementform mit Nut.....	86
Abb. 5.4: Schneidelemente nach dem Einsatz	87
Abb. 5.5: vorerst endgültige Form der Schneidkörper	87
Abb. 5.6: Einfluss des Spanwinkels auf die maximale Schnitt- und Vorschubkraft.....	88
Abb. 5.7: schematischer Korngrößenvergleich der verwendeten PKD – Sorten	89
Abb. 5.8: verwendeter 2 ² -Plan mit Zentrumspunkt.....	90
Abb. 5.9: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung	90
Abb. 5.10: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung	91
Abb. 5.11: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Schneidstoffs	93
Abb. 5.12: Einfluss des Schneidstoffs auf die Standmenge, Box-Plot-Darstellung.....	93
Abb. 5.13: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Spanwinkels und der Zustellung.....	95
Abb. 5.14: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Keilwinkels und der Zustellung bei $\gamma = -20^\circ$	97
Abb. 5.15: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Keilwinkels und der Zustellung bei $\gamma = -25^\circ$	98
Abb. 5.16: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation des Keilwinkels und der Zustellung bei $\gamma = -25^\circ$	99
Abb. 5.17: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation des Werkstoffs und der Zustellung bei $\gamma = -20^\circ$	100
Abb. 5.18: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Werkstoffs und der Zustellung bei $\gamma = -25^\circ$	100
Abb. 5.19: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Schneidstoffs und der Zustellung bei $\gamma = -20^\circ$	102
Abb. 5.20: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung bei $\gamma = -25^\circ$...	103
Abb. 5.21: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung bei $\gamma = -25^\circ$...	104
Abb. 5.22: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Kühlmediums und der Zustellung	105
Abb. 5.23: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation des Kühlmediums und der Zustellung	106
Abb. 5.24: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung	107
Abb. 5.25: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Werkstoffs.....	108

Abb. 5.26: Schneidelemente nach der Zerspanung von 500 cm ³ Sandstein bzw. Marmor	109
Abb. 5.27: Zeichnung des Schneidelements	110
Abb. 5.28: günstige Spanwinkel – Zustellung – Kombinationen	111
Abb. 6.1: Einfluss der Diamantkorngröße im PKD auf den Verschleiß der Schneidkante	113
Abb. 6.2: abrasive Wirkung auf Schneidstoffe mit unterschiedlicher Korngröße	114
Abb. 6.3: Keilwinkelvarianten bei $\gamma = -25^\circ$	116
Abb. 6.4: Materialabtrag im Falle des Rückfederns (links) bzw. bei einer Sekundärspanbildung (rechts)	116
Abb. 6.5: Einfluss der Anzahl der Eingriffe auf die Zerspankraftkomponenten bei $f_z = 0$	117
Abb. 6.6: REM – Aufnahme der drei Bereiche des Anschnitts auf der Glasplatte	118
Abb. 6.7: REM – Aufnahme aus einem tieferen Eingriffsbereich	120
Abb. 6.8: Entstehung der Scherspäne (sekundäre Spanbildung)	121
Abb. 6.9: Einfluss des Schnittvolumens auf den Schneidkantenradius unter Variation des Keilwinkels	122
Abb. 6.10: Einfluss der Schneidkantenverrundung auf den Anteil von Primär- und Sekundärspanbildung am Materialabtrag	122
Abb. 6.11: Einfluss Schnitttiefe und der Versuchszeit auf die maximale Temperatur des Schneidkörpers im Eingriff (500 mm Eingriffslänge, 3 mm Schnittröhre, Versuchsbeginn bei 2 mm Schnittfugentiefe)	124
Abb. 6.12: Trocken und mit Wasserfilm	125
Abb. 6.13: Verhinderung der reinen Festkörperreibung durch den Einsatz von Wasser als Schmierstoff	126
Abb. 6.14: Belastung der Fügestelle	127
Abb. 6.15: Vergleich der absoluten Zerspankraftkomponenten bei 30 und 70 μm Zustellung	129
Abb. 6.16: Einfluss der Zustellung auf die absolute Zerspankraft, die pro Schnittvolumen nötige Eingriffszahl und den Spanungsquerschnitt (qualitative Darstellung)	130
Abb. 6.17: zwei Phasen der Spanbildung	131
Abb. 6.18: Verschleiß durch verschiedene Gesteine	133

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Eigenschaften der Diamantschneidstoffe /74/	20
Tab. 2.2: Ritzhärte nach Mohs, Vickershärte und relative Schleifhärte nach Rosival /29/	24
Tab. 2.3: Rohdichte der Gesteine /80/	25
Tab. 2.4: Reindichte der Gesteine /80/	26
Tab. 2.5: Abrasivitätsklassen /58/	29
Tab. 2.6: Anstieg der Zahl der Faktorstufenkombinationen mit der Faktorenanzahl /53/	42
Tab. 2.7: Effekte und Wechselwirkungen eines Versuchsplan mit 3 Faktoren auf 2 Stufen /53/	42
Tab. 4.1: verwendete PKD - Schneidstoffe	51
Tab. 4.2: Ergebnis Druckfestigkeitsprüfung, Aalfangen Granit	77
Tab. 4.3: Ergebnis Druckfestigkeitsprüfung, schwarzer Granit	77
Tab. 4.4: Kennwerte der verwendeten Werkstoffe	79

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse	V
Formelzeichen	V
Abkürzungen	VII
Abbildungen	VIII
Tabellenverzeichnis	XII
Inhaltsverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Schneidstoff Diamant	3
2.1.1 Einteilung der Diamantschneidstoffe	3
2.1.2 Eigenschaften der Diamantschneidstoffe	20
2.2 Werkstoff Naturstein	21
2.2.1 Klassifizierung der Natursteine	21
2.2.2 Eigenschaften der gesteinbildenden Minerale	23
2.2.3 Eigenschaften der Gesteine	25
2.3 Gesteinsbearbeitung	30
2.3.1 Grundlagen der Zerspanetechnik	30
2.3.2 Steinbearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide	33
2.3.3 Steinbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide	37
2.4 Statistische Versuchsplanung	40
2.4.1 Allgemeines	40
2.4.2 Nomenklatur	40
2.4.3 Faktorpläne	41
3 Stand der Technik	44
3.1 Schneidstoff Diamant	44
3.2 Werkstoff Naturstein	45

3.3 Steinbearbeitung	45
4 Allgemeine Versuchstechnik	49
4.1 Messtechnik	49
4.1.1 Aufnahme der Prozesskräfte	49
4.1.2 Verschleißmessung	49
4.1.3 Schneidkantenvermessung	50
4.1.4 Werk- und Schneidstoffanalyse	50
4.2 Versuchswerkzeuge	50
4.2.1 Schneidstoffe	50
4.2.2 Werkzeugherstellung	51
4.3 Versuchsstand	56
4.3.1 Konzeption des Linearprüfstands	57
4.3.2 Linearprüfstand	57
4.3.3 Versuchsablauf	59
4.4 Vorgehensweise	63
4.4.1 Versuchsplanung	63
4.4.2 Versuchsauswertung	65
4.5 Versuchswerkstoffe	75
4.5.1 Granit	75
4.5.2 Sandstein und Marmor	78
4.5.3 Werkstoffklassifizierung	79
5 Werkzeugentwicklung	85
5.1 Vorversuche	85
5.1.1 Querschnittsform des Schneidelements	85
5.1.2 Spanwinkel	88
5.2 Versuchsreihen zur Werkzeugentwicklung	89
5.2.1 Schnittgeschwindigkeit, Zustellung und Schneidstoff	89
5.2.2 Spanwinkel und Zustellung	94
5.2.3 Keilwinkel	96
5.2.4 Wechsel des Werkstoffs	99
5.2.5 Neuer Schneidstoff	101
5.2.6 Niedrigere Schnittgeschwindigkeit	102
5.2.7 Kühlung	105

5.2.8 Höhere Schnittgeschwindigkeiten mit Wasserkühlung.....	106
5.2.9 Gesteinsklassen	108
5.3 Ergebnisse der Werkzeugentwicklung.....	109
6 Vorgänge an der Schneide.....	112
6.1 Diskussion der Erkenntnisse aus Werkzeugentwicklung	112
6.1.1 Schneidstoff.....	112
6.1.2 Spanwinkel	114
6.1.3 Keilwinkel, Freiwinkel.....	115
6.1.4 Schnittgeschwindigkeit und Kühl- bzw. Spülmedium	123
6.1.5 Belastung der Lötstelle	126
6.1.6 Werkstoff	127
6.1.7 Zustellung	129
6.2 Theorie zur Spanbildung.....	130
7 Zusammenfassung.....	135
8 Schrifttum	138

1 Einleitung

Während sich der Trend in der Metallbearbeitung seit Jahrzehnten von der geometrisch unbestimmten Zerspanung wegbewegt, gibt es beim Trennen mineralischer Werkstoffe nahezu keine marktübliche Alternative. Die für Naturstein und Beton angewandten Seil-, Kreis- und Gattersägen beruhen bspw. alle auf dem Prinzip der geometrisch unbestimmten Schneide. Dabei bietet die geometrisch bestimmte Schneide diverse Vorteile, wie eine höhere Schnittleistung, einen geringeren Schnittspalt und somit einen niedrigeren Energiebedarf. Dennoch sind die Publikationen auf diesem Gebiet zahlenmäßig gering und vor allem theoretischer Natur.

Die folgende Arbeit legt einen Grundstein für das geometrisch bestimmte Trennen mineralischer Werkstoffe. Sie beinhaltet einen Ausgangspunkt für die Entwicklung unterschiedlichster Werkzeuge. Hierfür wurden Schneiden für die Gesteinsbearbeitung entwickelt, die als Grundbaustein für verschiedene Werkzeugtypen Verwendung finden können. Anhand dieser Einzelschneiden konnten zusätzlich Erkenntnisse zu den Vorgängen bei der Zerspanung gesammelt werden, die die Formulierung einer Theorie zur Spanbildung ermöglichten.

Bei der geometrisch unbestimmten Steinbearbeitung wird Diamant aufgrund seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften als Schneidstoff geschätzt und findet daher ein sehr breites Anwendungsspektrum. Aus diesem Grund soll auch für die zu entwickelnden, geometrisch bestimmten Schneiden ein Diamantschneidstoff genutzt werden. Im Kapitel „Grundlagen“ werden die Eigenschaften, Verschleißmechanismen und Anwendungen der unterschiedlichen Diamantschneidstoffe dargelegt, um die Entscheidung für den später verwendeten nachvollziehbar gestalten zu können. Des Weiteren beinhaltet das Kapitel „Grundlagen“ eine Informationssammlung zum Werkstoff Naturstein und zu den Grundlagen der statistischen Versuchsplanung. Auch die Ergebnisse der Literaturrecherche zum Thema Steinbearbeitung, vor allem die gängigen Theorien der Spanbildung, werden im Grundlagenteil dargestellt. Das anschließende Kapitel „Stand der Technik“ beinhaltet zahlreiche Verweise auf Veröffentlichungen, die mit den behandelten Themengebieten verwandt sind und parallele Untersuchungen bieten.

Im Abschnitt „Allgemeine Versuchstechnik“ werden alle Informationen festgehalten, die zur Reproduktion der Ergebnisse dieser Arbeit erforderlich sind. Dazu zählen die Beschreibung des erstellten Versuchsstandes, die Benennung der verwendeten Schneid- und Werkstoffe, sowie die Dokumentation der zum Einsatz gekommenen Prüfgeräte und Messeinrichtungen. Außerdem werden die Schritte zur Herstellung der Werkzeuge ausführlich erläutert.

Das Kapitel „Werkzeugentwicklung“ beschreibt den Prozess der Werkzeug- bzw. Schneidenentwicklung. Dabei werden die verschiedenen Einflussgrößen der geometrisch bestimmten Zerspanung variiert, um die optimalen Betriebspunkte einzugrenzen und Tendenzen bzw. Korrelationen zu erkennen. Die Versuchreihen der Werkzeugentwicklung finden auf einem eigens für diesen Zweck erstellten Versuchsstand statt, der es ermöglicht, die Ergebnisse einzelner Schneiden reproduzierbar zu messen. Die so entwickelten Einzelschneiden sollen sich als Grundbaustein für unterschiedliche Werkzeugtypen verwenden lassen.

Die Schneidenentwicklung bildet die Grundlage für das nachfolgende Kapitel „Vorgänge an der Schneide“. Dort werden die im vorangegangen Optimierungsprozess aufgetretenen Effekte und Tendenzen diskutiert und durch zusätzliche Untersuchungen ergründet. In Kombination mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche im Grundlagenteil, soll dies abschließend zur Formulierung einer Theorie über die Vorgänge an der Schneide beim geometrisch bestimmten Trennen von mineralischen Werkstoffen führen.

Die Ergebnisse der Werkzeugentwicklung bilden somit zusammen mit der formulierten Theorie zur Spanbildung eine solide Grundlage für weiterführende Arbeiten.

2 Grundlagen

2.1 Schneidstoff Diamant

2.1.1 Einteilung der Diamantschneidstoffe

Diamantschneidstoffe werden in zwei Gruppen eingeteilt: Monokristalliner und polykristalliner Diamant. Monokristalline Diamanten stammen entweder aus natürlichen Quellen oder werden synthetisch hergestellt. Durch das Versintern monokristalliner Diamanten entsteht eine Gruppe der polykristallinen Diamantschneidstoffe (PKD). Neuere Herstellungsverfahren können allerdings auch polykristalline Diamantschichten aus einer Gasphase abscheiden (CVD).

2.1.1.1 Natürlicher und synthetischer Diamant

2.1.1.1.1 Vorkommen natürlicher Diamanten

Ein Sanskrit-Text aus Indien, dessen Entstehung auf den Zeitraum 320-295 v. Chr. geschätzt wird, ist das erste schriftliche Zeugnis über Diamanten. Diese indischen Vorkommen waren bis zum Beginn des 18. Jh. die einzigen Bezugsquellen für Diamant weltweit. Dann wurden auch in Brasilien und Südafrika Diamanten entdeckt. Bis Ende des 19 Jh. stammten jedoch alle Diamanten aus alluvialen Sekundärlagerstätten, d.h. sie wurden durch Erosion diamanthaltigen Gesteins freigelegt. Erst im Jahre 1897 konnten in der Nähe der südafrikanischen Stadt Kimberley in einer tief liegenden Gesteinsschicht Diamanten entdeckt werden. Diese Gesteinsschicht wurde als das diamantführende Muttergestein namens Kimberlit erkannt, welches in den trichterartigen Durchschussöfen von lange zurückliegenden Vulkanausbrüchen vorkommt. Diese Erkenntnis ermöglichte Durchbrüche auf dem Gebiet der Lagerstättenerkundung, was fortan weltweit eine systematische Lagerstättensuche initiierte. /93/

Trotz neuerer Funde blieb die Zahl der Lagerstätten gering. Zudem beträgt die typische Konzentration von Diamant in kimberlitischen Primärlagerstätten etwa 5 ppm. Daher ist natürlich gewachsener Diamant als Edelstein eines der teuersten Materialien. /93/

2.1.1.1.2 Entstehung natürlicher Diamanten

Grundsätzlich ist Graphit die bei Normalbedingungen stabile Kohlenstoffmodifikation. Die natürlichen Vorkommen belegen jedoch, dass der Phasenübergang in Graphit

kinetisch so stark gehemmt ist, dass Diamant als metastabile Hochdruckphase über Millionen Jahre nicht umgewandelt wird. Bei der Diamantsynthese, also der künstlichen Erzeugung von Diamanten, wird diese Hemmung der Phasenumwandlung durch Abkühlen der Proben vor der Druckentlastung realisiert. /93/

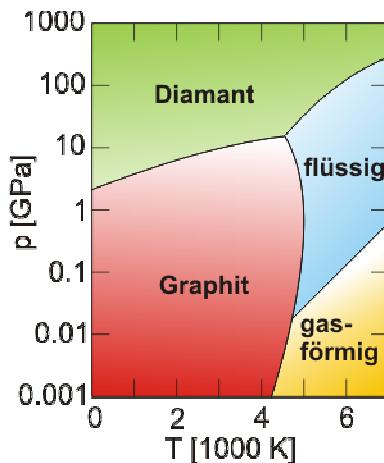


Abb. 2.1: Phasendiagramm des Kohlenstoffs /57/

Bei welchen Bedingungen die natürliche Umwandlung von Graphit zu Diamant stattfindet, ist noch nicht vollständig geklärt. Laborversuche zeigten, dass bei Drücken größer 7 GPa (70 kbar) und Temperaturen oberhalb von 2100 K Diamanten in Kimberlit kristallisieren. Diese Vorgänge spielen sich in vulkanischen Regionen in Tiefen von ca. 160 km ab. /75/, /93/

Collins beschreibt den Prozess der natürlichen Diamantentstehung folgendermaßen: „Obwohl die weiteren Details der terrestrischen Bildung noch kontrovers diskutiert werden, stehen die bisher durchgeführten Untersuchungen weitgehend in Einklang mit der Annahme, dass sich Diamanten in kimberlitischen Schmelzen im Bereich hoher Drücke und hoher Temperaturen durch chemische Reaktionen (Kontaktmetamorphosen) von ultrabasischen Magmen mit geologisch älteren, kohlenstoffhaltigen Gesteinen oder Gasen bildet.“ /93/

2.1.1.1.3 Diamantsynthese

Im späten 18. Jahrhundert entdeckten Lavoisier und Tennant, dass Diamant eine Verbindung aus Kohlenstoff ist. Dies verursachte eine Reihe von Versuchen Diamant aus Graphit synthetisch herzustellen. Da natürlicher Diamant im Erdinneren entsteht, war es für die Wissenschaftler selbstverständlich, dass die Diamantsynthese nur bei hohen Temperatur- und Druckwerten stattfinden kann. Dennoch blieben alle Versuche einer synthetischen Diamanterzeugung im 18., 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts erfolglos. /43/

Erst nach dem zweiten Weltkrieg war die Technik soweit fortgeschritten, dass die für die Diamantsynthese erforderlichen Drücke und Temperaturen bereitgestellt werden konnten. So konnte die General Electric Company (GE) nach Versuchen mit verschie-

denen Katalysatoren am 16. Dezember 1954 erste Diamanten wachsen lassen. GE publizierte die Ergebnisse und sicherte sich die Patente. Später wurde bekannt, dass ein Labor in Schweden bereits ein Jahr vor GE erfolgreich Diamanten herstellte, dies aber weder veröffentlichte noch patentieren ließ. 1957 begann GE Diamanten kommerziell zu produzieren. /43/, /75/

Die Umwandlung von Graphit zu Diamant, unterstützt durch Übergangsmetall-Lösungsmittel/Katalysatoren ist die häufigste Form der Diamantsynthese. Dabei werden in Pressen die Wachstumsbedingungen von Naturdiamanten simuliert (6 GPa und 1600°C). /75/

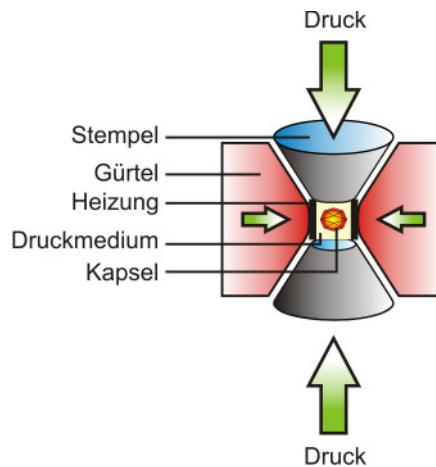


Abb. 2.2: Presse zur Diamantsynthese /57/

Bei diesen Hochdruck- Hochtemperaturverfahren (HPHT - high-pressure / high-temperature) stammt der Kohlenstoff entweder aus der Niederdruckphase Graphit oder er wird direkt aus der Gasphase (z.B. Methangas) abgeschieden /93/. Nahezu alle HPHT – Synthesen nutzen Eisen, Nickel, Kobalt, Mangan, Chrom und deren Legierungen als Katalysator /43/.

Es lassen sich zwei grobe Zielrichtungen bei der kommerziellen Herstellung von Diamanten beobachten: Zum einen die Züchtung großer Einkristalle für Diamantfenster und Werkzeuge zur Bearbeitung sehr harter Werkstoffe und zum anderen die Abscheidung von kristallinen Schichten für die Halbleiter- und Werkzeugindustrie (CVD). /93/

2.1.1.4 Eigenschaften

Die Zahl der Möglichkeiten über den Syntheseprozess die Eigenschaften der entstehenden Diamanten zu steuern ist heutzutage bereits sehr groß. So können sowohl Naturdiamanten annähernd nachgebildet, als auch bestimmte Eigenschaften speziell an die spätere Anwendung angepasst werden. Als Beispiel seien Sorten mit mikrobrechendem Verhalten genannt, die ein gutes freischneidendes Verschleißverhalten haben, dafür jedoch zwangsläufig geringere Festigkeiten aufweisen. /75/

Die generelle Unterscheidung der Eigenschaften von natürlichen und synthetischen Diamanten ist daher schwierig. Dennoch sollen hier beiden Diamantsorten Aussagen aus der Fachliteratur zugeordnet werden.

Eigenschaften natürlicher Diamanten

Naturdiamanten können eine Vielzahl von Einschlüssen und Fehlstellen enthalten. Dadurch werden die für Schleifanwendungen relevanten Eigenschaften eingeschränkt. Außerdem ist die Festigkeit von Diamant zu Diamant nicht garantiert. /75/

Vorteile Naturdiamant: /75/, /83/

- Einzigartiges Verschleißverhalten, da sie aufgrund ihrer hohen Bruchfreudigkeit einen freischneidenden Verschleißcharakter haben;
- Fähigkeit seine Festigkeit nach der Werkzeugherstellung bei hohen Temperaturen beizubehalten (Wärmebeständigkeit bei der Werkzeugherstellung);
- Inertes Verhalten in oxidativen Umgebungen (wie bei der keramisch gebundenen Herstellung);
- Oberflächenreinheit;
- Besseres Bindungsverhalten, aufgrund ihrer Form.

Eigenschaften synthetischer Diamanten

Synthetische Diamanten haben eine gelbliche Färbung, die durch Stickstoff-Verunreinigungen verursacht wird. Zwar haben auch Naturdiamanten Stickstoffanteile, diese treten jedoch in Formen auf, die keine optischen Absorptionen im sichtbaren Spektrum verursachen. Außer Stickstoff können synthetische Diamanten auch Spuren der Lösungsmittel-/ Katalysatormetalle enthalten. /75/

Vorteile der Diamantsynthese: /75/

- Kontrolle der Kristallinität und Größe der Diamantpartikel mittels Einstellung der Synthesekomponenten und -zyklen;
- Erheblich größere Festigkeit als natürliche Diamanten, aufgrund ihrer größeren Kristallperfektion;
- Deutlich höhere Verfügbarkeit;
- Vergrößerung des Anwendungsspektrums für Diamantwerkzeuge.

Ein Nachteil des synthetischen gegenüber den natürlichen Diamanten sind Einschlüsse von Lösungsmittelresten und Katalysatormetallen, welche bei Temperaturen über ca. 800°C innere Graphitisierungen verursachen können, die wiederum eine Verringerung der Festigkeit bewirken. /75/

Allgemeine Eigenschaften monokristalliner Diamanten

Abgesehen von den Eigenheiten, die synthetische von natürlichen Diamanten unterscheiden, weist Diamant allgemein eine große Zahl von Eigenschaften auf, die es deutlich von anderen Materialien abgrenzen:

- Härtestes bekanntes Material /43/, /75/, /78/, /83/;
- Höchste thermische Leitfähigkeit bei Raumtemperatur /18/, /78/;
- Breitestes Transmissionsspektrum aller bekannten Materialien (vor allem in infraroten Wellenlängen) /18/, /78/;
- Geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient (ergibt in Verbindung mit thermischer Leitfähigkeit sehr gute Thermoschockeigenschaften);
- Exzellenter elektrischer Isolator, Ausnahme: bestimmte halbleitende (synthetische) Typen /78/;
- Chemisch inert unterhalb von 500 °C /18/, /43/;
- Kubische Struktur, jedes Kohlenstoffatom hat vier nächste Nachbaratome. Bruch geschieht meist in einer von vier (111) – Ebenen /43/;
- Beginnt bei Temperaturen oberhalb 600 – 700 °C an Luft sehr schnell zu oxidiieren und/oder zu graphitisieren; bei über 900 °C verbrennt Diamant /43/, /75/, /83/;
- Aufgrund der Affinität des Kohlenstoffs zu Eisen löst sich Diamant bei der Bearbeitung von Eisenmetallen auf /43/;
- Biologisch kompatibel, aufgrund der hohen Ähnlichkeit mit Körpereigewebe /78/.

2.1.1.1.5 Verschleiß

Es können im Prinzip vier verschiedene Verschleißerscheinungsformen am Diamantkorn unterschieden werden: /99/

- Adhäsionsverschleiß: Der Diamant haftet an der Werkstückoberfläche, wodurch ganze Partikel vom Werkzeug abgeschert werden.
- Reibungsverschleiß: Sehr harte Kornteile des Werkstücks ritzen die Diamantoberfläche.
- Diffusionsverschleiß: Chemische Reaktionen zwischen dem Werkstück und der Diamantoberfläche (Kohlenstoff) führen zu einer Verringerung der Festigkeit und der Härte des Diamanten.

- Kornbruch: Durch Ermüdung, Stöße, Thermoschock (Kühlmittel) oder Überschreitung der Druckfestigkeit bricht das Diamantkorn oder es splittern kleine Teile ab.

In der Gesteinsbearbeitung sind Adhäsions- und Diffusionsverschleiß nicht von Bedeutung. Kornbruch und Reibungsverschleiß führen hier zu einem mehr oder weniger stetigen Abtrag des Diamanten. Je nach Werkstoff und Bearbeitungsparametern verrunden die Diamanten allmählich oder es treten Splitterbrüche auf. /99/

2.1.1.1.6 Anwendungen

Schmucksteine

Jährlich werden etwa 10 t Naturdiamanten gewonnen. Davon kommen ca. 10 % für die Schmuckindustrie in Frage, der Rest wird als Industriediamant verwendet. /19/

Nur sehr reine Diamanten und solche mit bestimmten Färbungen werden von der Schmuckindustrie genutzt. Durch das Schleifen und Polieren der Kristallflächen werden die besonderen optischen Eigenschaften der Diamanten hervorgehoben und der Wert der Diamanten beträchtlich erhöht.



Abb. 2.3: Diamant im Brillantschliff /113/

Industrielle Anwendung (Industriediamanten)

Der synthetische Diamant hat seit Beginn seiner kommerziellen Vermarktung Einzug in verschiedenste industrielle Anwendungen gehalten. Bis 2005 stammten weniger als 0,5 % der weltweit genutzten Diamanten aus natürlichen Quellen. /75/

Naturdiamanten finden somit nur noch vereinzelt industrielle Anwendung, da die Zahl ihrer Vorteile mit steigendem Entwicklungsstand der Diamantsynthese abnimmt. Bestehende Vorteile der Naturdiamanten sind die geringere Wahrscheinlichkeit des Festigkeitsverlusts bei hohen (Sinter-) Temperaturen und die verfügbaren Abmaße. Denn bis vor kurzem waren die Abmessungen der synthetischen Diamanten stark begrenzt. Außerdem findet natürlicher Diamant noch immer bei galvanisch belegten Werkzeugen Anwendung, da er als für Überplattierung weniger empfänglich gilt. /75/

Die Oberflächenreinheit ist ein wichtiges Kriterium bei der Verarbeitung von Diamanten. Bereits ein geringes Maß an Verunreinigungen kann bspw. bei der Herstellung galvanisch belegter Werkzeuge erhebliche Probleme bereiten. Quellen der Verunreinigungen können Bearbeitungsprozesse (z.B. Form- und Größengebung), Komponentenrückstände durch unzureichendes Reinigen und Restelemente aus der Diamantsynthese (Stichwort Lösungsmittel- / katalytische Metalle) sein. /75/

Allgemein wird Diamant in Partikelform von der Industrie als Schleifmaterial verwendet. Die Diamantpartikel werden dann mit verschiedenen Bindemitteln mit dem Werkzeuggrundkörper verbunden. Je nach Bindemittel eignet sich das Werkzeug für unterschiedlichste Anwendungen: /75/

- In Metallbindungen: Kreissägen von Stein und Baummaterialien, Glasschleifen und –polieren;
- In Kunstharzbindungen: Schleifen von Hartmetallen, Keramiken und Cermet, Bearbeiten von Diamantfomteilen;
- In Keramikbindungen: Rückenschliff von Silizium, Bearbeitung von elektronischen Schaltkreisen.

Beim Trennen von mineralischen Werkstoffen, speziell von Natursteinen, wird Diamant zumeist in einer Metallbindung als Schneidstoff eingesetzt. Hierfür wird die Diamantkörnung entweder galvanisch auf den Werkzeugkörper gebunden oder mit Metallpulver zu Segmenten versintert, die auf den Werkzeugkörper gelötet, geschweißt oder geklebt werden.

Galvanische Metallbindung

Ein metallischer Grundkörper – unterschiedlich kompliziert profiliert – kann galvanisch mit Diamant belegt werden. Dabei wird in mehreren Arbeitsschritten eine Bindung aufgebracht, die das Schleifkorn auf dem Träger fixiert. /27/

Im ersten Schritt wird eine Grundschicht auf den Trägerkörper aufgebracht, die eine begrenzte elastische Lagerung des Schleifkorns erzeugt und den nachfolgenden elektrolytischen Prozess positiv beeinflusst. Anschließend wird das Diamantkorn in einem galvanischen Bad durch die Aufbringung einer Nickelbindung auf den Trägerkörper fixiert. Für bestimmte Anwendungen wird die Bindung dann abschließend mit einer verschleißfesten Deckschicht belegt. /27/

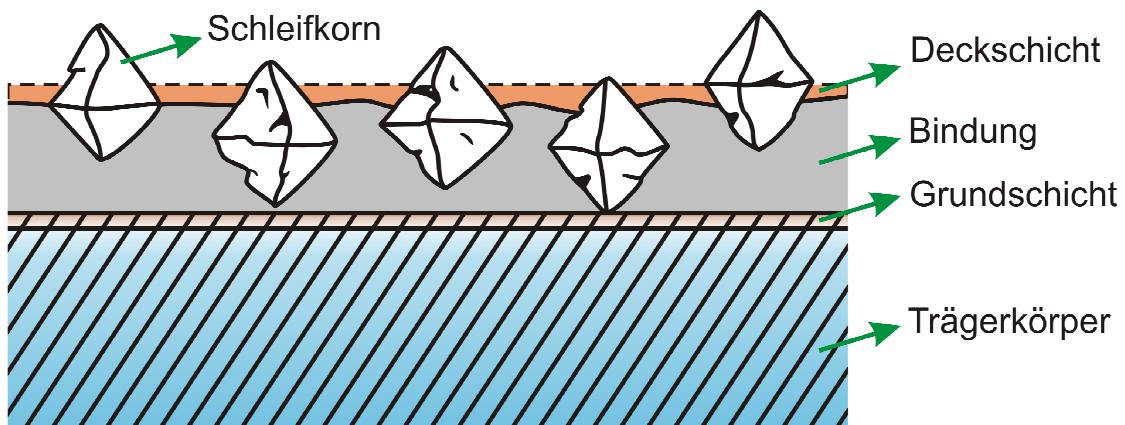


Abb. 2.4: allgemeines Schema einer galvanischen Bindung /3/

Zum einen besteht die Aufgabe der Galvanikbindung darin, das Schleifkorn bis zum Erreichen des Verschleißgrenzbereichs zu halten und zum anderen muss ein Spanraum zwischen den Diamantspitzen gebildet werden, der die Spanabfuhr gewährleisten kann. Die Einstellung der für den Einsatzbereich geforderten Eigenschaften erfolgt durch die Auswahl des Diamantkorns, die Anpassung der Streudichte und der Einstellung der Bindungshöhe. /3/, /27/



Abb. 2.5: galvanisch belegte Natursteinsäge /109/

Galvanisch belegte Werkzeuge werden vor allem zum Trennen von Naturstein, Beton, Mineralgesteinen und faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt.

Gesinterte Segmente

Bei der Herstellung gesinterter Diamantsegmente wird eine Industriediamantkörnung mit einem Metallpulver (bspw. auf Bronzebasis und mit Legierungselementen angereichert) gemischt und granuliert. Anschließend wird das Gemisch in der gewünschten Form kalt- bzw. heißgepresst, nachgearbeitet und auf einen Werkzeuggrundkörper aufgelötet. Die Herstellungsverfahren variieren um die Zusammensetzung des Metallpulvers und den Ablauf der Versinterung. Neuere Verfahren sintern die Schneidsegmente direkt auf den Werkzeugkörper, sodass der zusätzliche Fügeprozess entfällt. /40/

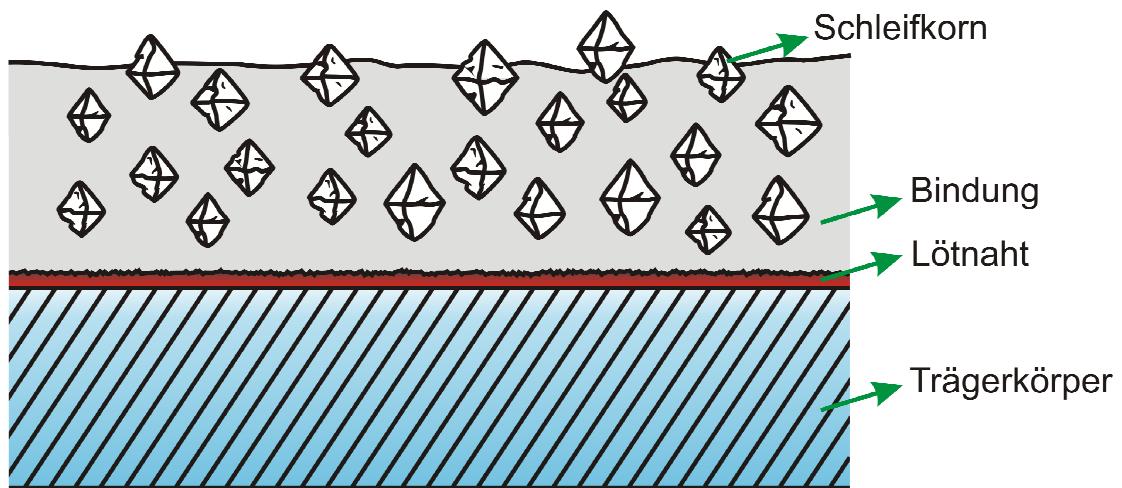


Abb. 2.6: allgemeines Schema einer gesinterten Bindung

Die Diamanten sind in den Schneidelementen in allen drei Raumrichtungen zufällig verteilt und orientiert. Ist eine Diamantlage verschlissen und fällt aus, werden die nächsten Diamanten frei geschliffen. Dieser Verschleißprozess setzt sich solange fort, bis von den teilweise mehrere Zentimeter hohen gesinterten Schneidelementen nur noch dünne Plättchen vorhanden sind. /40/



Abb. 2.7: Kreissägeblatt mit gesinterten Diamantsegmenten /109/

Trennschleifwerkzeuge mit gesinterten Diamantschneidelementen, vor allem Kreis- und Gattersägeblätter, finden eine breite Anwendung in der Natur- und Betonsteinindustrie sowie im Baustellenbereich. Sie werden dort sowohl mit, als auch ohne Wasserkühlung / -spülung verwendet. Auch die Schneidelemente von Sägeseilen sind gesinterte Diamantsegmente.

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet der gesinterten Diamantwerkzeuge sind Schleifbearbeitungen in der metallverarbeitenden Industrie. Allerdings wird der Diamant hier statt in Segmentform meist flächig auf den Werkzeuggrundkörper gebunden.

2.1.1.2 Polykristalliner Diamant (PKD)

2.1.1.2.1 Allgemein

1971 entwickelten Wissenschaftler von GE einen Prozess zur Synthese von polykristallinem Diamant (PKD). Dabei wurde einem Diamantpulver das Element Kobalt als Sinterhilfe beigegeben. Dieses Gemisch wurde einem HPHT-Prozess unterzogen, wodurch es sich zu einem stabilen Gefüge mit ca. 85 % Diamantanteil verwuchs. /43/

2.1.1.2.2 Herstellung

Bei der Herstellung von PKD werden vorsortierte (Größe, Synthesebedingungen) Diamantkörner in Anwesenheit eines metallischen Lösungsmittelkatalysators unter hohen Temperaturen und Drücken versinternt. Es entsteht eine sehr feste, durch Kornwuchs gekennzeichnete Verbundmasse von willkürlich ausgerichteten Diamanten. Das heißt, unter den bei der Versinterung vorherrschenden Bedingungen entstehen (chemische) Bindungen zwischen den einzelnen Diamantkristallen. Durch die Rückstände des Lösungsmittelmetalls und die Hartmetallunterlage, auf die die PKD – Schicht gesintert wird, erreicht PKD einen Grad an Zähigkeit und elektrischer Leitfähigkeit, der bei monokristallinen Diamantprodukten fehlt. /46/, /74/, /83/

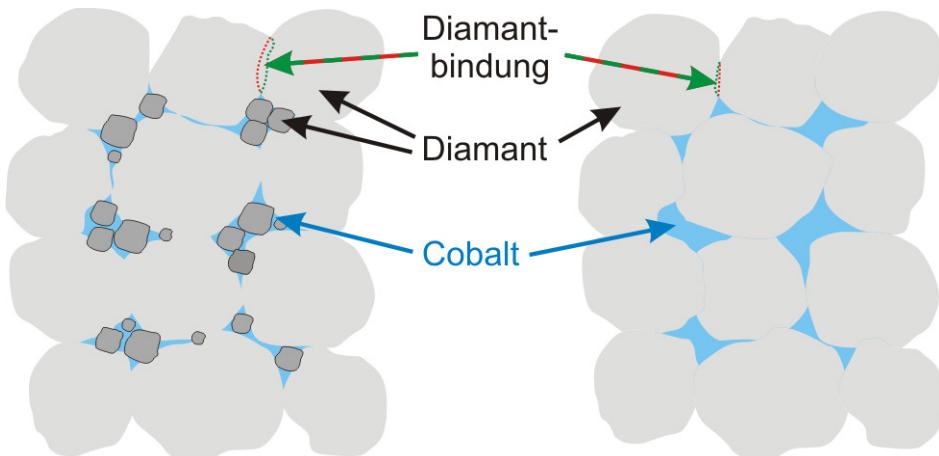


Abb. 2.8: PKD – Gefüge (links: Mischkorn, rechts: konstante Korngröße) /72/

Durch Unterschiede in der Korngröße und den Eigenschaften der verwendeten Diamanten sowie der Sinterbedingungen werden die unterschiedlichen PKD – Sorten verschiedenen Anwendungen gerecht. Geliefert wird PKD als Ronde, die dann durch Erodieren oder spezielle Schleifverfahren die gewünschte Schneidengeometrie erhält.

2.1.1.2.3 Verschleißverhalten

Die Bindefase Kobalt stellt den wesentlichen Nachteil der PKD – Schneidstoffe dar. Adhäsion und Abrasion, die dominierenden Verschleißmechanismen beim PKD, werden vom Kobalt begünstigt. /103/

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass abrasiv wirkende Partikel im Werkstückwerkstoff vor allem die weiche Bindefase des PKD schädigen. Durch Mikroplügen und Mikrospanen verdrängen die Partikel den Kobalt aus dem PKD – Verbund, da diese über eine deutlich höhere Härte als das Bindemetall verfügen. Dadurch wird die Abstützung der Diamantkristalle in der Schneidstoffmatrix vermindert. Ein Ausbrechen ist die Folge. /103/

Die Diamantkristalle können ebenfalls von den abrasiven Partikeln geschädigt werden. Hierbei sind die Verschleißmechanismen Kristallsplitterungen und das Herausbrechen kompletter Kristalle. /103/

Tribologische Prüfungen haben gezeigt, dass feinkörnige PKD – Sorten (2 µm Korngröße) einen geringeren Widerstand gegenüber abrasiven Verschleiß bieten als grobkörnigere (25 µm). /103/

Feinkörnige PKD – Sorten gewährleisten eine bessere Schneidkantengüte, vorausgesetzt es kommen geeignete Verarbeitungsverfahren zur Anwendung. Gröbere PKD – Sorten weisen im Allgemeinen die höhere Verschleißfestigkeit auf. /46/

Eine Versuchsreihe, in der mit PKD – Schneiden Gusseisen mit Vermikulargraphit (GJV) zerspannt wurde, beschreibt Abele in /15/. Es zeigte sich, dass eine gefaste Schneidkante einer scharfen und einer verrundeten bzgl. der Standzeit weit unterlegen ist. Die höchste Standzeit erreichte die verrundete Schneide, allerdings war die Prozessführung bei der scharfen Schneidkante sicherer. Versuchsreihen mit unterschiedlichen PKD – Sorten zeigten dann, dass die grobkörnigste Sorte die größten Standzeiten erzielte. /15/

PKD hat eine geringe Temperaturstabilität. Ab einer Temperatur von 420 °C erfolgt eine Gitterumklappung im Gefüge des Kobalts, welche zu einer signifikanten Volumenausdehnung des metallischen Binders führt. Dies leitet eine Zerstörung des PKD – Verbundes durch Rissbildung ein. Schädigungen bei Temperaturwechselbeanspruchungen sind jedoch nicht auf Thermoschockwirkungen zurückzuführen. Hierbei ist das Versagenskriterium die Oberflächentemperatur. /103/

Bei ebener Oberfläche besitzt Diamant eine sehr geringe Adhäsionsneigung. Daher können an der Oberfläche der Diamanten im PKD meist keine Werkstoffablagerungen aufgrund adhäsiver Beanspruchung festgestellt werden. Im Oberflächenbereich des Binders hingegen, können Werkstoffablagerungen beobachtet werden. Grund dafür sind die größeren atomaren Wechselwirkungen zwischen Kobalt und dem Werkstoff. /103/

2.1.1.2.4 Anwendungen

Allgemein findet PKD als Schneidstoff Anwendung bei der Bearbeitung von Holz- und Holzverbundwerkstoffen, Metallmatrix-Verbundwerkstoffen (MMC), Aluminium-, Kupfer-, Messing-, Bronze- und Magnesiumlegierungen, Keramik, Glaserfaser- und Kohle-

faserwerkstoffe, Kunststoff, Gummi, Hartmetallen und mineralischen Werkstoffen. /12/, /21/, /74/, /125/



Abb. 2.9: Formfräser mit PKD – Schneide /118/

Als Schneidstoff ist PKD auf NE-Metalle wie Aluminium, Kupfer und Magnesium beschränkt, weil Eisen und Legierungsbestandteile wie Kobalt und Nickel eine chemische Affinität zum Kohlenstoff des Diamanten im PKD besitzen. Das heißt, vor allem bei den hohen Temperaturen im Eingriffsbereich (1400 bis 1700 °C) werden thermo-chemische Reaktionen bedingt, die einen erheblich erhöhten Schneidenverschleiß bewirken. /21/

Hoffmann (/46/) gibt Schnittwerte für die Anwendung von PKD als geklemmte Negativplatte an Kunst- und Natursteinen vor: $v_c = 50$ bis 150 m/min, $f_z = 0,1$ bis $0,5$ mm. /46/

Aufgrund der hohen Verschleißbeständigkeit wird PKD auch in Verschleißteilanwendungen mit sowohl eisen- als auch nicht-eisenhaltigen Reibpaarungen verwendet. Hierbei entstehen in der Reib- bzw. Gleitkontaktzone üblicherweise Temperaturen unter 200 °C, so dass keine Einsatzbeschränkungen hinsichtlich Eisenwerkstoffen berücksichtigt werden müssen. /21/, /74/

2.1.1.3 Diamantsynthese aus der Gasphase

2.1.1.3.1 Allgemein

In der zweiten Hälfte der 1970er Jahre gelang den sowjetischen Wissenschaftlern Derjaguin und Fedoseev der Durchbruch bei der Abscheidung von Diamant auf Nicht-Diamantoberflächen bei niedrigen Drücken und mittleren Temperaturen. Seitdem wird die chemische Abscheidung von Diamant aus der Gasphase (CVD) intensiv erforscht und steht seit Ende der 1980er Jahre auch für industrielle Anwendungen zur Verfügung. /54/

Grundsätzlich werden zwei Arten von CVD-Schneidstoffen unterschieden. Zum einen die direkte Abscheidung auf vorhandene Werkzeugschneiden, wobei diese den Cha-

rakter einer Oberflächenbeschichtung mit einer wenige Mikrometer dicken Diamantschicht hat. Diese Werkzeuge werden dann als CVD-Diamant-Dünnschichtwerkzeuge bezeichnet. Zum anderen wird eine mehrere hundert Mikrometer dicke Diamantschicht abgeschieden und anschließend als Schneideneinsatz auf einen Werkzeugträger gelötet. Hier wird dann die Bezeichnung CVD-Diamant-Dickschichtwerkzeuge verwendet. /107/, /108/, /74/

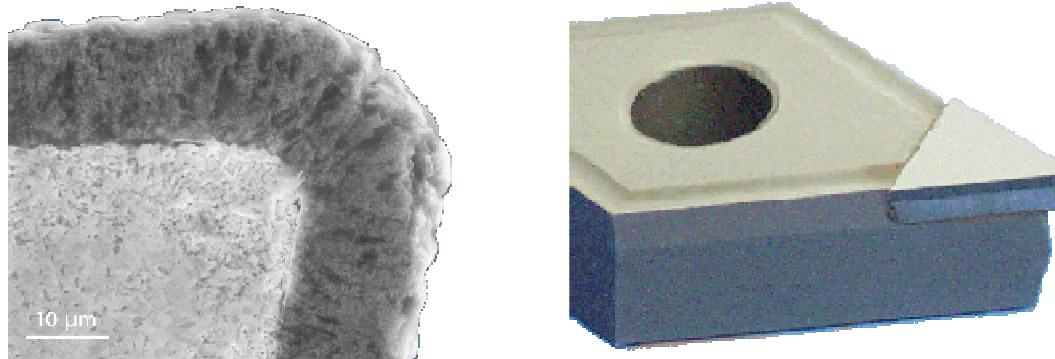


Abb. 2.10: CVD-Diamant-Dünnschicht (links) und Dickschicht (rechts)
/107/, /108/

CVD-Dickschicht steht in direkter Konkurrenz zu PKD. Hohe Kosten für den Schneidstoff CVD-Dickschicht und eine relativ kleine Zahl an Erfahrungswerten stehen derzeit einem ausgedehnteren Einsatz im Wege. Sowohl Dünnschicht als auch Dickschicht besitzen derzeit einen Nischencharakter am Werkzeugmarkt. /103/

Es gibt nur eine sehr geringe Anzahl von Untersuchungen und Publikationen, die sich mit CVD-Diamant-Dickschicht-Werkzeugen beschäftigen. Speziell für das Verschleißverhalten dotierter CVD-Diamant-Dickschichtwerkzeuge (CVD-E) liegen bisher kaum Erkenntnisse vor. Dieser Schneidstoff ist eine Weiterentwicklung des herkömmlichen CVD-Dickschicht, der durch die Dotierung elektrisch leitend und somit erodierbar ist. /103/

2.1.1.3.2 Herstellung

Diamantschichten werden mit aktivierten CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition = chemische Gasphasenabscheidung) hergestellt, wobei die Ausgangsstoffe gasförmig vorliegen. Durch chemische Reaktionen in der kohlenwasserstoffreichen Gasphase wird eine Diamantschicht auf der Zieloberfläche gebildet. Zur Auslösung dieser Reaktion ist eine thermische oder elektrische Aktivierung notwendig. /106/

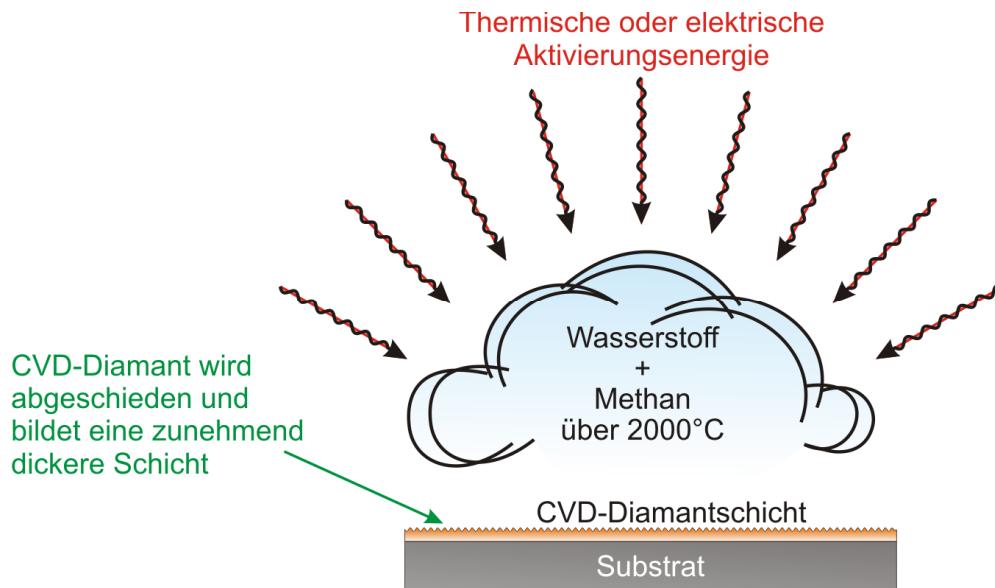


Abb. 2.11: Diamantscheidung aus der Gasphase /74/

Die thermische Aktivierung wird bei der Herstellung von CVD-Dünnenschichtwerkzeugen angewendet. Sogenannte heiße Filamente werden in einem bestimmten Abstand (5 bis 30 mm) zu der Substratoberfläche gehalten. Diese Filamente können stark unterschiedlichen und komplexen Werkzeuggeometrien sehr gut angepasst werden, so dass dreidimensionale, von Hinterschneidungen gekennzeichnete Werkzeuge problemlos beschichtet werden können. /106/

Zur Herstellung von dicken Diamantschichten wird vorzugsweise eine elektrische Aktivierung in Form eines Plasmas angewendet. Diese plasmaaktivierten CVD-Verfahren weisen höhere Schichtraten auf als die thermisch aktivierten. Auf vorzugsweise ebenen Substratoberflächen werden so hochreine oder bis zu 2 mm dicke Diamantschichten erzeugt. Substratmaterialien sind z.B. Silizium, Molybdän oder Hartmetall. Nach der Abscheidung wird die Diamantschicht vom Substrat gelöst und für die jeweilige Anwendung vorbereitet. /106/

Für die Anwendung auf Zerspanwerkzeugen mit geometrisch bestimmter Schneide wird die sehr raue Oberfläche der Diamantschicht geläppt und durch Laserschneiden in die gewünschten Schneidenformen gebracht. Diese werden anschließend im Vakuum-umlötverfahren auf dünne Plättchen aus Molybdän oder Hartmetall aufgebracht. Diese Halbzeuge können dann von Werkzeugherstellern auf verschiedene Werkzeuggrundkörper montiert werden. Durch abschließendes Schleifen und Polieren werden dann die genauen Formen und die benötigte Schärfe der Schneidkante erzeugt. /106/

Da Laserschneiden und Polieren die Geometrievielfalt der CVD-Dickschichtwerkzeuge stark begrenzt, wurde CVD-E entwickelt, das durch eine Dotierung bei der Abscheidung elektrisch leitfähig wird. So ist es möglich, die Schichten mit funkenerosiven Bearbeitungsverfahren zu gestalten. /20/, /106/

2.1.1.3.3 Verschleißverhalten

Anhand der mechanischen und thermischen Kennwerte können keine generellen Aussagen über das Verschleißverhalten von CVD-Werkzeugen getroffen werden. Aufgrund der Komplexität des Werkzeugaufbaus, sowie des Zusammenwirkens dynamischer und kontinuierlicher Belastungen im realen Zerspanprozess, gibt es keine generelle Korrelation zwischen den Verschleißmechanismen und den mechanischen und thermischen Kennwerten von CVD. Mittels Simulation und tribologischen Prüfungen konnten jedoch schon Aussagen über Verschleißmechanismen formuliert werden. /103/

CVD-Dünnschicht

Die Verschleißfestigkeit von CVD-Dünnschichtwerkzeugen ist von der Schichthaftung abhängig. Eine ungenügende Schichthaftung wird z.B. durch örtlich begrenzte Verunreinigungen und Temperaturschwankungen während des Beschichtungsprozesses, Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der zu beschichtenden Oberfläche sowie durch ein hohes Eigenspannungsniveau der CVD-Diamantschicht infolge des Beschichtungsprozesses verursacht. Schichtabplatzungen aufgrund der thermomechanischen Beanspruchung des Werkzeuges bewirken bereits nach geringen Einsatzzeiten einen hohen Werkzeugverschleiß. Bei der Anwendung von CVD-Dünnschicht in Leichtmetalllegierungen und Verbundwerkstoffen werden Schichtabplatzungen durch abrasiv wirkende Kristalle wie Silizium, Siliziumcarbid und Aluminiumoxid und die von ihnen ausgehenden Stoßbeanspruchungen begünstigt. /103/

CVD-Dickschicht (gegenüber PKD)

Gegenüber CVD-Dünnschicht und dem gesinterten PKD besitzt CVD-Dickschicht den höchsten Verschleißwiderstand bei der Bearbeitung von abrasiv wirkenden Leichtmetalllegierungen und Verbundwerkstoffen im kontinuierlichen Schnitt. Bei PKD resultiert der Verschleiß aus der Reaktion der beiden Hauptkomponenten Diamant und Kobalt. Der Verschleiß von CVD-Dünnschicht-Werkzeugen hängt dagegen maßgeblich von der Haftung der dünnen Diamantschicht ab. Das Verschleißverhalten von CVD-Dickschicht-Werkzeugen wird hauptsächlich durch deren Aufbau beeinflusst. /20/, /103/

Tribologie- und Zerspanuntersuchungen zeigten Schneidkantenverrundung, Schneidkantenversatz und Mikroausbrüche als Verschleißerscheinungen bei CVD-Dickschicht-Werkzeugen. Deren Ausprägung war jedoch in kennzeichnender Weise geringer als an PKD – Werkzeugen. Grund dafür ist die große Kantenstabilität des Schneidkörpers, die auf dem hohen Grad der Verwurzelung der Diamantkristalle im Ergebnis des Wachstumsprozesses beruht. /103/

Wird die beim Wachstum zuletzt entstandene Seite der Schicht poliert und als Spanfläche verwendet, werden größere Ausbrüche durch Kristallgrößen im Nanometerbereich verhindert. Die geringe Kristallgröße des CVD-Diamanten erschwert eine Riss einleitung auf der Spanfläche. Durch diese hohe Güte der Spanfläche der CVD-Dickschichtwerkzeuge und die aufgrund der guten Kantenstabilität hohen Schneidenschärfe werden sehr geringe Schnittkräfte ermöglicht. PKD hat demgegenüber deutliche Nachteile, da die weiche metallische Bindefase die Spanfläche aufraut und den Schneidkörper schwächt. /103/

Dennoch ist CVD trotz seiner hohen Verschleißfestigkeit und Härte spröder als PKD. Daher wird das Leistungsverhalten dieses Materials bei Anwendungen mit unterbrochenem Schnitt durch Kantenausbrüche beeinträchtigt. /74/

CVD-Dickschicht-Diamant hat zwar einen hohen Widerstand gegen abrasiven Verschleiß. Bei der Bearbeitung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen mit einem hohen Anteil Siliziumcarbid wurde jedoch auch schon das Ausbrechen von Diamantkristallen beobachtet. Dabei traten Furchen auf der Span- und/oder Freifläche auf, die auf Selbstfurchung der gelösten Diamantkristalle zurückgeführt werden. /20/, /103/

Bei der Zerspanung von Werkstoffen mit harten, abrasiven Einschlüssen tritt ein ausgeprägter Verschleiß im Bereich des Lotes an der Freifläche der CVD-Dickschicht-Werkzeuge auf. Hierbei kommt es zu einer Unterhöhlung des CVD-Diamant-Dickschichteneinsatzes im Bereich der Lotverbindung, wodurch das Werkzeug an Stabilität verliert. Im Gegensatz zum CVD-Dickschicht-Werkzeug wird bei PKD - Werkzeugen die Diamantschicht nicht auf den Hartmetallträger gelötet, sondern direkt darauf gesintert. Dieser Verbund wird dann auf einen Halter gelötet. Damit befindet sich die Lötstelle außerhalb des Kontaktbereichs mit dem Werkstückwerkstoff, wodurch diese keinem nennenswerten Verschleiß unterliegt. /103/

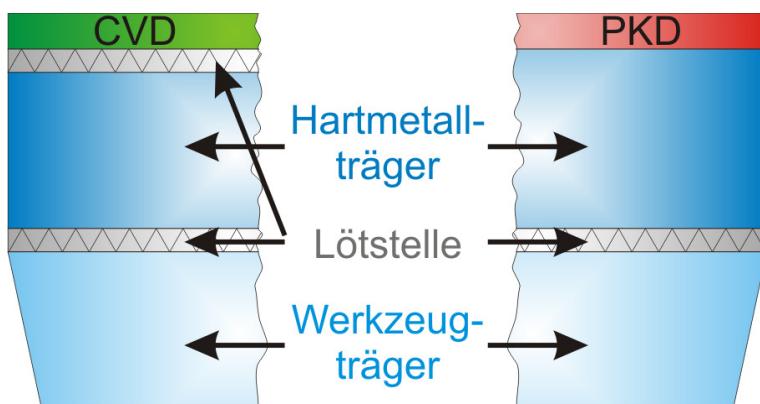


Abb. 2.12: Lage der Lötstellen bei CVD- und PKD – Werkzeugen

CVD-Dickschicht ist sehr temperaturstabil. Der Schneidstoff erträgt kurzzeitig Temperaturen von 800°C ohne Schädigungen an der Schneidstoffoberfläche zurückzubehalten. Die elektrisch leitfähigen Varianten (CVD-E) zeigen aufgrund der Bor-Dotierung bei gleicher thermischer Belastung geringere Schädigungen im Schneidstoffverbund

als die konventionelle CVD-Variante. Die konventionelle CVD-Variante besitzt dagegen hinsichtlich des Widerstandes gegen Thermoschockbeanspruchung deutliche Vorteile gegenüber CVD-E. Es werden Temperaturgradienten von bis zu 850°C ertragen. Zudem wurden bei CVD dank der hohen Wärmeleitfähigkeit und des großen zur Verfügung stehenden Volumens des Diamanten, im Vergleich zu anderen Schneidstoffen, die geringsten Schnitttemperaturen gemessen. Da jedoch die Schnitttemperatur bei der Metallzerspanung je nach Parametereinstellung 200°C nicht übersteigt, haben die thermischen Vor- und Nachteile von CVD und CVD-E keinen Einfluss auf den Verschleiß im Zerspanprozess. Im Standzeitverhalten gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen CVD und CVD-E. /103/

Sowohl triologische Prüfungen als auch Zerspantests haben also vor allem bei der Beständigkeit gegen Abrasion und thermische Beanspruchung deutliche Vorteile des binderfreien CVD gegenüber PKD gezeigt. Die Ursache liegt in der weichen Kobaltbindermatrix des PKD. Da CVD frei von Bindemitteln ist, hat es zusätzlich den Vorteil, dass es chemisch inert ist. /20/, /103/

2.1.1.3.4 Anwendungen

Typische Werkstoffe die mit CVD-Diamant bearbeitet werden können sind u. a.: Metallmatrix-Verbundwerkstoffe, Aluminiumlegierungen, Glas- und Kohlefaser verstärkte Werkstoffe, Graphit, Kunststoffe und Gummi /12/, /74/, /125/. Der Einsatzbereich von CVD-E liegt in Bearbeitungsoperationen, bei denen eine hohe Prozesswärme in der Spanbildungszone vorliegt /20/.

Außer als Schneidstoff hat CVD noch vielfältige andere Anwendungsgebiete. Elektronischen Geräten ermöglichen beispielsweise die Eigenschaften von Diamant den Einsatz bei rauen Umgebungsbedingungen: So werden CVD - Diamantelektroden bei der elektrochemischen Aufbereitung von Abwässern und der biologischen Abwasserbehandlung eingesetzt; als Fenster oder Dom wird CVD in Infrarot – Wärmebildsystemen benutzt; Halbschalen aus CVD werden auf Kugel und Pfanne bei Hüftgelenkprothesen eingesetzt, wo sie die Lebensdauer der Prothese erhöhen und aufgrund der biologischen Verträglichkeit des Kohlenstoffs zu weniger Komplikationen führen. /18/

2.1.2 Eigenschaften der Diamantschneidstoffe

Tab. 2.1 zeigt einen quantitativen Vergleich der Eigenschaften der drei behandelten Diamantschneidstoffe.

Eigenschaften		Diamant (Einkristall)	PKD	CVD
Dichte	[$\times 10^3$ kg/m 3]	3,52	4,12	3,52
Härte (Knoop)	[GPa]	50 – 100	50	85 – 100
E-Modul	[GPa]	1000 – 1100	776	1000 – 1100
Poisson-Zahl	[-]	0,07	0,07	0,07
Zugfestigkeit	[MPa]	1050 – 3000	1260	450 – 1100
Biegewechselfestigkeit	[GPa]	2,9	1,2	1,3
Druckfestigkeit	[GPa]	9,0	7,6	9,0
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C	[W/mK]	600 – 2200	560	500 – 2000
Wärmeleitfähigkeit bei 200 °C	[W/mK]	600 – 1100	200	500 – 1100
Wärmediffusion	[cm 2 /s]	5,5 – 11,6	2,7	2,8 – 11,6

Tab. 2.1: Eigenschaften der Diamantschneidstoffe /74/

Auffällig sind die großen Spannen der mechanischen Kennwerte von einkristallinen Diamanten und CVD, während die Werte von PKD konkret angegeben werden können. Der polykristalline Aufbau des PKD ergibt einen statistisch isotropen Gesamtkörper, in dem die Anisotropie der einzelnen, einkristallinen Diamantpartikel durch deren regellose Verteilung ausgeglichen wird. Deshalb weist PKD nicht die Härteanisotropie und die Spaltbarkeit monokristalliner Diamanten auf, erreicht andererseits aber auch nicht die Härtewerte eines Diamant-Einkristalls in dessen „härtester“ Richtung. Zumal die Härte von PKD zusätzlich durch den Grad des Zusammenwachsens der einzelnen Kristalle und deren Bindung an den Binder beeinflusst wird. CVD ist zwar ebenfalls ein polykristallines Gebilde. Da die einzelnen Kristalle jedoch gleichmäßig vom Substrat empor wachsen, überwiegen einige Gitterrichtungen, sodass kein statistischer Ausgleich deren Anisotropie vorliegt. /54/, /74/

2.2 Werkstoff Naturstein

Mineralische Werkstoffe sind Stoffe, die direkt als anorganische Naturstoffe oder nach einer physikalisch-chemischen Umwandlung in der Volkswirtschaft Anwendung finden. Ganze Industriezweige, wie die Baustoff- oder die Glasindustrie, haben mineralische Werkstoffe als Grundlage. /67/

Ein Naturstein ist ein durch einen geologischen Prozess gebildeter und durch Bohren, Sägen, Sprengen gewonnener Fels oder Felsblock. /61/

2.2.1 Klassifizierung der Natursteine

Die Vielfalt der Natursteine macht es notwendig eine Klassifizierung aufzustellen. Die Wissenschaft unterteilt die Natursteine nach ihrer geologischen Entstehung in drei große Gesteinsgruppen: magmatische Gesteine, Sedimentgesteine, metamorphe Gesteine. Die drei Gesteinsgruppen stehen über den Kreislauf der Gesteine miteinander in Beziehung. In diesem Kreislauf gehen die einzelnen Gesteinstypen unter Einwirkung verschiedener Ursachen ineinander über. /42/, /66/, /70/, /84/

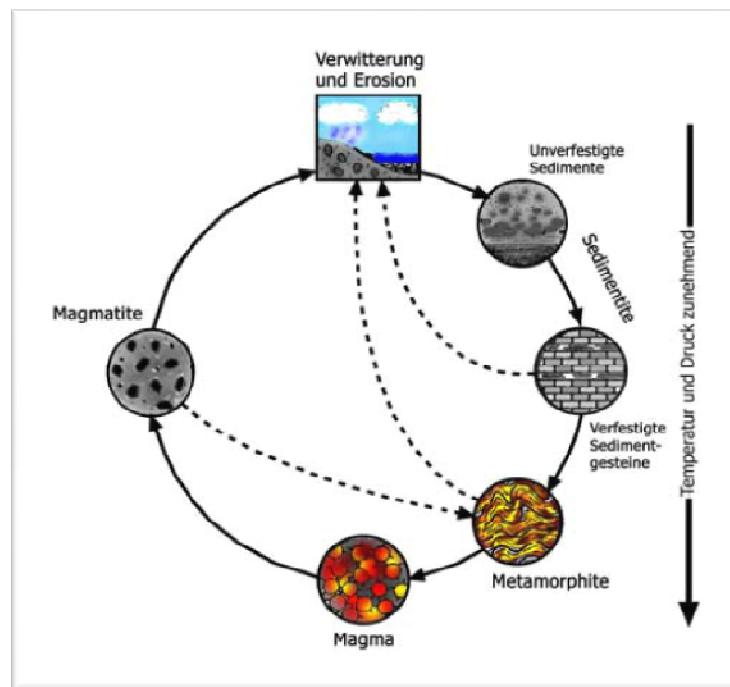


Abb. 2.13: Kreislauf der Gesteine /87/

2.2.1.1 Magmatische Gesteine

Magmatische Gesteine (Erstarrungsgesteine) bilden sich infolge des Abkühlens und des Verhärtens des Magmas sowohl in der Tiefe, also innerhalb der Erdrinde, als

auch auf der Erdoberfläche nach dem Austritt. Je nachdem teilen sie sich dann in Tieffengesteine oder Plutonite und Ergussgesteine oder Vulkanite auf. /4/, /70/, /84/, /94/

Plutonite (Tieffengesteine) sind gekennzeichnet durch sehr langsames Auskristallisieren und Abkühlen in 2-6 km Tiefe. Sie haben eine grobkristalline Struktur. Die Minerale können zu großen Kristallen von 1 mm bis 10 mm wachsen und bilden ein gleichmäßiges, dichtes und richtungsunabhängiges Gefüge. Vertreter dieser Gruppe sind Granite und Diorite. /4/, /70/, /84/

Vulkanite (Ergussgesteine) erstarren innerhalb von wenigen Tagen oder Wochen beim Ausfluss von Magma an der Erdoberfläche oder unter Wasser. Sie weisen zum Teil Fließstruktur und kleine Hohlräume auf. Vertreter dieser Gruppe sind Basalte und Basanite. /4/, /70/, /84/

Unterschiede bezüglich des chemischen Aufbaus lassen sich durch den Gehalt an Siliziumdioxid (SiO_2) in der jeweiligen Sorte festlegen. Diesem Merkmal entsprechend werden sie eingeteilt in saure (SiO_2 75-65%), intermediäre (65-52%), basische (52-40%) und ultrabasische (<40%). Der Säuregehalt wird auch durch die Farbe und die relative Dichte der Sorte gekennzeichnet. Je saurer das Gestein ist, desto heller ist es. Die dunkle Färbung basischer Magmatite hängt vom Vorhandensein farbiger Minerale wie schwarzem Glimmer, Augit, Olivin ab. /4/, /70/, /84/

2.2.1.2 Sedimentgesteine

Sedimentgesteine (Ablagerungsgesteine) sind durch Verwitterung und Abtragung verschiedener Gesteine abgelagerte Produkte. Sie lassen sich nach ihrer Entstehung in drei Gruppen teilen: /4/, /84/

- Klastische Sedimente entstehen durch Ablagerung von Gesteinsbruch, z.B. Sandstein, Grauwacke;
- Chemische Sedimente entstehen durch Auskristallisieren von Mineralen aus einer wässrigen Lösung, z.B. Salzgesteine, Gips- und Anhydritgestein;
- Organische Sedimente entstehen durch Ansammlung abgestorbener Kalkorganismen, z.B. Kieselschiefer, Kalksteine.

2.2.1.3 Metamorphe Gesteine

Metamorphe Gesteine (Umwandlungsgesteine) sind in größerer Tiefe der Erdrinde zu finden. Sie entstehen aus magmatischen Gesteinen oder Sedimentgesteinen durch sehr hohe Drücke und Temperaturen. Dadurch entsteht eine komplette oder bedeutende Änderung im mineralogischen Aufbau, in Struktur und Textur. Wichtigste metamorphe Gesteine sind Marmore, Quarzite, Gneise. /4/, /70/, /84/

2.2.2 Eigenschaften der gesteinbildenden Minerale

Die Eigenschaften der Gesteine hängen im Wesentlichen von den Mineralien bzw. Mineralgemengen ab, die nach Art und Menge den Charakter der Gesteine bestimmen /42/. Mineralien sind chemisch homogene und physikalisch einheitliche, kleinste Teile der Gesteine und in der Regel kristallin. Es gibt mehr als 3.000 Mineralienarten, davon treten allerdings nur wenige häufig und regelmäßig als Gemengeteil von Gesteinen auf. Die wichtigsten gesteinbildenden Mineralien gehen aus Abb. 2.14 hervor. /91/, /119/

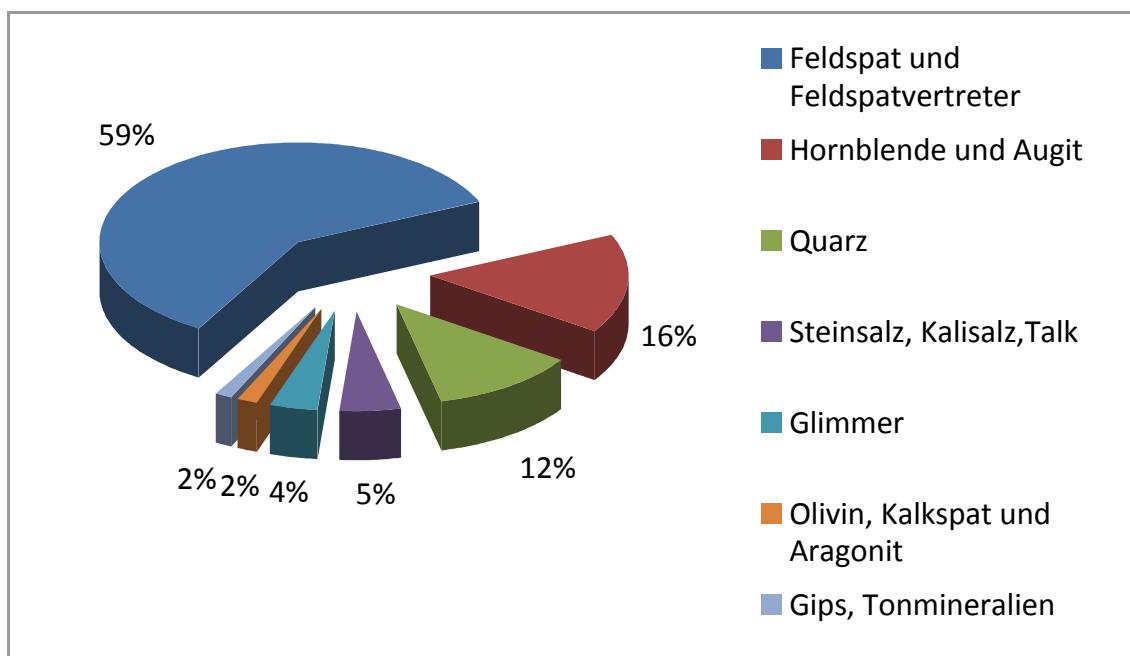


Abb. 2.14: wichtigste, gesteinbildende Minerale /91/, /119/

Mineralien verfügen über eine Reihe von charakteristischen Eigenschaften, die großen Einfluss auf die technischen Eigenschaften der Gesteine haben. Diese Eigenschaften hängen vom Aufbau und der Bindungsstärke der Atome im Kristallgitter ab. Die Beurteilung erfolgt nach Härte, Festigkeit, Dichte, Struktur und Witterungsbeständigkeit sowie nach Farbe und Glanz. Wichtige Eigenschaften der Mineralien werden in den nächsten Abschnitten näher betrachtet. /70/, /84/

2.2.2.1 Härte der Mineralien

Härte ist der Widerstand gegen einen mechanischen Eingriff auf die Oberfläche eines Materials. Die von Friedrich Mohs (1773-1839) aufgestellte Härteskala der Mineralien dient in der Mineralogie immer noch als Maßstab. Mohs legte zehn Minerale als Referenz fest und bezeichnete sie mit den Zahlen 1 – 10. Das Mineral mit der höheren Zahl ritzt jeweils die Minerale mit niedrigerer Nummer, wird aber selbst geritzt von dem Mineral mit höherer Nummer /42/, /44/, /84/, /119/. Die als Referenz genutzten Minerale sind:

le sind in Tab. 2.2 aufgeführt. Inzwischen wurde festgestellt, dass die Abstände der zehn Stufen sehr ungleich sind. /70/

Mohssche Ritzhärte	Mineral	Vickershärte [N/mm ²]	Relative Schleifhärte nach Rosival
1	Talk	20	0,03
2	Gips	300	1
3	Kalkspat	1700	3,75
4	Flussspat	2430	4,17
5	Apatit	5980	5,42
6	Feldspat	9120	31
7	Quarz	10980	100
8	Topas	12260	146
9	Korund	20590	833
10	Diamant	98070	117000

Tab. 2.2: Ritzhärte nach Mohs, Vickershärte und relative Schleifhärte nach Rosival /29/

Da Natursteine aus verschiedenen Mineralien mit sehr unterschiedlichen Härten bestehen, ist die Härteskala nach Mohs nicht auf die Gesteine übertragbar. /84/, /94/

2.2.2.2 Dichte der Mineralien

Die Dichte von Mineralien ist eine kristalltypische, richtungsabhängige Konstante. Die Bestimmungsmethoden sind aufwendig und ungenau, weil die Kristallarten in der Natur chemisch stark verunreinigt vorkommen. Das kann zu erheblichen Abweichungen führen. Die Dichtewerte der gesteinsbildenden Mineralien liegen in einem kleinen Intervall zwischen 2,2 und 3,6 g/cm³ relativ eng beieinander. /70/

2.2.3 Eigenschaften der Gesteine

Gesteine sind aus unterschiedlichen Mineralien aufgebaut. Ihre Eigenschaften sind daher von den Eigenschaften der Mineralien selbst und von der Beschaffenheit ihres Verbunds abhängig.

2.2.3.1 Dichte

Da die Gesteine heterogene Gemenge von Mineralien sind und Porenräume besitzen, wird hier zwischen Rohdichte und Reindichte unterschieden.

Im Durchschnitt haben magmatische Gesteine (Bsp.: Granit) die höchste Dichte und Festigkeit, dann folgen die metamorphen Gesteine (Bsp.: Marmor) und schließlich die Sedimentgesteine (Bsp.: Sandstein). /92/

2.2.3.1.1 Rohdichte

Die Rohdichte ρ_{roh} ist die Dichte eines porösen Festkörpers, basierend auf dem Volumen einschließlich der Porenräume.

$$\rho_{roh} = \frac{m_{tr}}{v_{roh}} \quad (2.1)$$

$$|v_{roh}| = |m_n - m_{au}| \quad (2.2)$$

Gestein	Rohdichte [g/cm ³]
Granit	2,6...2,8
Marmor	2,7...2,9
Sandstein	2,0...2,6

Tab. 2.3: Rohdichte der Gesteine /80/

2.2.3.1.2 Reindichte

Die Reindichte ρ_0 ist volumenbezogene Masse der Gesteine, wobei Hohlräume bei der Bestimmung des Volumens nicht berücksichtigt werden. Somit ergibt sich diese Dichte nur aus der Summierung der Dichten der einzelnen Minerale und hängt nicht von der Porosität ab.

Gestein	Reindichte [g/cm ³]
Granit	2,6...2,8
Marmor	2,7...2,9
Sandstein	2,6...2,7

Tab. 2.4: Reindichte der Gesteine /80/

2.2.3.2 Dichtigkeitsgrad d und wahre Porosität p

Die Porosität p eines Gesteins bestimmt seine Festigkeit, thermische Leitfähigkeit und andere qualitative Eigenschaften. Mit steigender Porosität nimmt die Härte des Materials ab, da die Bindekräfte zwischen den einzelnen Mineralien geringer werden. Das bedeutet, dass die Porosität das prozentuale Verhältnis zwischen Mineralen und Poren in einem Gestein angibt. /84/

$$d = \frac{\rho_{roh}}{\rho_0} \quad (2.3)$$

$$p = (1 - d) \cdot 100 \quad (2.4)$$

Alternativ lässt sich die Porosität als Verhältnis von Hohlraumvolumen V_H zum Gesamtvolumen, mit V_F als Reinvolumen des Feststoffes, angeben. /84/

$$p = \frac{V_H}{V} = \frac{V_H}{V_H + V_F} \quad (2.5)$$

Metamorphe Gesteine haben normalerweise eine sehr geringe Porosität, die selten über 1% liegt. Bei Sedimentgesteinen hingegen weist die Porosität mitunter deutlich höhere Werte auf und kann bei Sandsteinen 25% bis 30% betragen. Die Porosität magmatischer Gesteine geht in der Regel gegen Null und somit auch die möglichen Wassergehalte. Ohne Porosität entspricht die Dichte der Festsubstanz der Dichte des Gesteins. /94/

2.2.3.3 Mechanische Eigenschaften

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Gesteinen werden hauptsächlich Biegezug-, Spaltzug-, Druck- und Abriebfestigkeit herangezogen. Von besonderer Bedeutung für die Festigkeit von Naturwerksteinen ist das Gefüge der Gesteine. In diesem Zusammenhang sind auch Korngefüge, Bindemittel- und die Porenstruktur sowie die Ausbildung der Kontaktflächen zwischen den Körnern maßgebliche

Einflussgrößen. Die mechanischen Eigenschaften der Gesteine sind als vektorielle Größen richtungsabhängig. /70/, /84/, /88/, /94/

2.2.3.3.1 Festigkeit

Bei Gesteinen mit anisotropem Gefüge, bei denen sich also die physikalischen Eigenschaften mit der Raumrichtung ändern, ist die Druckfestigkeit unterschiedlich und muss getrennt gemessen und ausgewertet werden. Somit müssen die Prüfkörper mit definierter Lage der Textur präpariert werden. Werden Prüfkörper mit anisotropem Gefüge in der falschen Richtung belastet, führt dies aufgrund von Schichtungen und Schieferungen schnell zur Zerstörung. Hingegen ist die Druckfestigkeit beim einaxialen Druckversuch in der stabilsten Richtung (Krafteinleitung senkrecht auf das Schichtpaket) teilweise sogar höher als im isotropen Gestein. /84/, /94/, /119/

Druckfestigkeit

DIN EN 1926 beschreibt den einachsigen Druckversuch, bei dem der Prüfkörper einer einfachen geometrischen Form entspricht. Da die Druckfestigkeit relativ einfach zu bestimmen ist, wird sie in der Praxis universell angewandt. Beim Versuch dient ein Würfel oder ein Zylinder als Prüfkörper, der in einem Prüfstand bis zum Bruch vertikal belastet wird. Die Achse des Prüfkörpers muss beim Versuch senkrecht zu seinen Anisotropieebenen verlaufen. Die einachsige Druckfestigkeit R wird dann als Quotient aus der maximalen Bruchlast F und dem Prüfkörperquerschnitt A errechnet und in Megapascal [MPa] angegeben. /29/

Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit wird nach DIN EN 12372 an rechteckigen, prismatischen Probekörpern durchgeführt. Die Probe wird auf zwei Walzen gelagert und eine dritte Walze, die mittig auf der Probe liegt, wird dann nach unten gedrückt (3-Punkt-Biegeversuch).

Die Biegefestigkeit R_{tf} wird aus der Bruchlast F , den Probenabmaßen (Breite b und Höhe h) und dem Auflagerabstand l berechnet und ebenfalls in Megapascal angegeben. /28/

Zugfestigkeit

Durch lineare Kraftübertragung auf den Probenkörper erfolgt eine keilförmige Ausbreitung des Drucks. Die resultierende Zugkraft führt zum Reißen der Probe. Oder einfach ausgedrückt: das Gestein wird gespalten (Spaltzugversuch). Anders als die Druckfestigkeit ist die Zugfestigkeit hauptsächlich von der Kornbindung abhängig. Die Festigkeit der Körner spielt erst dann eine Rolle, wenn die Kornbindung größer ist als die Kohäsion innerhalb der Einzelkristalle von Quarzit. /94/

2.2.3.3.2 Härte und Abrasivität von Gesteinen

Die Härte von Gesteinen hängt neben der Zusammensetzung aus einzelnen Mineralen, deren Größe und Form auch von Korngröße, Verzahnungsgrad, Druckfestigkeit, Elastizitätseigenschaften usw. ab. Daher existiert kein physikalischer Kennwert, der die Härte definieren und quantifizieren kann. /98/

In der Geologie unterscheiden sich harte, mittelharte und weiche Festgesteine.

- Harte Festgesteine zeichnen sich durch hohe Druckfestigkeiten infolge fester Bindung der einzelnen Mineralkörper und großen Gehalt an harten Mineralien (Mohssche Härteskala bzw. Ritzhärte) aus. Hierzu sind z.B. Granit und quarzitischer und verkieselter Sandstein mit Druckfestigkeit über 180 N/mm^2 zu zählen. /23/
- Mittelharte Festgesteine sind eine Gruppe von Festgesteinen, deren Druckfestigkeiten zwischen 80 und 180 N/mm^2 . /23/
- Weiche Festgesteine sind Gesteine, die sich durch geringere Druckfestigkeiten ($< 80 \text{ N/mm}^2$) ausweisen. Gründe dafür sind eine unzureichende Verwachsung der harten Mineralkörper (z.B. schwach verkieselter Sandstein) oder eine Verkittung harter Mineralkörper mit weicheren Mineralien (z.B. Kalksandstein). Zu dieser Gruppe zählen die Gesteine aus weichen Mineralien wie z.B. Marmor und Dolomit. /23/

Ebenso wie die Härte wird die Abrasivität von Natursteinen von seiner Struktur und Textur sowie von dessen gesamten Mineralbestand bestimmt. Im Gegensatz zur Härte hat die Abrasivität von Gesteinen eine direkte verschleißende Wirkung auf ein schleifendes, sägendes oder bohrendes Werkzeug. Als abrasiv wirkende Minerale sind alle Mineralien anzusehen, deren Mohssche Härte größer ist als diejenige des Schneidstoffs. /6/

In der Tab. 2.5 sind aus Untersuchungen hervorgegangene Gesteinsklassen dargestellt. Innerhalb einer Klasse weisen die Gesteine annähernd die gleichen Verschleißmerkmale auf. Die Untersuchungen orientieren sich am Gewichtsverlust eines Stahlstifts, der auf dem Prüfkörper gerieben wird. /58/

Klassen	Merkmale	Abrasivität in mg	Gesteine
I	sehr geringe Abrasivität	<5	Kalkstein Marmor
II		5 ... 10	Argillit Alepolith
III		11 ... 18	feinkörniger Sandstein
IV		19 ... 30	feinkörniger Sandstein Quarzkalkstein
V		31 ... 45	grobkörniger Quarzsand- stein; Gneis, Diorit Gabbro
VI		46 ... 65	grobkörniger Granit Gneis
VII		66 ... 90	Granit
VIII		>90	Korund

Tab. 2.5: Abrasivitätsklassen /58/

Für die Ermittlung der Härte und der Abrasivität gibt es bereits über 200 Verfahren. Allerdings haben nur wenige eine weite Verbreitung gefunden. Der Bezug auf ein technisches Härteprüfverfahren (z.B. Vickers-Härte) ist grundsätzlich möglich. Allerdings existieren bei keinem der gängigen technischen Verfahren (Vickers, Brinell, Rockwell) in ausreichendem Maße Mineralhärtebestimmungen. Diese Verfahren sind hauptsächlich für die Härteprüfung von Stahl und anderen metallischen Werkstoffen ausgelegt. /98/

2.2.3.3.3 Elastische Eigenschaften

Da Gesteine ein sprödes Verhalten zeigen, ist ihr plastischer Verformungsbereich relativ klein. Elastisches Verhalten liegt nur im linearen Teil der Last - Verformungskurve vor. Dabei ist der elastische Bereich im Allgemeinen bei Druckbelastung größer als bei Zug. /98/

2.3 Gesteinsbearbeitung

2.3.1 Grundlagen der Zerspanetechnik

Die Grundlagen der in dieser Arbeit verwendeten Zerspanetechnik sollen am Beispiel des Drehens von metallischen Werkstoffen erläutert werden, da die Literatur die Bearbeitung mineralischer Werkstoffe nicht als Zerspanungsvorgang behandelt. Dennoch sind die Bezeichnungen der Kräfte und deren geometrische Zuordnung eine wesentliche Grundlage der vorliegenden Arbeit.

2.3.1.1 Zerspankraft und deren Komponenten

Die Zerspankraft F ist die Kraft, die bei der Zerspanung auf das Werkstück wirkt. Die Zerspankraft wird in die zwei Komponenten Aktiv- und Passivkraft (F_a und F_p) zerlegt. Dabei zeigt die Aktivkraft in die Bearbeitungsrichtung, sie liegt also in der Arbeitsebene und ist an der Zerspanleistung beteiligt. Die Passivkraft ist die Projektion der Zerspankraft auf eine senkrecht zur Arbeitsebene liegende Ebene. Sie ist an der Zerspanleistung unbeteiligt. /79/

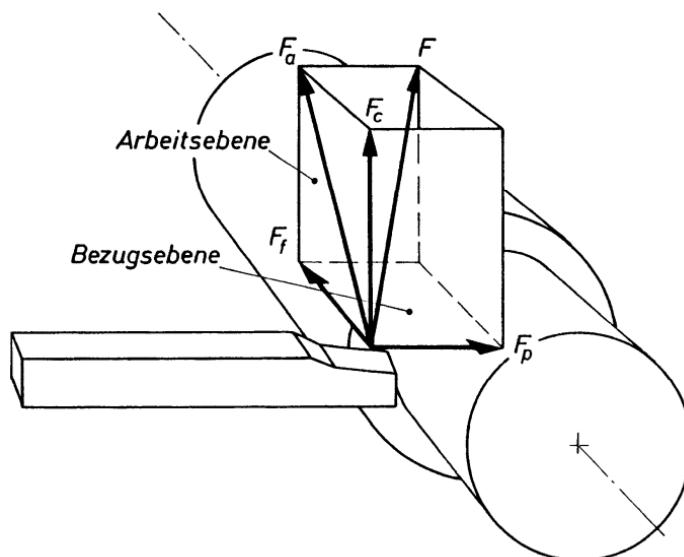


Abb. 2.15: Zerlegung der Zerspankraft F nach DIN 6584 /79/

Abb. 2.15 zeigt die Zerspankraft mit ihren Komponenten. Zudem ist in dieser Abbildung die Zerlegung der Aktivkraft in die Schnittkraft F_c und die Vorschubkraft F_f abgebildet. Hierbei stellt die Schnittkraft die Projektion der Zerspankraft in die Schnittrichtung dar. Sie ist bei der Metallbearbeitung die wichtigste Komponente der Zerspankraft, da der Leistungsbedarf für das Zerspanen ausschließlich von ihr abhängt. Auch die Belastung der Schneide wird maßgeblich von der Schnittkraft beein-

flusst. Die Vorschubkraft ist die Projektion der Zerspankraft in die Vorschubrichtung. /79/

2.3.1.2 Kinematische Bezeichnungen

Die Schnittbewegung ist als die Bewegung definiert, die bei einem Hub oder einer Umdrehung eine einmalige Spanabnahme bewirken würde. Die Vorschubbewegung ist erforderlich, um eine mehrmalige oder kontinuierliche Spanabnahme während mehrerer Hübe oder Umdrehungen zu realisieren. /79/

Analog zur Bezeichnung der Kräfte werden die Geschwindigkeiten nach deren Richtung bezeichnet. So ist die Schnittgeschwindigkeit v_c die Geschwindigkeit der Schneide bzw. des Werkstücks in Richtung der Schnittbewegung (Schnittrichtung). Die Vorschubgeschwindigkeit v_f zeigt in die Vorschubrichtung. /79/

Bei mehrschneidigen Werkzeugen (Fräsern, Sägeblättern) wird der Vorschub f pro Hub oder Umdrehung auf die Einzelschneiden aufgeteilt. Dieser Vorschubanteil je Zahn z wird Zahnvorschub f_z genannt. /79/

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (2.6)$$

2.3.1.3 Geometrische Bezeichnungen an der Schneide

Ein Schneidekeil wird aus der Spanfläche und einer oder mehreren Freiflächen gebildet. Der Freiwinkel α wird zwischen dem Werkstück und der Freifläche aufgespannt. Er soll dafür sorgen, dass die Freifläche nicht am Werkstück reibt. Zwischen Freifläche und Spanfläche wird der Keilwinkel β gemessen. Je größer der Keilwinkel, desto höher ist die Schneide durch Kräfte und Wärmefluss belastbar. Der Spanwinkel γ liegt zwischen der Spanfläche und einer Senkrechten auf der Werkstückoberfläche (in der Arbeitsebene). Die Summe der drei Winkel muss zusammen 90° ergeben. Somit kann der Spanwinkel sowohl positiv als auch negativ sein. /79/

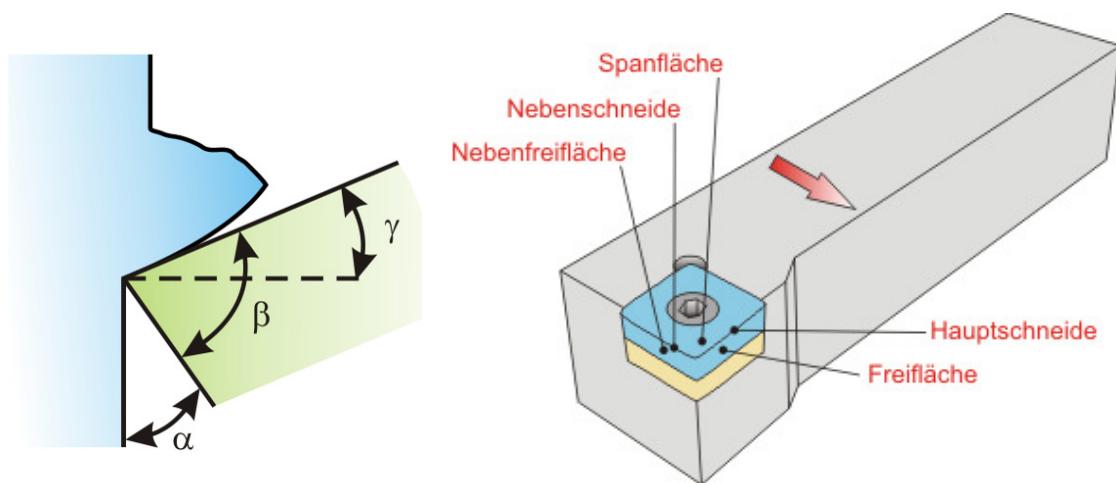


Abb. 2.16: Winkel und Flächen einer Schneide /79/

Negative Spanwinkel sind für Schneiden aus harten und spröden Schneidstoffen als auch bei unterbrochenen Schnitten von Bedeutung. Dabei ändert sich die Richtung der Zerspankraft und die Beanspruchung der Spanfläche wandelt sich von Zug in Druck. Stoßempfindliche Schneidstoffe können Druckbeanspruchung wesentlich besser aufnehmen als Zugbeanspruchung. Ein negativer Spanwinkel erfordert allerdings bei gleichen Zerspanbedingungen größere Kräfte und Leistungen als ein positiver Spanwinkel. Um dem hohen Leistungsbedarf entgegenzuwirken, wird häufig nur ein negativer Fasenspanwinkel angebracht, während der Haupt-Spanwinkel positiv bleibt. /79/

2.3.1.4 Spezifische Zerspankraftkomponenten

Der Spanungsquerschnitt A_c ist der Teil der Spanfläche, der während des Eingriffs vom Werkstückmaterial überdeckt wird. Senkrecht auf diese Fläche wirkt die Schnittkraft F_c . Somit kann in Anlehnung an Kienzle folgender Zusammenhang formuliert werden: /79/

$$F_c = A_c \cdot k_c \quad (2.7)$$

k_c bezeichnet hierbei die spezifische Schnittkraft. Diese ist der Teil der Schnittkraft, der auf 1 mm² des Spanungsquerschnitts wirkt. Beeinflusst wird die spezifische Schnittkraft besonders vom Werkstoff, der Spanungsdicke, dem Spanwinkel, der Schnittgeschwindigkeit, der Art des Schneidstoffs, sowie der Form der Hauptschnittfläche des Werkstücks. Die Spanungsbreite hat hingegen einen geringen Einfluss. Die Bestimmung der spezifischen Schnittkraft erfolgt durch Versuche mit dem zu zerspanenden Werkstoff unter wirklichkeitsnahen Bedingungen. Ist der Aufwand für diese Versuche zu groß, bestehen noch die Möglichkeiten der Berechnung oder die Ermittlung aus bestehenden Tabellen. /79/

Analog zur spezifischen Schnittkraft ist die spezifische Vorschubkraft k_f der Teil der Vorschubkraft F_f , der auf 1 mm^2 des Spanungsquerschnitts wirkt. Auch hier erfolgt die genaueste Bestimmung mittels Versuchen.

$$F_f = A_c \cdot k_f \quad (2.8)$$

2.3.2 Steinbearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide

Zum Trennen von Gesteinen werden überwiegend Bearbeitungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide (Schleifen, Polieren) angewendet. Gekennzeichnet sind diese Bearbeitungsverfahren durch hohe Schnittgeschwindigkeiten und geringe Vorschübe. Fast immer wird dabei Diamant als Schneidstoff gewählt, welcher als Kristall in zufälliger Orientierung auf den jeweiligen Werkzeugkörper gebunden wird. Anhand des Sägens sollen im folgenden Abschnitt die in der Literatur beschriebenen Trennmechanismen bei der Gesteinsbearbeitung beschrieben werden.

2.3.2.1 Allgemein

Beim Steinsägen mit Diamantsegmenten agieren einzelne Diamantkörner als gleitende Eindringkörper, die Energie umsetzen, indem sie beim lokalen Zermalen des Steins ein Druckspannungsfeld in Form eines Spannungsepizentrums erzeugen. Infolge der lokalen Spannungskonzentration bricht der Stein lokal aus. Dementsprechend handelt es sich bei der Steintrennung weniger um einen klassischen Spanprozess als um einen gerichteten Verschleißvorgang. Tatsächlich schwächen scharfe Diamantkörner das Werkzeugsystem eher. Das Spannungs-Epizentrum kann in Abhängigkeit des Diamantkorns durch den Kraftvektor lokalisiert werden, der für alle (in der Regel sehr hohen) Kreissägegeschwindigkeiten nahezu gleichgerichtet ist. Beim Gattersägen und beim Bohren ist er andersgerichtet, da wesentlich niedrigere Geschwindigkeiten auftreten. /5/

Das dominierende Bearbeitungsverfahren in der Granitbearbeitung ist das Kreissägen mit segmentierten, diamantbesetzten Sägeblättern. Wesentliche Einflussfaktoren sind: Diamant- und Bindereigenschaften (Diamantart, Diamantkonzentration, Korngröße, Binderhärte); Segmentherstellungsmethode, Prozessparameter (Umfangsgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Schnitttiefe), Betriebsart (Auf-, Abwärtssägen), physio-mechanische und mineralogische Steineigenschaften, Kühlung (Kühlmittel, Durchflussmenge), Maschinenzustand, Bediener.

In diesem Zusammenhang zeigt Unver (/104/) anhand statistischer Auswertungen, dass bei der Granitbearbeitung die folgenden Steineigenschaften einen signifikant quantifizierbaren Einfluss auf den Verschleiß haben: Korngröße der Quarzkristalle, NCB (Cone-Indenter) Härtezahl und mittlere Korngröße der Plagioklastkristalle (Feld-

spat). Daneben kann Verschleiß mitunter auch auf hohe Prozesstemperaturen zurückgeführt werden, wenn einzelne Bearbeitungsstellen an Festigkeit verlieren, weil beim Wärmeübergang zwischen Diamant und Binder ein Wärmestau entsteht. /8/

Im Hinblick auf den Kraftaufwand wurde festgestellt, dass trotz großer Unterschiede bei den Verschleißraten, die Kraftunterschiede bei der Granitbearbeitung sehr gering sind. /8/

2.3.2.2 Spanbildung

Die Spanbildung ist bei der Steinbearbeitung weniger ein Fließ- als ein gerichteter Bruchprozess, bei dem die Sägediamanten das Werkstückmaterial durch einen Ritz- und Brechvorgang abtragen. Clausen veröffentlichte in /13/ eine Untersuchung zum Spanbildungsprozess bei Gestein. Darin wurde ein einzelnes Diamantkorn unter einer Anpresskraft über Kalkstein, Marmor und Granit gezogen. Mittels eines Stereomikroskops konnte die Spanbildung beobachtet werden. Es zeigte sich, dass das sprödbrüchige Werkstoffverhalten den Materialabtrag maßgeblich bestimmt, gleichzeitig jedoch Anzeichen für plastische Werkstoffverformung feststellbar sind.

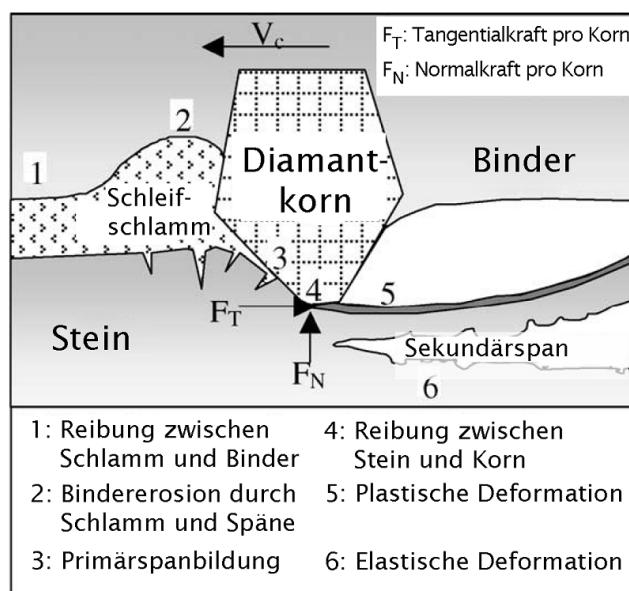


Abb. 2.17: Materialtrennmechanismus beim Steinsägen mit segmentierten Diamantwerkzeugen /13/, /32/

Prinzipiell werden diesbezüglich drei Prozesse unterschieden:

1. vor und neben dem Schneidkorn: Vor dem Diamantkorn erzeugt der stark negative Spanwinkel eine Tangentialkraft, die wiederum Druckspannungen hervorruft. Die Druckbelastung induziert Mikroscherrisse im Gestein, was zu einer Absplitterung von Gesteinspartikeln führt, die vor dem Schneidkorn aufgeworfen und zum Spurrand hin verschoben werden. Je negativer der Spanwinkel und je grobkörniger der Werkstoff, desto geringer ist die Menge dieses aufgeschobenen Materials am Spurrand. Denn

neben den Mikroscherrissen gehen auch Makrorisse vom Schneidkorn aus. Diese führen zu einer großflächigen Werkstoffabtrennung vor und neben der Ritzkante. Die dabei entstehenden Steinrümmer sammeln sich im Schleifschlamm vor dem Korn und werden durch Furchen an der Seite des Diamantkorns vorbeigezwungen. Die Steinrümmer sind bei diesem Vorgang üblicherweise sehr klein, aber häufig auch abrasiv. Dieser Vorgang wird als primäre Spanbildung bezeichnet. /13/, /32/

2. unter dem Schneidkorn: Unter dem Schneidkorn ließ sich ein Vorgang feststellen, der vor allem bei den feinkörnigen Werkstoffen Kalkstein und Marmor auf eine plastische Formänderung der obersten Gesteinsschicht hinwies. Der stark negative Spanwinkel zwängt einen Teil des abgespannten Werkstoffs unter die Schneide und sorgt dort zusammen mit der Andruckkraft des Schneidkorns für ein Verpressen dieses Materials. Zudem scheint der hohe Druck unter dem Schneidkorn Fließvorgänge im Grundgefüge des Gesteins zu bewirken, sodass eine wenige Mikrometer starke plastifizierte Schicht entsteht. Es ist bereits aus früheren Untersuchungen bekannt, dass spröde Werkstoffe unter Wirkung eines allseitigen Drucks duktile Verhalten zeigen. Der Druck verhindert das Auftreten von Öffnungs- und Scherrissen vor dem Einsetzen von Versetzungsbewegungen. Solch ein Zustand scheint auch bei der Gesteinszerspanung in Verbindung mit hohen Temperaturen im Kontaktbereich Schneidkorn – Stein lokal auftretende, plastische Verformungen zu ermöglichen. /13/

3. hinter dem Schneidkorn: Unmittelbar hinter dem Schneidkorn steigen kleine Werkstoffpartikel schweifartig auf, die aus dem, vom Zerspanungsprozess zerrütteten, umliegenden Steingefüge stammen. Gelockerte Gesteinspartikel (Größe im Mikrometerbereich) federn hinter dem Schneidkorn elastisch zurück und werden infolge des plötzlichen Spannungswechsel (Druck → Zug) hinter der Schneide gelöst und hoch geschleudert. Zusätzlich entstehen auch noch größere, scherspanähnliche Spanprodukte – die sogenannten Sekundärspäne. Aufgrund der elastischen Reaktion des Werkstoffs hinter dem Schneidkorn erfolgt eine teilweise Zerstörung der plastifizierten Schicht, sodass 0,2 bis 0,5 mm lange Späne entstehen. Die Späne weisen eine für Scherspäne typische Lamellierung auf. /13/, /32/

Je nach Werkstoff ist die festgestellte plastische Verformung des Gesteins und die Sekundärspanbildung unterschiedlich ausgeprägt: Feinkristalline Gesteine (Kalkstein, Marmor) zeigen nach dem Ritzversuch eine plastifizierte Spuroberfläche, die die Kontur des Schneidkorns deutlich widerspiegelt. Je grobkörniger das Gefüge und je geringer die Spaltbarkeit der Minerale (Granite), desto größer die Zahl der makroskopischen Sprödbruchvorgänge vor dem Schneidkorn. So entsteht eine Ritzspur, die immer weniger mit der Geometrie des Schneidkorns übereinstimmt. Deshalb kommt es hier nur punktuell und diskontinuierlich zum Kontakt zwischen Stein und Schneide, sodass der zur plastischen Verformung benötigte Spannungszustand nicht ständig herrscht und die erzeugten Scher- / Sekundärspäne nur im mikroskopischen Größenbereich auftreten. /13/

2.3.2.3 Verschleiß

Der Werkzeugverschleiß an diamantbestückten Steinkreissägen resultiert aus dem Abtrag der Werk- bzw. Schneidstoffoberflächen infolge der Relativbewegung beider Wirkflächen. Der Verschleiß bewirkt eine Änderung der Schneidengeometrie, senkt damit die Schnittrate und erhöht die erforderliche Schnittenergie, sodass die belasteten Diamanten ausbrechen oder ausbröckeln können. Die wirkenden Verschleißmechanismen und das Ausmaß des Verschleißes richten sich nach einer Reihe von Prozessstellgrößen, die selbst komplex miteinander interagieren.

Brook hebt in /5/ hervor, dass scharfe Werkzeuge eine hohe Leistungsfähigkeit und einen geringen Schnittenergiebedarf aufweisen. Allerdings verlieren sie diese Eigenschaften, wenn der Diamant verschleißt. Die Belastung wächst, und die Diamantkörner müssen durch gezieltes oder zufälliges Abrichten gegen neue Schneiden ausgetauscht werden. Spitze Diamantkörner sind aber keineswegs ein Standzeit verlängernder Faktor. Zwar benötigen scharfe Schneiden weniger Schnittenergie, aber es bedarf nur eines geringen Verschleißvolumens, damit der Energiebedarf dramatisch ansteigt. Demgegenüber sind abgeflachte Geometrien zwar zunächst energetisch ungünstiger, halten diesen Zustand aber länger stabil und zeigen keinen so dramatischen Leistungsverlust. Dementsprechend werden für Steinwerkzeuge abgerundete Kristalle bevorzugt. Sägen und Bohrer verwenden in diesen Materialien vergleichbare Diamantkristalle, allerdings bei deutlich abweichenden Geschwindigkeiten. /5/

Der Sägenverschleiß ist nach Ersoy (/32/) die Folge abrasiver, adhäsiver, erosiver, korrosiver und chemischer Abtragmechanismen. Abrasion ist in diesem Zusammenhang der wesentliche Verschleißmechanismus. Erosionsabtrag tritt auf, wenn der Schleifschlamm das weichere Bindermaterial verschleißt. Zudem kommt es bei hohen Geschwindigkeiten zu sämtlichen Schleifmechanismen (Mikrospanen, Mikropflügen, Mikrofurchen), wenn harte Partikel über das Schleifsegment schleifen. Insgesamt treten dabei gegenläufige Effekte auf, da Diamant und Bindermaterial grundsätzlich unterschiedliches Verschleißverhalten zeigen. Diamanten sind in der Regel härter als der zu zerspanende Stein, wohingegen das Bindermaterial weicher ist. /32/

Beim Ausbröckeln des Diamanten bilden sich zumeist neue scharfe Kanten, sodass die Schneidfähigkeit auch nach längerem Gebrauch erhalten bleibt. Gleichwohl sind Diamanten spröde und können ohne das zähre Bindermaterial nicht der Zug- / Druckbeanspruchung widerstehen. Wenn der Diamant zu spröde ist, verschleißt er schneller als das Bindermaterial, sodass die Hauptbelastung vom Binder aufgenommen werden muss. Das Werkzeug wird stumpf. Falls umgekehrt das Bindermaterial zu schnell verschleißt, verlieren die Diamantkörner ihren Halt und brechen aus. Der Verlust der Schneidfähigkeit ist die Folge. Der Binderverschleiß erfolgt in zwei Prozessen: Abrasion, wobei harte Partikel das Bindermaterial durch Pflügen direkt abtra-

gen und Risse hinterlassen sowie Schlagbelastung und thermomechanische Ermüdung. /32/

Der Verschleiß des Schneidkorns selbst hängt nach Clausen /13/ von der Struktur des Werkstoffs ab. Wie im vorangegangenen Abschnitt 2.3.2.2 erläutert, besteht bei feinkristallinen Werkstoffen nahezu ständig Kontakt zwischen Schneidkorn und Werkstoff. Dies bedingt die beschriebene plastische Verformung des Ritzgrundes. Dabei unterliegt die Schneidkornoberfläche einer ständigen Reibung, was wiederum zu abrasivem Verschleiß führt. Bei grobkristallinen Werkstoffen ist der Kontakt zwischen Schneidkorn und Werkstoff diskontinuierlich und zumindest partiell ständig unterbrochen. Die daraus resultierende Stoßbeanspruchung fördert hier eine Absplitterung von Diamantpartikeln. /13/

2.3.3 Steinbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide

Die Bearbeitung von Gesteinen mit geometrisch bestimmter Schneide ist kein Novum. Vor allem im Berg- und im Tunnelbau können dieser Gruppe der Fertigungsverfahren zahlreiche Bearbeitungsvorgänge zugeordnet werden. In Kapitel 3.3 werden einige Veröffentlichungen genannt, die sich mit dem Verschleiß und den Wirkprinzipien von Gesteinsbohrern und den verschiedenen Meißen von Tunnelbohrmaschinen beschäftigen. Texte zu anderen Trennwerkzeugen mit geometrisch bestimmter Schneide, wie z.B. Bohrkronen oder Sägen, konnten nicht gefunden werden.

2.3.3.1 Spanbildung

Eine Veröffentlichung aus dem Jahre 1971, die ebenfalls der Fachrichtung Bergbau zuzuordnen ist, findet sich bei Wagner in /120/. Darin erfolgt mithilfe von photoelastischen Modellversuchen eine Beschreibung der Rissbildung im Werkstoff beim Zerspanen von Gesteinen mit geometrisch bestimmter Schneide. Als Grundlage der Versuche wird folgende Zerspanungstheorie formuliert:

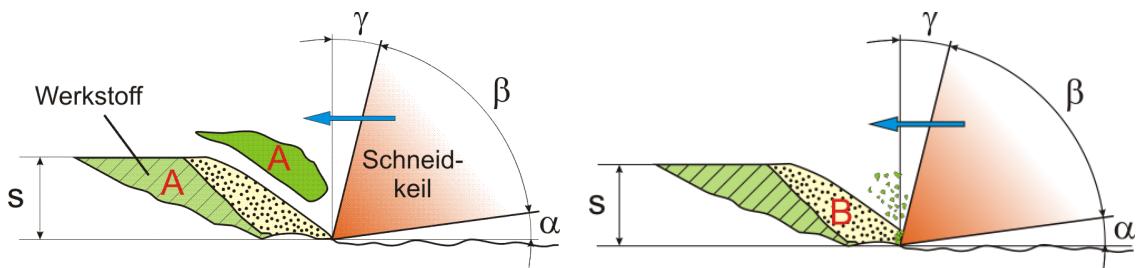


Abb. 2.18: Phasen der Gesteinszerspanung /120/

Eine Schneide läuft unter einer Andruckkraft auf die Schräge eines zuvor aus dem Gesteinsverband herausgelösten Spanes. Durch die Vorschubkraft wird ein Aufsteigen der Schneide auf die Schräge verhindert, sodass das Werkzeug in das Gestein eindringt. Die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück ist zu Beginn der

Schräge gering, wodurch die konstant hohe Schnittkraft örtliche Spannungsspitzen erzeugt, die ein Zermalmen und Herausreißen einzelner kleiner Gesteinspartikel bewirken (B in Abb. 2.18). Das weitere Eindringen der Schneide in die Schräge vergrößert die Kontaktfläche bis diese zu groß ist um mit der vorliegenden Schnittkraft das Gestein zu zermalmen. Dann ist die Schneide blockiert. Es folgt eine Speicherung elastischer Verformungsenergie im Werkzeug, da der Antriebsmotor die Schnittkraft immer weiter steigert. Ist die Schnittkraft groß genug, bricht der Stein. Ein großes Spanelement wird aus dem Gesteinsverband herausgebrochen (A in Abb. 2.18). Die nun freiwerdende potentielle Energie schleudert zum einen den Span aus dem Eingriffsraum und beschleunigt zum anderen die Schneide. Diese prallt wiederum auf die durch das Herausbrechen des Spans entstandene Schräge, wodurch der Arbeitszyklus geschlossen wird. /120/

Dem photoelastischen Modellversuch liegt die Erkenntnis zugrunde, dass der Bruchwinkel der Gesteine im Bereich reiner Druckbeanspruchung weitgehend konstant bleibt. D.h. der Riss, der durch das Werkzeug im Werkstück initiiert wird, läuft unabhängig vom Spanwinkel des Werkzeugs immer mit dem gleichen Winkel zur Arbeitsebene in das Werkstück hinein. /120/

Das Werkzeug wirkt mit der resultierenden Zerspankraft F unter dem Winkel ε auf den Werkstoff. Da sowohl die Spanfläche als auch die Schneidenfase, d.h. der verschlissene Teil der Freifläche, Kontakt mit dem Werkstoff haben, teilt sich die Zerspankraft in eine Komponente, die senkrecht zur Spanfläche wirkt (P_{NS}) und eine, die senkrecht auf der Freifläche angetragen wird (P_{NF}). Diese beiden Kraftkomponenten werden um den Reibungswinkel ρ aus der Senkrechten geneigt, da der Prozess nachweisbar nicht reibungsfrei abläuft. So ergeben sich die tatsächlich auf den Werkstoff wirkenden Kräfte P'_{NS} und P'_{NF} . /120/

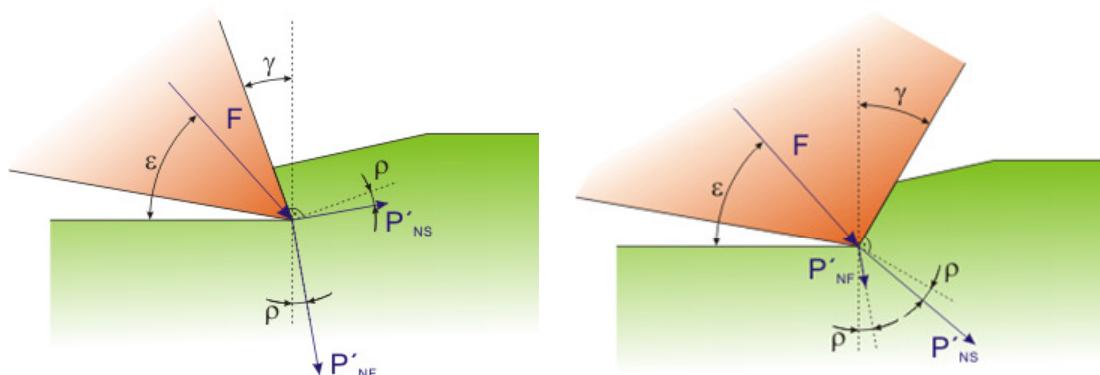


Abb. 2.19: Kräfte bei der Gesteinszerspanung mit positivem und mit negativem Spanwinkel /120/

Es zeigte sich, dass die über die Freifläche wirkende Komponente P'_{NF} mit geringer werdendem Spanwinkel γ abnimmt und im Falle, dass der Angriffswinkel der Zerspankraft gleich der Summe aus Spanwinkel und Reibungswinkel ($\varepsilon = \gamma + \rho$) ist, den Wert Null annimmt. Wird der Spanwinkel weiter verringert, wirkt P'_{NF} dem Eindringen des Meißels entgegen und erhöht somit die Vorschubkraft. Außerdem wurde anhand der im photoelastischen Modellversuch erzeugten Isochromatenbilder festgestellt, dass P'_{NF} nicht an der Spanbildung beteiligt ist. Nur die, über die Spanfläche wirkende Komponente P'_{NS} bewirkt die Risseinleitung und das Fortschreiten der Riss spitze. Diese ändert bei einer Variation des Spanwinkels lediglich ihre Richtung, der Betrag bleibt nahezu gleich. Die Richtung von P'_{NS} hat wiederum einen Einfluss auf die, zum Vorantreiben der Riss spitze im Material zur Verfügung stehenden Kraftkomponente, da P'_{NS} eine Reibung im bereits erzeugten Riss hervorruft, indem sie die Bruchflächen aufeinander presst. Nach der geometrischen Herleitung dieser Zusammenhänge, verdeutlicht Wagner den Einfluss des Spanwinkels indem er die tatsächlich in der Riss spitze wirkende Rissausbreitungskraft konstant hält und unter Variation des Spanwinkels die benötigte Zerspankraft berechnet. /120/

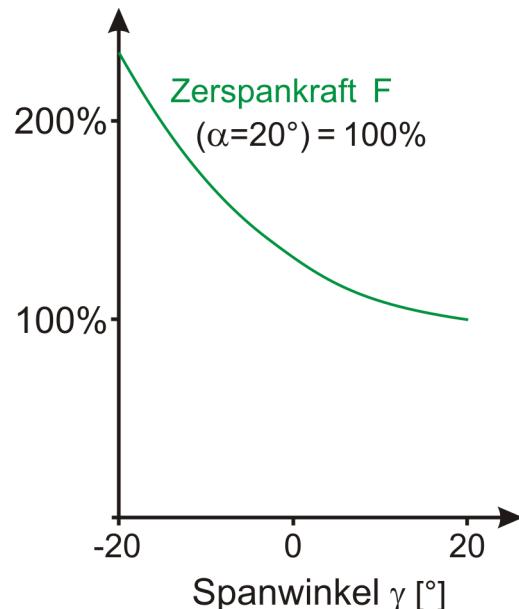


Abb. 2.20: Einfluss des Spanwinkels auf die Zerspankraft /120/

Des Weiteren versucht Wagner in /120/ über Biegemomente um die Riss spitze, deren Drehsinn vom Spanwinkel abhängt, den Weg der Rissverlängerung durch den Werkstoff zu beschreiben. Ziel ist dabei die theoretische Erklärung der deutlichen Abweichung realer Bruchvorgänge von existierenden Modellen. /120/

2.4 Statistische Versuchsplanung

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen wurden mit Hilfe der Grundlagen der statistischen Versuchsplanung vorbereitet und durchgeführt. Daher sollen im folgenden Abschnitt die für die vorliegende Arbeit relevanten Grundlagen und die Nomenklatur der statistischen Versuchsplanung dargelegt werden.

2.4.1 Allgemeines

Das Ergebnis eines Prozesses ist abhängig von Einflussfaktoren, die auf den Prozess selbst wirken. Die statistische Versuchsplanung ist ein Mittel um die Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Prozesses zu untersuchen. Sie ermöglicht Kosten- und Zeitersparnisse durch einen hohen Informationsgewinn aus möglichst rationell angesetzten Versuchen. Zudem gestattet sie es, Informationen zu gewinnen, die in anderer Weise nicht generierbar sind. /34/

Dies wird durch das beherrschte und überwachte Lenken mehrerer Einflussfaktoren ermöglicht, sowie durch den Einsatz statistischer Analysemethoden, die die Einzelwirkung der Einflussfaktoren auf die interessierende Zielgröße feststellen. Die Einflussfaktoren werden systematisch variiert, sodass eine nachfolgende statistische Analyse ihrer Wirkungen und Wechselwirkungen ermöglicht wird. Um diese Vorteile hinreichend nutzen zu können, ist eine sorgfältige Planung notwendig. /34/

Für die Entscheidung, ob die Wirkung eines Einflussfaktors zufällig ist oder nicht, stellt die statistische Versuchsplanung ein breites Methodenspektrum zur Verfügung. Die, vermutlich aufgrund ihrer frühen Einführung, klassisch genannte Methode nutzt vollfaktorielle oder fraktionelle Faktorpläne, um die Wirkung unterschiedlicher Stellgrößenvariationen zu erkennen und quantitativ zu erfassen. Der Vollständigkeit wegen sollen, als zwei weitere wichtige Arten der statistischen Versuchsplanung, die Methoden nach Taguchi und Shainin hier jedoch lediglich genannt werden. /48/

2.4.2 Nomenklatur

Zielgrößen beschreiben das Ergebnis eines Versuches, wobei mit einem Versuch mehrere Zielgrößen bestimmt werden können. Größen, die in Verdacht stehen die Versuchsergebnisse (Zielgrößen) zu beeinflussen, heißen Einflussgrößen. Taguchi untergliedert Einflussgrößen in Steuergrößen und Störgrößen. Dabei sind Steuergrößen die Einflussgrößen, deren Wert für den untersuchten Prozess eingestellt und dort (in gewissen Grenzen) gehalten werden kann. Störgrößen sind somit die Einflussgrößen, deren Wert nicht vorgegeben werden kann bzw. nicht vorgegeben werden soll. /53/

Die Zahl der Einflussgrößen eines Prozesses ist meist sehr groß. Deshalb werden für Versuche nur die als wesentlich vermuteten Einflussgrößen ausgewählt. Diese heißen dann Faktoren. Für jeden Faktor werden Werte festgelegt, die der Faktor im Versuch annehmen soll. Diese ausgewählten Werte heißen Faktorstufen. Eine Faktorstufenkombination ist dann die Festlegung der angenommenen Stufen verschiedener Faktoren für einen Einzelversuch. /53/

Beim Mittelwertvergleich wird ein Faktor auf zwei Faktorstufen betrachtet. Die Differenz der Stichprobenmittelwerte (\bar{y}_1, \bar{y}_2) der Zielgröße wird Effekt genannt.

$$\bar{d} = \bar{y}_2 - \bar{y}_1 \quad (2.9)$$

\bar{d} ist der Schätzwert für die wahre Differenz δ der Mittelwerte der beiden Stichproben. Der Vertrauensbereich, auch Konfidenzintervall genannt, ist dann der Bereich innerhalb dessen δ mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt.

$$\bar{d} - t \cdot s_{\bar{d}} \leq \delta \leq \bar{d} + t \cdot s_{\bar{d}} \quad (2.10)$$

t ist ein Tabellenwert, der mit Zunahme der Stichprobengröße und Abnahme des Vertrauensniveaus (bspw. 99,9 %, 99 % oder 95%) kleiner wird. $s_{\bar{d}}$ gibt die Standardabweichung des Effektes wieder und wird aus der Varianz der Einzelwerte s^2 und der Gesamtzahl N der Messwerte berechnet.

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{4}{N} \cdot s^2} \quad (2.11)$$

Liegt der Wert 0 zwischen den Grenzen des Vertrauensbereichs, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die wahre Differenz $\delta = 0$ ist. Der beobachtete Effekt kann zufällig zustande gekommen sein. Enthält der Vertrauensbereich den Wert 0 nicht, geht man davon aus, dass wirklich ein Unterschied besteht. Der Effekt ist signifikant. Je nach angewandtem Vertrauensniveau wird der Effekt als höchstsignifikanter Unterschied (99,9 %), signifikanter Unterschied (99%) oder indifferent, d.h. es sollten mehr Daten gesammelt werden, (95%) gewertet. /53/

Ist die Zufallsstreuung sehr viel kleiner als technologisch relevante Unterschiede, kann auf die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse verzichtet werden. /53/

2.4.3 Faktorpläne

Vollständige faktorielle Versuchspläne sind eine Verallgemeinerung des Mittelwertvergleichs. Sie ermöglichen die gleichzeitige Untersuchung mehrerer Faktoren auf zwei oder mehr Stufen. Die Planung ist auf die statistische Auswertung ausgerichtet und ermöglicht auch das Erkennen von Wechselwirkungen zwischen den Faktoren. /53/

Das einfachste Beispiel ist ein Versuchsplan für zwei Faktoren auf je zwei Faktorstufen, die mit - und + bezeichnet werden. Der Versuchsplan besteht aus $2^2 = 4$ Faktorstufenkombinationen und heißt daher 2^2 -Plan. Mit jedem zusätzlichen Faktor verdoppelt sich die Zahl der Faktorstufenkombinationen, vorausgesetzt es bleibt bei zwei Faktorstufen je Faktor. /53/

syst. Nr.	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	...
1	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	-
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	-	-	+	-
11	-	+	-	+	-
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	-
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	-

Tab. 2.6: Anstieg der Zahl der Faktorstufenkombinationen mit der Faktorenanzahl /53/

So ergeben sich bereits bei einer überschaubaren Faktorenanzahl k umfangreiche Versuchsreihen, aus denen man insgesamt $2^k - 1$ Effekte berechnen kann. Dazu zählen sowohl die Effekte einzelner Faktoren als auch die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren. Bei vollständig faktoriellen Versuchsplänen werden alle möglichen Wechselwirkungskombinationen der k Faktoren berücksichtigt. /53/

syst. Nr.	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

Tab. 2.7: Effekte und Wechselwirkungen eines Versuchsplan mit 3 Faktoren auf 2 Stufen /53/

Bei fraktionellen faktoriellen Versuchsplänen werden die Wechselwirkungen mit den meisten beteiligten Faktoren vernachlässigt und an deren Stelle zusätzliche Faktoren untersucht. Die Stufen (Vorzeichen) dieser Faktoren sind jedoch identisch zu denen der vernachlässigten Wechselwirkungen, sodass der neu entstandene Versuchsplan nur einen Bruchteil (1 / Zahl zusätzlichen Faktoren) der Faktorstufenkombinationen aufweist, die ein vollfaktorieller Versuchsplan mit der gleichen Anzahl Faktoren hätte. Somit können mehr Faktoren bei gleichbleibendem Versuchsumfang untersucht werden. Der Nachteil liegt in der eingeschränkten Aussagekraft über die Wechselwirkungen zwischen den ursprünglichen Faktoren und derer mit den zusätzlichen Faktoren. Über den zusätzlichen Faktor sollte bekannt sein, dass er keine direkten Wechselwirkungen mit den anderen Faktoren hat. Bei Bedarf kann der fraktionelle faktorielle Versuchsplan jedoch zu einem vollständig faktoriellen Versuchsplan ergänzt werden. /53/

Allgemein gilt: Für einen fraktionellen faktoriellen 2^{k-p} - Versuchsplan geht man von einem vollständig fraktionellen Versuchsplan mit $k-p$ Faktoren aus und nimmt zusätzlich p Faktoren durch p Zuordnungen auf. So entsteht ein Versuchsplan mit k Faktoren und 2^{k-p} Faktorstufenkombinationen. Es wird daher nur ein Anteil $\frac{1}{2^p}$ der insgesamt 2^k Faktorstufenkombinationen des vollständigen faktoriellen Versuchsplans untersucht. Der Preis für diese Aufwandsreduktion ist jedoch, dass nur ein Anteil $\frac{1}{2^p}$ der insgesamt $2^k - 1$ Effekte des vollständigen Plans berechnet werden kann.

/53/

3 Stand der Technik

3.1 Schneidstoff Diamant

Diamant ist als härtestes bekanntes Mineral prädestiniert für die Anwendung als Schneidstoff. Die starke Affinität des Kohlenstoffs zu Eisen begrenzt jedoch dessen Anwendungsspektrum auf Nichteisenwerkstoffe. Weinz vergleicht in /126/ die Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von mono- und polykristallinen Diamantwerkzeugen mit denen von CBN, welches zwar nicht so hart wie Diamant ist, aber dagegen keine Einschränkung bzgl. Eisenwerkstoffen besitzt.

Im überwiegenden Teil der Anwendungen werden synthetische Diamanten den natürlichen Diamanten vorgezogen. Die Nachteile der Synthese werden durch deren Weiterentwicklung Schritt für Schritt verringert. So beschreibt bspw. Webb in /124/ welche Auswirkungen der Ersatz des Stickstoffs bei der Diamantsynthese auf das Bruchverhalten hat. /51/ und /50/ behandeln die Optimierung der Herstellung von synthetischen Diamanten für die Verwendung als Schneidstoff zur Steinbearbeitung. Dabei wird die Mikrostruktur der Diamanten untersucht und angepasst. /123/ zeigt dagegen, wie die Eigenschaften der Diamantkörnung durch eine Titanbeschichtung an bestimmte Anwendungen angepasst werden können.

Zur Steinbearbeitung werden Diamanten meist in gesinterten Schneidelementen auf den Werkzeugkörper gebunden. Reinhardt beschreibt dazu in /82/ eine neuartige Form der Diamant – Segmente, die durch eine seitliche Aussparung einen gleichmäßigeren Verschleiß fördert und die Schnittgenauigkeit erhöht. Auch bei der Herstellung dieser Schneidsegmente gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten die Schneideigenschaften der Segmente zu steuern. Nitkiewicz untersuchte in /76/ den Einfluss von Zinn bei Metallmatrix – gebundenen, gesinterten Diamantsegmenten für die Steinbearbeitung. In /43/ versuchte Spriano Kobalt als Matrixmaterial in den gesinterten Segmenten zu ersetzen.

Tönshoff zeigt in /101/ Schneidprinzipien, Verschleißmechanismen und Anwendungen metallisch gebundener Diamantwerkzeuge auf und Carrino erläutert in /9/ die Verschleißvorgänge an Diamanten am Beispiel von Diamantfräsern. In /59/ werden die Verschleißcharakteristiken von Diamantschneidstoffen bei der Bearbeitung abrasiver Werkstoffe untersucht.

CVD ist der modernste Diamantschneidstoff mit einem großen Potential für schwierige Bearbeitungsbedingungen. Hogmark /47/ und Schlund /90/ schreiben in diesem Zusammenhang über die CVD-Dünnenschicht – Variante. Diese wird in den beiden Veröffentlichungen mit anderen Hartstoffbeschichtungen im Hinblick auf die Zerspanung

von Hartmetallen verglichen. Turchetta beschreibt hingegen in /102/ eine Art Einzahnversuch mit CVD – Werkzeug zum Schneiden von Marmor. Dabei wird ein Segment einer Seilsäge getestet, in welchem Wolframkarbid durch CVD ersetzt wurde. Es konnte eine Reduzierung der Bearbeitungszeit realisiert werden.

3.2 Werkstoff Naturstein

Natursteine sind Produkte der Erdgeschichte. Sie waren den verschiedensten Einflüssen zu unterschiedlichsten Zeiten ihrer Entwicklung ausgesetzt. Daher ist jeder Stein ein Einzelstück mit für ihn charakteristischen Eigenschaften. Wright beschreibt in /127/ die Entwicklung eines Gesteinklassifizierungssystems für Diamantwerkzeuge. Er untersuchte den Einfluss der Abrasivität und eines selbst entwickelten Sägbarkeitsindex auf das Ergebnis einer Diamantsäge. Der Sägbarkeitsindex wurde aus der Energie ermittelt, die benötigt wird, um eine Einheit Stein abzubauen. Wright kam zu der Erkenntnis, dass der Sägbarkeitsindex einen größeren Einfluss auf das Werkzeug hat als die Abrasivität. Für diese Untersuchungen waren zwei Prüfstände erforderlich auf denen kleine Gesteinsproben getestet werden konnten.

Goktan versuchte in /38/ mittels des Schmidthammertests ebenfalls die maschinelle Bearbeitbarkeit von Gesteinen vorherzusagen. Dies gelang auch, jedoch mit einigen Einschränkungen. In /71/ untersuchte Muro Gesteine mit Impact-Versuchen, um deren Bearbeitbarkeit mit Bohrmeißeln zu charakterisieren. /37/ bietet eine Untersuchung zum Zusammenhang zwischen der Sprödheit von Gesteinen und der zur Steinzerspanung erforderlichen spezifischen Energie. Es konnte jedoch kein beweisbarer Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen gefunden werden.

Kou beschreibt in /56/ erste Ansätze zur numerischen Simulation von Steinen. Er entwickelte dabei ein Modell des Bruchs eines inhomogenen Gesteins unter Zerspanungsbeanspruchung. Guo veröffentlichte in /41/ eine Studie zur Steinbearbeitung unter Anwendung der linear-elastischen Bruchmechanik.

3.3 Steinbearbeitung

Viele Natursteinprodukte sind Luxusgüter, da ihre Gewinnung und Weiterverarbeitung sehr aufwendig sind. Zur Bearbeitung der meisten Gesteine werden die Schneidstoffe der höchsten Härteklassen benötigt, die wiederum nur für eine begrenzte Zahl von Werkzeuggeometrien verwendet werden können. Deshalb ist auch der Gestaltungsfreiheit bei Natursteingütern Grenzen gesetzt. Denkena gibt in /24/ einen Überblick über Bearbeitungsverfahren, Einflussfaktoren, Ziele und Trends beim Trennschleifen von Naturstein.

In /2/ und /89/ werden Werkzeug- und Maschinentechnologien der Steinbearbeitung beschrieben. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Aufteilung der Steinblöcke zu

Platten nach der Gewinnung im Steinbruch und der Herstellung von Säulen aus Blöcken.

Die Gewinnung von Naturstein erfolgt meist in Steinbrüchen. Dort werden die Steinblöcke aus Massiven gesprengt oder gesägt. Manche Weichgesteine werden maschinen herausgebrochen. Zum Sägen aus dem Massiv und zum Teilen großer Blöcke werden heutzutage in den meisten Steinbrüchen Seilsägen verwendet.

Die Werkzeuge der Seilsägen sind Endlosseile, auf denen in gewissen Abständen Metallmatrix gebundene Diamantperlen aufgefädelt sind. In /77/ untersuchte Oliveira die Auswirkungen der Herstellungsparameter auf das Verschleißverhalten und die Leistungsmerkmale der Diamantperlen. Filgueira betrachtet dagegen in /33/ das Seil selbst. Dieses besteht oft aus einem inneren, Zugkraft aufnehmenden Trägerseil und einem äußeren, vor Korrosion und Erosion schützenden Hüllseil. Filgueira versuchte nun einen optimalen Durchmesser für das Hüllseil zu ermitteln. Dass Diamantsägeseile auch zum Trennen von Metallbauteilen verwendet werden können zeigt Tönshoff in /100/.

Außer Seilsägemaschinen sind auch Gattersägen häufig in Steinbrüchen oder in den nachgeordneten Schritten der Produktionskette von Natursteinprodukten anzutreffen. Diese werden in manchen Brüchen ebenfalls zum Teilen großer Steinblöcke eingesetzt. Größtenteils verwendet man Gattersägen jedoch zum Auftrennen der Steinblöcke zu Platten. Dabei wird eine Gattersäge mit einer Vielzahl von Sägeblättern gleichzeitig bestückt, die wiederum möglichst gleichmäßig verschleißen sollen, um das komplette Potenzial der Werkzeuge nutzbar zu machen. Diese Anforderung spiegelt sich in einer großen Zahl an Untersuchungen wieder.

Clausen untersucht in /13/ den Spanbildungsprozess beim Gattersägen. Er beschreibt dabei die Vorgänge vor, unter und nach einem Schneidkorn und zeigt den Zusammenhang zwischen Sprödbruchrate am Korn und der Grobkörnigkeit des Werkstoffs. Mit einem sogenannten Ein-Segmentversuch untersuchte Clausen in /14/ anschließend die Entwicklung des Kornverschleißes bei Gattersägesegmenten. Die Versuche wurden mittels Messung der Zerspankraft und des Schallpegels ausgewertet. Dabei kam Clausen zu der Erkenntnis, dass die Vorschubkraft die geeignete Kenngröße im Bezug auf die Verschleißbewertung ist.

In /121/ veröffentlichte Wang die Ergebnisse einer Versuchsreihe mit vereinzelten Diamantkristallen im Ritzversuch auf Marmor. Es wurden die Prozesskräfte aufgenommen. Er kam dabei zu dem Schluss, dass der Mechanismus der Zerpanung von Marmor als Wechselwirkung zwischen plastischer Deformation und Sprödbruch erklärt werden kann. Bei der Übertragung der Erkenntnisse auf den Prozess des Gattersägens erläutert Wang, dass der Schnittprozess durch die Interaktion von Diamantkörnern verschiedener Segmente in verschiedenen Positionen bestimmt ist. Das heißt also, dass nur wenige Diamanten am Schnittprozess teilnehmen.

In /15/ schreibt Clausen über Gattersägeversuche auf Marmor und Kalksandstein. Durch die Messung der Kräfte während der Versuche kommt er zu der Aussage, dass die absolute Zerspankraft keine Aussage über den Prozess erlaubt. Erst die Verwendung definierter Eingriffs- und Prozessgrößen macht einen Prozessvergleich möglich. Diese Größen definiert Clausen in /16/. In /17/ beschreibt er den Modellversuch zur Werkzeugbeurteilung, der die Grundlage der genannten Erkenntnisse bildet.

Weniger etabliert als Seil- und Gattersägen sind Bandsägen in der Steinbearbeitungsbranche. Büttner stellt in /7/ schon früh eine im Einsatz befindliche Bandsäge zum Trennen von Naturstein vor und betont deren Vorteile gegenüber Seil- und Gattersägen. Diese Vorteile greift Gerlach in /35/ auf und konkretisiert sie: Die Seilsäge kann das Potenzial der Diamanten nicht voll ausnutzen, da sie nicht die nötigen Vorschübe realisieren kann. Der wesentlich stabilere Werkzeugkörper des Gattersägeblatts verliert dagegen die nötige Vorspannung, wenn die Schnittkraft aufgrund der angepassten Vorschubgeschwindigkeit steigt. Die Bandsäge ermöglicht hohe Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten und gewährleistet gleichzeitig ein ausreichend gespanntes Werkzeug. Voraussetzung ist jedoch eine möglichst kurze Eingriffslänge und die Führung des Werkzeugs nah am Eingriffsbereich. Heydt /45/ und Denkena /26/ berichten über ein EU-Projekt, das auf diesen theoretischen Vorteilen des Bandsägens basiert und fügen den Überlegungen die praktischen Vorteile der Bandsäge hinzu: Das Werkzeug einer Bandsäge benötigt nur einen Bruchteil der Schnittkanalbreite von Seil-, Kreis- oder Gattersägen. Dies bedeutet im Einsatz geringere Materialverluste und einen geringeren Energiebedarf, was die Wirtschaftlichkeit der Steinbearbeitung stark erhöhen würde.

Ein weiteres etabliertes Verfahren zum Trennen von Naturstein ist das Kreissägen. Dieses wird meist zum Zuschneiden von Plattenmaterialien verwendet. Seine Flexibilität ist jedoch auch beim Individualzuschnitt von Steinblöcken geschätzt. Der Sägeblattdurchmesser begrenzt dabei allerdings die Schnitttiefe und somit die bearbeitbare Blockgröße.

Ersoy /31/ führte eine Versuchsreihe zum Kreissägen von verschiedenen Gesteinen durch. Er verwendete dabei 5 Gesteinsgruppen und 3 verschiedene Kreissägeblätter unter Variation der Zustellung und der Schnitttiefe. Als Ergebnis zeigt Ersoy die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Schnittfaktoren auf. Wang untersuchte in /122/ den Einfluss der Kühlung beim Granitsägen. Er kam zu dem Schluss, dass Emulsionen aus Wasser und Öl den Leistungsbedarf, den Geräuschpegel und den Verschleiß gegenüber mit alkalischen Metallen und Säuren angereichertem Wasser erhöhen. Xu veröffentlichte in /130/ und /131/ quantitative Untersuchungen der Kräfte auf die Diamanten beim Kreissägen von Diamant. Lou betrachtet in /62/ und /63/ das Verhalten von Diamantsägeblättern bei der Steinbearbeitung. Er benennt dabei verschiedene Verschleißmechanismen der Diamanten auf der Oberfläche der Schneidsegmente. In /64/ ergänzt Lou eine Untersuchung der verschlissenen Oberfläche von

Diamantsägeblättern bei der Granitbearbeitung. Einen gänzlich anderen Ansatz zur Ausnutzung des Potenzials des verwendeten Schneidstoffs Diamant betrachtet Skury in /95/. Er strebt dabei die Aufbereitung der synthetischen Diamanten eines verschlissenen Sägeblatts an, da er herausfand, dass mehr als 10% der ursprünglichen Diamanten noch unbeschädigt vorliegen.

Die Beschädigung bzw. den Verschleiß der Diamanten zu untersuchen und zu prognostizieren nahm sich Wright in /128/ zur Aufgabe. Er betrachtete dazu den Kornüberstand und den Kornverschleiß. Als Ergebnis gibt er eine Empfehlung für Diamanten mit hoher Qualität, da diese kontrolliert brechen und ein Freischneiden ermöglichen. Polini kommt bei seiner Betrachtung des Verschleißes von Diamantwerkzeugen in /81/ zu dem Schluss, dass die Verschleißcharakterisierung mit zwei Methoden erfolgen muss: einer makro- und einer mikrogeometrischen.

Checkina entwickelte ein Modell für den Werkzeugverschleiß beim Trennen von Stein. In /11/ schreibt er, dass sich der Verschleißvorgang aus elastischer Deformation bis zum Bruch und Sprödbruch zusammensetzt. Kenny /52/ beschäftigte sich vor allem mit dem Werkzeugverschleiß beim Zerspanen von Abrasivgesteinen wie Sand- und Kalksteinen. In /133/ beschäftigt sich Zeren mit der optischen Untersuchung und der Charakterisierung von Fehlern an Diamantwerkzeugen.

Ein innovatives Verfahren zum Trennen von Naturstein erläutert Mirinda in /68/. Es handelt sich dabei um Trennen von Marmor und Kalkstein mit CO₂ – Laser. Die Stein härte und die Porosität beschränken jedoch die Qualität und die Geschwindigkeit des Schnittes.

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet der Steinbearbeitung liegt im Tunnel- und Bergbau. Auch zu den hier verwendeten Werkzeugen liegen einige Veröffentlichungen vor. So beschreibt Chang in /10/ Linearschnittversuche zur Beurteilung von Werkzeugen für Tunnelbohrmaschinen in granitartigen Gesteinen. Eine Versuchsreihe mit PKD – Scheiben einer Tunnelbohrmaschine auf Hartgestein wurde in /60/ veröffentlicht. Richard beschreibt in /85/ und /86/ die selbst angeregten Stick-Slip Schwingungen bei Bohr- und Zugmeißeln. Cools führte in /22/ Temperaturmessungen auf der Meißeloberfläche bei der Steinbearbeitung durch und Yilmaz /132/ erstellte eine Berechnung der Schnittkraft bei Radialmeißeln auf Hartgestein. Stöck untersuchte in /97/ die Belastungen beim Bohren mit einem Steinbohrer mit Wolframcarbidkopf. Xi stellt in /129/ ein neuartiges Verfahren zur Oberflächengestaltung von Steinen mittels Polieren vor. Kaitkay führte in /49/ Steinbearbeitungsversuche mit PKD – Schneiden von Tiefenbohrern unter äußerlichem hydrostatischen Druck durch und stellte fest, dass sich das abgetragene Material dabei vor der Schneide hält und nicht abgesprengt wird. Es bilden sich lange, aus dem Bohrschlamm zusammengepresste Spanstücke, die den Eindringprozess der Schneide behindern können.

4 Allgemeine Versuchstechnik

Der Abschnitt Versuchstechnik behandelt die wichtigsten Maschinen, Messgeräte und Methoden die zur Durchführung der Versuchsreihen im Hauptteil der vorliegenden Arbeit benötigt wurden.

4.1 Messtechnik

4.1.1 Aufnahme der Prozesskräfte

Die Werkzeuge wurden in einem 3-Komponenten Dynamometer Typ 9263 der Firma Kistler (Kraftmessdose) gehalten. Mit Hilfe der Anwendungssoftware DIAdem wurden die Signale der Messdose erfasst und in Datenformaten gespeichert, die später mit Microsoft Excel aufbereitet und in Diagrammen dargestellt werden konnten. Zwischen der Kraftmessdose und dem PC war ein Kistler Ladungsverstärker ICAM 5070 verbaut, der die elektrischen Ladungen der Messdose in elektrische Spannungen umwandelt, die vom PC verarbeitet werden können.

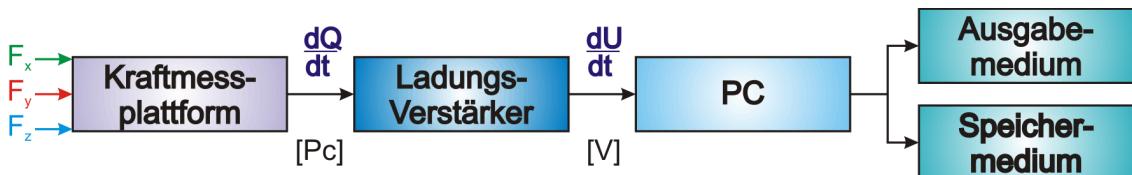


Abb. 4.1: Blockschaltbild der Signalverarbeitung /36/

4.1.2 Verschleißmessung

Zur Verschleißbetrachtung wurden die Freiflächen der Werkzeuge in regelmäßigen Abständen fotografiert. Hierfür wurde ein Stereomikroskop der Firma Olympus genutzt, an welchem eine Kamera Eos 20D der Firma Canon angeschlossen ist. Mit der Software Adobe Photoshop wurde anschließend in den Bildern der Verschleißfortschritt gemessen.



Abb. 4.2: Arbeitsplatz zur Verschleißdokumentation

4.1.3 Schneidkantenvermessung

Zur Erfassung von Schneidkantengeometrien wurde ein optisches Messgerät der Firma GF Messtechnik vom Typ MikroCAD verwendet. Dieses Gerät arbeitet nach dem Streifenlichtprojektionsprinzip, d.h. es werden mehrere kodierte Lichtmuster aus beleuchteten und unbeleuchteten Streifen nacheinander auf das Messobjekt projiziert, um die Oberfläche des Messobjekts zu erfassen. Anhand der Auslenkung der Lichtstreifen werden die Raumkoordinaten des Messpunkts ermittelt. So entstand ein dreidimensionales Flächenmodell der untersuchten Schneidkanten, an dem u. a. Winkel und Radien gemessen werden konnten.

4.1.4 Werk- und Schneidstoffanalyse

Unter einem Rasterelektronenmikroskop vom Typ CamScan MV2300 fanden energie-dispersive Röntgenanalysen (EDX) und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (REM) statt. Diese betrafen vor allem die Schneidkanten der entwickelten Schneidkörper sowie die Oberflächen der bearbeiteten Werkstücke.

4.2 Versuchswerkzeuge

4.2.1 Schneidstoffe

4.2.1.1 Schneidstoffauswahl

Industriediamanten werden bei der Zerspanung nahezu ausschließlich als geometrisch unbestimmte Schneiden eingesetzt. Sie können nur mit großem Aufwand in definierte Formen gebracht werden und sind dann aufgrund ihrer Monokristallinität nicht in allen Raumrichtungen gleich belastbar. Sie scheiden daher als Schneidstoff für das Trennen mit geometrisch bestimmter Schneide aus.

CVD-Diamant-Dünnschichtwerkzeuge wurden bereits nach der Literaturrecherche von den Untersuchungen ausgeschlossen. Im Hinblick auf den grundsätzlichen Aufbau von Gesteinen war die, in Abschnitt 2.1.1.3.3 beschriebene, starke Neigung zu Schichtabplatzungen bei der Bearbeitung von Werkstoffen mit abrasiv wirkenden, harten Kristallen, der Grund für diese Entscheidung. Der Vorteil der größeren Geometrievielfalt von Dünnschichtwerkzeugen kam hier nicht zum Tragen, da alle Geometrien mittels Funkenerosion hergestellt werden sollten.

Durch die in Abschnitt 2.1.1.3.3 erläuterte überlegene Widerstandsfähigkeit von CVD-Dickschicht-Werkzeugen gegen abrasiven Verschleiß sind diese Werkzeuge, theoretisch betrachtet, optimal für das Trennen von Naturstein geeignet. Aufgrund der hohen

Kosten für den Schneidstoff CVD-Dickschicht und der fehlenden Möglichkeit zur Formgebung dieses Schneidstoffs, sollten dennoch alle Untersuchungen dieser Arbeit mit dem Schneidstoff PKD durchgeführt werden. Auch im Hinblick auf spätere Anwendungen der entwickelten Schneiden, blieb PKD für diese Arbeit aufgrund seiner kostengünstigeren Herstellung und Verarbeitung unverzichtbar.

4.2.1.2 Verwendete PKD – Sorten

Folgende PKD – Sorten wurden im Rahmen dieser Arbeit verwendet:

Lieferant	Artikel – Bezeichnung	Diamantkorngröße	Abk. intern
Duratec	4H05-R3630020	5 µm	A
Duratec	4H10-R3630020	10 µm	B
Duratec	4H25-R3630020	25 µm	C
Duratec	4H25U-R3630020	5-25 µm	D
ElementSix	CMX R70.0-360-2005PL 850	0,5-1 µm	K

Tab. 4.1: verwendete PKD - Schneidstoffe

4.2.2 Werkzeugherstellung

PKD wurde in Form von Ronden geliefert, deren Durchmesser vom Hersteller abhängen.



Abb. 4.3: PKD – Ronden ($\varnothing = 25$ mm)

Aus den Ronden wurden die Schneidelemente per Drahterodieren hergestellt. Um diese im Versuchstand aufnehmen zu können, wurden zusätzlich Werkzeughalter benötigt. Diese wurden ebenfalls auf der Drahterodiermaschine gefertigt.

Anschließend wurden die PKD – Elemente auf dem Werkzeughalter fixiert. Dies erfolgte mittels Löten.

4.2.2.1 Erodieren

Zur Herstellung der PKD - Schneidelemente und der Werkzeughalter wurde eine Drahterodiermaschine vom Typ Matra Fanuc Robocut a – OC genutzt.

Der Werkzeughalter wurde aus 1,6 mm starkem, gehärtetem Werkzeugstahlblech, durch einfaches Abfahren der Kontur erzeugt, d.h. die Achse des Erodierdrahts stand senkrecht auf der Blechoberfläche.

Bei der Herstellung der PKD - Elemente stellte die Oberfläche der PKD - Ronde die spätere Spanfläche dar. Zur Änderung des Keilwinkels der Schneiden war es also notwendig die Drahtachse aus der Senkrechten zu kippen. Dieses Verfahren war mit der verwendeten Maschine bis zu einem Winkel von 10° außerhalb der Senkrechten möglich. Somit bestand die theoretische Möglichkeit Keilwinkel von 80 bis 100° zu erzeugen.

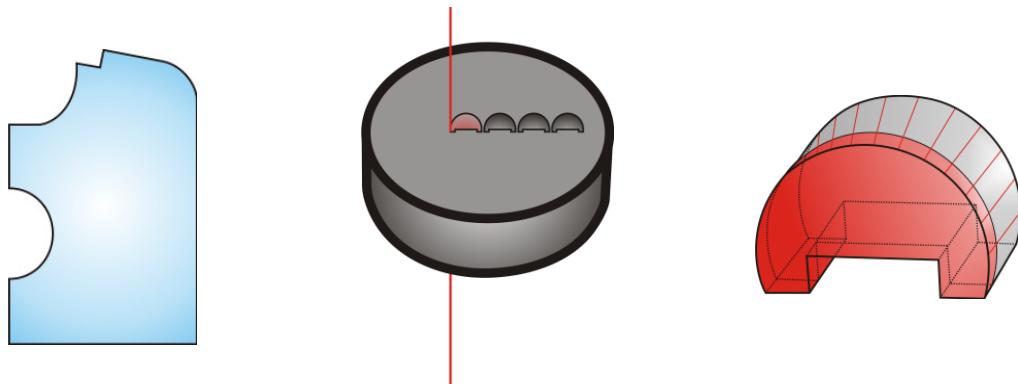


Abb. 4.4: links: Werkzeughalter; Mitte: Erodieren einer PKD – Ronde; rechts: Schneidelement

4.2.2.2 Löten

Die PKD – Elemente wurden auf dem Werkzeughalter mittels Hartlöten befestigt. Löten ist nach DIN ISO 857, Teil 2 ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Grundwerkstoffen. Ohne Erreichen der Solidustemperatur der Grundwerkstoffe, entsteht die Verbindung aus einer flüssigen Phase, die durch Schmelzen eines Lotes oder Diffusion an den Grenzflächen entsteht. /30/, /65/

Liegt die Liquidustemperatur des Lotes oberhalb von 450 °C wird das Lötverfahren als Hartlöten bezeichnet. /30/, /65/

Löten hatte zwei Vorteile. Zum einen bestanden hier bei Herstellern von Flussmitteln und Lötzusatz bereits Erfahrungen mit dem Fügen des Hartmetalls auf das das PKD gesintert wird. Zum anderen konnten schnell erste Werkzeuge hergestellt werden - ohne maschinellen Aufwand. Das alternative Verfahren Schweißen hätte erheblich mehr Entwicklungsaufwand benötigt, da es keinerlei Erfahrung mit dem Schweißen kleiner PKD – Elemente gab. Parallel zu den Versuchen mit gelöteten Elementen,

wurde später das Widerstandsschweißen der Schneidelemente erprobt und gegen Ende der Arbeit auch umgesetzt.

Der überwiegende Teil der Versuchsreihen wurde allerdings mit gelöteten Elementen durchgeführt. Zum Löten wurden das Lot BrazeTec 5507 und die Flussmittelpaste BrazeTec spezial h der Firma Umicore verwendet. Das Lot ist ein niedrigschmelzendes Silberhartlot mit sehr guten Fließeigenschaften. Es ist speziell für das Löten von PKD – Elementen geeignet, da es unterhalb der Umwandlungstemperatur von Diamant zu Graphit schmilzt und dann sofort einen guten Benetzungszustand herstellt. Die Flussmittelpaste ist ein Flussmittel nach DIN EN 1045 Typ FH12.

Energieträger beim angewandten Lötverfahren war das Hochleistungsgas maxigas 400, das von der Firma Rothenberger bezogen wurde. Es besteht zu 56 Vol.-% aus einem Gemisch aus n-Butan, Isobutan und Propen. Zudem besteht es aus 21 Vol-% Aceton, 21 Vol-% Propan und 1,5 Vol-% Pentane. Der verwendete Sauerstoff wurde ebenfalls von der Firma Rothenberger bezogen.

Die Wärme zum Schmelzen des Lötzusatzstoffs wurde durch Erhitzen des Werkzeughalters eingebracht, d.h. die Flamme wurde nicht an das PKD - Element gehalten, sondern unterhalb der Fügestelle an den Werkzeugstahl.

Die Nachteile dieses manuellen Fügeverfahrens sind die schwankende Qualität der Fügeverbindung und die geringe Positioniergenauigkeit des Schneidelements. Das Ergebnis einer Untersuchung zur Abweichung der Winkellage der gelöteten Elemente im Vergleich zu den ersten geschweißten, ist in Abb. 4.5 dargestellt. Es zeigte sich bereits bei diesen ersten Schweißversuchen eine erhebliche Reduzierung der Winkelabweichung.

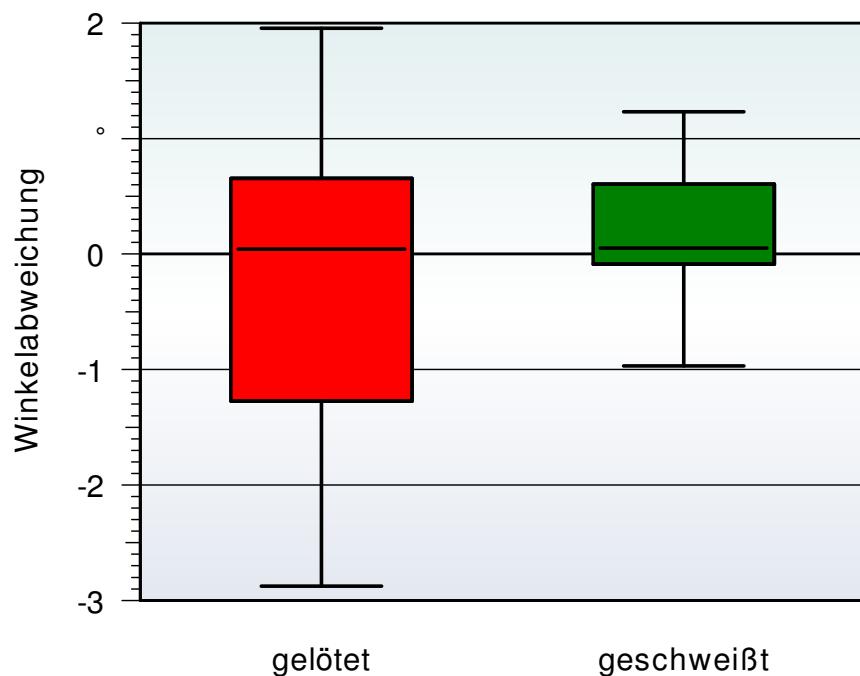


Abb. 4.5: Abweichung der Winkellage der PKD – Elemente

Zur seitlichen Positionierung der Elemente wurde beim Erodieren eine 1,7 mm breite Aussparung in die Elemente eingebracht. So konnte zusätzlich die Fläche der Fügezone vergrößert werden.

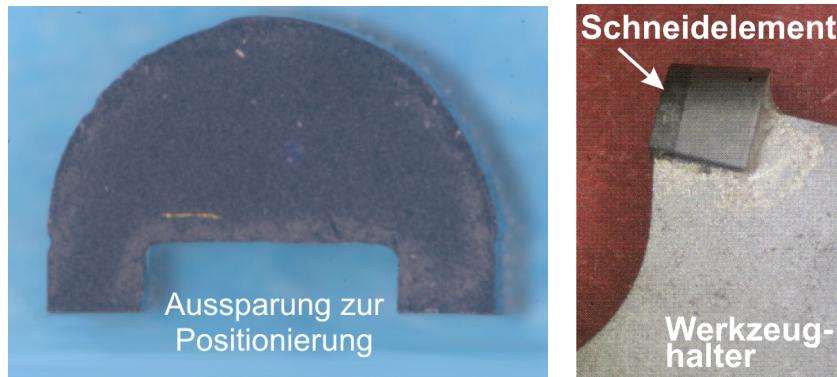


Abb. 4.6: links: Schneidelement mit Aussparung zum Positionieren; rechts: gelötetes Werkzeug

4.2.2.3 Schweißen

Parallel zu den laufenden Versuchsreihen wurden Alternativen zum Fügeverfahren Löten gesucht. Hier zeigte sich neben Laserstrahlschweißen das Widerstandsschweißverfahren als vielversprechend. Da eine Laserstrahlschweißanlage inklusive der benötigten Handhabungstechnik erheblich höhere Investitionen erforderte, wurde dem Widerstandsschweißen der Vorrang eingeräumt.

Beim Schweißen werden Teile am Schweißstoß durch Schweißnähte unlösbar zu einem Schweißteil zusammengefügt /69/. Beim Widerstandsschweißen wird die benötigte Wärmeenergie in der Fügezone durch Kurzschließen einer Stromquelle erzeugt.

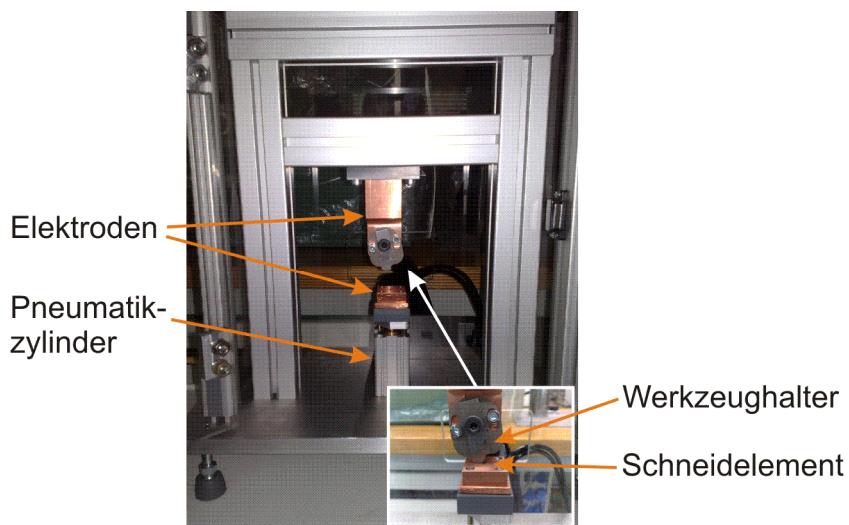


Abb. 4.7: Schweißvorrichtung

Zur Handhabung der zu fügenden Teile wurde die in Abb. 4.7 abgebildete Vorrichtung konstruiert. Diese führt das PKD – Element mittels eines Pneumatikzylinders von un-

ten an den Werkzeughalter heran, setzt es auf den dafür vorgesehenen Sitz auf und beaufschlagt es mit einer über einen Druckminderer eingestellten Kraft.

Anschließend wird der Schweißprozess gestartet. Hierbei ist die Steuerung des Schweißstroms von wesentlicher Bedeutung. Dazu wurde die Stromquelle SPATZH6000 der Firma Matuschek Widerstandsschweißtechnik verwendet. Diese ermöglicht dank einer Taktfrequenz von 20 kHz eine sehr genaue Stromführung.

Beim Test der ersten geschweißten Werkzeuge auf dem Linearprüfstand, trat sehr häufig das Abplatzen der kompletten PKD – Schicht auf. Dies war bei den gelöteten Schneiden nur in wenigen Ausnahmen der Fall. Zudem war der Zeitpunkt dieser Schichtabplatzung größtenteils vor der Standmenge von gelöteten Elementen, sodass eine Schädigung durch das Fügeverfahren Schweißen vorlag. Da sich die PKD – Schicht und die darunter liegende Hartmetallschicht in ihrem Temperaturausdehnungsverhalten unterscheiden, bewirkt die Energiezufuhr beim Schweißen eine Verschädigung der Verbindung dieser beiden Schichten. Durch die Lastwechsel im Eingriff breitet sich diese Schädigung aus und führt zum Verlust der PKD – Schicht.

Ziel der Schweißversuche war daher, die zur Verbindung der Stoffe nötige Energie in die Fügezone einzubringen, ohne den Schneidkörper mit einer hohen Temperatur zu belasten. Zum Zeitpunkt der Beendigung dieser Arbeit, wurden die besten Ergebnisse mit kurzen, starken Stromstößen erreicht. Zwischen den Stromstößen müssen Pausenzeiten zum Abkühlen eingefügt werden. So konzentriert sich die Hitze auf die Fügezone, während das Schneidelement selbst relativ kühl bleibt.

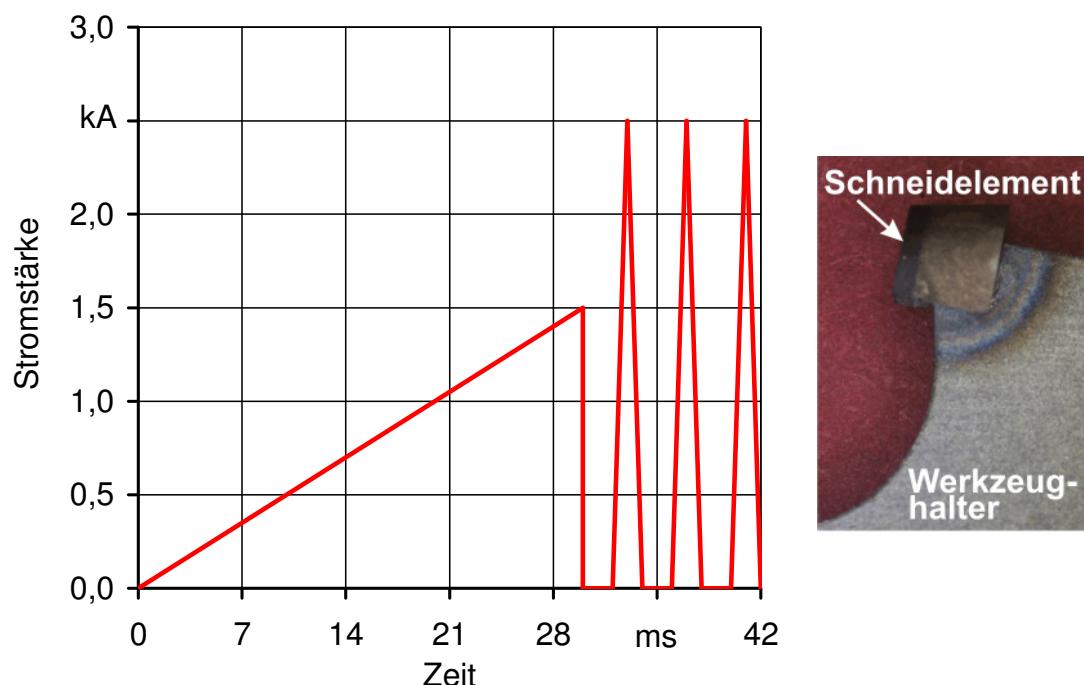


Abb. 4.8: links: Verlauf des Schweißstroms, rechts: geschweißtes Werkzeug

4.3 Versuchsstand

Grundgedanke der vorliegenden Arbeit ist die Erforschung der Bearbeitung mineralischer Werkstoffe mit geometrisch bestimmter Schneide ohne eine spätere Anwendung zu berücksichtigen. Die Schneiden sollten also weder einem bestehenden Werkzeug entnommen werden, noch sollte die Entwicklung im Hinblick auf ein bestimmtes Werkzeug durchgeführt werden. Dennoch musste für die Versuchsreihen eine Bearbeitungsbewegung festgelegt werden. Die Auswahl war auf eine kreisförmige und eine lineare Schnittlinie beschränkt.

Vorteil einer kreisförmigen Bearbeitungsbewegung ist der kontinuierliche Schnittverlauf. Zur Aufnahme der Bearbeitungskräfte sind jedoch erheblich mehr Sensoren und Rechenleistung erforderlich als bei der linearen Schnittbewegung.

Deshalb wurde der Versuchstand für einen linearen Schnittversuch geplant. Dabei sollte das Werkzeug fest in einer Messdose gehalten werden und nur die Bewegung in Vorschubrichtung ausführen. Die Bewegung in Schnittrichtung sollte das Werkstück ausüben.

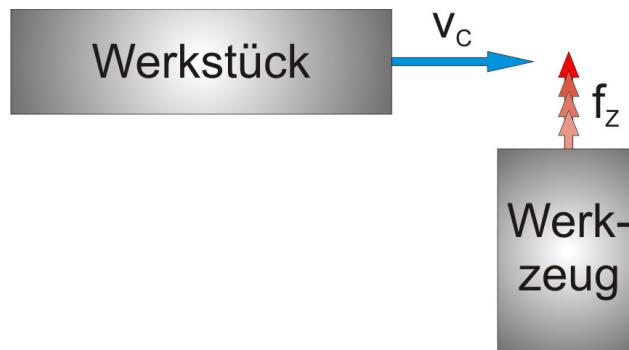


Abb. 4.9: Prinzipskizze Schnitt- und Vorschubbewegung

Auf der Grundlage dieser Überlegungen wurde ein vorhandener Versuchsstand umgerüstet und später ein neuer Prüfstand entwickelt. Die erste Maschine konnte Schnittgeschwindigkeiten bis 1 m/s realisieren, die Zustellung des Werkzeugs (Bewegung in Vorschubrichtung) erfolgte manuell. Auf dieser Anlage sollte die Machbarkeit des Vorhabens geprüft werden. Anschließend wurden darauf die ersten Versuchsreihen ausgeführt, die die Grundform der Schneide und grobe Einstellbereiche für Technologie- und Geometriefaktoren bestimmten. Die zweite Maschine wurde wesentlich größer und steifer geplant als die erste. Diese Maschine realisierte Schnittgeschwindigkeiten über 9 m/s und führte die Zustellung des Werkzeugs automatisch durch. Auf dieser Anlage wurde der überwiegende Teil der Versuchsreihen durchgeführt.

Aufgrund der linearen Schnittbewegung wurden beide Maschinen Lineareinheit oder auch Linearprüfstand genannt. Das soll auch in dieser Arbeit so beibehalten werden.

4.3.1 Konzeption des Linearprüfstands

Die vorhandene Maschine war als Anlage mit einer linearen Verfahrbewegung konstruiert. Die Erzeugung der erforderlichen Schnittgeschwindigkeit innerhalb der relativ kurzen Strecke, wurde mit einem Servomotor der Firma KEB Antriebstechnik in Verbindung mit einer Kugelumlaufspindel von Bosch Rexroth erzeugt.

Bei der Umrüstung der vorhandenen Maschine für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit, wurde diese um eine Werkzeugaufnahme ergänzt. Eine Messdose zur Aufnahme der Prozesskräfte und die Realisierung der Werkzeugzustellung waren Teile dieser Werkzeugaufnahme.

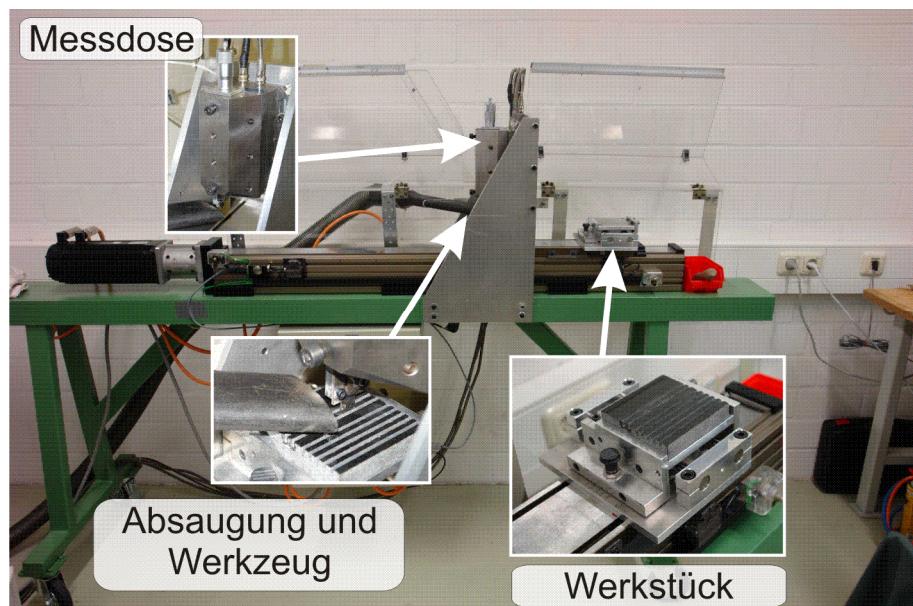


Abb. 4.10: erste Version des Linearprüfstands

4.3.2 Linearprüfstand

Die zweite Maschine wurde wesentlich steifer und massiver als die erste entworfen. War die erste Maschine noch fahrbar auf Rollen montiert, stand der neue Prüfstand ortsfest auf einem über 3 m langen Maschinenbett aus Polymerbeton und wog ca. 6 t. Neben der Maschine musste noch ein ebenfalls ca. 3 m langer Schaltschrank errichtet werden. Die Fertigung und Montage der Maschine nahm über ein Jahr in Anspruch und fand in Kooperation mit der Firma Weber GmbH, Aschaffenburg, statt.

Die Funktionskomponenten der Maschine wurden von der Firma Bosch Rexroth bezogen. Der Linearmotor IndraDyn L Baugröße 140 S realisiert die Schnittgeschwindigkeit. Ein Synchron-Servomotor IndraDyn S MSKO erzeugt die Zustellung des Werkzeugs.

Ziel der Neukonstruktion war zum einen die Versteifung der Maschine und zum anderen die Automatisierung der Werkzeugzustellung. Diese Automatisierung verkürzte die

Dauer einer Versuchsreihe erheblich und ermöglichte somit wesentlich größere Versuchsumfänge. Des Weiteren erfüllte die Neukonstruktion die Forderungen nach höheren Schnittgeschwindigkeiten und Zustellgenauigkeiten.

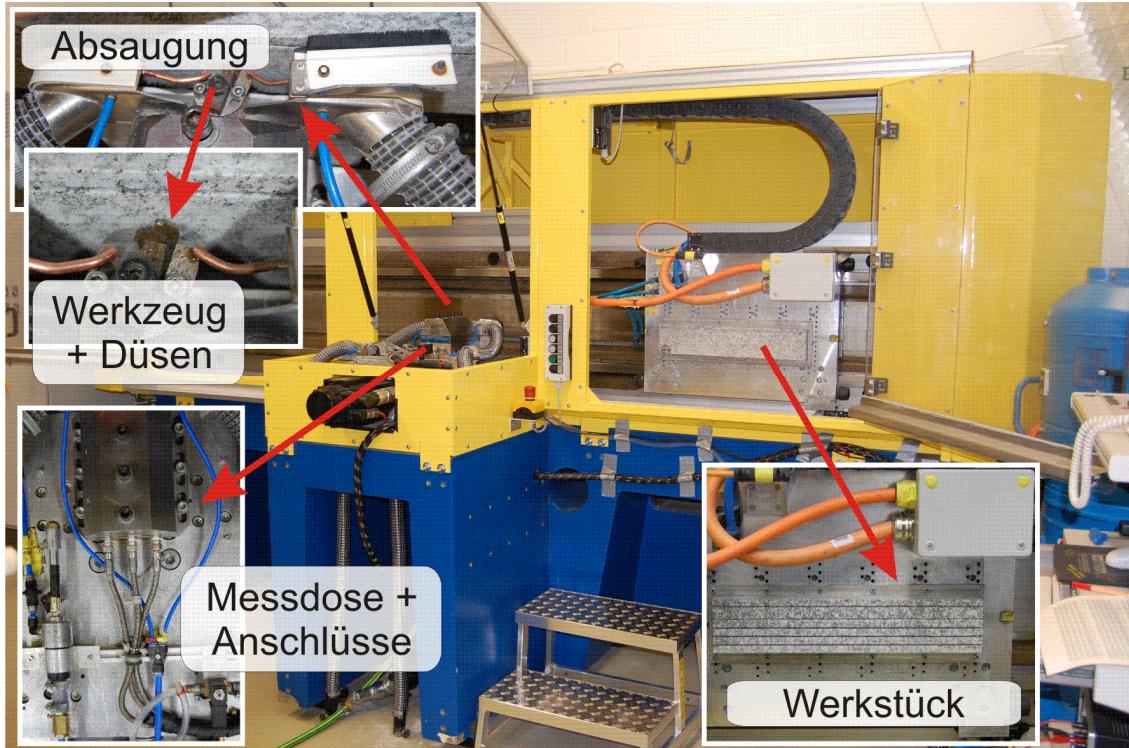


Abb. 4.11: neu entworfener Linearprüfstand

4.3.2.1 Kühlung und Absaugung

Bei vielen Steinbearbeitungsverfahren, wie z.B. Kernbohren im Baustellenbereich, werden die Schneiden der Werkzeuge weder gekühlt noch gespült. Andere Verfahren, wie das Trennschleifen von Natursteinen, nutzen Wasser als Spül- und Kühlmittel.

Der Prüfstand wurde zunächst ohne Kühlung / Spülung ausgelegt. Beidseitig des Werkzeugs wurden Saugdüsen angebracht (siehe Abb. 4.11, links oben), durch die ein geräuscharmer Industriesauger das beim Bearbeitungsvorgang entstehende Gesteinsmehl absaugen sollte. Es zeigte sich jedoch, dass die Absaugung allein nicht ausreichte um die aktuelle Bearbeitungsnut zu säubern. Das Gesteinsmehl bewirkte in der horizontalen Nut eine einseitige Belastung des Schneidelements, da es nur auf der Unterseite der Nut zum Liegen kam. Der dadurch aufgetretene Reibungsunterschied der Seitenfreiflächen der Schneide ist jedoch kein realer Effekt, sondern ein Maschineneinfluss. Daher musste die Ablagerung des Gesteinsmehls auf der Unterseite der Nut verhindert werden.

Beiderseits der Werkzeugaufnahme wurden mit jeweils einem Kupferröhrchen (Innendurchmesser 2 mm) Luftdüsen installiert (siehe Abb. 4.11, links oben, kleineres Bild), die das Gesteinsmehl aus der Bearbeitungsnut zu den Saugdüsen blasen. Zur zusätz-

lichen Kühlung des Werkzeugs wurde in die Zuleitung der Luftpistolen ein druckluftbetriebener Kältegenerator eingebaut, der auf dem Prinzip des Wirbelrohrs beruht. So wurde die Luft, die das Werkzeug aus den zwei Düsen umströmt, auf ca. -5 °C abgekühlt.

Parallel zu den ersten Versuchsreihen wurde eine Wasserversorgung in den Linearprüfstand gelegt. Durch einfaches Umstecken der Luftpistole konnten so die Luftpistolen zu Wasserdüsen (Durchflussmenge: 2,8 l/min bei 4 bar) umfunktioniert werden (siehe Abb. 4.11, links unten). Ein 2/2-Wegeventil wurde von DIAdem so angesteuert, dass das Wasser nur während des Eingriffs an das Werkzeug und in die Bearbeitungsnut strömte.

Die Maschine kann folglich mit Wasser- und mit Luftspülung/-kühlung betrieben werden. Wasser wurde jedoch nur für wenige Versuchsreihen genutzt, da der Aufwand bei der Versuchsdurchführung und der dabei täglich notwendigen Maschinenpflege erheblich größer war als bei Versuchen mit Luft als Kühl- und Spülmittel.

4.3.3 Versuchsablauf

4.3.3.1 Versuchsablauf – Konzeption des Linearprüfstand

Auf der ersten Version des Linearprüfstands konnte das Werkstück innerhalb der ersten Hälfte der Führungsbahn auf bis zu 1 m/s beschleunigt werden. Kurz nach der Mitte der Bahn wurde das Werkzeug senkrecht zum Werkstück in der Kraftmessdose der Firma Kistler (siehe Abschnitt 4.1.1) gehalten. Durch die Bewegung des Werkstücks erfolgte der Eingriff der Schneide. Anschließend wurde das Werkstück auf dem zweiten Abschnitt der Führungsbahn bis zum Stillstand abgebremst.

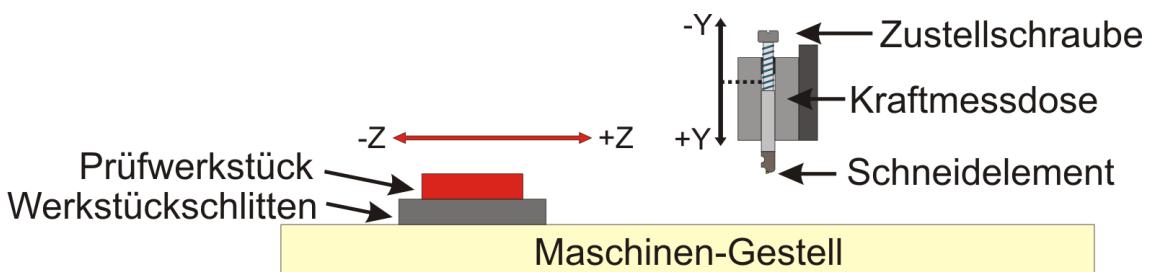


Abb. 4.12: Kinematik erster Linearprüfstand

Um die Maschine wieder in den Ausgangszustand zu versetzen, wurde das Werkzeug gelöst und zurückgesetzt, der Werkstückschlitten auf Ausgangsposition gefahren und anschließend das Werkzeug um den jeweiligen Zustellungswert weiter als beim letzten Durchgang zugestellt. Die Zustellung erfolgte mit einer Mikrometerschraube, die Teil einer speziell für die Kraftmessdose entworfenen Vorrichtung war. Nach der Zustellung wurde das Werkzeug wieder gespannt. Die Genauigkeit der Zustellung war

von der Wiederholgenauigkeit der Mikrometerschraube, dem Anzugsmoment der Spannschrauben und vor allem vom Bediener abhängig.

Ausgelöst wurde ein Versuch per Messrechner. Das Programm DIAdem startete den Servomotor und begann zeitgleich die Signale der Kraftmessdose aufzuzeichnen.

4.3.3.2 Versuchsablauf –Linearprüfstand

4.3.3.2.1 Vorbereitungen

Die neue Maschine ermöglichte wiederholbar exaktere Ergebnisse als der alte Versuchsstand. Außerdem waren nun erheblich größere Versuchsumfänge in relativ kurzer Zeit möglich. Daher änderte sich der Versuchsablauf deutlich. Zwar stand die Messung der Prozesskräfte weiterhin im Mittelpunkt der Versuche, die Einführung zusätzlicher Betrachtungen erforderte jedoch eine aufwändigere Vor- und Nachbereitung der Versuche.

Vor jedem Versuch wurde die Freifläche der Werkzeuge in einem Stereomikroskop betrachtet und fotografiert. So konnte der Verschleißfortschritt an den Schneiden betrachtet werden.

Die Werkstücke mussten für den Versuch als Platten mit 500 mm Länge, ca. 100 mm Breite und einer Stärke von mindestens 15 mm vorliegen. Diese Platten wurden dann mit dem Kleber OTTOCOLL M500 der Firma Otto-Chemie auf Aluminiumplatten geklebt, deren Lochbild zur Werkstückaufnahme der Maschine passte. Nach 2 Tagen Aushärtezeit des Klebers konnten die Platten für die Versuche verwendet werden.

Jede Werkstückplatte wurde zu Beginn mit einem Standardwerkzeug bei immer gleichen Schnittparametern bearbeitet. Diese Maßnahme ermöglichte später eine Abgrenzung zwischen den verschiedenen Werkstückmaterialien.

4.3.3.2.2 Durchführung

Wie bei der ersten Version des Versuchsstands wird das Werkstück auf der ersten Hälfte der Führungsbahn auf die geforderte Schnittgeschwindigkeit beschleunigt. Die maximal mögliche Geschwindigkeit beträgt 9 m/s. Auf der anderen Hälfte der Bahn stoppt der Werkstückschlitten wieder. In der Mitte der Maschine befindet sich eine Plattform, die mittels eines Stellmotors eine senkrecht zur Verfahrbewegung des Werkstückschlittens gerichtete Bewegung ausführt. Auf dieser Plattform wird das Werkzeug in der Kraftmessdose gehalten. Der Servomotor realisiert die Zustellung über einen Gewindetrieb an der Plattform. Die Positionen der Plattform und des Werkstückschlittens werden mittels absolut messenden Glasmaßstäben überwacht.

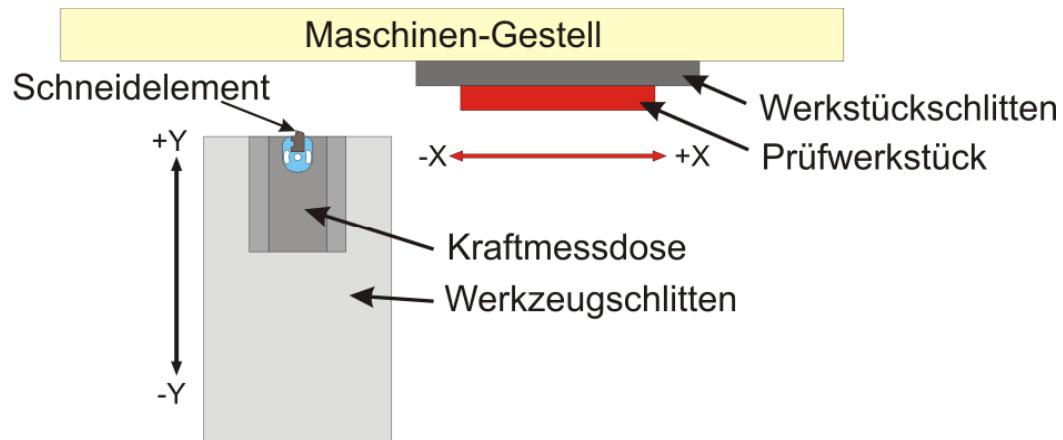


Abb. 4.13: Kinematik neuer Linearprüfstand

In der Maschinensteuerung ist ein Automatikbetrieb hinterlegt: Der Bediener gibt dazu Schnittgeschwindigkeit, Zustellung pro Zyklus, Anzahl der durchzuführenden Zyklen und die Startposition der Plattform ein. Der erste Zyklus beginnt mit der Zustellung des Werkzeugs, d.h. mit dem Vorfahren der Plattform auf die eingegebene Startposition. Anschließend beschleunigt der Werkstückschlitten das Werkstück. Der Eingriff erfolgt. Während dann das Werkstück abgebremst wird, fährt die Plattform mit dem Werkzeug zurück auf eine Sicherheitsposition. Ist diese erreicht, verfährt der Werkstückschlitten zurück auf seine Startposition und der nächste Zyklus beginnt. Dieser erfolgt analog zum ersten Zyklus, mit dem Unterschied, dass das Werkzeug um den eingegebenen Betrag (Zustellung pro Zyklus) weiter zugestellt wird. Die Positionierunsicherheit dieser Zustellbewegung beträgt $1 \mu\text{m}$. Wenn die eingegebene Gesamtanzahl der Zyklen erreicht ist, stoppt der Automatikbetrieb.

Ein Automatikbetrieb wird Auto-Zyklus genannt. Im Regelfall erzeugt ein Werkzeug während eines Auto-Zyklus im Werkstück eine ca. 10 mm tiefe Schnittfuge. Anschließend wird das Werkzeug aus der Maschine entnommen und zur visuellen Verschleißfassung erneut fotografiert.

Nach einem Auto-Zyklus muss das Werkstück quer zur erzeugten Schnittfuge versetzt werden, sodass beim nächsten Automatikbetrieb eine parallele Nut fertiggestellt wird.

Im Gegensatz zum ersten Versuchsstand werden die Versuche nicht von DIAdem gestartet, sondern von der Maschinensteuerung. Deshalb wurde in der Maschine eine Lichtschranke installiert, die in DIAdem die Aufzeichnung der Prozesskräfte auslöst. Bei den Versuchen mit Wasser als Kühl- und Spülmittel, wurde das Signal der Lichtschranke von DIAdem zusätzlich zur Steuerung des 2/2-Wegevents genutzt.

Bei den ersten Versuchsreihen fiel auf, dass bei manchen Werkstoffen häufig während der Bearbeitung das zwischen den Schnittfugen verbleibende Material bricht. Dadurch wird die Bearbeitungsstelle auf dieser Seite freigelegt, die Schneide drängt dem geringeren Widerstand nach und die Passivkraft steigt. Da die Schnittfugen der Reihe nach nebeneinander erzeugt wurden, befand sich die neue Nut immer auf der

gleichen Seite der zuletzt erzeugten Schnittfuge. Somit stieg auch die Passivkraft immer mit dem gleichen Vorzeichen, was auf Dauer eine Schwächung der Lötstelle verursachte und dadurch frühzeitiges Versagen dieser Fügestelle bewirkte.

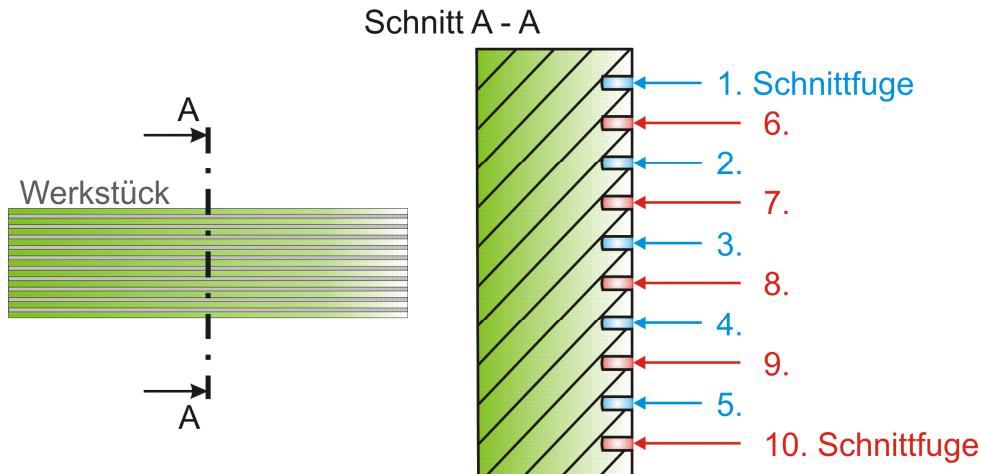


Abb. 4.14: veränderte Reihenfolge der Schnittfugen

Zur Minimierung dieser Störgröße wurde die Reihenfolge der Schnittfugen auf dem Werkstück so verändert, dass die ersten Nuten mit doppeltem Abstand erzeugt und anschließend die verbliebenen Zwischenräume genutzt wurden. Bei der Herstellung der Schnittfugen in den Zwischenräumen brach zwar teilweise immer noch das Material, doch war nun die Richtung zufällig. Da sichergestellt wurde, dass alle Schneiden die gleiche Anzahl Schnittfugen mit doppelten Abständen und Zwischenrinnen erzeugen, blieb die Vergleichbarkeit erhalten, während Material gespart werden konnte und die Lötstelle entlastet wurde.

4.3.3.2.3 Nachbereitungen

Wie bereits erwähnt, wurden die Werkzeuge nach jedem Versuch erneut zur Verschleißfassung fotografiert. Das Lösen der Klebeverbindung zwischen Werkstück und Aluminiumplatte erfolgte mittels Erhitzen des Verbunds über mehrere Stunden in einem Laborofen.

Die von DIAdem erzeugten Daten wurden nach den Versuchen in eine übersichtliche Ordnerstruktur kopiert und mit Informationen über die Versuchsbedingungen versehen.

Ein sehr wichtiger und zeitaufwändiger Punkt der Nachbereitungen war die tägliche Pflege und Wartung des Linearprüfstands. Die Kugelumlaufführungen des Werkstückschlittens und der Zustellplattform benötigen aufgrund der hohen Staubbelastung häufig Schmierung. Bei den Versuchen mit Wasser erhöhte sich die tägliche Pflegezeit auf über eine Stunde, da die Maschine komplett getrocknet werden musste. Die Eisen-Spurenelemente aus dem Werkstückwerkstoff erzeugten andernfalls innerhalb kürzester Zeit Korrosion auf den Edelstahlschienen der Führungen.

4.4 Vorgehensweise

4.4.1 Versuchsplanung

Die Versuche wurden mit den Grundlagen der statistischen Versuchsplanung geplant und gestaltet. Bei der Auswertung konnte allerdings nur teilweise auf die Werkzeuge dieser Methodik zurückgegriffen werden.

4.4.1.1 Einflussgrößen

Eine Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Schneidelements zum Trennen mineralischer Werkstoffe mit geometrisch bestimmter Schneide. Hauptaugenmerk lag dabei auf dem Trennen von Naturstein. Zu diesem Themengebiet existierten bis dato keinerlei experimentelle Veröffentlichungen, sodass im ersten Schritt die Grundlagen erarbeitet werden mussten. Mithilfe einer Recherche in den verwandten Themengebieten „Trennen von Naturstein mit geometrisch unbestimmter Schneide“ und „Trennen von Metallen mit geometrisch bestimmter Schneide“ wurden die Haupteinflussgrößen des Werkzeug – Werkstücksystems benannt.

An dieser Stelle sollen nun die wichtigsten Einstellgrößen des Werkzeug- / Werkstücksystems genannt werden.

- Technologiegrößen:
 - Schnittgeschwindigkeit v_c
 - Zustellung f_z
 - Fügeverfahren
 - Schneidstoff
 - Kühlung / Spülung
- Geometriegrößen
 - Schneidenform
 - Frei-, Keil- und Spanwinkel (α, β, γ)
- Materialgrößen
 - Werkstoff (Gesteinsart)

Zusätzlich zu den Einstellgrößen haben zahlreiche Störgrößen Einfluss auf den Trennprozess, die hier jedoch nicht aufgeführt werden sollen. Erkannte Störgrößen wurden möglichst konstant gehalten oder erfasst.

4.4.1.2 Zielgrößen

Die Nutzung der Werkzeuge der statistischen Versuchsplanung zur Auswertung der Versuche ist an die Definition von Zielgrößen gebunden. Diese Zielgrößen müssen als Einzelwerte ausgedrückt werden können. Eine Zielgröße, die Funktion einer anderen Größe ist, wie z.B. Kraftverlauf über Standzeit, ist ungeeignet.

Die Versuche auf dem ersten Linearprüfstand waren sehr langwierig, sodass keine Standzeitversuche durchgeführt wurden. Die Zielgröße war die Maximalkraft, die aus wenigen Schnitten eines Schneidelements ermittelt wurde. Die anderen Beurteilungen des Prozesses waren visuelle Verschleißbetrachtungen, die ohne Messung zu Weiterentwicklungen führten.

Aufgrund des erheblich beschleunigten Versuchsablaufs auf dem zweiten Linearprüfstand, konnten die Schneidelemente auf dieser Maschine bis zum Versagen gestestet werden. Als Zielgröße wurde daher die Standzeit gewählt. In den ersten Versuchsreihen zeigte sich jedoch, dass die Standzeiten der Schneidelemente erheblichen Schwankungen unterlagen, wobei das Standzeitende bei 80 % der Elemente auf das Abreißen des kompletten Schneidelements vom Halter zurückzuführen war.

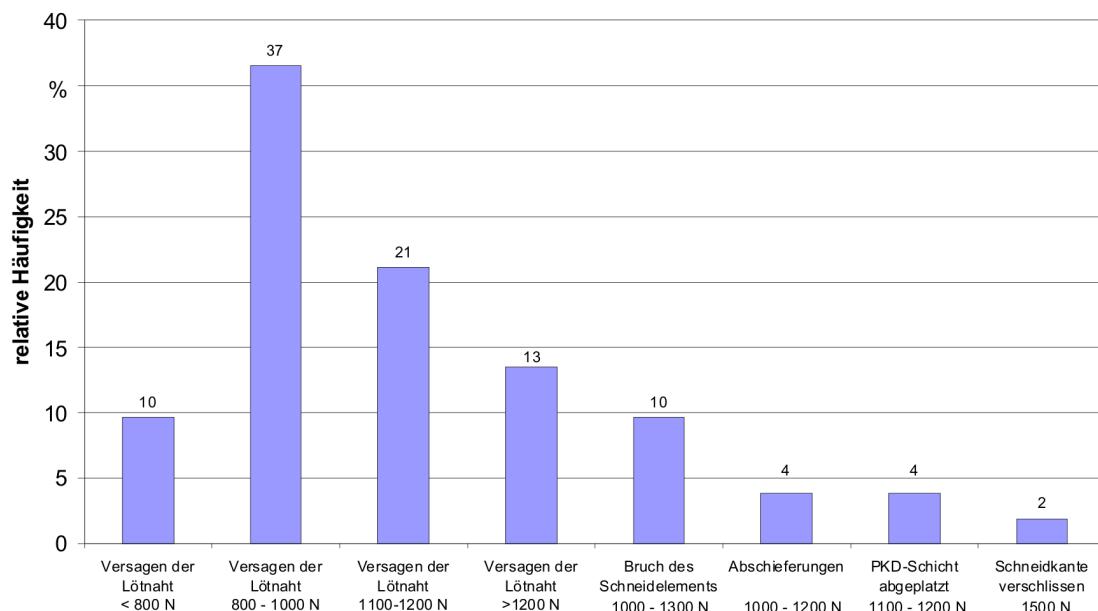


Abb. 4.15: Ausfallursachen bei gelöteten PKD - Elementen

Die Ursache der Schwankungen lag beim Löten der Elemente auf den Halter. Nach dem Erkennen des Problems wurden die Schwankungen durch verschiedenste Maßnahmen auf ein Minimum reduziert. Der manuelle Fügeprozess verursacht jedoch verfahrensbedingt gewisse Qualitätsunterschiede, sodass das Abreißen der Elemente weder verhindert werden konnte, noch auf einem konstanten Kräfteniveau stattfand.

Die ermittelte Standzeit war somit kein Maß für die Verschleißfestigkeit der Schneidelemente, sondern eine Angabe zur Belastbarkeit der Lötverbindung.

Standardmäßig wurden bei jedem Versuch die Bearbeitungskräfte aufgezeichnet und anschließend über dem zerspannten Volumen aufgetragen. Die so ermittelten Kraftverläufe konnten miteinander verglichen und damit die besten Faktorstufenkombinationen herausgestellt werden. Die statistische Auswertung konnte jedoch nicht angewendet werden. Maximalkräfte, mittlere Kräfte oder andere Werte aus den Kraftkurven zu ermitteln, war aufgrund der oben erläuterten Lötproblematik ebenfalls nicht aussagekräftig. Erst wenn die Schneidelemente prozesssicher geschweißt werden können, ist die Festlegung der genannten Zielgrößen sinnvoll.

Als weitere Zielgröße wurde während der ersten Versuchsreihen eine Verschleißbeobachtung eingeführt. Dazu wurden die Freiflächenbilder der Schneidelemente vermessen, und so ein Verschleißfortschritt skizziert.

4.4.2 Versuchsauswertung

4.4.2.1 Erster Linearprüfstand

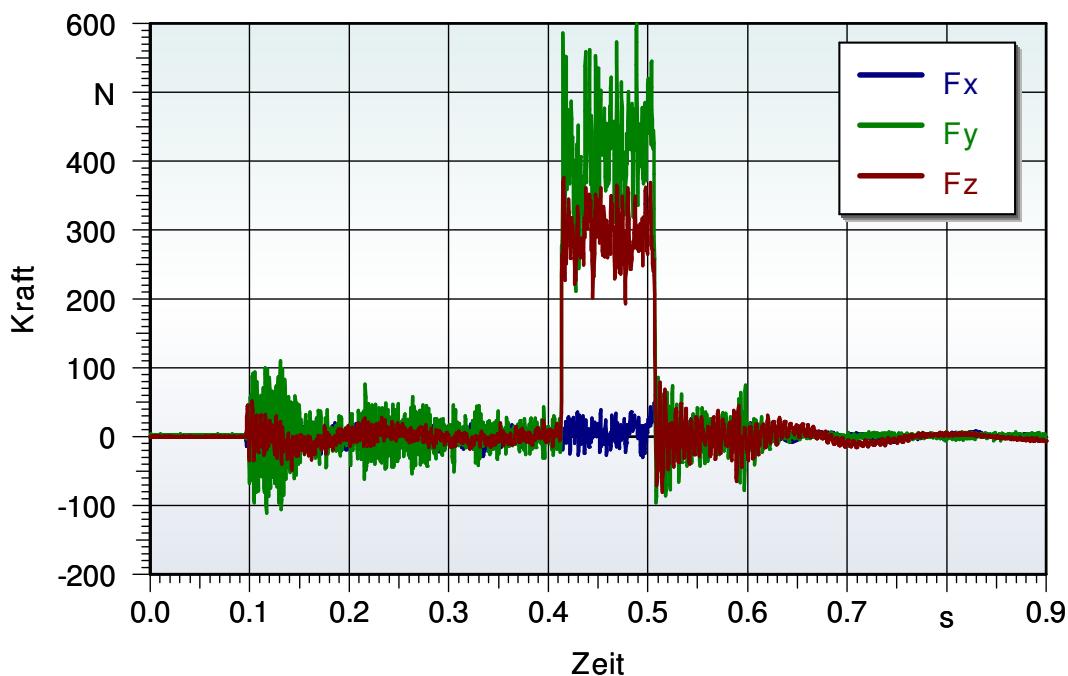


Abb. 4.16: Zerspankräfte beim Schneiden von Nero Assoluto;
Versuch auf dem ersten Linearprüfstand; $v_c=60$ m/min,
 $f_z=100$ μm (exemplarische Darstellung)

Abb. 4.16 zeigt das Ergebnis eines Schnittes auf dem ersten Linearprüfstand. Die Messung der Kräfte beginnt 0,1 s bevor der Werkstückschlitten startet und endet, wenn er steht. Der Ausschlag ab ca. 0,41 s zeigt die Kräfte während des Eingriffs.

F_x entspricht der Passivkraft, F_y der Vorschubkraft und F_z der Schnittkraft. Bei der Auswertung der Versuche wurde nur der Eingriffszeitraum betrachtet. Als Zielgröße wurden die Maximalwerte der Vorschub- und der Schnittkraft ermittelt.

Als weiteres Ergebnis der Schnittversuche wurde der Zustand der Schneidelemente fotografisch festgehalten und visuell beurteilt.

4.4.2.2 Zweiter Linearprüfstand

Der wesentlich vereinfachte Versuchsablauf auf dem neu konstruierten Versuchsstand ermöglichte eine Erweiterung der Versuchsauswertung. Statt einzelne Schnitte darzustellen, wurde dazu übergegangen alle Schnitte eines Schneidelements abzubilden.

4.4.2.2.1 Kräfte

Aufbereitung der Kraftmessungen

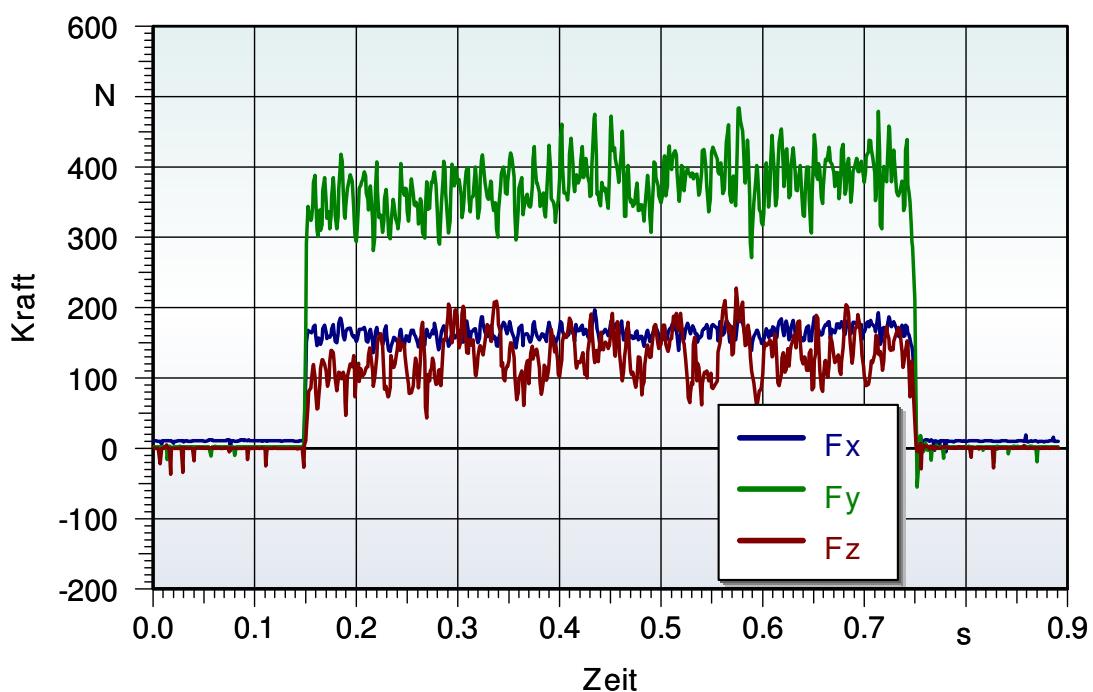


Abb. 4.17: Zerspankräfte beim Schneiden von schwarzem Granit;
Versuch auf dem Linearprüfstand; $v_c=50$ m/min; $f_z=30$ μm
(exemplarische Darstellung)

Abb. 4.17 zeigt das Ergebnis eines Schnittes auf dem neuen Linearprüfstand. Da die Messung per Lichtschranke ausgelöst wird, werden nur wenige zusätzliche Daten vor und nach der Eingriffszeit aufgenommen. Diese Daten wurden genutzt um gelegent-

lich auftretende Offset- (Bsp.: F_x in Abb. 4.17) oder Driftfehler zu bereinigen. Anschließend wurde die Eingriffszeit freigeschnitten, um die Mittelwerte der Kräfte zu berechnen. Zusätzlich zum Mittelwert wurde das Konfidenzintervall berechnet, sodass beim Vergleich mehrerer Kurven die Signifikanz der erkennbaren Unterschiede geprüft werden konnte.

Da die Kraftmessdose im neuen Prüfstand mit einer anderen Orientierung verbaut wurde, entspricht F_x hier der Schnittkraft und F_z der Passivkraft.

Die für jeden Schnitt berechneten Kraftmittelwerte wurden über dem, durch das Schneidelement zerspanten Volumen aufgetragen, sodass eine Standzeitkurve entstand. Die Berechnung des Schnittvolumens ergab sich aus den Abmessungen des Werkstücks, der Geometrie des Schneidelements, Zustellung pro Schnitt und der aktuellen Schnittzahl.

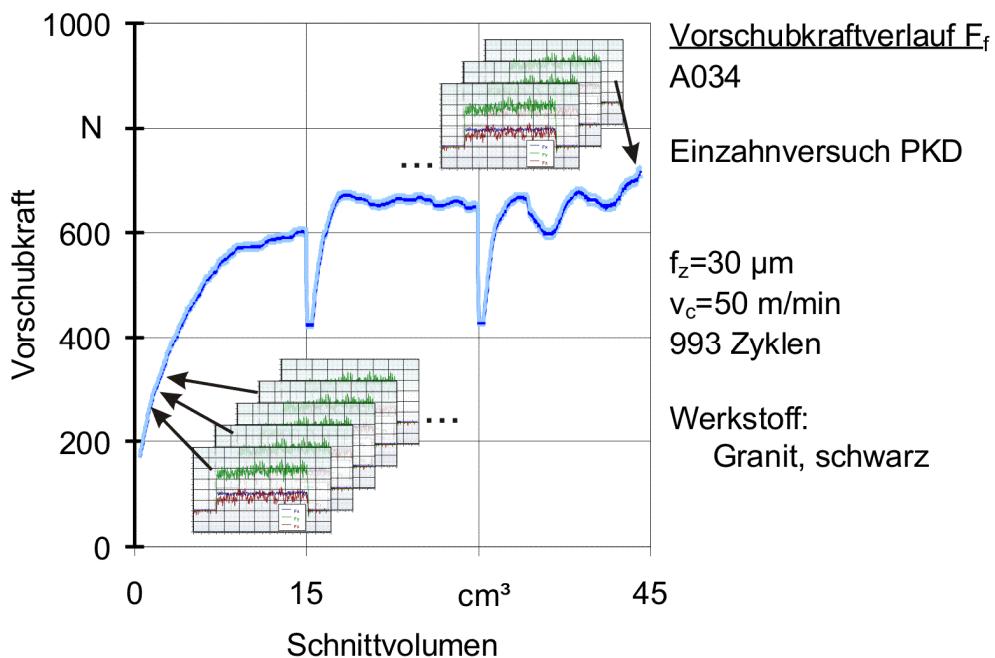


Abb. 4.18: Einfluss des Schnittvolumens auf die Vorschubkraft (exemplarische Darstellung der Diagrammerstellung)

Eine 10 mm tiefe Schnittfuge entspricht einem zerspanten Volumen von 15 cm^3 . Deshalb zeigt die Kurve in Abb. 4.18 bei allen Vielfachen von 15 cm^3 einen Einbruch. Aufgrund der runden Form der Spanfläche steigt der Materialabtrag zu Beginn einer Schnittfuge mit der Schnitttiefe an. Wird die Schnitttiefe größer als der Radius der Spanfläche, bleibt der Materialabtrag pro Schnitt konstant. Da im Anschnitt der Spanungsquerschnitt geringer ist, ist auch die Zerspankraft niedriger. Zur Glättung der Kurve wurden die Zerspankraftkomponenten deshalb in spezifische Größen umgerechnet. Die notwendigen Berechnungsschritte werden im anschließenden Abschnitt erläutert.

Die gemessene Passivkraft wird sehr stark durch den geringen Abstand zwischen den Schnittfugen beeinflusst. Durch die Änderung der Bearbeitungsreihenfolge (siehe Abschnitt 4.3.3.2.2) wurde die Richtung der Passivkraft zufällig, der Betrag stieg dennoch. Dies ist jedoch ein systematischer Fehler des Versuchsaufbaus und kein realer Effekt der Schneidelemente oder deren Geometrie. Daher wurde die Passivkraft in den weiteren Auswertungsschritten nicht berücksichtigt. Sie diente lediglich der Überprüfung auf weitere Störgrößen der Versuchsanordnung.

Berechnung der spezifischen Kräfte

Die Verwendung der spezifischen Schnitt- und Vorschubkraft brachte zwei Vorteile. Zum einen verliefen die Auswertungskurven stetiger. Dies wurde bereits oben erläutert. Zum anderen wird die Belastung der Schneide aussagekräftiger charakterisiert: Die absolute Zerspankraft ist bei geringer Zustellung etwas kleiner als bei großen Zustellwerten, da ein geringerer Materialabtrag stattfindet. Im absoluten Vergleich scheinen die Schneiden mit geringer Zustellung daher weniger belastet zu werden. Eine geringere Zustellung erfordert jedoch mehr Eingriffe zur Zerspanung des gleichen Volumens, d.h. die Schneide muss mehr Schläge ertragen. Der Bezug auf den Spanungsquerschnitt stellt diese Zusammenhänge besser dar.

An dieser Stelle sollen daher die Schritte zur Berechnung der spezifischen Schnitt- und Vorschubkraft erläutert werden.

Die Grundlage bilden die Gleichungen 2.7 und 2.8, die nach den spezifischen Größen aufgelöst werden:

$$k_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (4.1)$$

$$k_f = \frac{F_f}{A_c} \quad (4.2)$$

Die absoluten Kräfte F_c und F_f werden im Versuch gemessen, sind also bekannt.

Unbekannt ist der aktuelle Spanungsquerschnitt $A_{c,n}$ bei jeder Zustellung.

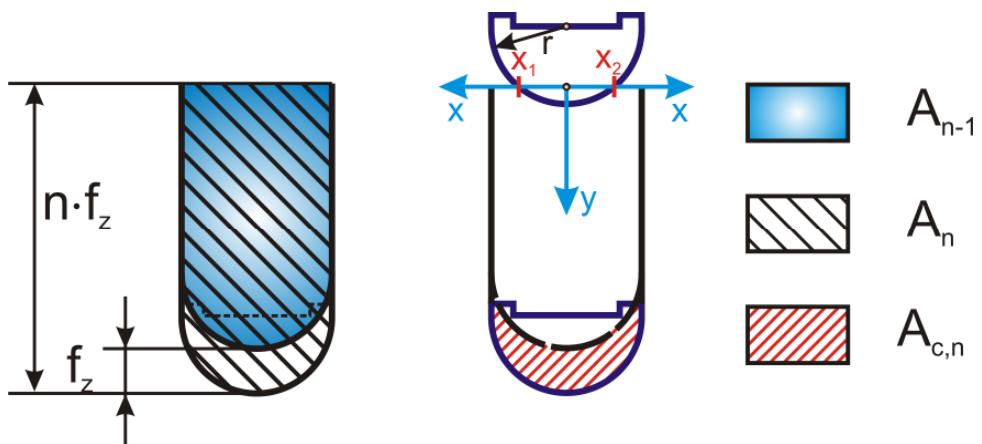


Abb. 4.19: Spanungsquerschnitt beim Einsatz halbkreisförmiger Schneiden in unterschiedlichen Zustellungssituationen

Der Spanungsquerschnitt berechnet sich als Differenz der aktuellen Nutquerschnittsfläche A_n und der entsprechenden Fläche A_{n-1} beim letzten Zustellungszustand:

$$A_{c,n} = A_n - A_{n-1} \quad (4.3)$$

Der Schnittfugenquerschnitt A_n berechnet sich als Integral einer Kreisfunktion mit dem Radius der Spanfläche und dem von der Zustellung abhängigen Ordinatenpunkt:

$$A_n = \int_{x_{1,n}}^{x_{2,n}} \sqrt{r^2 - x^2} + (r - n \cdot f_z) dx \quad (4.4)$$

Die Integrationsgrenzen $x_{1,n}$ und $x_{2,n}$ hängen von der aktuellen Gesamtzustellung $n \cdot f_z$ ab. Bevor diese größer als der Spanflächenradius ist, sind die Nullstellen der Kreisfunktion die Integrationsgrenzen. Anschließend lässt sich die Spanungsquerschnitt als Rechteckfläche berechnen.

für $n \cdot f_z < r$:

$$x_{1/2,n} = \pm \sqrt{r^2 - (n \cdot f_z - r)^2} \quad (4.5)$$

für $n \cdot f_z \geq r$:

$$A_{c,n} = 2 \cdot r \cdot f_z \quad (4.6)$$

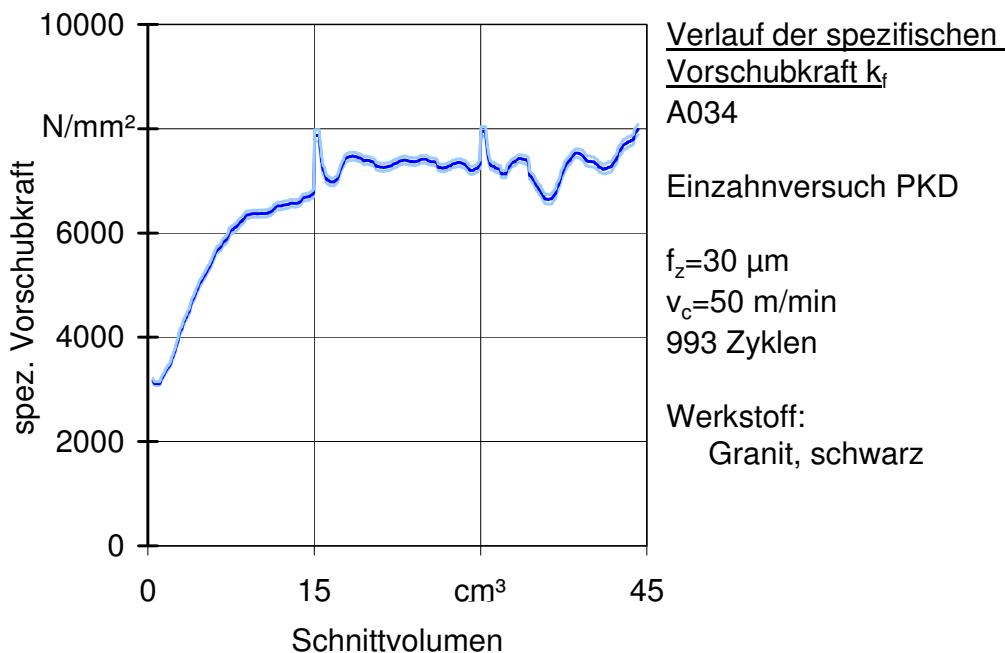


Abb. 4.20: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft (exempl.)

Abb. 4.20 zeigt das spezifische Pendant zu Abb. 4.18. Da der berechnete Spanungsquerschnitt niemals exakt dem realen entspricht, sind auch in dieser Kurve die ersten Zyklen einer Schnittfuge zu erkennen. Die Breite dieser Unstetigkeiten ist jedoch deutlich geringer.

Zusammenfassung und Vergleich

Alle Faktorstufenkombinationen wurden mit mindestens zweifacher Wiederholung (Stichprobengröße 3) durchgeführt. Wie in Abschnitt 4.4.1.2 erläutert, konnten die Kraftverläufe jedoch nicht auf aussagekräftige Einzelwerte reduziert werden. Somit war keine Auswertung im ursprünglichen Sinne der statistischen Versuchsplanung möglich.

Um dennoch den zur Auswertung der Versuche dringend erforderlichen Vergleich der verschiedenen Faktorstufenkombinationen zu ermöglichen, wurden die Kraftverläufe gleicher Faktorstufenkombinationen zusammengefasst. Die dazu erforderlichen Schritte sollen nachfolgend erläutert werden.

Reduktion der Datenmenge

Zur Reduzierung der Datenmengen und Erhöhung der Übersichtlichkeit beim späteren Kurvenvergleich, wurde im ersten Schritt eine Art Glättung vorgenommen. Die Datenreihen wurden durchlaufen und bei allen Vielfachen von 2 cm^3 Schnittvolumen wurde ein Mittelwert aus der Menge der letzten und der nächsten 10 Kraftwerte gebildet. (Abb. 4.21 zeigt die geglättete Darstellung der Kurve aus Abb. 4.20.) Zudem wurde

der Schätzwert der wahren Standardabweichung dieser meist 21 Werte umfassenden Stichprobe berechnet. Die Werte für Schnittvolumen, Stichprobengröße, Mittelwert und Standardabweichung wurden in einer Matrix zusammengehörig abgelegt. Bei der Zusammenfassung der Kraftkurven gleicher Elemente wurden anschließend die Stichprobenkennwerte mit gleichem zugehörigen Schnittvolumen zusammengefasst.

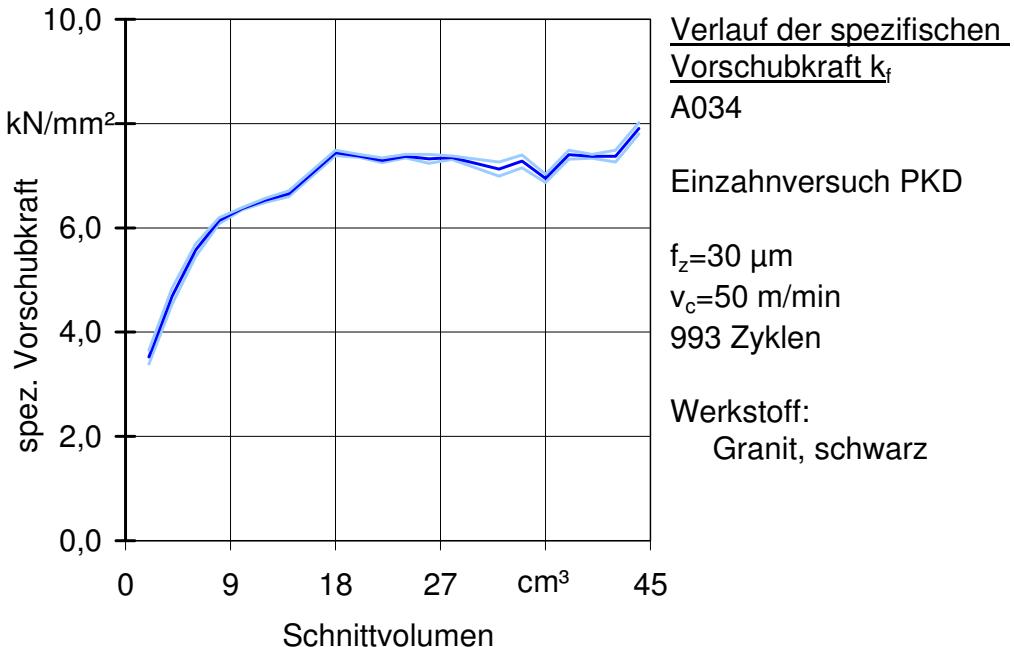


Abb. 4.21: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft; reduzierte Darstellung (exempl.)

Da die Stichprobengröße nicht bei allen Punkten 21 betrug, konnte für den Zusammenfassungsschritt keine konstante Stichprobengröße vorausgesetzt werden. Die Suche in der Literatur nach Lösungsansätzen für dieses Problem verlief erfolglos. Daher wurde ein eigener Weg entwickelt:

Zusammenfassen mehrerer Stichproben mit unterschiedlicher Stichprobengröße

Gegeben sind mehrere Stichproben mit teils unterschiedlichen Stichprobengrößen, deren Einzelwerte nicht mehr bekannt sind. Es sind nur Stichprobengröße, Mittelwert und Standardabweichung der Stichproben bekannt. Mittelwert und Standardabweichung wurden nach Graf (S. 77/78, /39/) bestimmt:

$$\bar{y}_n = \frac{1}{n_n} \cdot \sum_{i=1}^{n_n} x_{n,i} \quad (4.7)$$

$$s_n^2 = \frac{1}{n_n - 1} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_n} x_{n,i}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_n} x_{n,i} \right)^2}{n_n} \right) = \frac{1}{n_n - 1} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_n} x_{n,i}^2 - n_n \cdot \bar{y}_n^2 \right) \quad (4.8)$$

Werden nun k Stichproben zusammengeführt addieren sich ihre Stichprobengrößen:

$$n_{ges} = \sum_{i=1}^k n_i = n_1 + n_2 + \dots + n_k \quad (4.9)$$

Alle Einzelwerte der ursprünglichen Stichproben werden nun zusammen in einer großen Stichprobe betrachtet. Der Mittelwert wird nach obiger Gleichung, unter Einbeziehung aller Einzelwerte und der Gesamtstichprobengröße berechnet. Durch Auflösen der Mittelwertgleichungen der ursprünglichen Stichproben nach der Summe der Einzelwerte, können diese in der Gleichung für den Gesamtmittelwert durch das Produkt $n_n \cdot \bar{y}_n$ ersetzt werden. Somit ergibt sich für den Gesamtmittelwert:

$$\bar{y}_{ges} = \frac{1}{n_{ges}} \cdot \sum_{i=1}^k n_k \cdot \bar{y}_k \quad (4.10)$$

Löst man die Gleichung zur Berechnung der Standardabweichung der ursprünglichen Stichproben nach der Quadratsumme der Einzelwerte auf, ergibt sich:

$$\sum_{i=1}^{n_n} x_{n,i}^2 = s_n^2 (n_n - 1) + n_n \cdot \bar{y}_n^2 \quad (4.11)$$

Somit lässt sich auch die Standardabweichung der zusammengefassten Stichproben ohne die Kenntnis der Einzelwerte berechnen:

$$s_{ges}^2 = \frac{1}{n_{ges} - 1} \cdot \left(\sum_{i=1}^k (s_k^2 (n_k - 1) + n_k \cdot \bar{y}_k) - n_{ges} \cdot \bar{y}_{ges}^2 \right) \quad (4.12)$$

Zusammenfassen mehrerer Kraftkurven

Mit diesen Mitteln konnten nun Kraftkurven von Schneidelementen mit gleicher Faktorstufenkombination zusammengefasst werden. Dazu wurden die aus den Kraftkurven erstellten Matrizen nebeneinander aufgelistet und zeilenweise mit den oben hergeleiteten statistischen Mitteln zusammengefasst. Durch die Kenntnis der Standardabweichung und des Stichprobenumfangs, konnte für jeden Punkt der zusammengefassten Kurve das Konfidenzintervall bestimmt werden. Beim Vergleich mehrerer Kurven ermöglichte dies, die Signifikanz der zu erkennenden Unterschiede einzuschätzen.

Werden mehrere Kraftkurven auf die beschriebene Weise zusammengefasst, so läuft die zusammengefasste Kurve bis zur maximalen Standzeit der ursprünglichen Kurven,

also bis zu der Standzeit, die das Schneidelement mit der größten Lebensdauer erreichte. Die Standzeit wird zwar nicht als Zielgröße betrachtet, die Länge der Kraftkurven beeinflusst dennoch, wenn auch nur subjektiv, den Kurvenvergleich. Daher wurde die mittlere Standzeit der zusammenfassenden Kurven berechnet und die Gesamtkurve nur bis zu diesem Punkt erstellt.

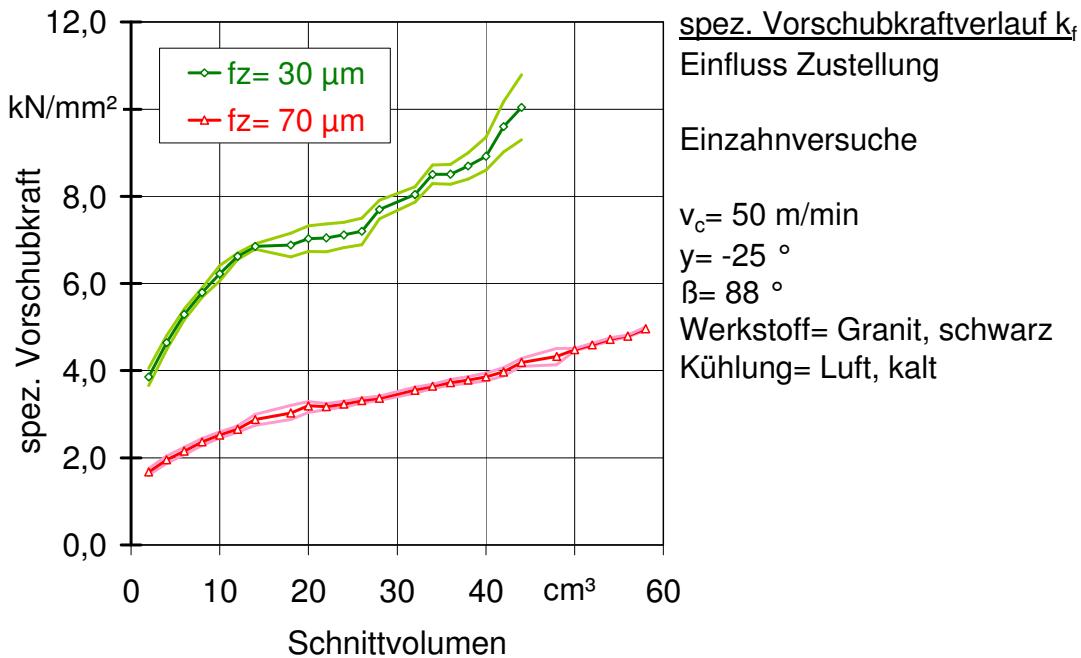


Abb. 4.22: Einfluss des Schnittvolumens bei unterschiedlichen Zustellungen auf die spezifische Vorschubkraft (exempl.)

Abb. 4.22 zeigt das Ergebnis der Zusammenfassung mehrerer, unter gleichen Bedingungen aufgezeichneter Kraftverläufe. Die dargestellten Kurven repräsentieren die mittleren Kraftverläufe zweier Faktorstufenkombinationen. Diese Darstellung ermöglicht es, den Effekt des geänderten Faktors (hier: Zustellung f_z) zu erkennen. Die Eintragung des Streubandes gestattet zusätzlich die Einschätzung der Signifikanz des Effektes. Ist der Effekt deutlich größer als die Streubreite (wie in Abb. 4.22), wird im Hauptteil dieser Arbeit aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung des Streubandes verzichtet.

4.4.2.2.2 Verschleiß

Die Verschleißbetrachtung ist neben der Kraftauswertung ein weiterer Weg den Zustand des Werkzeugs zu beurteilen. Verschleiß tritt am Werkzeug, ausgehend von der Schneidkante, auf der Freifläche und auf der Spanfläche auf. Messbare Größen sind die Verschleißmarkenbreite und Schneidkantenversatz auf der Freifläche, sowie Kolktiefe und -breite auf der Spanfläche. Diese Bezeichnungen aus der Metallbearbeitung sollen auch in dieser Arbeit Anwendung finden. /79/

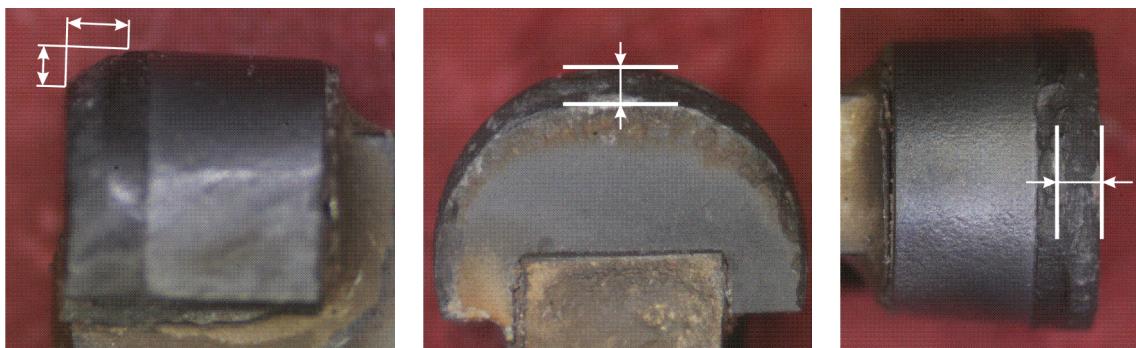


Abb. 4.23: Aufnahmen einer durch Ausbrüche und abrasiven Verschleiß gekennzeichneten Schneide

Abb. 4.23 zeigt die Aufnahmen eines verschlissenen PKD – Schneidelements aus drei Richtungen bei der Betrachtung im Stereomikroskop. Erstes Bestreben war die Bestimmung des Schneidkantenversatzes anhand der seitlichen Aufnahme. Durch das runde Profil der Schneide reicht jedoch die Tiefenschärfe des Objektivs nicht aus, um den zu messenden Bereich in allen Fällen klar abzubilden. Aus der Aufnahme der Spanfläche sollte eine Messung der Verschleißerscheinungen an deren Rand generiert werden. Doch auch hier störte die runde Form der Schneide. Die Verschleißfront entsprach ebenfalls einer Kreisbahn, jedoch mit einem versetzten Radius, sodass die Messung der Verschleißbreite stark vom Ort der Messung abhing.

Somit wurde sich für die Verschleißbetrachtung auf der Freifläche entschieden. Zwar begrenzte auch in diesem Fall die Tiefenschärfe den Betrachtungsbereich, doch konnte der Verschleißfortschritt die zu messenden Punkte nicht in den unscharfen Bereich verschieben.

Die Freifläche der Schneidelemente wurde also vor bzw. nach jeder Schnittfuge auf dem Linearprüfstand (alle 15 cm^3 Schnittvolumen) im Stereomikroskop fotografiert. Nach dem Ausscheiden / Versagen der Elemente wurden die Bilder ausgewertet.

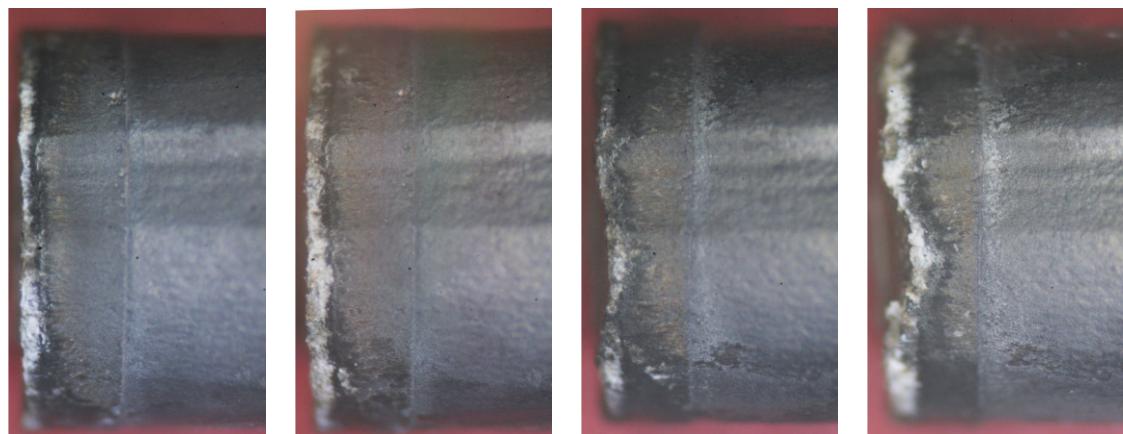


Abb. 4.24: Schneide in verschiedenen Verschleißzuständen

Mit der Bildverarbeitungssoftware Adobe Photoshop CS3 wurden die Fotos vom Neuzustand ausgehend übereinander gelegt und an der Spanfläche ausgerichtet. An-

schließend wurde auf jedem Bild der Abstand zwischen Verschleißfront und Spanfläche gemessen. Die Messwerte wurden dem Schnittvolumen zugeordnet und in Diagrammen aufgetragen.

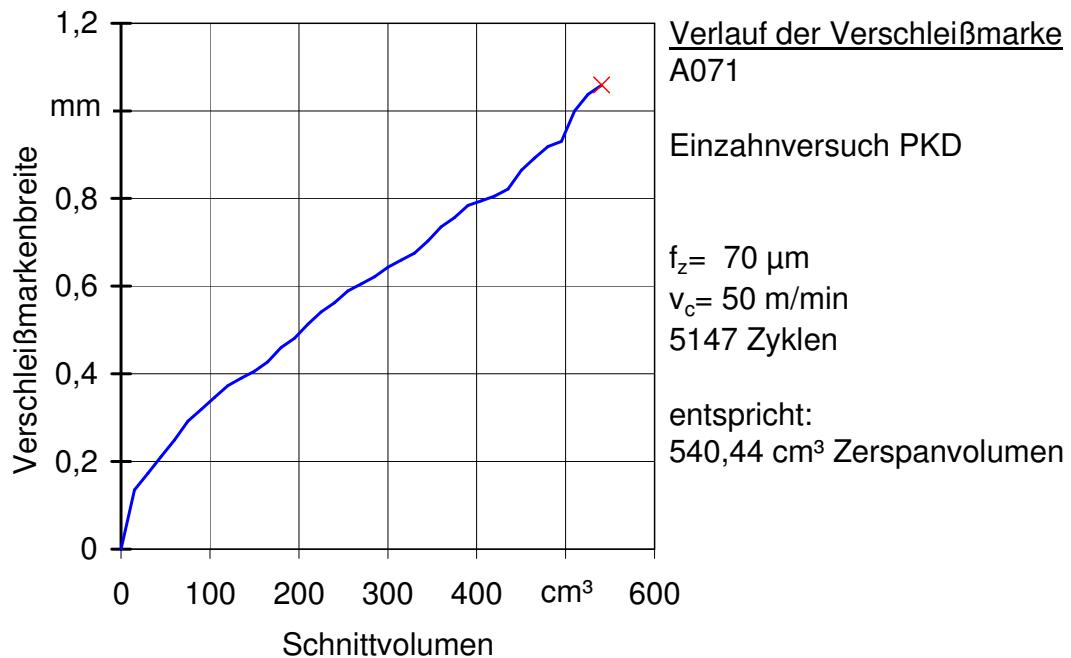


Abb. 4.25: Einfluss des Schnittvolumens auf den Verschleißfortschritt (exempl.)

4.5 Versuchswerkstoffe

Als Versuchswerkstücke wurden Natursteinplatten verwendet. Bei Materialstärken von 15 bis 50 mm betrugen die Abmaße 500 x 100 mm. Diese Platten wurden mit Aluminiumplatten verklebt und in die Maschine geschraubt.

Insgesamt kamen drei Granite, ein Marmor und ein Sandstein als Werkstoff zum Einsatz. Für eine Untersuchung wurde Glas verwendet.

4.5.1 Granit

Die Granite waren Nero Assoluto, der auf dem ersten Versuchsstand verwendet wurde, sowie ein schwarzer Granit und Aalfanger Granit, die auf dem zweiten Prüfstand eingesetzt wurden.



Abb. 4.26: von links: Nero Assoluto, Aalfanger Granit /117/, schwarzer Granit (gleicher Maßstab)

Nero Assoluto aus Südafrika ist einer der dunkelsten Naturwerksteine. Seine Struktur ist feinkörnig, dicht und sehr homogen. Er besteht aus einem relativ gleichmäßigen Gemenge von schwarzen Pyroxenmineralien, farblosen Plagioklas – Feldspat und schwarz-grauem metallisch schimmernden Magnetit – Erz. Seine Hauptanwendungen sind Boden-, Wand- oder Küchenplatten. /111/, /115/

Aalfanger Granit wird in Niederösterreich abgebaut. Er ist ein mittel- bis grobkörniger, blau-grauer Granit mit einer richtungslosen Textur. Aufgrund seiner Frost- und Tau-salzbeständigkeit wird er bei Außenanwendungen für große Werkstücke genutzt. /117/

Der schwarze Granit wurde zur Machbarkeitsprüfung zu Beginn der Versuche zusammen mit einer Vielzahl anderer Granitsorten als Plattenabschnitt von einem Küchenarbeitsplattenhersteller bezogen. Die Zuordnung der Granitsorten war nicht gegeben. Als der schwarze Granit verbraucht war, wurde deshalb der bekannte Aalfanger Granit auf dem Prüfstand verwendet.

4.5.1.1 Druckfestigkeitsmessungen

Aufgrund der fehlenden Bezeichnung für den schwarzen Granit, war es nicht möglich die Materialkennwerte dieses Werkstoffes aus Datenbanken zu ermitteln. Deshalb wurde in der Materialprüfanstalt der Universität Kassel eine Materialprüfung in Auftrag gegeben. Die Plattenform des Materials ließ dabei lediglich eine Druckfestigkeitsprüfung zu. Die Abmaße einer Probe zur Biegefestigkeitsbestimmung konnten nicht eingehalten werden. Zu Vergleichszwecken und zur Überprüfung der Tabellenwerte, wurden zusätzlich zum schwarzen Granit Proben von Aalfanger Granit eingereicht.

Die Druckfestigkeit wurde an je fünf Würfeln durch die „Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen“ (AMPA) der Universität Kassel nach DIN EN 1926 bestimmt. Alle Proben wurden gemäß DIN EN 12390-2 2001-06 Anhang NA behandelt. Die angewendete Norm sieht eine Probentrocknung bei 70°C vor.

4.5.1.1.1 Ergebnis Druckfestigkeitsprüfung, Aalfanger Granit



Abb. 4.27: Aalfanger Granit beim einachsigen Druckversuch

Die fünf untersuchten Proben des Aalfanger Granits wiesen im Mittel eine Druckfestigkeit von 161,4 N/mm² auf.

n = 5	L [mm]	B [mm]	H [mm]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Fläche [mm ²]	F _{max} [kN]	Festigkeit [N/mm ²]
5	89,83	89,98	89,68	1,887	2,604	8083	1304,3	161,4

Tab. 4.2: Ergebnis Druckfestigkeitsprüfung, Aalfanger Granit

4.5.1.1.2 Ergebnis Druckfestigkeitsprüfung, schwarzer Granit



Abb. 4.28: schwarzer Granit beim einachsigen Druckversuch

Beim schwarzen Granit ergab sich nach den fünf Proben ein Mittelwert der Druckfestigkeit von 300,88 N/mm².

n = 5	L [mm]	B [mm]	H [mm]	Masse [g]	Rohdichte [kg/dm ³]	Fläche [mm ²]	F _{max} [kN]	Festigkeit [N/mm ²]
5	21,71	22,38	20,29	27,3	2,823	487	142,669	300,88

Tab. 4.3: Ergebnis Druckfestigkeitsprüfung, schwarzer Granit

4.5.2 Sandstein und Marmor

Der verwendete Sandstein stammte aus Ibbenbüren (Deutschland) und der Marmor aus Carrara (Italien).

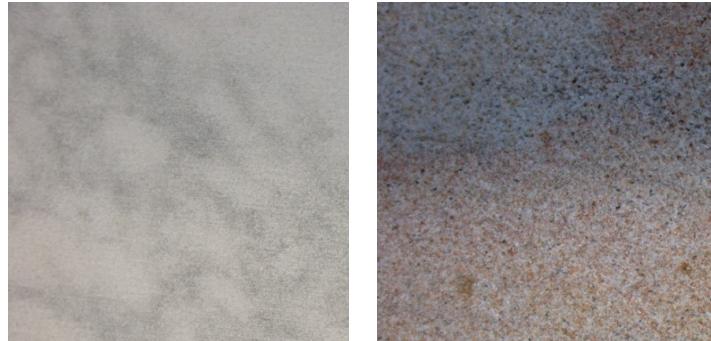


Abb. 4.29: von links: Bianco Carrara Marmor, Ibbenbürener Sandstein (gleicher Maßstab)

Ibbenbürener Sandstein wird in Norddeutschland abgebaut. Die gelblichen oder bräunlichen Färbungen beruhen auf der Anwesenheit von Limonit, der häufig in Form von Schlieren und konzentrisch angeordneten Ringen, aber auch fein verteilt oder in kleinen Nestern im Gestein vorkommt. Beim Ibbenbürener Sandstein handelt es sich um mittel- bis grobkörnige Sandsteine mit kieseligem Bindemittel. Die große Härte führt zu einer relativ schweren Bearbeitbarkeit. Anwendung findet dieser Sandstein als Mauerstein, Boden- oder Wandplatte und als großes Werkstück für den Außenbereich. /112/

Bianco Carrara Marmor ist wohl die bekannteste Natursteinsorte. Er besteht zu 99% aus Calcit und ist daher weiß. Als Nebengemengeenteile kommen im Carrara Marmor Minerale wie Quarz, Chlorit, Graphit, Pyrit vor. Zudem besitzt er eine geregelte bis mehr oder weniger richtungsloskörnige Textur. /70/

Werkstoffkennwerte

Die verwendeten Werkstoffe haben im Einzelnen folgende Kennwerte:

	Ibben- bürener Sandstein /114/	Bianco Carrara Marmor /116/	Nero Assoluto /111/	Aalfanger Granit /105/ u. AMPA	Granit, schwarz AMPA
Biegefestigkeit [N/mm ²]	7,6	18	25-35	16,187	-
Druckfestigkeit [N/mm ²]	125	120-135	265-315	161,4	300,88
Rohdichte [g/cm ³]	2,44	2,65-2,75	2,94-3,00	2,604	2,823
Wasserauf- nahme [%]	2,81	0,15-1	0,01-0,15	0,34	-
Abrieb [cm ³ /50cm ²]	--	15-40	--	5,4	-

Tab. 4.4: Kennwerte der verwendeten Werkstoffe

4.5.3 Werkstoffklassifizierung

Naturstein ist ein Zufallsprodukt geologischer Entwicklungen. Kein Stein gleicht dem anderen. Auch die auf den Linearprüfständen eingesetzten Steinplatten unterliegen in ihren Eigenschaften einer Streuung. Auf dem ersten Prüfstand war der Einfluss relativ gering, da meist alle Versuche einer Versuchsreihe auf derselben Steinplatte durchgeführt werden konnten. Die größeren Versuchsumfänge auf dem Linearprüfstand erhöhten den Verbrauch an Steinplatten pro Versuchsreihe. Bereits nach den ersten Auswertungen fiel auf, dass der Wechsel der Steinplatte beim selben Schneidelement teilweise deutliche Unterschiede in den Bearbeitungskräften hervorrief. Abb. 4.30 zeigt den Verlauf der Vorschubkraft eines Schneidelements, das auf drei verschiedenen Steinplatten derselben Gesteinssorte eingesetzt wurde. Die bei der Bearbeitung der zweiten Platte gemessenen Kräfte liegen deutlich unter denen der anderen beiden Steinplatten. Dies zeigt, dass diese Platten unterschiedliche Eigenschaften aufwiesen und somit die Schneide unterschiedlich belasteten. Bei der Auswertung und Zusammenfassung mehrerer Schneidelemente ist dieser Umstand jedoch störend.

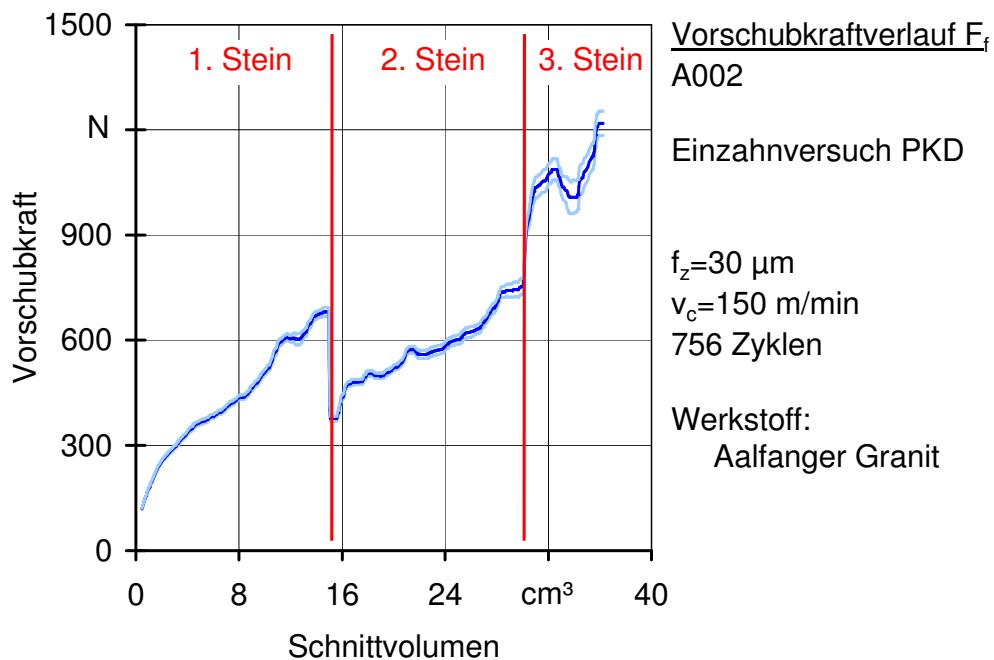


Abb. 4.30: Einfluss des Schnittvolumens auf die Vorschubkraft (exemplarische Darstellung)

Deshalb wurde ein Indexwerkzeug eingeführt: Eine Schneidelementsorte, von der auf jeder Steinplatte eine ungebrauchte Schneide eine 5 mm tiefe Schnittfuge erzeugte, wurde in die Versuche eingebaut. Alle Schneiden dieser Sorte glichen sich in Geometrie und Schneidstoff und wurden mit den gleichen Betriebsparametern eingesetzt. Somit ermöglichte der Vergleich der Bearbeitungskräfte der einzelnen Indexschneiden eine Aussage über die jeweiligen Steinplatten, auf denen diese eingesetzt wurden.

Mithilfe der Ergebnisse der Indexschneiden sollte für jede Steinplatte ein Materialkennwert berechnet werden, der die Bearbeitbarkeit des jeweiligen Gesteins beschreibt. Nach Möglichkeit sollte dieser Kennwert sowohl die Materialänderung zwischen Platten des gleichen Gesteins, als auch eine Unterscheidung zwischen den Gesteinsklassen und deren Sorten zulassen.

Bevor der Aufwand der eigenen Kennwertermittlung begangen wurde, gab es bereits Bemühungen die Gesteinssorten anhand ihrer Eigenschaften quantitativ in Bearbeitungsklassen zu sortieren. Allerdings ergaben weder Literaturrecherchen noch eigene Vergleiche nutzbare Ergebnisse. Am Besten korrelierte die Druckfestigkeit mit den Bearbeitungskräften. Sie zeigt ähnliche Verhältnisse zwischen Sandstein, Marmor und Granit wie die Kräfte. Allerdings weist der schwarze Granit eine deutlich höhere Druckfestigkeit auf als Aalfanger Granit, während die Bearbeitungskräfte annähernd gleich sind. Aus anderen Versuchsreihen war zu diesem Zeitpunkt sogar schon bekannt, dass Aalfanger Granit die Schneiden deutlich früher versagen lässt als der schwarze Granit. Daher konnte die Druckfestigkeit nicht als alleinige Einflussgröße geltend gemacht werden.

Stattdessen wurde versucht, aus den Ergebnissen der Indexschneiden einen neuen Kennwert zu berechnen, der die Belastung der Schneide durch den bearbeiteten Werkstoff beschreibt. Als Ansatz diente folgendes Diagramm, das die gemittelten spezifischen Schnittkraftverläufe aller eingesetzten Indexschneiden zeigt:

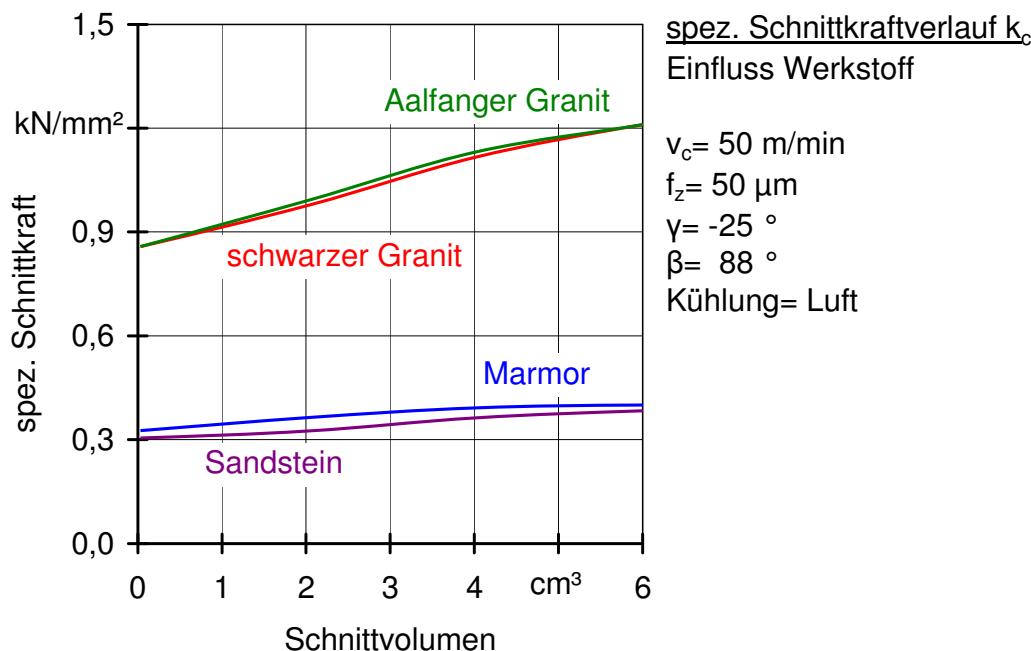


Abb. 4.31: Einfluss des Schnittvolumens bei unterschiedlichen Werkstoffen auf die spezifische Schnittkraft

Es zeigt, dass die Granite deutlich höhere Bearbeitungskräfte benötigen als der Sandstein und der Marmor. Dies deckt sich mit der Erfahrung aus den Versuchsreihen, dass die beiden weicheren Gesteine ähnlich niedrige Schnidenbelastungen verursachen und so auch vergleichbar hohe Standmengen zulassen. Die beiden Granite unterscheiden sich kaum in den erforderlichen Bearbeitungskräften (siehe auch Abb. 4.32), obwohl die Ergebnisse der Versuchsreihen und der Verschleißmessungen eine höhere Belastung durch Aalfanger Granit zeigen.

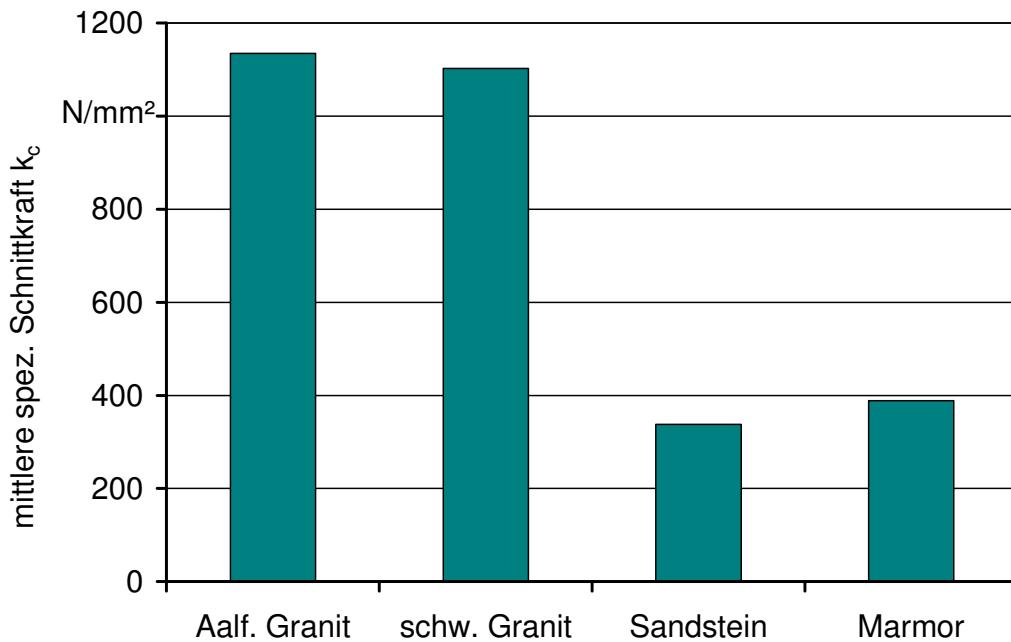


Abb. 4.32: Einfluss der Gesteinssorte auf die mittlere spezifische Schnittkraft im Eingriff

Hier musste also zur Beurteilung noch ein zusätzliches Kriterium herangezogen werden. Aus mehreren Varianten zeigten sich die Streuungen der Kräfte über der Eingriffsdauer als am aussagekräftigsten.

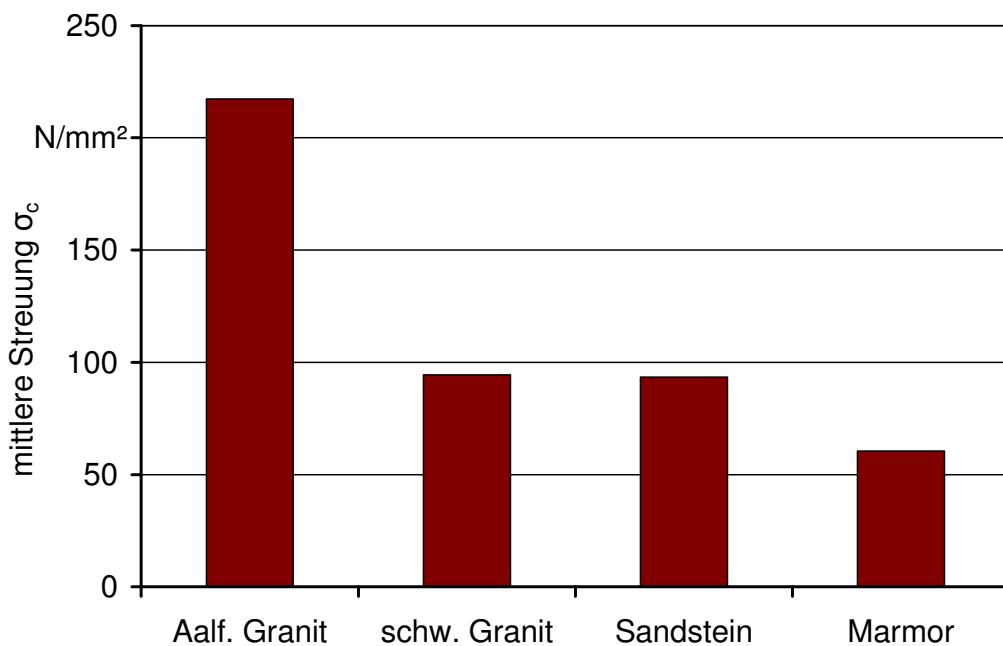


Abb. 4.33: Einfluss der Gesteinsorte auf die mittlere Streuung der spez. Schnittkraft im Eingriff

Wie Abb. 4.33 zeigt, verursacht Aalfanger Granit deutlich höhere Amplituden der schwelenden Beanspruchung als der schwarze Granit, die aber, wie bereits erwähnt, im Mittel annähernd gleich sind. Auch der, anhand der Verschleißmessungen festgestellte Unterschied zwischen Marmor und Sandstein kann an der Streuung erkannt werden.

Somit waren die beiden Hauptberechnungsfaktoren gefunden: Die Mittelwerte der spezifischen Zerspankraftkomponenten sollten zur Unterscheidung zwischen Hart- und Weichgesteinen genutzt werden. Deren Streuung wurde herangezogen, um die unterschiedliche Belastung von Steinen der gleichen Gesteinsklasse abzubilden. Folglich gingen vier Faktoren in die Berechnung ein: Die mittlere spezifische Schnittkraft \bar{k}_c , die mittlere spezifische Vorschubkraft \bar{k}_f und deren Streuungen σ_c und σ_f . Die Beträge dieser vektoriellen Größen wurden auf deren jeweiligen Mittelwert bei Aalfanger Granit normiert, sodass die Kennwerte von Aalfanger Granit nahe dem Wert 1 lagen. Der Übersichtlichkeit halber wurden diese Mittelwerte jedoch gerundet. Es ergab sich folgende Gleichung zur Berechnung des Kennwerts K_s .

$$K_s = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\bar{k}_c}{1100 \text{ N/mm}^2} \cdot \frac{\sigma_c}{220 \text{ N/mm}^2} + \frac{\bar{k}_f}{1900 \text{ N/mm}^2} \cdot \frac{\sigma_f}{580 \text{ N/mm}^2} \right) \quad (4.13)$$

Im Durchschnitt ergeben sich mithilfe dieser Berechnung folgende Kennwerte:

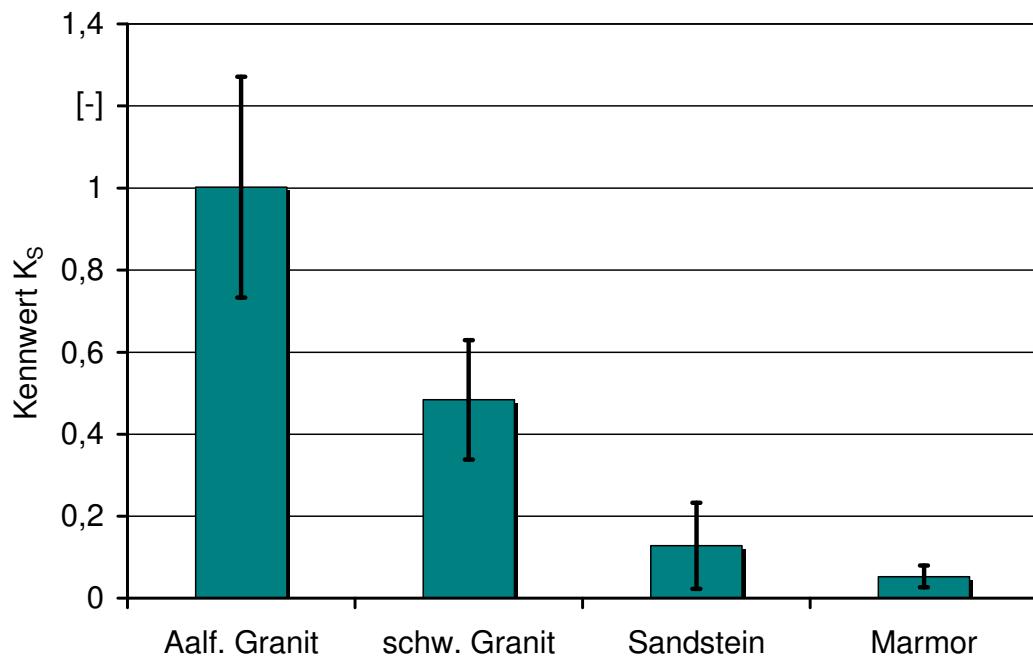


Abb. 4.34: Einfluss der Gesteinssorte auf den erstellten Kennwert der Steine

Der berechnete Kennwert soll ein Maß für die Beanspruchung des Werkzeugs durch den zu bearbeitenden Werkstoff darstellen. In Abb. 4.34 sind die Kennwerte der vier, auf dem neuen Linearprüfstand verwendeten Gesteine dargestellt. Das Verhältnis zwischen den Granitsorten entspricht dem, durch die Verschleiß- und Kraftmessungen festgestellten Unterschied der Schneidenbeanspruchung durch die beiden Granite. Auch der abgebildete geringe Kennwertunterschied zwischen Sandstein und Marmor deckt sich mit den Erkenntnissen aus den Versuchsreihen. Denn während bei Marmor kaum Verschleißfortschritt zu erkennen war, zeichnete sich bei Sandstein eine gut erkennbare Verschleißfront ab, die über die Freifläche wanderte. Fazit ist somit, dass der berechnete Kennwert geeignet ist, die Bearbeitbarkeit der verwendeten Werkstoffe darzustellen.

Da der Kennwert die unterschiedliche Beanspruchung der Schneiden durch die verschiedenen Gesteinssorten wiedergab, wurde er anschließend zum Ausgleich der unterschiedlichen Belastung durch verschiedene Platten einer Steinsorte verwendet. Abb. 4.35 zeigt nun die kennwertbereinigte Darstellung der Abb. 4.30.

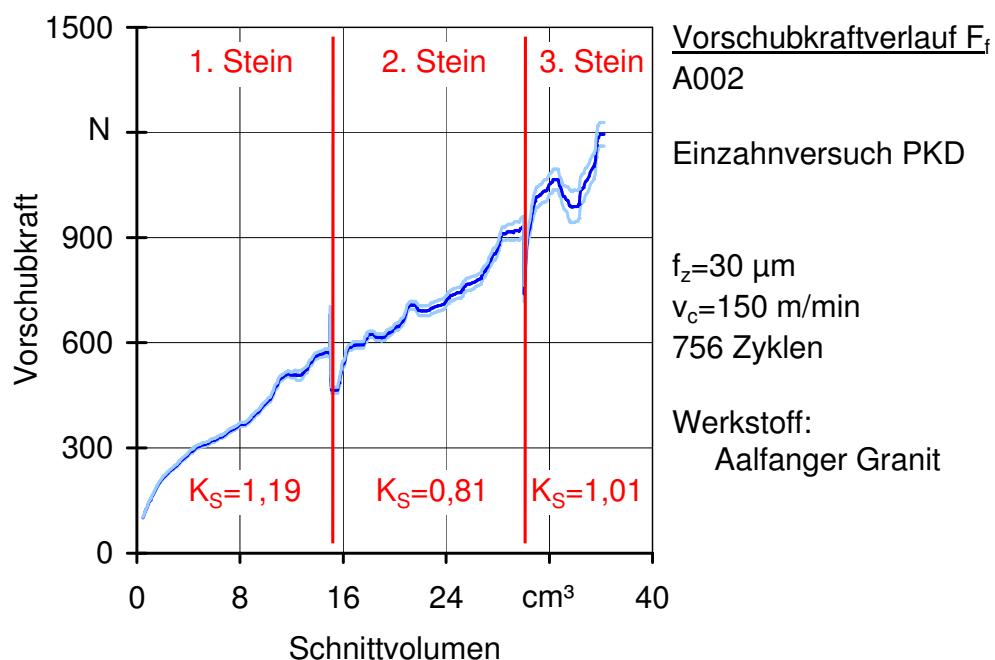


Abb. 4.35: Einfluss des Schnittvolumens auf die Vorschubkraft, kennwertbereinigt (exempl.)

5 Werkzeugentwicklung

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Schneide zum Trennen mineralischer Werkstoffe. Diese Entwicklung soll nicht im Hinblick auf ein spezielles Bearbeitungsverfahren erfolgen, sondern Einzelschneiden betreffen, die die Grundlage für verschiedenste Trennwerkzeuge bilden können.

In diesem Kapitel werden die Versuchsreihen beschrieben, die die grundlegenden Stellgrößen der geometrisch bestimmten Zerspanung variieren. Die dabei gesammelten Ergebnisse sollen späteren Anwendern einen Ausgangspunkt für die Werkzeugentwicklung bieten.

5.1 Vorversuche

Der erste Linearprüfstand diente vor allem dem Beweis der Machbarkeit des Vorhabens mit geometrisch bestimmter Schneide Naturstein zu trennen. Der Versuchsstand wurde deshalb aus Baugruppen vorhandener Versuchseinrichtungen errichtet und war nur für kleine Versuchsreihen geeignet.

Die Schnittgeschwindigkeit war durch den verwendeten Antrieb auf $v_c = 60 \text{ m/min}$ festgelegt. Der Großteil der Versuch wurde mit einer Zustellung $f_z = 100 \mu\text{m}$ und auf dem Werkstoff Nero Assolut (Granit) durchgeführt.

5.1.1 Querschnittsform des Schneidelements

PKD wurde als Ausgangsschneidstoff gewählt. Die Eigenschaften dieses Schneidstoffs in Verbindung mit seiner Verfüg- und Bearbeitbarkeit prädestinierten PKD als Standardschneidstoff in den grundlegenden Versuchsreihen. Eine weitere Festlegung vor dem Beginn der Versuche betraf die Schnittfugenbreite mit ca. 3 mm. Somit war eine Dimension der Schneidelemente vorgegeben.

Im ersten Schritt musste eine Querschnittsform des Schneidelements gefunden werden, die einem gleichmäßigen Verschleiß unterliegt und dadurch das Potenzial des Schneidstoffs so lange wie möglich nutzen kann. Orientiert an der Metallzerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide, wurden zuerst eckige Spanflächen erprobt. Eckige Geometrien ermöglichen die unabhängige Einstellung von Haupt- und Seitenfreiwinkeln.

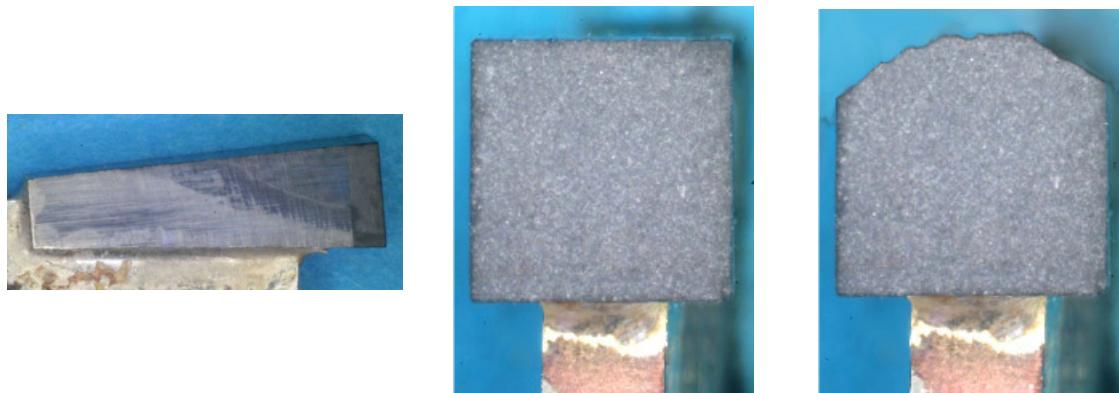


Abb. 5.1: Schneidkörper mit eckiger Spanfläche, rechts nach Einsatz

Die Ecken des Elements verrundeten sehr schnell, sodass sich aus der ursprünglich gradlinigen Schneidkante eine bogenförmige Schneide entwickelte. Daher wurden im nächsten Schritt runde Elemente hergestellt. Diese ließen sich zudem beim Fügen besser positionieren.



Abb. 5.2: Schneidkörper mit kreisförmiger Spanfläche

Aus der kreisförmigen Spanfläche wurde eine weitere Schneidenform hergeleitet: Da beim Eingriff des Schneidelements nur die obere Hälfte des Spanflächenumfangs arbeitet, ist die untere Hälfte der Spanfläche ohne Funktion und somit verschwendeter Schneidstoff. Daher wurden Elemente mit halbkreisförmiger Spanfläche hergestellt. Durch das Einbringen einer Nut an der Unterseite des Elements wurde die Positionierung erheblich vereinfacht und zusätzlich die Fügzone vergrößert.

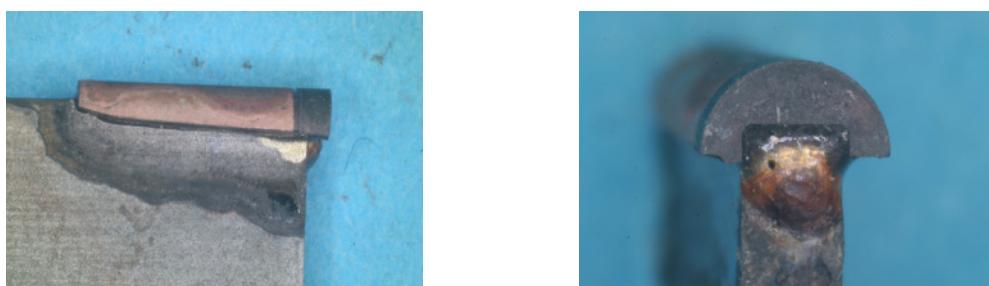


Abb. 5.3: halbrunde Elementform mit Nut

Die halbrunden Schneiden hielten den Belastungen besser stand, da sie gleichmäßiger verschlissen als die eckigen. Dennoch kam es auch bei diesen Elementen früh zum Bruch. Hier lagen jedoch Gewaltbrüche in der Hartmetallunterlage des PKD – Schneidstoffs vor, die auf die sehr hohen Vorschubkräfte zurückgeführt wurden.



Abb. 5.4: Schneidelemente nach dem Einsatz

Auf hohe Vorschubkräfte wird in der Metallbearbeitung mit einem Anstellen der Schneide reagiert. Dadurch werden Span- und Freiwinkel verändert, was wiederum die Reibung zwischen Schneide und Werkstück und den Spanfluss beeinflusst. Dies ist jedoch mit einer dünneren Hartmetallunterlage der PKD – Schicht leichter möglich. Es kamen 2 mm starke PKD – Ronden mit ca. 0,5 mm dicker PKD – Schicht zum Einsatz. Aus diesen wurde die halbrunde Form mit der Nut zur Positionierung erodiert.

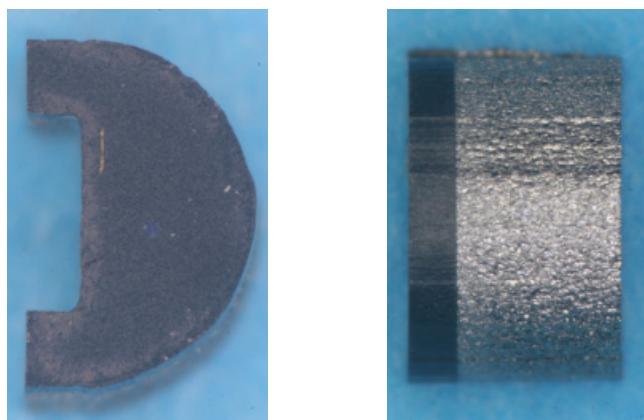


Abb. 5.5: vorerst endgültige Form der Schneidkörper

Die halbrunde Form bedingte zu diesem Zeitpunkt einen konstanten Keilwinkel, da der Freiwinkel nur an der Oberseite der Schneide durch Anstellen des Elements beeinflusst werden konnte. Seitlich wurde er durch die Geometrie des Schneidkörpers vorgegeben. Als guter Kompromiss zwischen großem Keilwinkel und ausreichendem Seitenfreiwinkel ergab sich $\beta = 88^\circ$ und somit $\alpha = 2^\circ$. Bei kleinerem oder keinem seitlichen Freiwinkel ergaben sich Versagensbilder wie in Abb. 5.4 rechts.

5.1.2 Spanwinkel

Das Anstellen der Schneide bedeutet bei konstantem Keilwinkel die Variation des Span- und des Freiwinkels. Zur Einstellung der Winkel wurde der Sitz des Schneidelements am Halter mit der gewünschten Neigung erodiert. Untersucht wurden Spanwinkel von $\gamma = 0^\circ$ bis $\gamma = -35^\circ$ in 5° -Schritten. Ausgewertet wurden die maximalen Schnitt- und Vorschubkräfte.

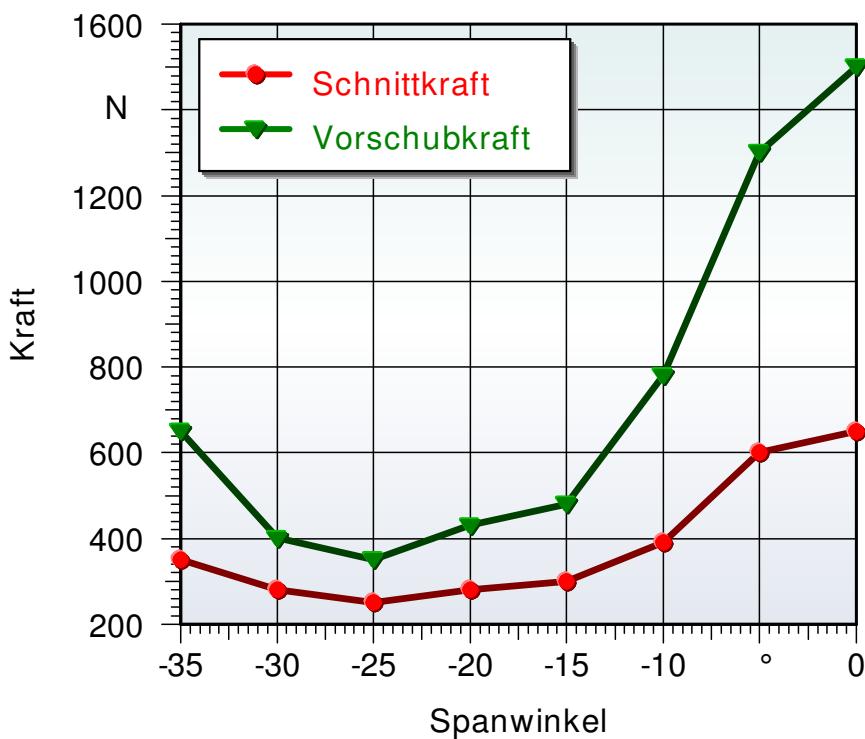


Abb. 5.6: Einfluss des Spanwinkels auf die maximale Schnitt- und Vorschubkraft

Die Untersuchung zeigte, dass Schnitt- und Vorschubkraft bei Spanwinkeln zwischen -15° und -30° minimal sind. Das absolute Minimum beider Kräfte befindet sich bei $\gamma = -25^\circ$. Bei Spanwinkeln zwischen 0° und -15° ist der Freiwinkel zu klein, d.h. das zerspannte Material staut sich zwischen Freifläche und Werkstück und bewirkt dadurch eine hohe Vorschubkraft. Ab $\gamma = -30^\circ$ erzeugt die Neigung der Spanfläche ein Abdängen des Werkzeugs vom Werkstück, was erneut zum Anstieg der Vorschubkraft führt.

Mit dem ersten Prüfstand konnte also die Schneidenform und ein Spanwinkelbereich ermittelt werden. Außerdem wurden Erfahrungen mit dem Schneidstoff, der Zustellung und der Schnittgeschwindigkeit gesammelt. Die Machbarkeit des Vorhabens wurde bewiesen, sodass ein größerer maschineller Versuchsaufwand begründet werden konnte. Ein neuer Versuchsstand wurde errichtet.

5.2 Versuchsreihen zur Werkzeugentwicklung

Der neu konstruierte Linearprüfstand ermöglichte deutlich größere Versuchsumfänge und somit die Anwendung von Faktorplänen. Die vereinfachte Änderung von Spanwinkel und Schnittgeschwindigkeit erhöhte zudem die Zahl der maschinenseitigen Einstellgrößen.

5.2.1 Schnittgeschwindigkeit, Zustellung und Schneidstoff

Das Ziel der ersten Versuchsreihe auf dem neuen Linearprüfstand war die Festlegung einer PKD – Sorte als Grundlage der nächsten Versuchsreihen. Es standen vier Sorten zur Verfügung, die vom Lieferanten als zur Natursteinbearbeitung tauglich deklariert wurden. Diese unterschieden sich in der Korngröße der bei der Synthese verwendeten Industriediamanten.

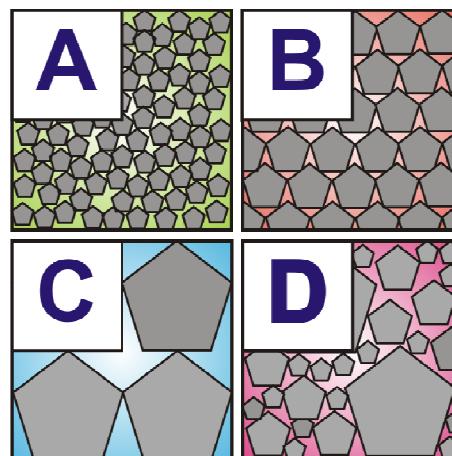


Abb. 5.7: schematischer Korngrößenvergleich der verwendeten PKD – Sorten

Sorte A hatte $5 \mu\text{m}$ große Diamantkörner, B $10 \mu\text{m}$, C $25 \mu\text{m}$ und Sorte D war eine Korngrößenmischung mit Diamanten von 5 bis $25 \mu\text{m}$ Korngröße. Problematisch war die Anzahl der vorhandenen Elemente jeder Sorte, da Schnittgeschwindigkeit und Zustellung ebenfalls variiert werden sollten. Deshalb wurde die Versuchsreihe geteilt. Im ersten Schritt sollte ein Betriebspunkt ermittelt werden, auf dem anschließend der Schneidstoffvergleich durchgeführt wurde.

Zur Ermittlung des Betriebspunktes wurde ein 2^2 -Plan mit Zentrumspunkt erstellt. Abb. 5.8 zeigt die Faktorstufenkombinationen.

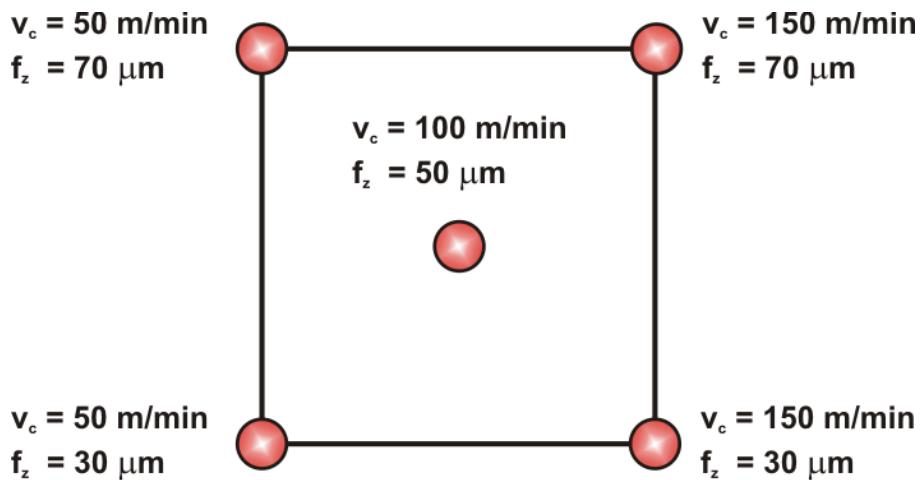


Abb. 5.8: verwendeter 2²-Plan mit Zentrumspunkt

Jede Faktorstufenkombination wurde von je einer Schneide jedes Schneidstoffes realisiert, sodass der Schneidstoff in diesem Versuch als konstante Störgröße auftrat. Dies ermöglichte eine ausreichende Stichprobengröße der einzelnen Faktorstufenkombinationen, während eine genügende Anzahl unverwendeter Schneidelemente jedes Schneidstoffes für den anschließenden Schneidstoffvergleich weiter zur Verfügung stand.

5.2.1.1 Ermittlung des Betriebspunkts für den Schneidstoffvergleich

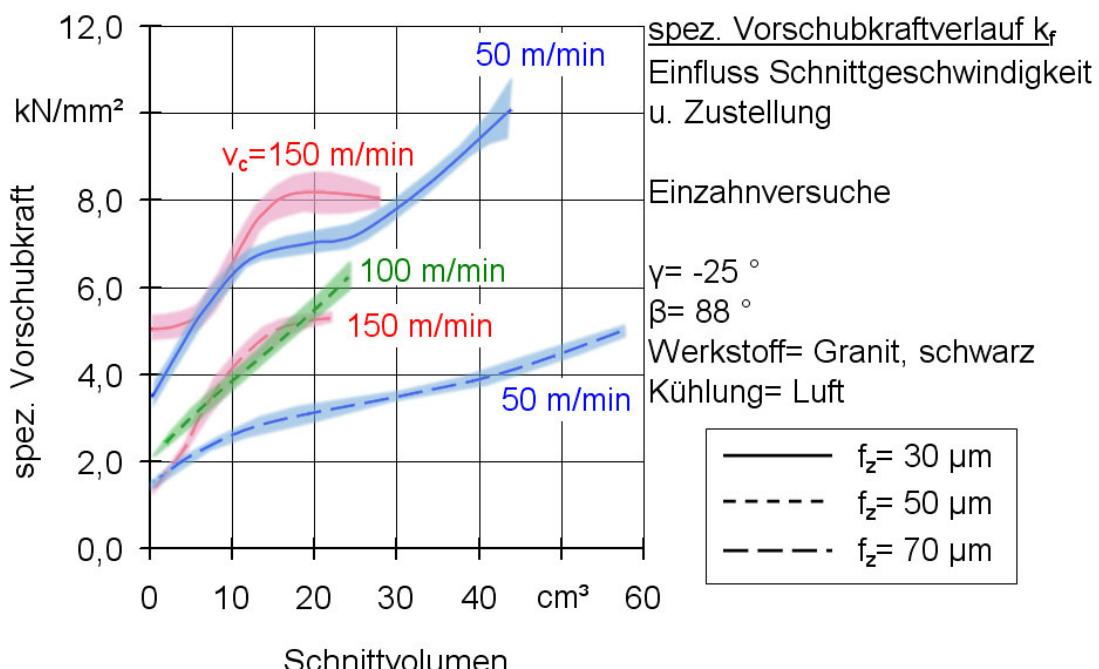


Abb. 5.9: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung

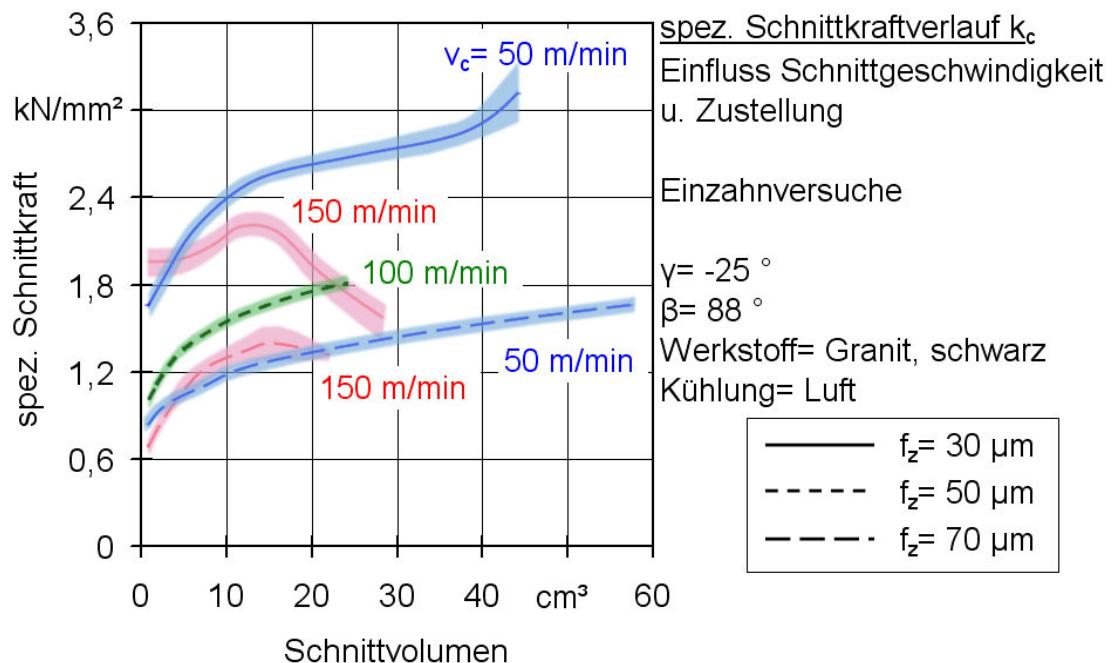


Abb. 5.10: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung

Abb. 5.9 und Abb. 5.10 zeigen das Ergebnis der Betriebspunktsuche. Die Verläufe der spezifischen Vorschubkraft zeigen einen deutlichen Nachteil der höheren Schnittgeschwindigkeiten, während die Betrachtung der spezifischen Schnittkräfte zwei gegensätzliche Aussagen zulässt: Die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit bei gleichbleibender Zustellung bewirkt bei $f_z = 70 \mu\text{m}$ keine signifikante Änderung der Kräfte. Dagegen führt die gleiche Änderung der Schnittgeschwindigkeit bei $f_z = 30 \mu\text{m}$ zu einem überwiegend fallenden Verlauf der spezifischen Schnittkraft. Als Grund hierfür werden Veränderungen der Schneidengeometrie vermutet, die zwar niedrigere Schnittkräfte begünstigen aber gleichzeitig höhere Vorschubkräfte hervorrufen. Beobachtungen bei der Versuchsdurchführung deuten zusätzlich auf das Vorhandensein einer Temperaturbelastung ab einer Schnittgeschwindigkeit von 100 m/min. Spätere Versuchsreihen werden mit einer Wasserkühlung die Möglichkeiten der höheren Schnittgeschwindigkeiten erneut prüfen. Temperaturuntersuchungen in Kapitel 6 dieser Arbeit sollen zudem die Auswirkungen der höheren Schnittgeschwindigkeiten auf die Schneidkörper betrachten.

Für den Schneidstoffvergleich und die nachfolgenden Versuchsreihen wird die Schnittgeschwindigkeit zunächst auf 50 m/min festgelegt. Für ungekühlte Werkzeuge lassen sich Schnittgeschwindigkeiten unterhalb von 100 m/min empfehlen.

Die Empfehlung einer Zustellung gestaltet sich schwieriger. Die spezifische Belastung der Schneide in Vorschubrichtung ist bei geringer Zustellung höher. Allerdings scheint

zwischen Schnittgeschwindigkeit und Zustellung eine Wechselwirkung zu bestehen, da die gleichzeitige Verringerung der beiden Faktoren keinen Effekt bei der spezifischen Vorschubkraft bewirkt. Deutlich wird dies in Abb. 5.9 anhand der Streubänder der Faktorstufenkombinationen $v_c = 150 \text{ m/min}$ - $f_z = 70 \mu\text{m}$ und $v_c = 100 \text{ m/min}$ - $f_z = 50 \mu\text{m}$. Bei konstanter Schnittgeschwindigkeit erzeugt die Verringerung der Zustellung sowohl in Vorschub-, als auch in Schnittrichtung höhere spezifische Belastungen der Schneide. Die geringsten Kräfte treten bei einer Zustellung von $70 \mu\text{m}$ auf.

Allerdings steigen die spezifischen Kräfte bei der Verringerung der Zustellung von $70 \mu\text{m}$ auf $50 \mu\text{m}$ in einem geringeren Maß als von $50 \mu\text{m}$ auf $30 \mu\text{m}$. Aufgrund der linearen Abnahme des Spanungsquerschnitts könnte dies auf ein Zustellungsoptimum bei $50 \mu\text{m}$ hindeuten. Da diese Zustellung als Zentrumspunkt des Versuchsplans nur in Verbindung mit einer Schnittgeschwindigkeit getestet wurde, konnten an dieser Stelle keine exakteren Aussagen getroffen werden. Der Versagenszeitpunkt und das Verschleißbild erwiesen sich bei $50 \mu\text{m}$ Zustellung jedoch wesentlich gleichmäßiger als bei $70 \mu\text{m}$, weshalb für den Schneidstoffvergleich eine Zustellung von $50 \mu\text{m}$ gewählt wurde.

Allgemein bleibt festzuhalten, dass die gewählten Faktorstufen der Zustellung ($30, 50$ und $70 \mu\text{m}$) sehr ähnliche Ergebnisse liefern und somit alle für die spätere Anwendung geeignet sind. Vorversuche mit 10 und $100 \mu\text{m}$ Zustellung zeigten dagegen stark abweichende Ergebnisse: Bei $10 \mu\text{m}$ war der belastete Bereich der Spanfläche zu klein und die Anzahl der nötigen Eingriffe pro Zerspanvolumen zu groß, was schnell zu starkem Schneidkantenversatz und hoher Reibung führte. Die auf dem ersten Linearprüfstand verwendete Zustellung von $100 \mu\text{m}$ erwies sich dagegen bei den Dauertests auf dem neuen Versuchsstand als nicht geeignet, da hier die absoluten Bearbeitungskräfte sehr schnell anstiegen und ein Versagen der Schneidkante bewirkten. Für die weiteren Versuchsreihen wurde daher die Variation der Zustellung auf $30, 50$ und $70 \mu\text{m}$ beibehalten. Zum einen ergibt sich daraus der Vorteil, dass auftretende Wechselwirkungen mit anderen Faktoren erfasst werden konnten. Zum anderen bleiben die Ergebnisse im Hinblick auf eine spätere Anwendung der Schneidelemente an mehrschneidigen Werkzeugen allgemeiner nutzbar.

5.2.1.2 Schneidstoffvergleich

Der Vergleich der vier PKD – Sorten wurde also mit einer Schnittgeschwindigkeit $v_c = 50 \text{ m/min}$ und einer Zustellung $f_z = 50 \mu\text{m}$ durchgeführt.

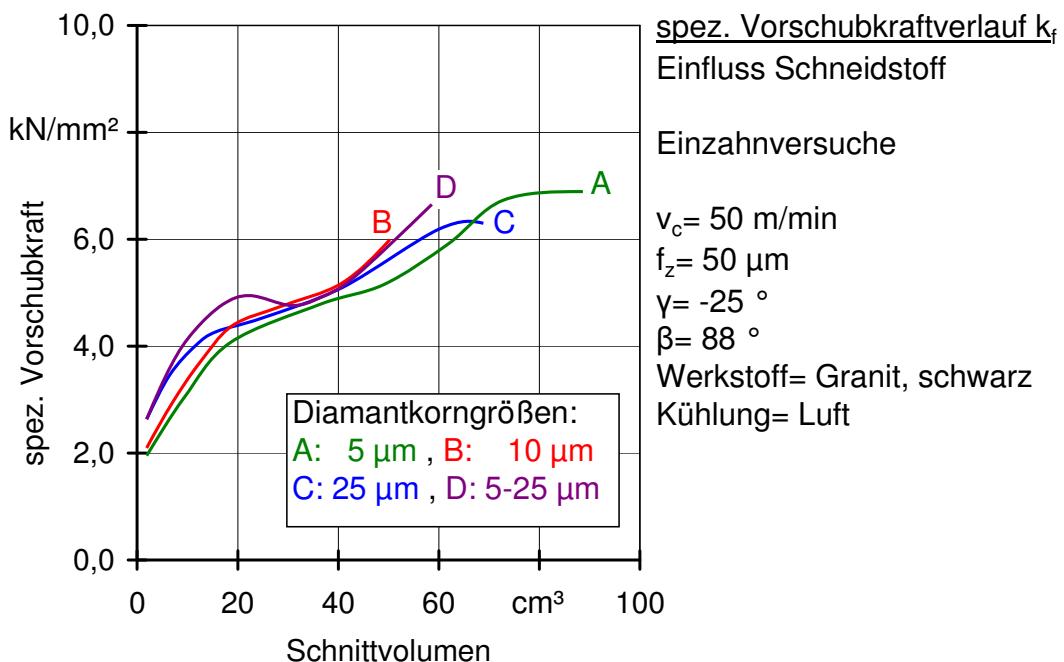


Abb. 5.11: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Schneidstoffs

Abb. 5.11 zeigt auch ohne die Darstellung der Streubänder, dass sich die Änderung des Schneidstoffs nur geringfügig auf die Kraftverläufe auswirkt. Daher wurde an dieser Stelle die Standmenge der Schneiden betrachtet. Der Einfluss der Störgröße Lötnaht wurde durch Eliminierung und Wiederholung der extremen Ausreißer von A, B und D verringert.

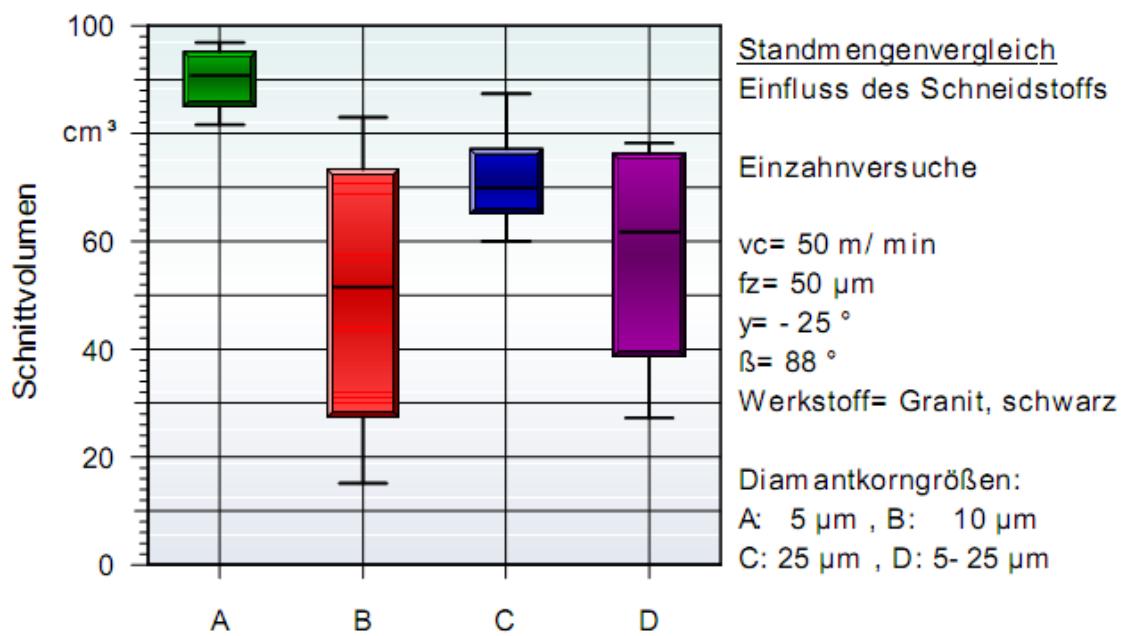


Abb. 5.12: Einfluss des Schneidstoffs auf die Standmenge, Box-Plot-Darstellung

Trotz der Überschneidungen lag der Vorteil bei Schneidstoff A. Dies ist der feinkörnigste Schneidstoff der Auswahl. Die Verringerung der Diamantkorngröße bewirkt eine Verfeinerung des PKD – Gefüges und somit eine höhere Zähigkeit der Schneidkante. Zudem erzeugen Hartstoffe im Werkstoff nur verhältnismäßig kleine Fehlstellen an der Schneidkante, was eine bessere Formhaltigkeit und folglich höhere Standmengen ermöglicht. Der grobkörnige Schneidstoff C erreichte zwar aufgrund seiner hohen Härte ebenfalls eine hohe Standmenge, die Notwendigkeit der Reduzierung des Versuchsumfangs schloss jedoch dessen weitere Erprobung vorerst aus. Für die nachfolgenden Versuchsreihen wurde ausschließlich die PKD – Sorte mit einer Korngröße von 5 μm verwendet.

5.2.2 Spanwinkel und Zustellung

Im Anschluss an den Schneidstoffvergleich wurde die Einstellgröße Spanwinkel betrachtet. Eine Versuchsreihe zum Spanwinkel gab es zwar bereits auf der ersten Version des Linearprüfstands, mit den Möglichkeiten des neuen Versuchsstands sollte nun aber zusätzlich eine Variation der Zustellung erfolgen. Für die Versuche waren die Faktorstufen 0°, -15° und -30° beim Spanwinkel und 30, 50 und 70 μm bei der Zustellung geplant. Der Keilwinkel war weiterhin durch die Geometrie der Elemente auf 88° festgelegt.

Erste Versuche mit 0° führten, wie schon beim ersten Versuchsstand, wegen zu hoher Vorschubkraft nach wenigen Zyklen zum Versagen der Elemente. Darum wurde diese Faktorstufe auf -5° geändert. Doch auch hier kam es schnell zum Versagen. Der Grund war wieder ein zu kleiner Freiwinkel, erkennbar an der während eines Eingriffs stark steigenden Vorschubkraft. Dies deutet auf einen Materialstau zwischen Freifläche und Werkstück hin.

Ein Einzeltest bei $\gamma = -10^\circ$ ergab zwar bei dieser Einstellung keinen deutlich erkennbaren Einfluss des Freiwinkels. Um den Einfluss des Freiwinkels auf die Bearbeitungskräfte mit großer Sicherheit ganz auszuschließen wurden die Faktorstufen des Spanwinkels für die Versuchsreihe auf -15°, -20°, -25° und -30° abgeändert. Die Freiwinkel betrugen somit 17 bis 32°. Da nun der Spanwinkel auf vier Faktorstufen betrachtet wurde, ergaben sich zwölf Faktorstufenkombinationen, welche mit je 3 Schneiden erprobt wurden.

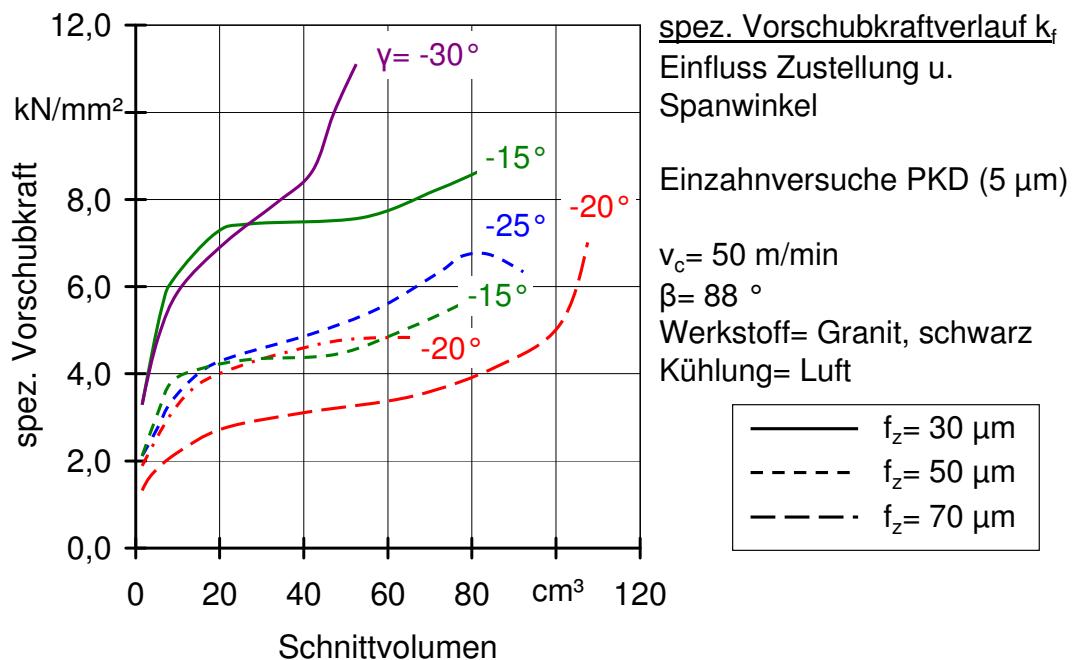


Abb. 5.13: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Spanwinkels und der Zustellung

Abb. 5.13 zeigt nun einen Teil der Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihe. Da die Darstellung aller zwölf Kraftverläufe keinerlei Übersichtlichkeit im Diagramm ermöglichte, wurde eine Vorauswahl der darzustellenden Kurven getroffen. Die nicht dargestellten Faktorstufenkombinationen führten zu schnell ansteigenden Kräften und frühzeitigem Versagen. Auf die Darstellung der spezifischen Schnittkräfte wurde ebenfalls verzichtet, da dieser Vergleich lediglich die Unterschiede zwischen den verschiedenen Zustellungen wiedergab, nicht die Effekte der Spanwinkeländerung.

Als Ergebnis der Versuche lässt sich herausstellen, dass eine Wechselwirkung zwischen dem Spanwinkel und der Zustellung besteht. Für jede der drei Faktorstufen der Zustellung ergab sich ein idealer Spanwinkel. So erfordert eine Zustellung von $70 \mu\text{m}$ einen Spanwinkel von -20° . Diese Faktorstufenkombination erwies sich als die mit der geringsten spezifischen Belastung der Schneide und auch mit der höchsten Standmenge.

Kann bei einer späteren Anwendung an vielschneidigen Werkzeugen keine Zustellung von $70 \mu\text{m}$ erreicht werden sollte auf die Kombinationen $50 \mu\text{m}$ und -25° bzw. $30 \mu\text{m}$ und -15° ausgewichen werden. Vor allem der Unterschied zwischen -20 und -25° ist bei gleicher Zustellung marginal.

5.2.3 Keilwinkel

Eine weitere wichtige geometrische Einstellgröße der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide ist der Keilwinkel. Dieser sollte in der nächsten Versuchreihe betrachtet werden. Aufgrund des Herstellungsaufwands wurde nur eine weitere Schneidengeometrie erzeugt, die dann mit der bisherigen ($\beta = 88^\circ$) zu vergleichen war.

Als Randbedingung bestand die Fähigkeit der verwendeten Drahterodiermaschine den Erodierdraht um bis zu 10° aus der Senkrechten zu neigen. Somit waren Keilwinkel von 80 bis 100° möglich. Eine Möglichkeit war die Verringerung des Keilwinkels, um auch bei Spanwinkeln von 0 und -5° ausreichende Freiwinkel zu ermöglichen. Diese spitzen Keilwinkel sind jedoch bei harten Schneidstoffen wie PKD eher unüblich, da dann die nötige Abstützung des spröden Materials an der Schneidkante fehlt.

Die andere Möglichkeit war die Erhöhung des Keilwinkels. Ein günstiger Spanwinkel von -20° und ein ausreichender Freiwinkel von 12° (gleichfalls wie der erprobte Freiwinkel von 17° und der günstige Spanwinkel von -25°) aus der vorhergehenden Versuchsreihe ergeben einen Keilwinkel von 98° . Zur Ausnutzung des Schneidstoffs wurde der Wert gerundet und folglich Schneiden mit einem Keilwinkel von 100° gefertigt.

Wie bereits in Abschnitt 5.1.1 erläutert, erfordert die runde Form der Schneide einen seitlichen Freiwinkel von 2° , um nicht in der erzeugten Schnittfuge zu klemmen. D.h., der Keilwinkel von 100° kann nur in der Arbeitsebene eingehalten werden. Diese Randbedingungen ergeben eine komplexe Form des Schneidelements, welche die Drahterodiermaschine nur durch kontinuierliches Verstellen des Neigungswinkels des Drahtes über dem Umfang der Spanfläche erzeugen konnte.

Nachdem eine ausreichende Anzahl von Schneidelementen mit einem Keilwinkel von 100° hergestellt war, wurde ein Plan für die Versuchsreihe erstellt. Die vorhergehende Versuchsreihe identifizierte einen Spanwinkel von -20° als günstig. Im Hinblick auf spätere Anwendungen und die Gefahr zu geringer Freiwinkel wurden jedoch auch weiterhin Versuche mit einem Spanwinkel von -25° durchgeführt. Der Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses des Keilwinkel wurde daher mit einer Variation des Spanwinkels auf -20 und -25° und der bereits mehrfach durchgeführten Alternierung der Zustellung auf $30, 50$ und $70 \mu\text{m}$ erstellt.

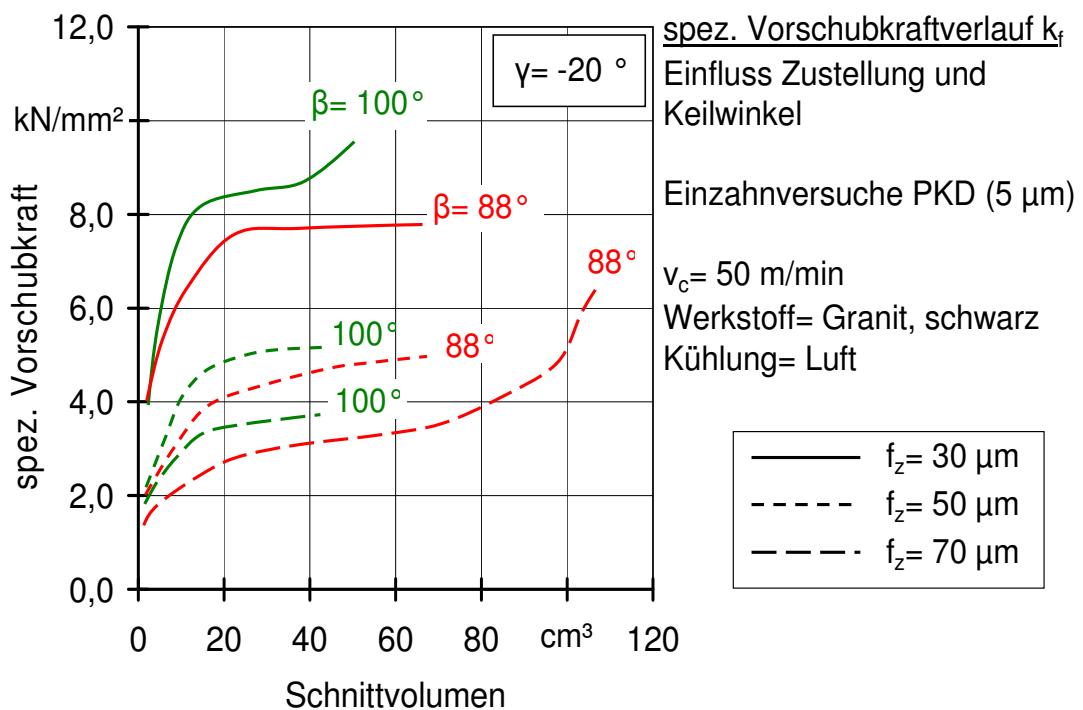


Abb. 5.14: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Keilwinkels und der Zustellung bei $\gamma = -20^\circ$

Abb. 5.14 zeigt nun den Einfluss des Keilwinkels auf die spezifische Vorschubkraft bei $\gamma = -20^\circ$. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei allen drei Zustellungswerten die Belastung mit dem Keilwinkel ansteigt. Hier ist anzunehmen, dass die gleichzeitige Verringerung des Freiwinkels von $\alpha = 22^\circ$ (bei $\beta = 88^\circ$) auf $\alpha = 10^\circ$ ($\beta = 100^\circ$) den Anstieg der Kräfte verursacht.

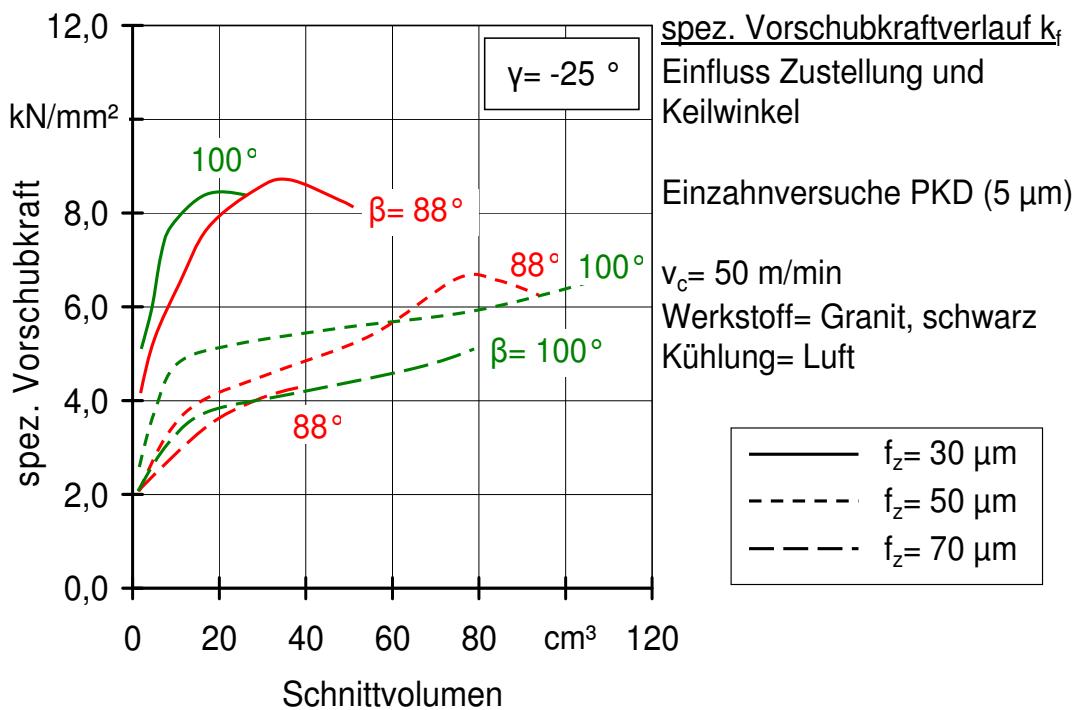


Abb. 5.15: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Keilwinkels und der Zustellung bei $\gamma = -25^\circ$

Bei $\gamma = -25^\circ$ verringert sich der Freiwinkel durch die Erhöhung des Keilwinkels von $\alpha = 27^\circ$ auf $\alpha = 15^\circ$. Dies verursachte ebenfalls einen leichten Anstieg der Vorschubkräfte, wie in Abb. 5.15 zu erkennen.

Der Anstieg der Vorschubkräfte ist jedoch vergleichsweise gering gegenüber der Senkung der Schnittkräfte. Abb. 5.16 zeigt den Verlauf der spezifischen Schnittkräfte mit unterschiedlichen Keilwinkeln und Zustellungen bei $\gamma = -25^\circ$. Das Verhältnis zwischen den Kraftkurven gleicht dem bei $\gamma = -20^\circ$, weshalb auf die Darstellung dieses Diagramms verzichtet wurde. In beiden Fällen ist deutlich zu erkennen, dass die Erhöhung des Keilwinkels die Schnittkräfte erheblich senkt.

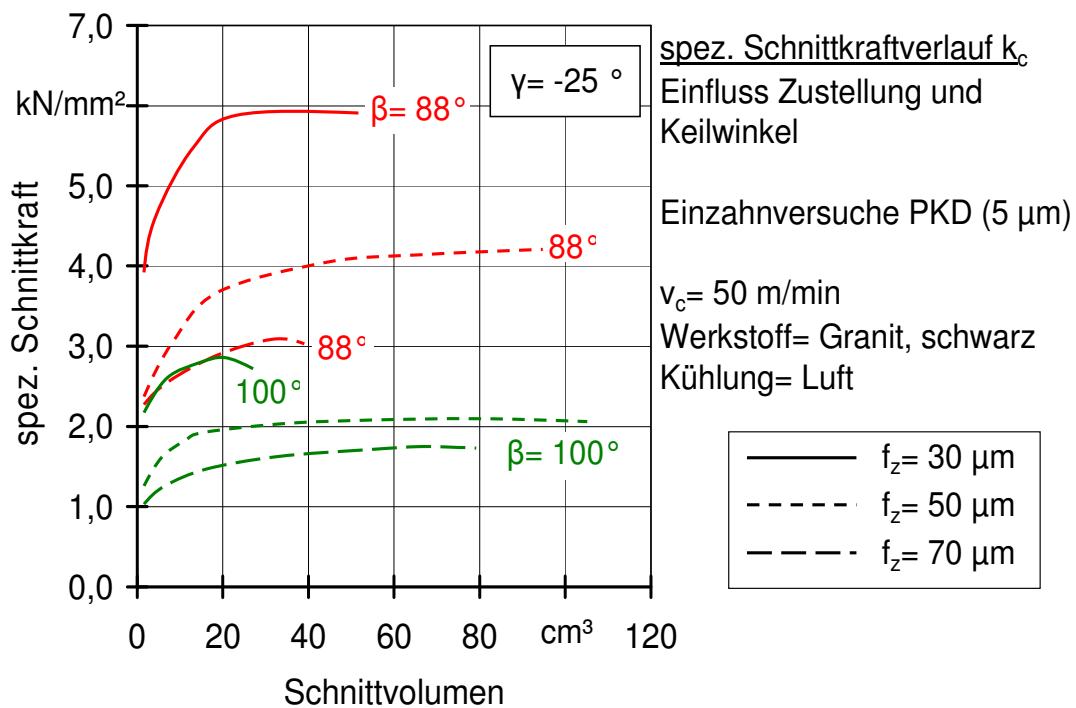


Abb. 5.16: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation des Keilwinkels und der Zustellung bei $\gamma = -25^\circ$

Das Fazit der Versuchsreihe lautet also, dass die Erhöhung des Keilwinkels die Belastung der Schneiden reduziert – trotz des Anstiegs der Vorschubkraft aufgrund der gleichzeitigen Freiwinkelverringerung. Allerdings ist die Herstellung der Schneidelemente aufwändig und nur mit bestimmten Anlagen realisierbar. Für die weiteren Versuchsserien wird jedoch der höhere Aufwand akzeptiert und somit weiterhin Schneiden mit $\beta = 100^\circ$ verwendet.

5.2.4 Wechsel des Werkstoffs

Nachdem die bisherigen Versuchsreihen im Abschnitt 5.2 auf dem schwarzen Granit durchgeführt wurden, sollte nun Aalfanger Granit als neuer Werkstoff eingeführt werden. Im Gegensatz zum bisher verwendeten schwarzen Granit wies Aalfanger Granit den Vorteil auf, dass seine Herkunft bekannt war und folglich seine Eigenschaften aus Tabellenwerken ermittelt werden konnten.

Eine erste Versuchsreihe auf dem neuen Werkstoff sollte den Vergleich mit dem bisherigen ermöglichen und eine Grundlage für die nächsten Untersuchungen legen. Dazu wurden wieder Zustellung (30, 50 und 70 μm) und Spanwinkel (-20 und -25°) variiert.

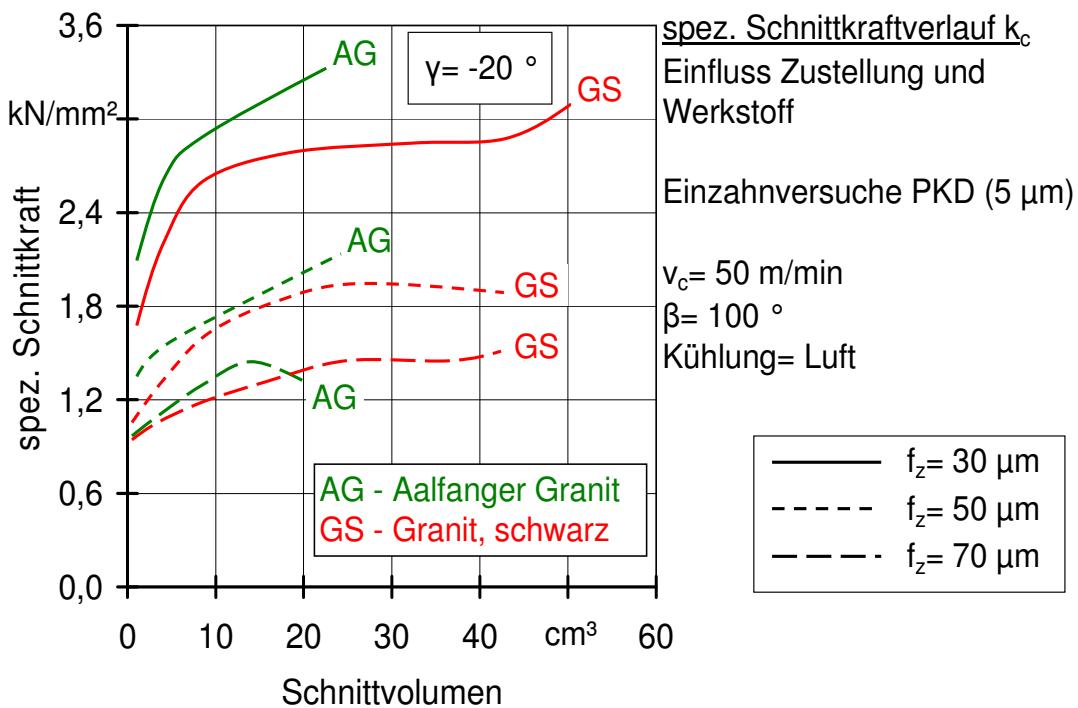


Abb. 5.17: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation des Werkstoffs und der Zustellung bei $\gamma = -20$ °

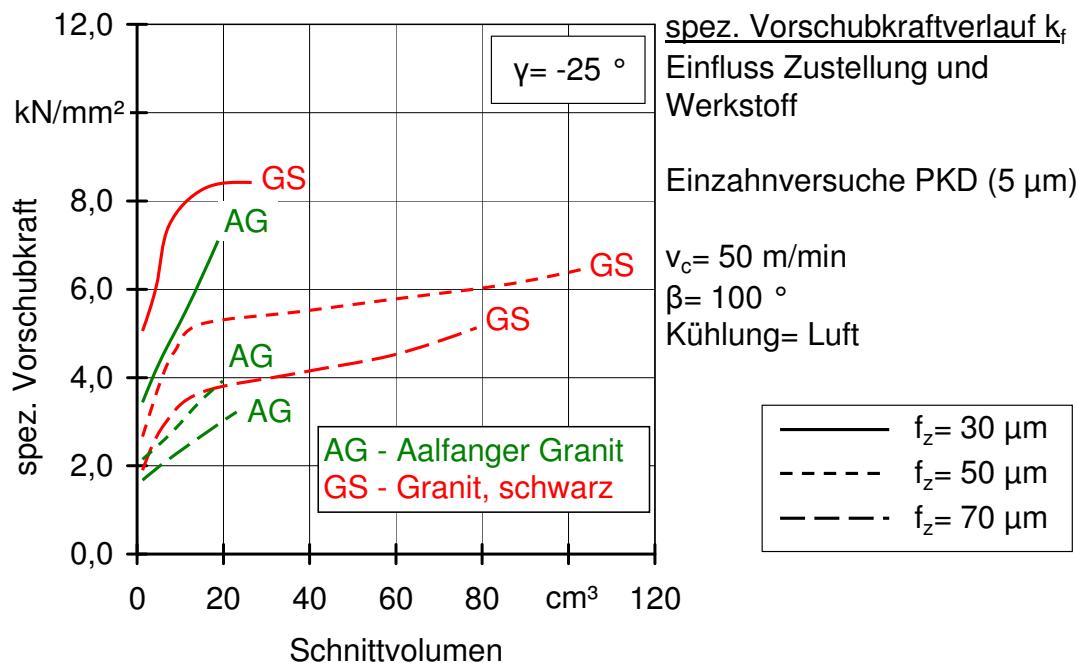


Abb. 5.18: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Werkstoffs und der Zustellung bei $\gamma = -25$ °

Abb. 5.17 und Abb. 5.18 zeigen den Vergleich zwischen den beiden Werkstoffen. Die Auswirkungen des Wechsels sind bei beiden getesteten Spanwinkelwerten gleich: Die Werte der Schnittkraft sind bei der Bearbeitung von Aalfanger Granit etwas höher. Gleichzeitig sind jedoch geringere Vorschubkräfte erforderlich. Allerdings ist Aalfanger Granit ein inhomogeneres Gestein als der bisher verwendete schwarze Granit. Dies ist in den Auswertungen der einzelnen Schneiden anhand etwas größerer Streubreiten zu erkennen. Diese größeren Belastungsunterschiede während eines Eingriffs belasten die Schneidkörper augenscheinlich stärker, da der Verschleiß deutlich schneller anstieg und somit früheres Versagen herbeiführte.

5.2.5 Neuer Schneidstoff

Beim Schneidstoffvergleich in Abschnitt 5.2.1.2 wurden vier PKD – Sorten verglichen. Nun sollte ein weiterer Schneidstoff in die Betrachtungen einbezogen werden. Diese PKD – Sorte, im Folgenden als Schneidstoff *K* bezeichnet, wird aus Diamanten der Körnung 0,5 bis 1 μm hergestellt. Da sich im ersten Schneidstoffvergleich die feinkörnigste Sorte (*A*, 5 μm) durchsetzte, war der Schritt zu der neuen, noch feinkörnigeren konsequent.

Der Schneidstoff *K* wurde also mit Schneidstoff *A* verglichen. Dazu wurden, wie schon in den letzten beiden Versuchsreihen, Zustellung (30, 50 und 70 μm) und Spanwinkel (-20 und -25°) variiert.

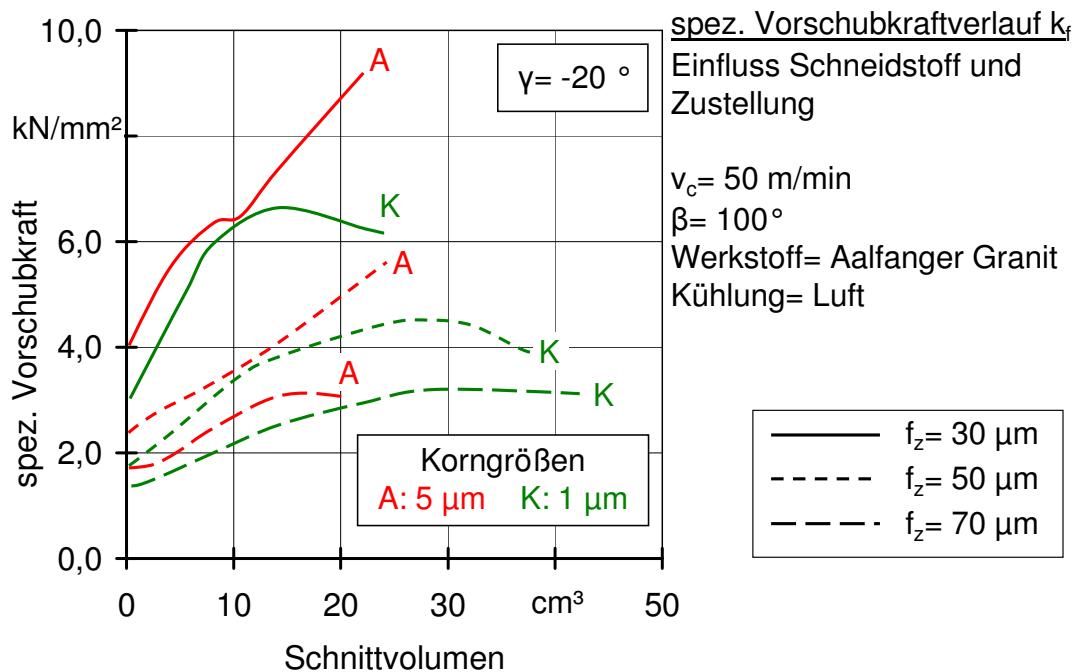


Abb. 5.19: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Schneidstoffs und der Zustellung bei $\gamma = -20^\circ$

Die Verringerung der Korngröße führt zu einer Verringerung der Schneidenbelastung. Sowohl Schnitt-, als auch Vorschubkraft verhalten sich bei beiden eingestellten Spanwinkeln analog zur Vorschubkraft in Abb. 5.19. Die Feinkörnigkeit kann die Formhaltigkeit der Schneidkanten entscheidend erhöhen, sodass länger günstige Zerspanungsbedingungen herrschen. Teilweise tritt sogar ein freischneidendes Verschleißverhalten auf, sodass die Bearbeitungs Kräfte gegen Standzeitende sinken (z.B. K - $50 \mu\text{m}$ – Kurve in Abb. 5.19).

Tendenziell scheint die Verringerung der Korngröße der Diamanten im PKD – Schneidstoff die Bearbeitung von Gestein zu begünstigen. Werden in Zukunft feinkörnigere PKD – Sorten als Schneidstoff K verfügbar, sollten diese ebenfalls auf ihre Eignung zur Gesteinzerspanung überprüft werden. Hier wird für die weiteren Versuchreihen der Schneidstoff K verwendet. Auch bei einer späteren Anwendung sollte die feinkörnigste PKD – Sorte als Basis herangezogen werden.

5.2.6 Niedrigere Schnittgeschwindigkeit

Bei der Betriebspunktsuche in Abschnitt 5.2.1.1 stellte sich die niedrigste der drei getesteten Schnittgeschwindigkeiten als deutlich am günstigsten heraus. Auch in diesem Fall erschien es konsequent eine noch kleinere Schnittgeschwindigkeit zu testen. Unter Anwendung aller bis dahin gesammelten Erkenntnisse wurde daher nach der Ein-

führung des Schneidstoffs K eine Versuchsreihe zur Gegenüberstellung der Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 30 \text{ m/min}$ und 50 m/min durchgeführt.

Es wurde ein Versuchsplan erstellt, in dem zusätzlich zur Schnittgeschwindigkeit Zustellung (30, 50 und 70 μm) und Spanwinkel (-20 und -25°) variiert wurden.

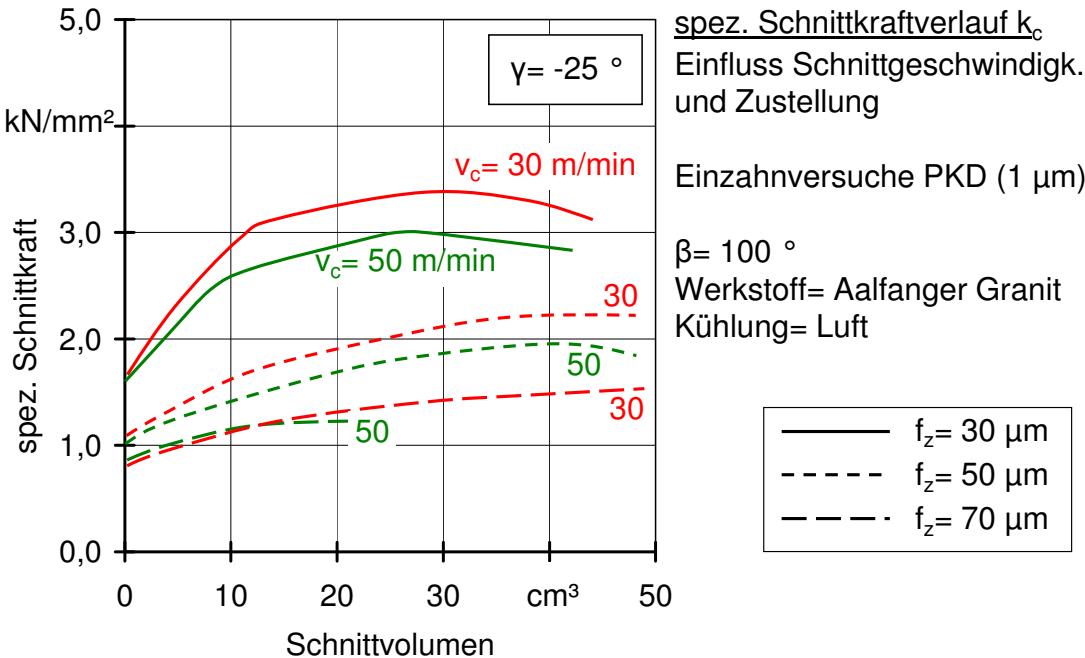


Abb. 5.20: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung bei $\gamma = -25^\circ$

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind differenziert zu betrachten: Die spezifische Belastung der Schneide in Schnittrichtung nimmt durch die Verringerung der Schnittgeschwindigkeit bei Zustellungen von 30 und 50 μm um ca. 10% zu. Bei 70 μm Zustellung wirkt sich die Geschwindigkeitsänderung nicht auf die Schnittkraft aus. Diese Zusammenhänge sind sowohl bei dem in Abb. 5.20 abgebildeten Verlauf für -25° Spanwinkel zu erkennen, als auch in dem hier nicht dargestellten Verlauf bei $\gamma = -20^\circ$.

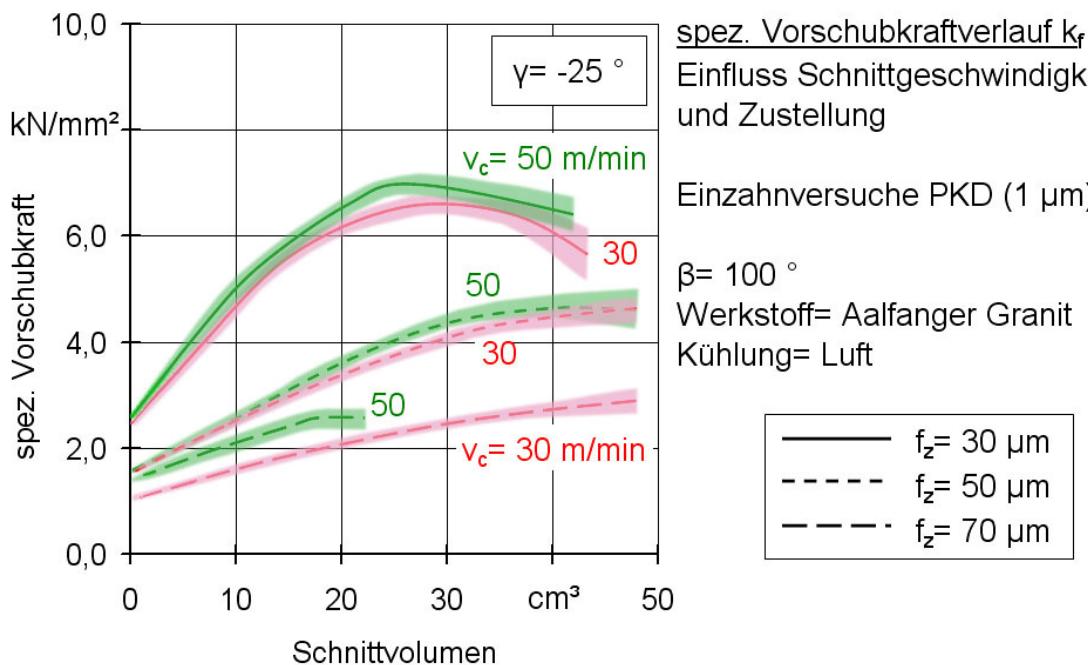


Abb. 5.21: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung bei $\gamma = -25^\circ$

Die Auswirkung der Verringerung der Schnittgeschwindigkeit auf den Verlauf der spezifischen Vorschubkraft lässt sich sowohl bei $\gamma = -25^\circ$ (Abb. 5.21) als auch bei $\gamma = -20^\circ$ nur mit dargestellten Streubändern einschätzen. Die Unterschiede sind bei 30 und 50 μm Zustellung nicht signifikant. Einzig bei 70 μm Zustellung bewirkt die Verringerung der Schnittgeschwindigkeit ein Sinken der Vorschubkraft.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass ein Herabsetzen der Schnittgeschwindigkeit auf $v_c = 30 \text{ m/min}$ nur geringfügige Auswirkungen auf die Bearbeitungskräfte hat. Bei einer Anwendung der entwickelten Schneiden an mehrschneidigen Werkzeugen würde eine geringe Schnittgeschwindigkeit die Realisierung der großen Zustellung von 70 μm erleichtern. Allerdings sind derartig niedrige Schnittgeschwindigkeiten oftmals nur durch einen hohen maschinellen Aufwand (hohe Motorleistung, zusätzliche Getriebe) zu erreichen. Daher wird an dieser Stelle nur auf die Möglichkeit der niedrigen Schnittgeschwindigkeit hingewiesen. Die nachfolgenden Versuchsreihen werden weiterhin auf der Grundlage von $v_c = 50 \text{ m/min}$ durchgeführt.

5.2.7 Kühlung

In allen bisherigen Versuchen wurde als Kühlung kalte Druckluft verwendet. Durch die Bündelung des Luftstrahls mittels zweier Düsen erfüllte die Luft den Zweck der Kühlung des Werkzeugs nach jedem Eingriff und sie beseitigte das zerspannte Material aus dem Schnittspalt.

Bei den höheren Schnittgeschwindigkeiten, die bei der Betriebspunktsuche in Abschnitt 5.2.1.1 untersucht wurden, zeigte sich jedoch, dass die Luftpühlung ab einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 100 \text{ m/min}$ nicht mehr vermag die im Eingriff entstehende Prozesswärme abzuführen. Daher wurde der Prüfstand mit einer Wasserkühlung ausgestattet, um auch deren Möglichkeiten zu erproben.

Im ersten Schritt sollte die Auswirkung der Wasserkühlung bei der bisher verwendeten Schnittgeschwindigkeit $v_c = 50 \text{ m/min}$ untersucht werden. Dazu wurde ein Versuchsanplan unter Variation der Zustellung aufgestellt. Aufgrund der erwarteten, hohen Versuchsdauer wurde der Spanwinkel bei dieser Untersuchung nicht variiert. Stellte sich der Einfluss die Wasserkühlung als positiv heraus, waren im nächsten Schritt höhere Schnittgeschwindigkeiten zu erproben.

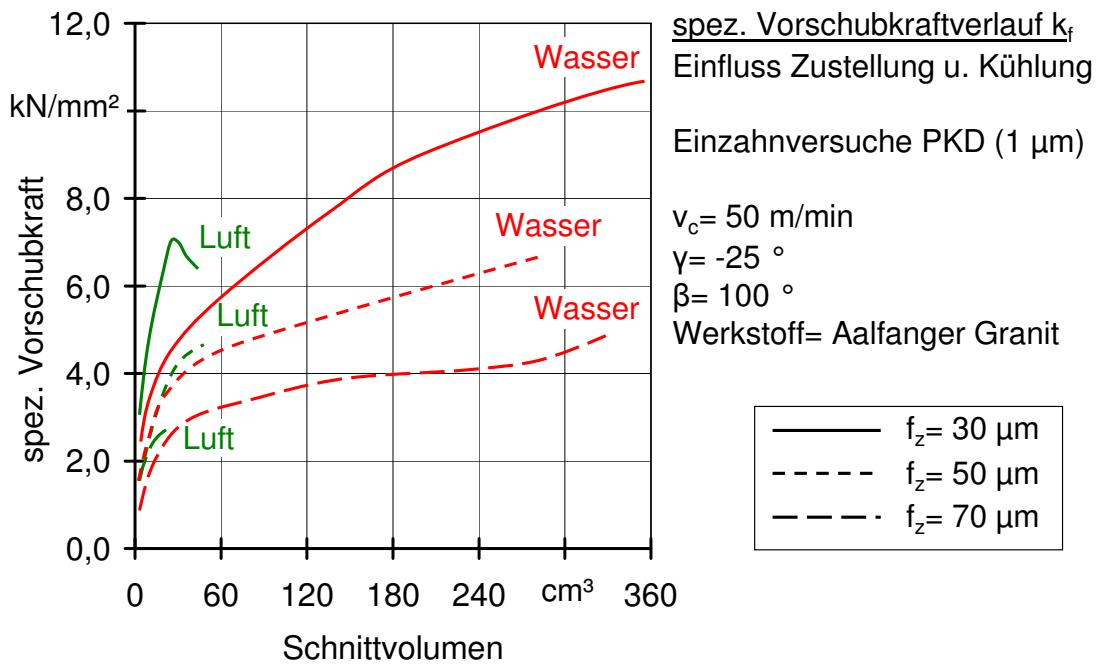


Abb. 5.22: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Kühlmediums und der Zustellung

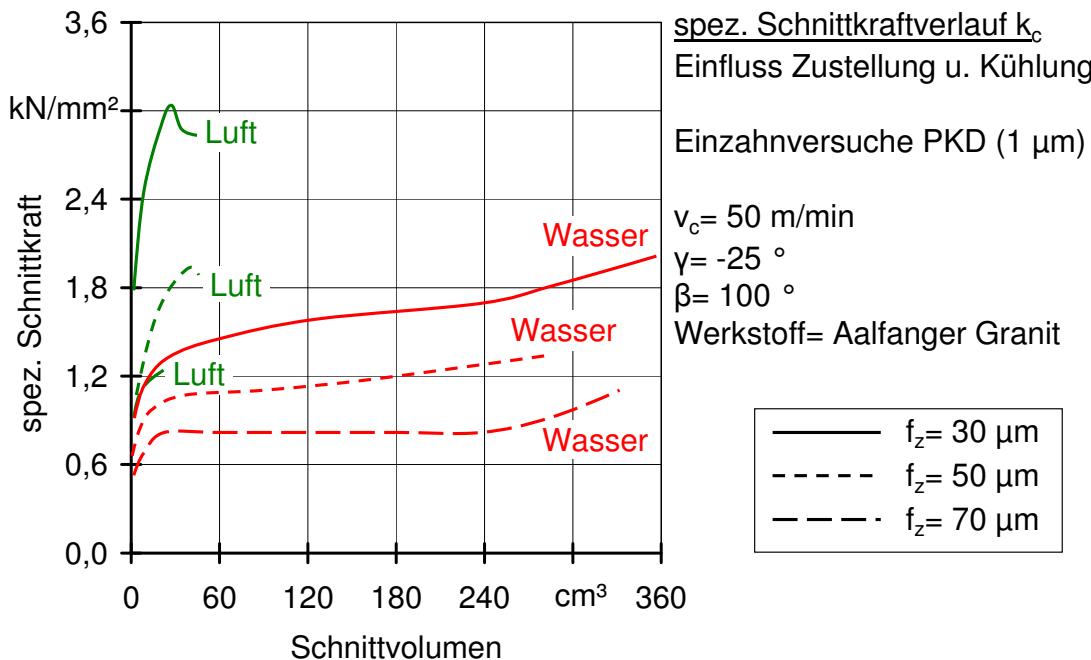


Abb. 5.23: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Schnittkraft unter Variation des Kühlmediums und der Zustellung

Abb. 5.22 und Abb. 5.23 zeigen den Einfluss des Kühlmediums Wasser: Die Vorschubkräfte steigen zwar langsamer an, erreichen jedoch Maximalwerte die bspw. bei einer Zustellung von 30 μm mehr als 50 % über denen der Schneidelemente mit Luftpühlung liegen. Gleichzeitig werden die Schnittkräfte durch den Einsatz der Wasserkühlung nahezu halbiert. Insgesamt beträgt die durchschnittliche Standmenge der Schneidelemente mit Wasserkühlung das Siebenfache derer mit Luftpühlung. Eine Kühlung der Schneidelemente im späteren Einsatz ist also empfehlenswert.

Erstmals erreichten mehr als die Hälfte der Proben Abbruchkriterien, die nicht im Zusammenhang mit der Fügestelle zwischen Schneidelement und Halter stehen. Somit wird die Fügeverbindung beim Einsatz der Wasserkühlung weniger belastet. Diese Erkenntnis und die Fragestellung, ob die vorrangige Wirkung des Wassers wirklich eine kühlende ist, sollen in Kapitel 6 dieser Arbeit wieder aufgegriffen und vertieft werden.

5.2.8 Höhere Schnittgeschwindigkeiten mit Wasserkühlung

In Abschnitt 5.2.1.1 wurde bei der Betriebspunktsuche festgestellt, dass Schnittgeschwindigkeiten ab 100 m/min sichtbare Temperaturbelastungen der Schneidelemente bedeuten. Nun, da in der letzten Untersuchung der positive Einfluss einer Wasserkühlung gezeigt werden konnte, wurde erneut eine Versuchsreihe mit 100 und 150 m/min Schnittgeschwindigkeit durchgeführt. Ziel war die Überprüfung der Aussa-

gen aus den Abschnitten 5.2.1.1 und 5.2.6, dass $v_c = 50 \text{ m/min}$ der günstigste untersuchte Betriebspunkt ist.

Es wurde bei der Erstellung des Versuchsplans auf die Variation des Spanwinkels verzichtet, da der Einsatz der Wasserkühlung eine eklatante Standmengenerhöhung und somit eine erhebliche Dauer der Untersuchungen erwarten ließ. Deshalb wurde zusätzlich zur Schnittgeschwindigkeit (50, 100 und 150 m/min) lediglich die Zustellung auf den gewohnten Stufen (30, 50 und 70 μm) variiert.

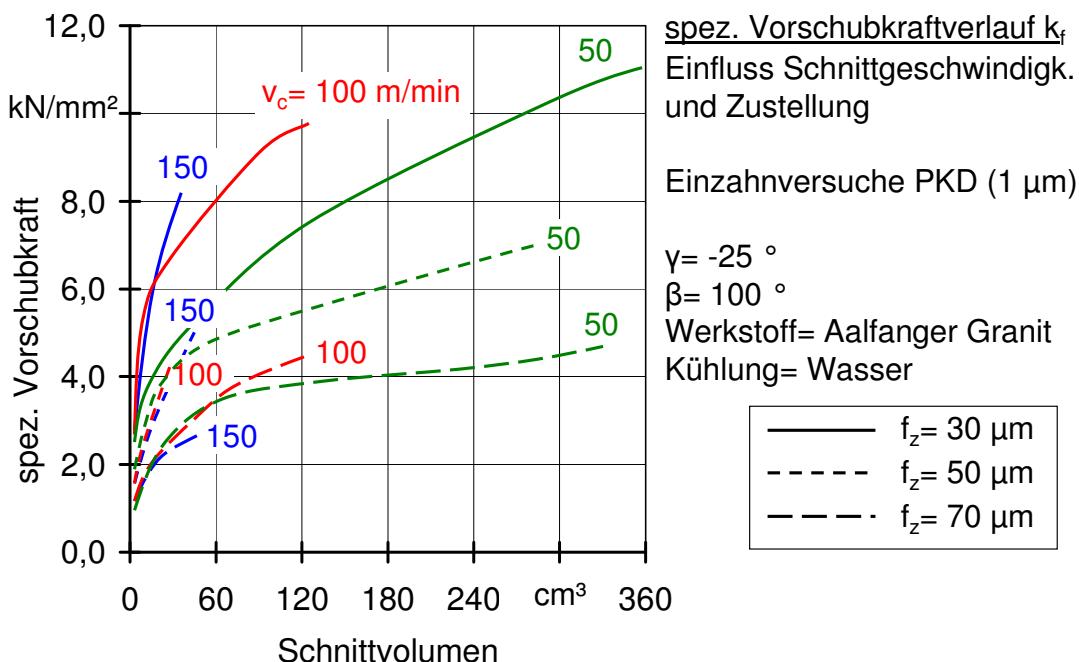


Abb. 5.24: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und der Zustellung

Wie schon beim Schnittgeschwindigkeitsvergleich mit Luftkühlung, erweist sich die niedrigste Schnittgeschwindigkeit als die günstigste Wahl, obwohl die Kräfte (Ausnahme: 30 μm Zustellung) zu Beginn der Standmengen (bis ca. 30 cm^3) ohne signifikanten Einfluss der Schnittgeschwindigkeit verlaufen. Erst vor ihrem jeweiligen Standzeitende weichen die Kraftverläufe der einzelnen Schnittgeschwindigkeiten von den anderen mit gleicher Zustellung ab. Bei einer Zustellung von 30 μm steigt die spezifische Vorschubkraft bei $v_c = 50 \text{ m/min}$ langsamer an, als die der anderen Schnittgeschwindigkeiten.

Da hier weniger die Lötstelle zwischen Schneidelement und Werkzeughalter als PKD – Schichtabplatzungen und –ausbrüche für das Versagen der Schneiden verantwortlich war, können auch die Standmengen für Aussagen über den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit herangezogen werden. Dabei zeigt sich, dass eine Verringerung der Schnittgeschwindigkeit eine deutliche Steigerung der Lebensdauer der

Schneiden bewirkt. Als Ausnahme erweist sich der geringfügige Unterschied zwischen 100 und 150 m/min bei einer Zustellung von 50 μm .

Da für die Schnittkräfte sehr ähnliche Aussagen getroffen werden können, wie für die Vorschubkräfte, wurde auf deren Darstellung verzichtet.

Es bleibt für die vorliegende Bearbeitung die Empfehlung von 50 m/min als Einsatzschnittgeschwindigkeit. Auch die weiteren Versuchsreihen werden mit dieser Schnittgeschwindigkeit durchgeführt. 70 μm Zustellung bedeutet auch weiterhin die geringste spezifische Belastung der Schneide. Die höhere Belastung bei 30 μm wirkt sich jedoch mit einer Wasserkühlung nicht negativ auf die Standmenge aus.

5.2.9 Gesteinsklassen

Alle bisherigen Versuchsreihen wurden auf Granit durchgeführt. Nun sollten die bisher gesammelten Erkenntnisse auch auf den zwei anderen Gesteinsklassen Marmor und Sandstein getestet werden, um Ansatzpunkte für nachfolgende Arbeiten zu liefern und das Potential der entwickelten Schneiden abschätzen zu können.

Vorversuche zeigten bereits, dass die entwickelten Schneiden auf den weicheren Gesteinen erheblich höhere Standmengen erreichen, als auf Granit. Deshalb wurden diese Versuche wieder mit Luftkühlung statt mit Wasserkühlung durchgeführt, um den zeitlichen Rahmen der Untersuchungen zu beschränken. Für alle anderen Parameter wurden die bis dato ermittelten Optimalwerte eingestellt.

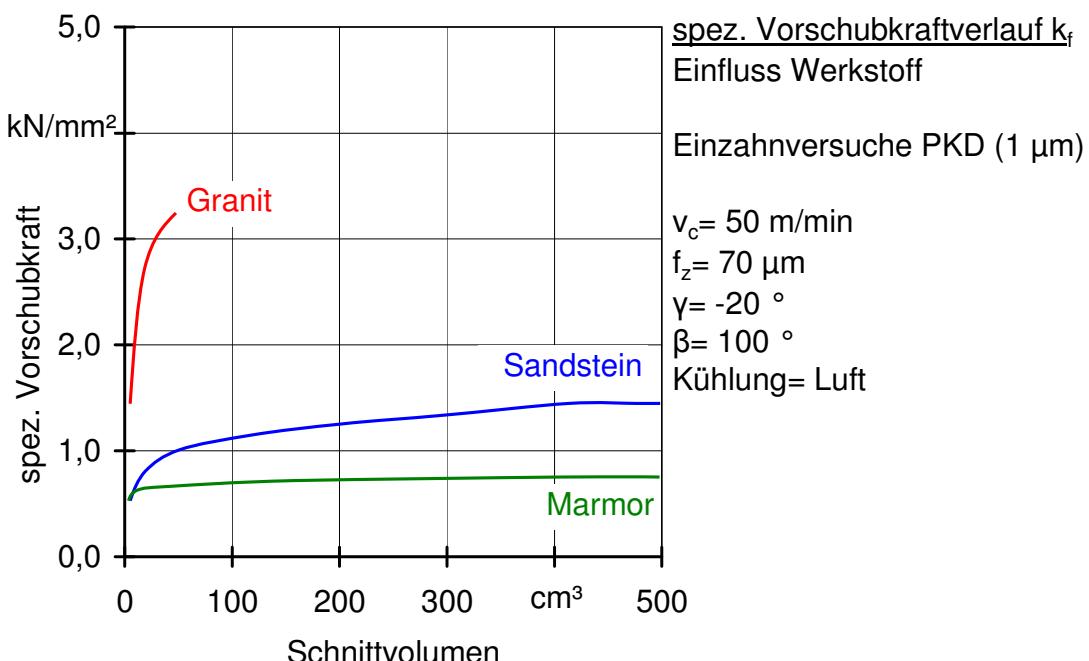


Abb. 5.25: Einfluss des Schnittvolumens auf die spezifische Vorschubkraft unter Variation des Werkstoffs

Es zeigte sich, dass die Bearbeitungs Kräfte auf den weicheren Gesteinen nur einen Bruchteil derer auf Granit betragen. Dies führt zu deutlich höheren Standmengen. Abb. 5.25 zeigt den Verlauf der Vorschubkräfte. Das Verhalten der Schnittkräfte ist diesen sehr ähnlich, weshalb auf deren Darstellung verzichtet wurde. Auffällig ist, dass die Kräfte bei Sandstein stetig anstiegen, während sie bei Marmor nahezu konstant blieben. Dies spiegelt sich auch in den Verschleißbetrachtungen wieder: Die Marmor – Schneiden wiesen nach 500 cm^3 zerspantem Volumen fast keine Verschleißerscheinung auf. Dagegen zeigten die Schneiden, die auf Sandstein dieses Schnittvolumen erzeugt haben, einen sehr starken abrasiven Verschleiß, sodass die Versuchsreihe an dieser Stelle beendet wurde.

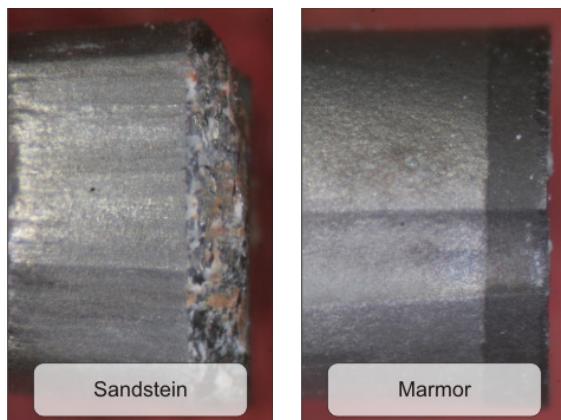


Abb. 5.26: Schneidelemente nach der Zerspanung von 500 cm^3 Sandstein bzw. Marmor

Auf weicheren Gesteinen sind also erheblich höhere Standmengen möglich als auf Graniten. Während jedoch die abrasive Wirkung des Sandsteins einen deutlichen Verschleiß des Schneidelements hervorrief, konnte Marmor nahezu mühelos zerspannt werden. Das Potenzial der entwickelten Schneiden scheint demnach sehr hoch zu sein. Die Anpassung von Schnittgeschwindigkeit, Zustellung und Spanwinkel ermöglicht voraussichtlich eine Steigerung der Ergebnisse.

5.3 Ergebnisse der Werkzeugentwicklung

Als Ergebnis der Werkzeugentwicklung lassen sich Eckdaten für die Anwendung von geometrisch bestimmten Schneiden bei der Zerspanung von Naturstein nennen. Es wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt, in denen eine Vielzahl der Stellgrößen der geometrisch bestimmten Zerspanung variiert wurde. Im Hinblick auf die Entwicklung und Optimierung der Schneiden, wurden die Effekte der Stellgrößenvariationen diskutiert. Die Ursachen für die aufgetretenen Effekte konnten hier lediglich vermutet werden. Weitergehende Überlegungen und zusätzliche Untersuchungen in Kapitel 6 – „Vorgänge an der Schneide“ sollen dabei helfen, Erklärungen für einen Teil der Effekte zu finden.

Die Schneiden die in diesem Kapitel entwickelt wurden, sollen die Grundlage für verschiedene Werkzeuge bieten. Deshalb wurde bereits zu Beginn vereinbart, dass die Entwicklung nicht im Hinblick auf eine spätere Anwendung in einem bestimmten Bearbeitungsverfahren durchgeführt werden soll, sondern unabhängig davon. Die Ergebnisse dieses Kapitels sollen also gleichermaßen von Entwicklern für Bohrkronen, Bohrern oder auch Band- und Kreissägewerkzeugen verwendet werden können. Für diese und noch andere Anwendungen lassen sich folgende Empfehlungen nennen:

Eine halbkreisförmige Spanfläche ermöglicht einen gleichmäßigeren Verschleiß als eckige Formen. Wird zusätzlich eine Nut an der Unterseite des Schneidelements angebracht, wird die Positionierung beim Fügevorgang deutlich vereinfacht. Wenn möglich, sollte der Keilwinkel am höchsten Punkt der Spanfläche 100° und an den Seiten des Schneidelements 88° betragen. Kann die herstellende Maschine diese Bewegung nicht ermöglichen, sollte ein konstanter Keilwinkel von 88° eingehalten werden.

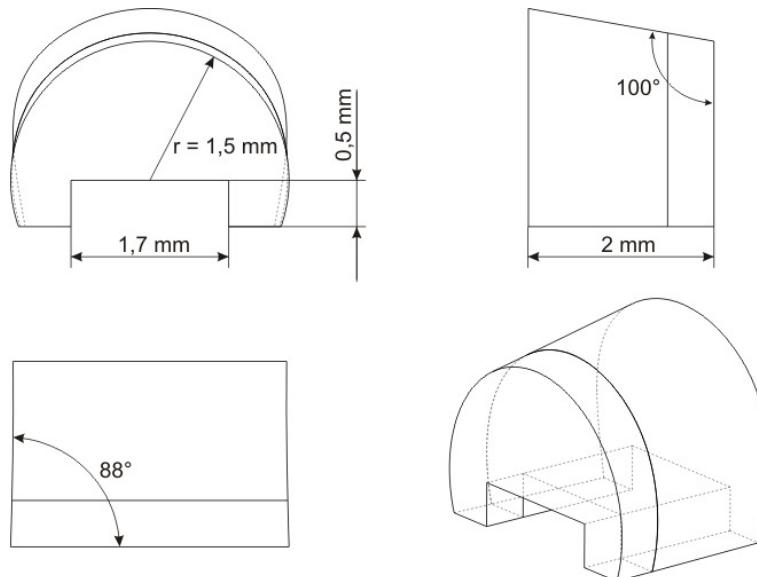


Abb. 5.27: Zeichnung des Schneidelements

Beim Fügen der Schneiden auf den Werkzeugträger ist die festgestellte Wechselwirkung zwischen Zustellung und Spanwinkel zu berücksichtigen: Im Idealfall sollten die Schneiden mit -20° Spanwinkel aufgebracht werden. Dann muss die Zustellung von Schneide zu Schneide im Einsatz auf $70 \mu\text{m}$ eingestellt werden können. Ist solch eine große Zustellung nicht möglich, muss der Spanwinkel angepasst werden. Für eine Zustellung von $50 \mu\text{m}$ sollte er -25° betragen, bei $30 \mu\text{m}$ sind -15° am günstigsten.

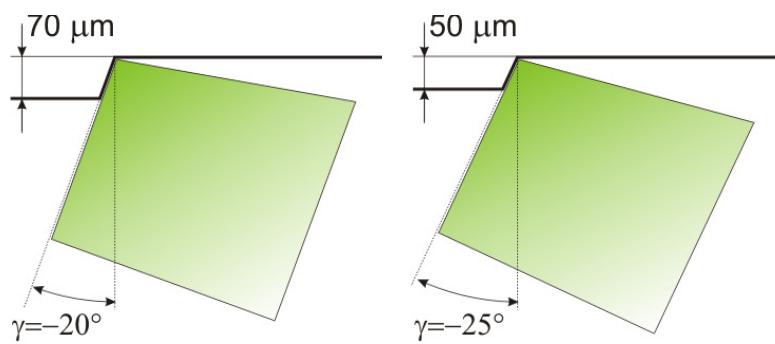


Abb. 5.28: günstige Spanwinkel – Zustellung – Kombinationen

Als Kühl- bzw. Spülmedium ist Wasser zu empfehlen. Es ist jedoch auch möglich die Schneiden mit Luft zu kühlen. Allerdings sinkt dann deren Standmenge. Unabhängig davon kann eine Schnittgeschwindigkeit von 50 m/min empfohlen werden. Eine Herabsenkung der Schnittgeschwindigkeit auf 30 m/min kann Vorteile in der Standmenge bringen, bei der zugehörigen Versuchsreihe waren diese jedoch nicht signifikant.

PKD wurde als Schneidstoff in fast allen Versuchreihen verwendet, da er als etablierter Diamantschneidstoff relativ kostengünstig bezogen und in Schneidenform gebracht werden konnte. Versuchsreihen zeigten, dass für die Natursteinbearbeitung die feinkörnigen PKD – Sorten am Besten geeignet sind.

Der Großteil der Untersuchungen wurde auf Granit durchgeführt, sodass die bisher genannten günstigen Technologie- und Geometriewerte vorrangig für die Anwendung der Schneiden auf diesem Werkstoff gelten. Versuche auf den Werkstoffen Sandstein und Marmor ergaben, dass hierbei mit den genannten Einstellungen sehr große Standmengen erreicht werden können. Das Potential der entwickelten Schneiden ist jedoch auf diesen Werkstoffen noch längst nicht erschöpft. Eine Verschiebung des optimalen Betriebspunktes (Werkzeuggeometrie, Technologiedaten, usw.) bei verschiedenen Werkstoffen ist sehr wahrscheinlich und sollte in nachfolgenden Arbeiten untersucht werden.

6 Vorgänge an der Schneide

Zweites Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Vorgänge an der Schneide beim Trennen mineralischer Werkstoffe. Die bei der Werkzeugentwicklung erlangten Erkenntnisse werden in diesem Kapitel diskutiert, um Erklärungen für die aufgetretenen Effekte zu finden. Durch zusätzliche Versuche und Betrachtungen werden Erklärungsversuche bestätigt oder widerlegt. Am Ende des Abschnitts soll eine Theorie über den Zerspanvorgang formuliert werden.

6.1 Diskussion der Erkenntnisse aus Werkzeugentwicklung

6.1.1 Schneidstoff

Erste zur Diskussion stehende Einflussgröße ist der Schneidstoff. Bei den Untersuchungen mit PKD wurde festgestellt, dass ein feinkörniger Schneidstoff einen flacheren Anstieg der Bearbeitungskräfte bewirkt, als der Einsatz einer grobkörnigen PKD – Sorte.

Einfache Überlegungen führen zu dem Schluss, dass die Diamanten in feinkörnigen PKD – Sorten mehr Verbindungen untereinander eingehen können, da sie mehr Reaktionsoberfläche zur Verfügung haben und kleinere Hohlräume bilden. Es ergibt sich somit ein festerer Verbund, da das engere System eine bessere Stützwirkung für eine größere Anzahl harter Stützpunkte bietet.

In die Hohlräume zwischen den Diamantkörnern diffundiert bei der Herstellung der Binder. Wie bereits in den Grundlagen ermittelt, ist die Abrasion dieses Binders der vorrangige Verschleißmechanismus bei PKD. Ein Vergleich dreier verschiedener PKD – Schneidstoffe nach der Zerspanung von 15 cm^3 Aalfanger Granit, sollte die unterschiedlichen Verschleißvorgänge zeigen.

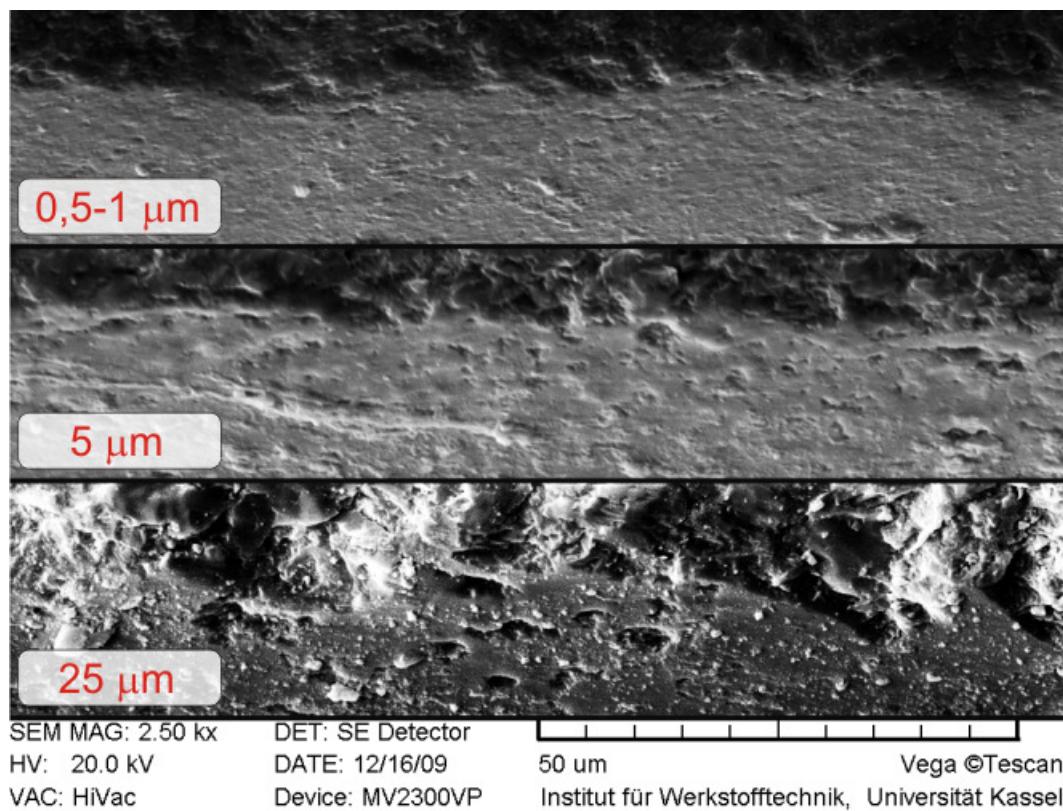


Abb. 6.1: Einfluss der Diamantkorngröße im PKD auf den Verschleiß der Schneidkante

Abb. 6.1 zeigt die REM – Aufnahmen der drei untersuchten Schneiden unter Angabe der Korngröße des jeweiligen PKD – Schneidstoffs. Der Unterschied ist klar zu erkennen. Beim feinkörnigsten Schneidstoff sind Schneidkante und Spanfläche von einer sehr geringen Oberflächenrauhigkeit gekennzeichnet. Die Schartigkeit der Schneidkante ist, im Gegensatz zu denen der größeren Schneidstoffe, minimal. Bei der mittleren Schneidkante kann bereits eine leicht erhöhte Rauigkeit festgestellt werden. Jedoch hebt sich die Schneide mit 25 μm großen Diamanten im PKD deutlich von den anderen beiden ab. Hier sind tiefe Kerben in der Schneidkante und Ausbrüche auf der Spanfläche festzustellen.

Damit kann der eingangs beschriebene Verdacht bestätigt werden. Die Feinkörnigkeit ermöglicht einen stärkeren Verbund zwischen den Diamanten und verhindert größere Fehlstellen, für den Fall, dass ein Schneidkorn bei der Bearbeitung aus dem Verbund gerissen wird. Dieses Herausreißen ist eine Folge der Abrasion des Binders. Wird dieser abgetragen, erfahren die benachbarten Diamanten aufgrund der verringerten Abstützwirkung Zugbelastungen oder Verformungen, in deren Folge sie aus dem Diamantverbund herausbrechen können.

Der Hauptverschleißmechanismus am PKD scheint also die Abrasion des Binders durch harte Partikel des Werkstoffes zu sein. Es ist zu vermuten, dass die Größe der abrasiv wirkenden Werkstoffpartikel im Verschleißprozess eine entscheidende Rolle

spielt. Je kleiner die Diamantkorngröße im Schneidstoff, desto schlechter können die Werkstoffpartikel den Binder zwischen den Diamanten abtragen.

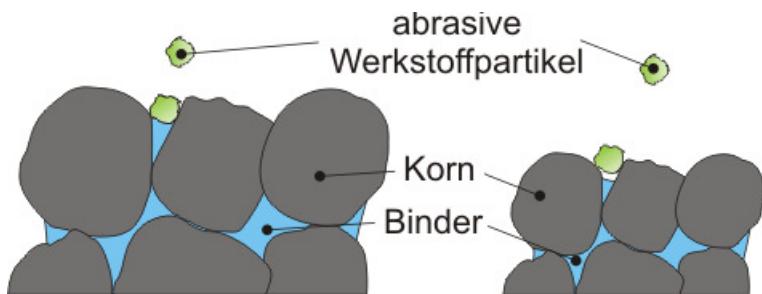


Abb. 6.2: abrasive Wirkung auf Schneidstoffe mit unterschiedlicher Korngröße

Folglich könnte eine Anpassung der Diamantkorngröße im PKD an den jeweiligen Werkstoffeinsatz den abrasiven Verschleiß der Schneidkante effektiv verringern.

6.1.2 Spanwinkel

Die Untersuchungen im Kapitel Werkzeugentwicklung ergaben einen günstigen Spanwinkelbereich von -20 bis -25° . Diese Erkenntnis ermöglicht sowohl Aussagen über die Mechanismen im Werkstoff als auch eine Diskussion über die Wechselwirkungen zwischen Schneide und Werkstück.

6.1.2.1 Werkstoff

Der ermittelte günstige Spanwinkelbereich befindet sich im Quervergleich zur Metallbearbeitung sehr stark im Negativen. Im Hinblick auf die Gesteinszerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide (Abschnitt 2.3.2) erweist sich dieses Ergebnis allerdings als folgerichtig. Dort wird das Gestein durch die schrägen Flanken der eingebetteten Diamantkörner zertrümmert. Positive Spanwinkel sind nahezu unmöglich, da der Diamant dann nicht ausreichend vom Binder umschlossen sein kann bzw. der Binder ebenfalls in Eingriff kommt und so der Diamant nach kurzer Zeit freigelegt ist. Die Spanbildung erfolgt nicht durch das Abtrennen eines Spans, sondern durch eine lokale Überbeanspruchung des Werkstoffs mit Druck. Dieser Vorgang wird durch negative Spanwinkel begünstigt. Auch die Verwendung von Diamant als Schneidstoff ist konsequent, da dieser als härtestes bekanntes, natürliches Material eine höhere Druckfestigkeit als das zu zerstörende Material besitzt.

Für die in dieser Arbeit angewendete Gesteinszerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide, bedeutet der als optimal ermittelte, stark negative Spanwinkel, dass der grundlegende Spanbildungsmechanismus mit dem der Steinbearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide übereinstimmt. Die Schneide muss ihren Vorteil der hö-

heren Druckfestigkeit gegenüber dem Werkstoff nutzen, um ihn so stark mit Druck zu belasten, dass dieser zerstört wird.

6.1.2.2 Interaktion zwischen Schneide und Werkstoff

Die Abweichung aus dem ermittelten Spanwinkelbereich (-20 bis -25°) hatte folgende Auswirkungen: Bei $\gamma \rightarrow 0^\circ$ stieg vor allem die Vorschubkraft an. Für $\gamma \rightarrow -45^\circ$ wurde ein gleichzeitiges Ansteigen von Schnitt- und Vorschubkraft verzeichnet. Die Erklärung ist im Abschnitt 2.3.3.1 (Spanbildung geometrisch bestimmte Gesteinsbearbeitung) und in den geometrischen Gegebenheiten zu finden.

In /120/ zeigte Wagner, dass die zur Gesteinstrennung benötigte Schnittkraft mit sinkendem Spanwinkel ansteigt. Unterschreitet die Summe aus Spanwinkel und Reibungswinkel den Wert des Angriffswinkels der Zerspankraft, wirkt zusätzlich eine Kraft auf die Freifläche, die das Werkzeug vom Werkstück abdrängt. Damit lässt sich leicht der Anstieg der Zerspankraftkomponenten für den Fall $\gamma \rightarrow -45^\circ$ erklären, denn für diese Spanwinkel scheint die beschriebene Winkelkombination erreicht, sodass eine zusätzliche Kraftkomponente die Vorschubkraft erhöht. Die Schnittkraft steigt so, wie es Wagner aufgrund der Spanwinkelverringerung prognostiziert.

Für $\gamma \rightarrow 0^\circ$ beschreibt Wagner ein Sinken der Schnitt- und der Vorschubkraft. Allerdings beruht diese Aussage auf einem gleichbleibenden Freiwinkel. Diese Bedingung war bei den Spanwinkelversuchreihen dieser Arbeit nicht gegeben, da hier der Keilwinkel herstellungsbedingt konstant gehalten werden musste. Somit ging mit der Erhöhung des Spanwinkels stets eine Verringerung des Freiwinkels einher. Der kleiner werdende Raum zwischen Freifläche und Werkstück scheint jedoch Materialstau und Reibung in diesem Bereich zu verursachen, weshalb die Vorschubkraft deutlich ansteigt. Aufgrund der Reibung und der hohen Vorschubkraft wird auch in Schnittrichtung eine höhere Kraft erzeugt, weshalb diese von dem von Wagner berechneten fallenden Verlauf abweicht.

Der als günstig ermittelte Spanwinkelbereich ist folglich ein Kompromiss zwischen zu negativem Spanwinkel und zu kleinem Freiwinkel.

6.1.3 Keilwinkel, Freiwinkel

Unabhängig vom Spanwinkel bewirkt die Erhöhung des Keilwinkels einen leichten Anstieg der Vorschubkraft und eine deutliche Verringerung der Schnittkraft. Den Ursachen dieser beiden Effekte soll in diesem Abschnitt nachgegangen werden.

6.1.3.1 Anstieg der Vorschubkraft

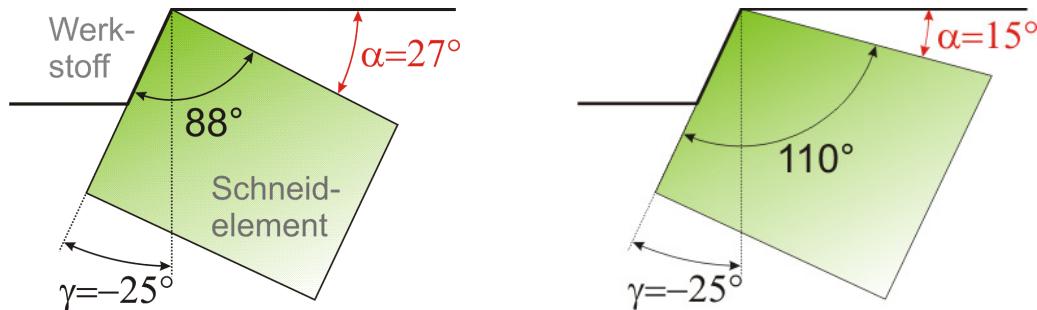


Abb. 6.3: Keilwinkelvarianten bei $\gamma = -25^\circ$

Abb. 6.3 zeigt die beiden Winkelsituationen bei einem Spanwinkel von -25° . Die Abnahme des Freiwinkels infolge der Vergrößerung des Schneidkeils ist in der Abbildung gut erkennbar. Der kleinere Freiraum zwischen Werkzeug und Werkstück spiegelt sich in der höheren Vorschubkraft wieder. Ein Teil des Werkstoffs übt also eine Kraft auf die Freifläche der Schneide aus.

Zur Erklärung des Effektes stehen die verschiedenen Theorien der Spanbildung bei der Gesteinsbearbeitung zur Verfügung, die in Kapitel 2.3.2 und 2.3.3 recherchiert wurden. Nach der Theorie für die Gesteinsbearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide wird die Vorschubkraft vom Sekundärspan verursacht. Dieser bildet sich durch sprunghafte Rückfedern des, vom Diamantkorn mit Druck beaufschlagten Werkstückmaterials und durch Scherbeanspruchungen des Werkstoffs aufgrund der Reibung mit dem Schneidkorn. Bei der Theorie für geometrisch bestimmte Schneiden wird kein Sekundärspan beschrieben. Einzig ein elastisches Rückfedern des Materials ist in der betreffenden Veröffentlichung (/120/) genannt.

Im Hinblick auf die im aktuellen Kapitel angestrebte Erklärung der Spanbildung, sollte überprüft werden, welche der beiden Theorien besser zutrifft. Der Nachweis basierte darauf, dass das Werkstückmaterial durch eine Sekundärspanbildung weiter abgetragen würde, als das Werkzeug in den Werkstoff eindringt. Im Fall des simplen Rückfederns würde weniger abgetragen.

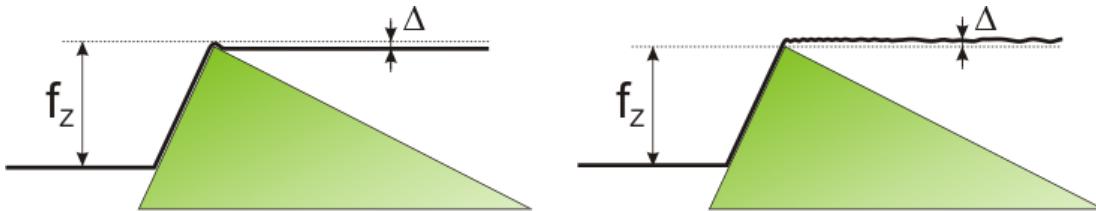


Abb. 6.4: Materialabtrag im Falle des Rückfederns (links) bzw. bei einer Sekundärspanbildung (rechts)

Die Versuchsdurchführung bestand somit aus mehreren Schnittversuchen ohne Zulistung der Schneide. Bei vorhandener Sekundärspanbildung müssten die gemessenen Bearbeitungskräfte bereits beim zweiten Eingriff wesentlich geringer sein als beim

ersten. Ist lediglich ein Rückfedern des Materials der Fall, müsste beim zweiten Eingriff vor allem die Vorschubkraft noch deutlich messbar sein.

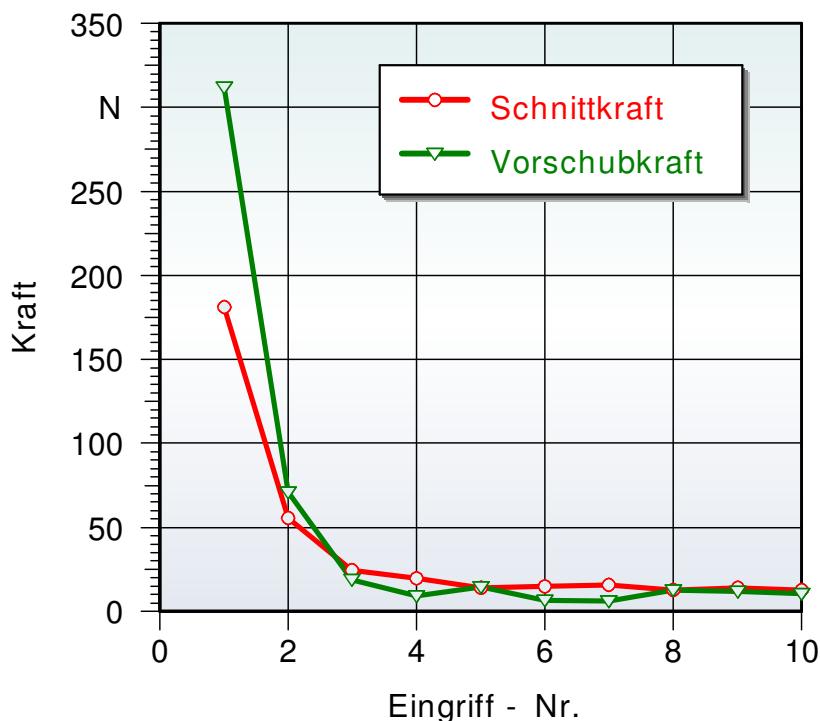


Abb. 6.5: Einfluss der Anzahl der Eingriffe auf die Zerspankraftkomponenten bei $f_z = 0$

Abb. 6.5 zeigt das Ergebnis des beschriebenen Versuchs mit 50 μm Zustellung beim ersten Zyklus und anschließend 9 Zyklen mit $f_z = 0 \mu\text{m}$. Beim ersten Eingriff wurden die regulären Bearbeitungskräfte gemessen. Beim zweiten Eingriff brechen die Kräfte deutlich ein und schon ab dem dritten Zyklus bleiben die Werte nahezu konstant niedrig. Dieses Ergebnis deutet stark auf das Vorhandensein einer Sekundärspanbildung hin, wenngleich ein Anteil des Rückfederns erkennbar ist: Nachdem beim ersten Eingriff der Großteil des Materials zerspannt wurde, müssen beim zweiten Durchzug noch einige Werkstoffspitzen zerstört werden, die zuvor bspw. durch Rattern oder ähnliche dynamische Effekte unbearbeitet blieben. Ab dem dritten Eingriff schleift das Werkzeug nur noch über den Werkstoff. Der Hauptteil der Schneide hat keine Berührungen mit dem Werkstück, lediglich die Randbereiche, in denen die Zustellung bereits beim ersten Eingriff nur zur leichten elastischen Verformung des Materials reichte, erzeugen geringfügige Schnitt- und Vorschubkräfte.

Da dem System Stein – Werkzeug – Maschine eine gewisse Nachgiebigkeit zuzuschreiben ist, könnten die verbleibenden Kräfte ebenfalls aus einer geringfügigen Verformung des Versuchsaufbaus resultieren, sodass das Rückfedern nicht mit Sicherheit als alleinige Ursache der verbleibenden Kräfte genannt werden kann.

Eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Grundes der bearbeiteten Schnittfuge sollte Aufschluss über die Kontaktzonen zwischen Werkzeug und Werk-

stoff geben. Allerdings scheiterte das Vorhaben am Aufbau der Natursteine: Da diese aus einer Vielzahl von Mineralen bestehen, kann keine Schnittstruktur erkannt werden. Jedes Mineralkorn bricht oder verschleißt anders. Deshalb wurde nach einem homogeneren mineralischen Werkstoff gesucht, auf dem der Spanbildungsprozess untersucht werden sollte. Hier bot sich Glas an. Dieses besitzt den Natursteinen ähnliche mechanische Eigenschaft, hat aber eine homogenere Struktur.

Es wurden also Glasplatten angefertigt, die mittels einer speziellen Halterung im Linearprüfstand unter einer Neigung (100 µm auf 100 mm) aufgespannt werden konnten. Die Neigung sollte eine Betrachtung der Vorgänge beim Werkzeugeintritt ermöglichen. Dazu musste das Werkzeug jeweils so eingerichtet werden, dass der Eingriff genau im Bereich des ersten Drittels der Glasplattenlänge stattfand. Durch die Neigung tauchte das Werkzeug über die Länge der Platte zunehmend tiefer ein, sodass bei den anschließenden rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen verschiedene Phasen des Werkzeugeintritts betrachtet werden konnten.

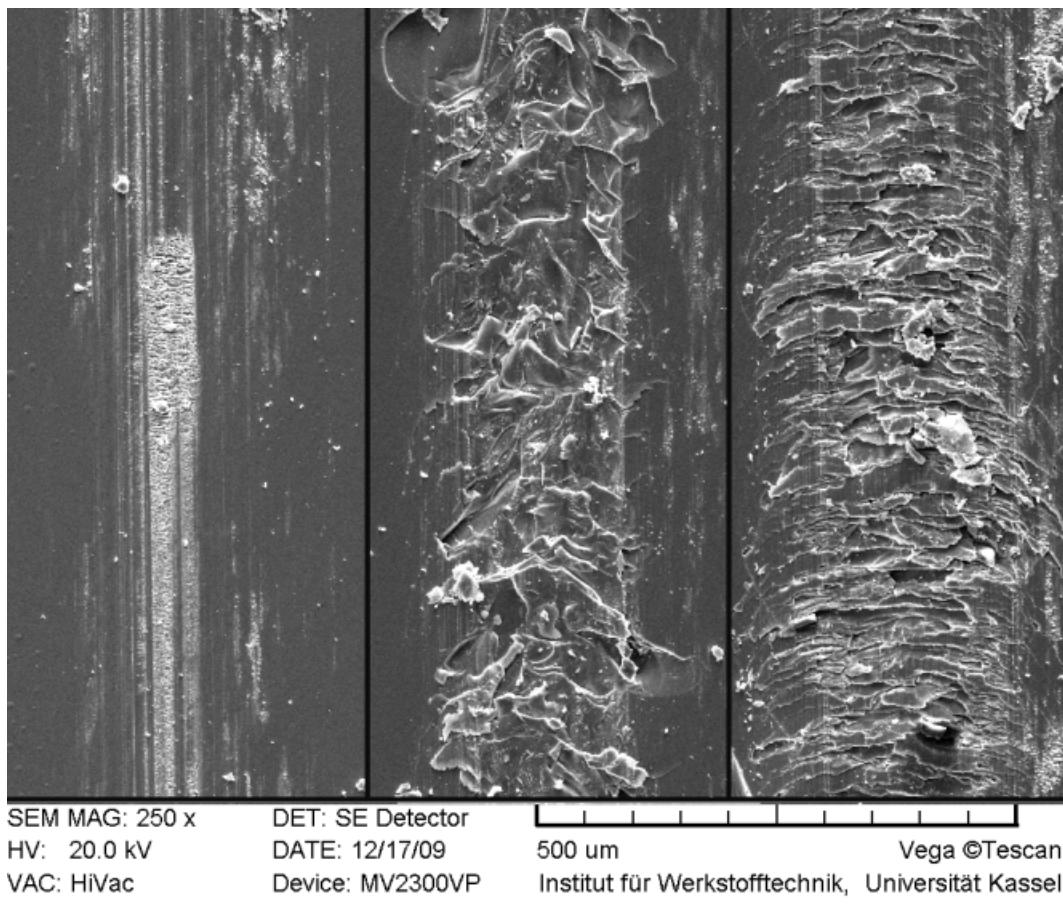


Abb. 6.6: REM – Aufnahme der drei Bereiche des Anschnitts auf der Glasplatte

Abb. 6.6 zeigt einen Teil der angefertigten REM – Aufnahmen. Es fiel auf, dass sich die Spuren der Werkzeuge in drei Bereiche einteilen lassen:

- Im ersten Bereich (Abb. 6.6 links) schleift das Werkzeug über den Werkstoff. Durch Reibung oder lokale Druckspitzen entstehen kleine Fehlstellen auf der Werkstoffoberfläche. Der Großteil des Materials reagiert jedoch elastisch auf die Belastung durch das Werkzeug.
- Im zweiten Bereich (Abb. 6.6 mittig) ist der Druck auf den Werkstoff so hoch, dass das Material der Schneide zwar noch elastisch ausweichen kann. Die starke Reibung zwischen Schneide und Werkstoff induziert jedoch Scherspannungen in der Oberfläche des Werkstoffs, die Risse und Brüche im Material verursachen. Beim Rückfedern direkt nach dem Werkzeug kann die vorgeschiadigte Werkstoffschicht dann der plötzlich auftretenden Zugbeanspruchung nicht widerstehen, sodass Werkstoffpartikel abreißen (sekundäre Spanbildung). Es entsteht die in Abb. 6.6., Mitte dargestellte, kraterförmige Oberflächenstruktur.
- Im dritten Bereich (Abb. 6.6 rechts) ist das Werkzeug bereits relativ tief in das Werkstück eingedrungen, sodass die Spanfläche jetzt ebenfalls großflächig Kontakt zum Werkstoff hat. Im Bereich direkt vor der Schneide wird dadurch eine Druckbelastung aufgebaut, die Risse im Material verursacht. Der Fortschritt der Schneide im Material gleicht dem in Abschnitt 2.3.3.1 beschriebenen Vorgang der Spanbildung: Es entstehen in zwei sich abwechselnden Phasen ein großer Span und mehrere kleine, wenn die bei der Bildung des großen Spans entstandene, schräg ansteigenden Bruchfläche bearbeitet wird. Dieser Vorgang wird nachfolgend mit Primärspanbildung bezeichnet. Die fein geschuppte Struktur entspricht der Lamellierung der in Abschnitt 2.3.2.2 beschriebenen scherspanähnlichen Sekundärspäne. Deren Erscheinungsbild unterscheidet sich hier zum zweiten Bereich, da das Material durch die Primärspanbildung vorgeschiadigt ist.

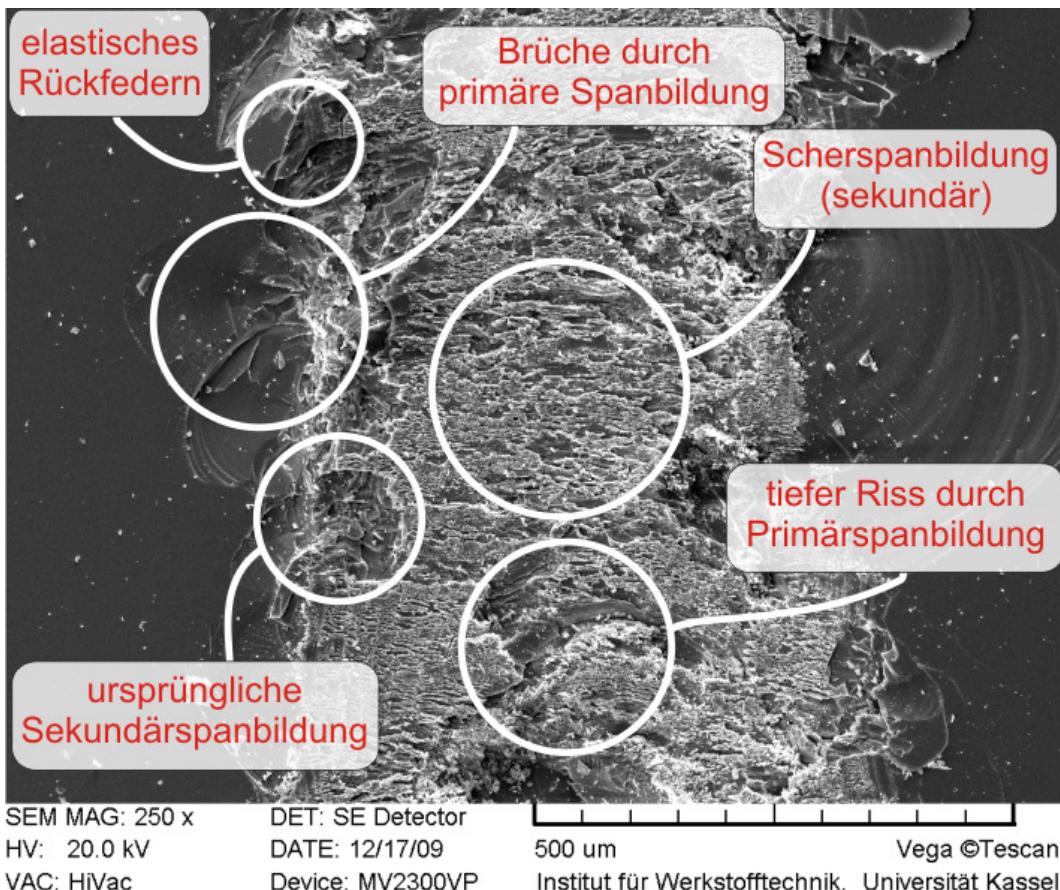


Abb. 6.7: REM – Aufnahme aus einem tieferen Eingriffsbereich

Abb. 6.7 zeigt eine REM – Aufnahme eines relativ tiefen Eingriffs vom Ende der Glasplatte. Elastisches Rückfedern und Sekundärspanbildung treten mit ihren ursprünglichen Erscheinungsformen (wie in Abb. 6.6 links und Mitte) nur noch am Rand der Bearbeitungsstelle auf, wo aufgrund der runden Schneidenform die Spandicke geringer ist. Die primäre Spanbildung trägt den meisten Werkstoff ab und erzeugt dabei Brüche oder Risse, die tief in das Material reichen und auch neben der eigentlichen Schnittfuge Werkstoff abtragen. Verbleibendes Material wird (vor allem im Bereich der verrundeten Schneidkante) durch das Werkzeug elastisch verformt und unter der Schneide hindurch gezwängt. Bei diesem Vorgang erzeugt die Reibung starke, trennend wirkende Scherbelastungen (Tangentialkraft F_T) im oberflächennahen Werkstoff. Die hier entstehenden, mikroskopischen Sekundärspäne werden hinter der Schneide, beim Rückfedern des anstehenden Gesteins, aus der entstandenen, fein geschuppten Oberfläche heraus geschleudert. Abb. 6.8 soll diese Abläufe verdeutlichen. Für den beschriebenen sekundären Trennvorgang wird Raum benötigt, der nur von einem ausreichend großen Freiwinkel geboten werden kann.

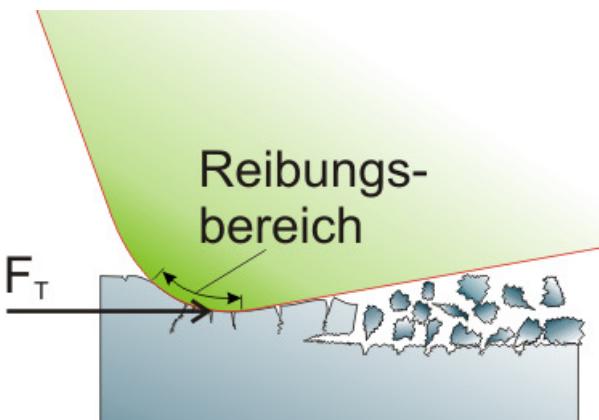


Abb. 6.8: Entstehung der Scherspäne (sekundäre Spanbildung)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sowohl das Phänomen der Sekundärspanbildung als auch das einfache Rückfedern auftritt. Deshalb muss ein Mindestfreiwinkel eingehalten werden, der dem hinter der Schneide herausreißenden Material ausreichend Platz zum Abtransport bietet bzw. die Kontaktlänge zwischen Freifläche und rückfederndem Werkstoff begrenzt. Auch deutlich oberhalb dieses Mindestwertes macht sich jede Verringerung des Freiwinkels durch einen Anstieg der Vorschubkraft bemerkbar, da beide Mechanismen auch in den Randbereichen der Schneide auftreten. Dort sind die Spanungsdicken und auch die Freiwinkelwerte aufgrund der runden Form der Spanfläche geringer als im mittleren Schneidenbereich.

6.1.3.2 Verringerung der Schnittkraft

Der zweite, deutlich größere Effekt der Keilwinkelvergrößerung ist das Abfallen der Schnittkraft. Hier kommt die erhöhte mechanische Stabilität des Schneidkeils zum Tragen. Die Abstützung der Diamantkörner direkt an der Schneidkante wird durch die Erhöhung des Keilwinkels verbessert. Als Nachweis wurde der Schneidkantenradius von Schneiden mit 88°- und 100°-Keilwinkeln vor und nach der Zerspanung von 15 cm³ Aalfanger Granit gemessen. Die Bearbeitungsparameter betrugen: 50 m/min Schnittgeschwindigkeit, 50 µm Zustellung und -25° Spanwinkel. Zudem kamen der feinkörnigste PKD – Schneidstoff (Korngröße: 0,5 -1 µm) und Luftspülung zum Einsatz. Die Ergebnisse wurden gemittelt und in Abb. 6.9 zusammengefasst.

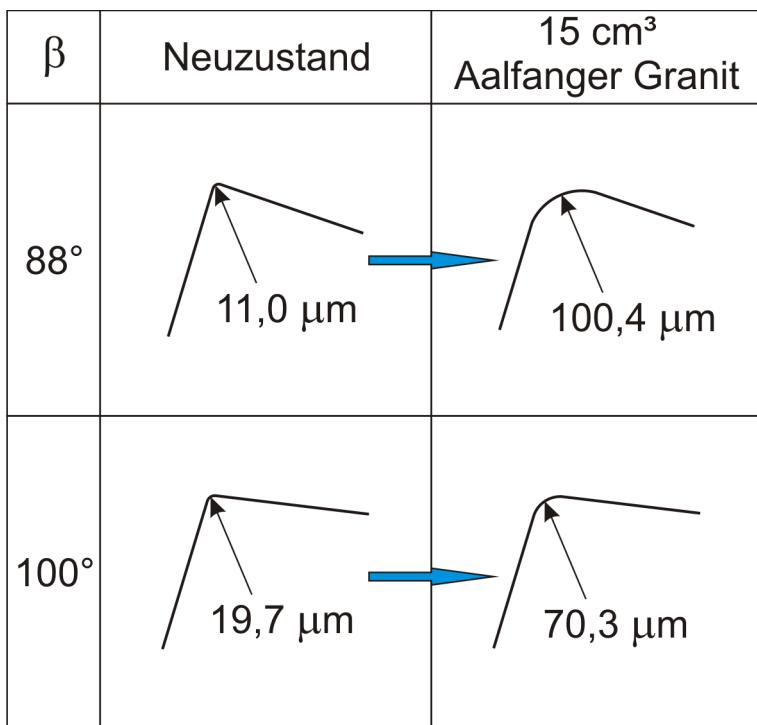


Abb. 6.9: Einfluss des Schnittvolumens auf den Schneidkantenradius unter Variation des Keilwinkels

Bei beiden Keilwinkelvariationen ist eine deutliche Verrundung der Schneidkante durch die Gesteinszerspanung festzustellen. Im Neuzustand weisen die Schneiden mit einem Keilwinkel von 100° die größere Schneidkantenverrundung auf. Während jedoch der Radius der 88° – Schneiden durch die Gesteinsbearbeitung nahezu verzehnfacht wurde, stieg dieser Wert bei den Schneiden mit 100° – Keilwinkel lediglich um 250 %, sodass der kleinere Keilwinkel nach der Bearbeitung einen um 40 % höheren Schneidkantenradius aufwies.

Die schnellere Verrundung der Schneidkante bei kleinerem Keilwinkel hat einen Einfluss auf die sekundäre Spanbildung. Je größer der Radius der Schneide, desto mehr Material wird unter die Schneide gezwängt und desto größer ist die Kontaktfläche zwischen Werkstoff und Werkstück in der Reibung stattfindet. Bei einer scharfen Schneide ist der Anteil der Sekundärspanbildung geringer, da der gerade Teil der Spanfläche größer ist und somit die Mechanismen vor der Schneide (primäre Spanbildung) mehr Material abtragen können. Abb. 6.10 soll diesen Zusammenhang verdeutlichen.

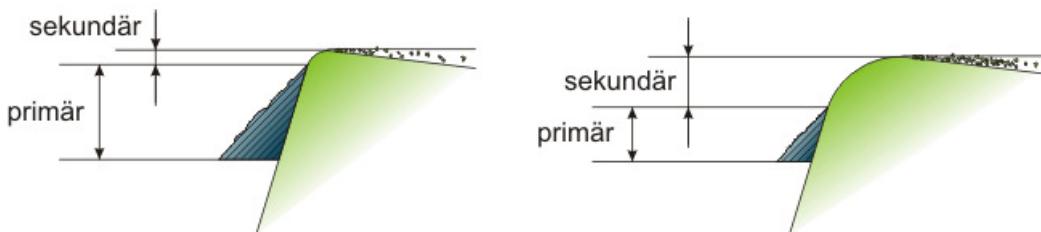


Abb. 6.10: Einfluss der Schneidkantenverrundung auf den Anteil von Primär- und Sekundärspanbildung am Materialabtrag

Die Reibung zwischen Schneide und Werkstoff wirkt vor allem der Schnittkraft entgegen. Erhöht sich also die Reibung aufgrund der Verrundung der Schneidkante, muss für das Fortschreiten des Werkzeugs im Werkstück eine höhere Schnittkraft aufgebracht werden. Des Weiteren begünstigt die größere Kontaktfläche den abrasiven Verschleiß und somit einen weiteren Anstieg des Schneidkantenradius. Der größere Anteil der Sekundärspanbildung erfordert auch ein größeres elastisch zu verformendes Werkstoffvolumen unter der Schneide. Dies bedeutet, dass durch eine Keilwinkelverringerung ein Anstieg der Vorschubkraft zu verzeichnen sein müsste. Dieser wird jedoch augenscheinlich vom größeren Effekt der gleichzeitigen Freiwinkelverringerung überlagert.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass der Keilwinkel die Formstabilität der Schneide beeinflusst, welche sich im Fortschritt der Schneidkantenverrundung widerspiegelt. Je größer der Schneidkantenradius, desto größer die erforderliche Zerspankraft, da der gleichzeitig wachsende Anteil der Sekundärzerspanung überaus reibungsbehaftet ist.

6.1.4 Schnittgeschwindigkeit und Kühl- bzw. Spülmedium

Alle Versuchsreihen zur Schnittgeschwindigkeit zeigten, dass 50 m/min ein sehr günstiger Betriebspunkt ist. Bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit stiegen die Kräfte und das Standvolumen sank. Auch unter Einsatz von Wasser als vermeintlichem Kühlmedium blieb diese Tendenz erhalten. Eine Verringerung der Schnittgeschwindigkeit konnte die Kraft- und Standmengenwerte ebenfalls nicht signifikant gegenüber denen von 50 m/min verbessern.

Die Anwendung von Wasser statt Luft als Schmier-, Spül- bzw. Kühlmedium führte zu einem deutlich flacheren Anstieg der Schnittkräfte und zu einer Vervielfachung der Standmenge. Die Vorschubkraft stieg ebenfalls langsamer an, erreichte aber zum Standzeitende den 1,5-fachen Wert der Schneidelemente mit Luftspülung.

Nun sollte dem Einfluss der Schnittgeschwindigkeit und des Wassers auf die Vorgänge an der Schneide nachgegangen werden. Erste Überlegungen tendierten zu Reibungs- und Wärmeeinflüssen. Denn bei den Versuchen mit Luftkühlung konnte ein mit der Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit einhergehender Temperaturanstieg visuell festgestellt werden. Durch die Messung der Temperatur über mehrere Eingriffe sollte geklärt werden, ob diese Werte annimmt, die für den Schneidstoff PKD kritisch sein kann. Als kritisch sind dabei folgende Temperaturen anzusehen, die der Literatur entnommen wurden: Zum einen erfolgt bei einer Temperatur von 420 °C eine Gitterumklappung im Binder Kobalt, wodurch das PKD – Gefüge geschädigt werden kann. Zum anderen ist Diamant ab 500 °C nicht mehr chemisch inert und beginnt bei 600 – 700 °C zu oxidieren und/oder zu grafitisieren.

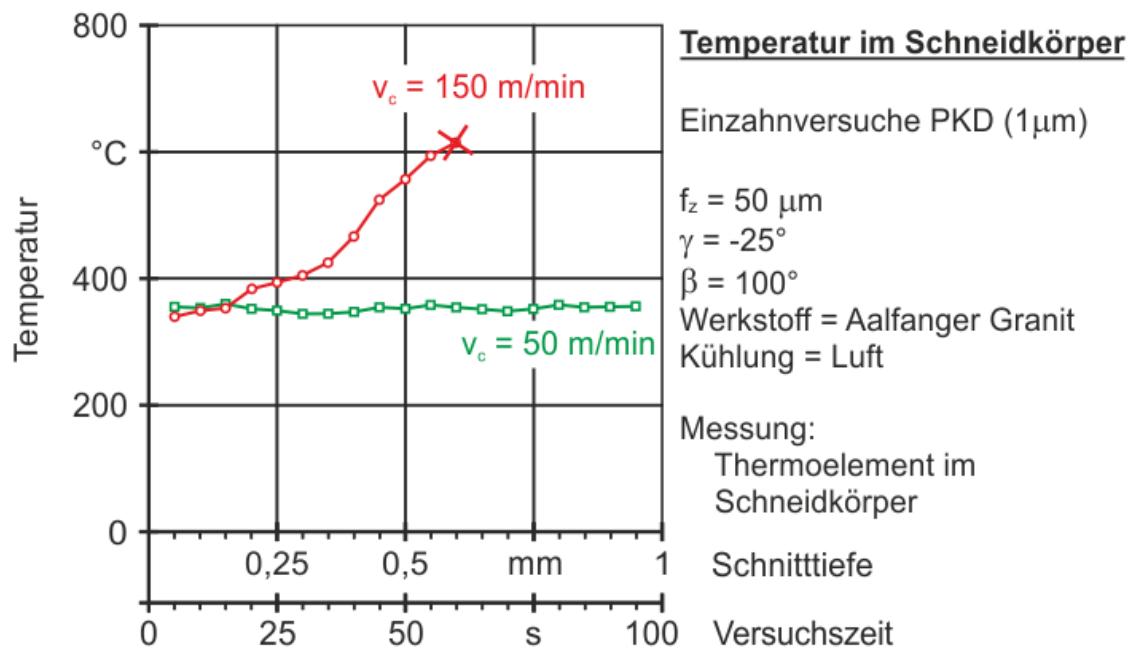


Abb. 6.11: Einfluss Schnitttiefe und der Versuchszeit auf die maximale Temperatur des Schneidkörpers im Eingriff (500 mm Eingriffslänge, 3 mm Schnittkanalbreite, Versuchsbeginn bei 2 mm Schnittfugentiefe)

Zur Erfassung der Temperaturen wurden Thermoelemente durch die Rückseite der Schneidelemente bis zur PKD – Schicht eingelassen. Das Ergebnis ist in Abb. 6.11 dargestellt: Während die Temperatur im Schneidelement bei einer Schnittgeschwindigkeit von 50 m/min während jedes Eingriffs auf ca. 350 °C steigt, wächst diese bei 150 m/min von Eingriff zu Eingriff auf über 600 °C an. Zwischen den Eingriffen erfolgte eine Abkühlung durch die eingesetzte Luft, sodass die aufgezeichneten Kurven Minima und Maxima aufwiesen. Abb. 6.11 zeigt den Verlauf der Maxima. Die Minimalwerte zeigen ein ähnliches Verhalten: Bei 50 m/min bleiben sie konstant bei ca. 20 °C, bei 150 m/min steigen sie auf über 30 °C an. Der Anstieg der Temperaturen bei einer Schnittgeschwindigkeit von 150 m/min führte zu einem vorzeitigen Versagen des Schneidkörpers. Die PKD – Schicht zerbröckelte und das Schneidelement zerbrach. Ursache ist das Überschreiten der oben genannten, kritischen Temperaturen.

Erwartungsgemäß steigt also die Temperaturbelastung des Schneidelements mit der Schnittgeschwindigkeit an. Da PKD nur bedingt temperaturbeständig ist, führt dieser Zusammenhang zwangsläufig zu einer Begrenzung der Schnittgeschwindigkeit. Mangels einer geeignet abgedichteten Apparatur, war es nicht möglich die entsprechenden Temperaturwerte beim Einsatz von Wasser zu ermitteln. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen zeigen allerdings, dass die festgestellte Korrelation zwischen Temperatur und Schnittgeschwindigkeit weiterhin besteht und lediglich die absoluten Werte der Temperatur reduziert sind. Zur Klärung der Wirkung des Wassers hätte diese Messung ohnehin nur einen geringen Beitrag leisten können, da

durch diese Untersuchung lediglich der Wert der Temperaturreduzierung festgestellt worden wäre. Ob das Wasser tatsächlich nur kühlt, wie ursprünglich vermutet, soll die nachfolgende Diskussion klären:

Denn die subjektive Beurteilung der Geräusche bei den Versuchen mit Wasserspülung, führte zu der Aussage, dass das Wasser die Stoßbelastung der Schneide im Eingriff mindert. Ein Vergleich der Bearbeitungskräfte zwischen Trocken- und Nassbearbeitung bestätigt den Verdacht: Die mittlere Streuung der Schnittkraft wird durch den Einsatz des Wassers um 30% verringert, gleichzeitig bleibt die Streuung der Vorschubkraft nahezu unverändert. In Analogie zur Berechnung der Reibungskraft

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (6.1)$$

entspricht dies einer Veränderung der Reibungsbedingungen zwischen Schneid- und Werkstoff. In diesem Fall würde die Vorschubkraft der Normalkraft und die Schnittkraft der Reibungskraft gleichkommen. Unter der Annahme der Gültigkeit der Gleichung 6.1 für die vorliegenden Bedingungen ergibt sich für die trockene Bearbeitung eine Gleitreibungszahl von 0,4, während der Wert dieses Kräfteverhältnisses beim Wassereinsatz 0,25 lautet (verwendete Kraftwerte aus Versuchsreihe in Abschnitt 5.2.7). Dieser Unterschied spricht folglich für eine deutliche Verringerung der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstoff durch die Verwendung des Wassers.

Eine Verringerung der Reibung bedeutet im Allgemeinen auch eine geringere Wärmeentwicklung. Somit ist die geringere Temperaturbelastung bei der Nassbearbeitung weniger eine Folge des höheren Wärmeabtransports durch das Medium Wasser, als vielmehr eine Reduzierung der Wärmeentstehung.

Es ergibt sich folgende Kausalkette: Die Schneide belastet den Werkstoff mit Druck. Wird die Druckfestigkeit des Werkstoffs lokal überschritten, erfolgt der Materialabtrag. Bei der Druckeinleitung bewegt sich die Schneide relativ zum Werkstück. Vor allem bei der Stauchung des Materials zur Sekundärspanbildung entstehen Reibungswärme und eine schwelende Beanspruchung des Schneidkörpers, durch das ineinanderhaken und Abgleiten der Unebenheiten auf der Werkstoff- und der Schneidstoffoberfläche. Wird der Bearbeitungsstelle ausreichend Wasser zugeführt, bildet sich zwischen den beiden Reibpartnern ein Wasserfilm.

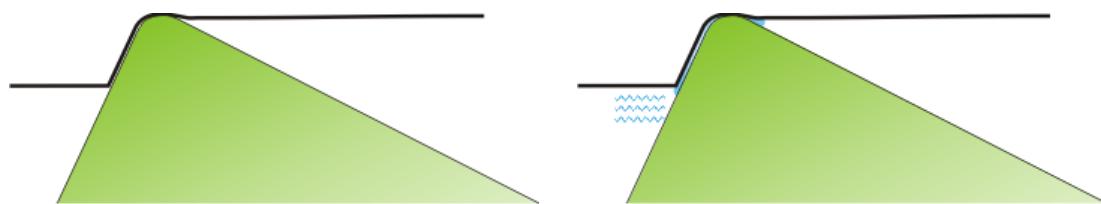


Abb. 6.12: Trocken und mit Wasserfilm

Aufgrund der Inkompressibilität des Mediums Wasser wird die Druckeinleitung in den Werkstoff kaum beeinflusst. Allerdings ändern sich die parallel ablaufenden Prozesse:

Der Flüssigkeitsfilm sorgt für ein leichteres Abgleiten des Werkzeugs auf dem Werkstück. Ein Teil der Unebenheiten der Schneidenoberfläche wird durch das Wasser am Einrasten in die Oberflächenrauheiten des Werkstoffs gehindert, da die Flüssigkeit aufgrund ihrer Trägheit nicht schnell genug aus den Oberflächenstrukturen verdrängt werden kann. Im Quervergleich zu hydrodynamischen Lagerungen befindet man sich hier im unteren Übergangsbereich, in dem bereits Mischreibung vorherrscht (d.h. es tritt schon Flüssigkeitsreibung auf, die Festkörperreibung ist jedoch noch vorherrschend).

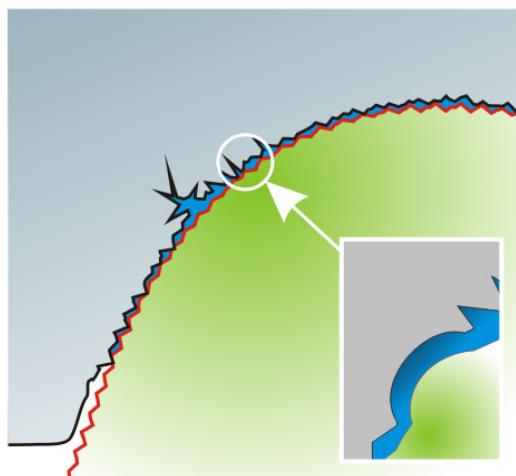


Abb. 6.13: Verhinderung der reinen Festkörperreibung durch den Einsatz von Wasser als Schmierstoff

Wasser ist somit ein Kühlenschmierstoff (KSS) im klassischen Sinn. Es verringert vorergründig die Entstehung von Reibungswärme und sorgt für die Spanabfuhr. Außerdem führt es einen Teil der entstandenen Wärme ab.

Zusammenfassend optimiert Wasser den Prozess des Materialabtrags deutlich: Die Einleitung der Druckbelastung in den Werkstoff wird durch den Wasserfilm zwischen Schneide und Werkstück nur geringfügig beeinflusst, während der verschleißende Einfluss der Störprozesse Reibung und Rattern maßgeblich reduziert wird. Schmieren und Spülen sind dabei die Hauptaufgaben des Mediums Wasser – Kühlen spielt eine untergeordnete Rolle. Deshalb wird Wasser ab dieser Stelle als Spül- und Schmiermedium bezeichnet.

6.1.5 Belastung der Lötstelle

Die Fügeverbindung zwischen Schneidelement und Werkzeughalter wird bei einer Spülung bzw. Schmierung mit Wasser geringer belastet, als beim Einsatz von Luft. Dieser Zusammenhang soll an dieser Stelle noch einmal diskutiert werden.

Die Auswertung der Kräfte aus der entsprechenden Untersuchung in Abschnitt 5.2.7 zeigt, dass die Vorschubkräfte bei einer Wasserschmierung zwar langsamer ansteigen aber deutlich höhere Maximalwerte erreichen. Gleichzeitig werden die Schnittkräf-

te durch den Einsatz des Wassers halbiert. Da die Standmengen vervielfacht werden, scheint die Schnittkraft einen größeren Einfluss auf die Haltbarkeit der Fügeverbindung zu besitzen, als die Vorschubkraft. Betrachtet man die Belastungssituation am Schneidelement unter Beachtung des eingestellten Spanwinkels, ist dies eine logische Schlussfolgerung. Abb. 6.14 zeigt qualitativ die Beanspruchung der Fügestelle durch Schnitt- und Vorschubkraft.

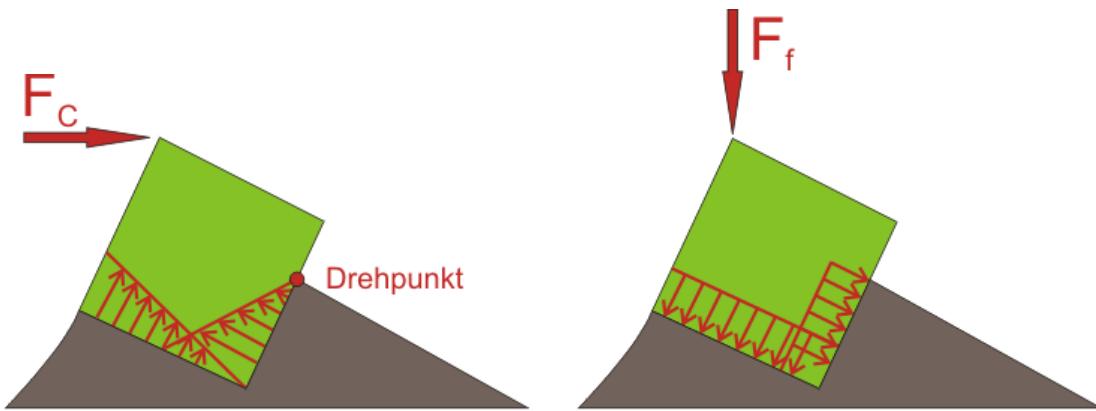


Abb. 6.14: Belastung der Fügestelle

Die Vorschubkraft belastet beide Fügeflächen des Schneidelementes mit Druck. Dagegen erzeugt die Schnittkraft aufgrund des negativen Spanwinkels eine Hebelwirkung um die obere Kante des Werkzeughaltes. Diese hat wiederum eine Zugbeanspruchung der beiden Fügeflächen zur Folge. Da Zug im Allgemeinen schlechter ertragen wird als Druck, bestimmt somit die Höhe der Schnittkraft die Haltbarkeit der Fügeverbindung. Aber: Sowohl Schnitt- als auch Vorschubkraft sind im Eingriff teilweise starken Schwankungen unterlegen, sodass sich, je nach Bearbeitungssituation, wechselnde oder schwellende Belastungen mit hohen Amplituden einstellen können. Diese beanspruchen die Fügeverbindung stärker als die reine Zugbelastung. Die Berechnung eines günstigen Schnitt- / Vorschubkraftverhältnis, dessen Existenz Abb. 6.14 evtl. suggeriert, macht daher wenig Sinn.

6.1.6 Werkstoff

Die Auswertung der Versuchsreihen hinsichtlich der Unterschiede zwischen den verwendeten Werkstoffen zeigte, dass sowohl der Wechsel der Gesteinsklassen (Granit, Sandstein, Marmor), als auch der der Granitsorten (Aalfanger und schwarzer Granit) Auswirkungen auf den Verschleiß der betrachteten Schneiden hatte. Auf der Suche nach den Ursachen, wurde bereits in Kapitel 4.5.3 festgestellt, dass die mechanischen Eigenschaften der Gesteine nur begrenzt zur Klassifizierung geeignet sind. Nur die Druckfestigkeit eignet sich zur Unterscheidung zwischen den Gesteinsklassen: Sandstein und Marmor haben gegenüber den Graniten einen geringen Widerstand gegen Druckbelastungen. Da die Spanbildung auf Druckbeanspruchung basiert, lassen sich diese beiden Gesteine folglich leichter bearbeiten als Granit. Der Verschleiß der

Schneiden basiert hier auf Abrasion, d.h. einzelne harte Partikel im Werkstoff tragen Stück für Stück den Binder des Schneidstoffs ab und lösen so Diamanten aus dem Verbund. Weil die bei den weichen Gesteinen wirkenden Kräfte sehr gering sind, dauert dieser Prozess erheblich länger als bei der Bearbeitung von Granit. Dort sind zwar die Mechanismen grundsätzlich die gleichen, aufgrund der höheren erforderlichen Druckbelastung und der härteren Minerale läuft die Abrasion jedoch wesentlich aggressiver ab. Außerdem verursachen die meist grobkörnigeren Granite Stoßbelastungen, die neben der Abrasion des Binders auch Schädigungen (Absplitterungen, Ausbrüche) am Diamant bewirken können.

Des Weiteren beanspruchen die beiden Granite die Schneiden unterschiedlich. Es liegt jedoch keine Korrelation mit der Druckfestigkeit vor: Obwohl Aalfanger Granit die niedrigere Druckfestigkeit besitzt, verschleißt die Schneiden bei dessen Bearbeitung schneller. Zudem wurde in Kapitel 4.5.3 erläutert, dass auch die Mittelwerte der Bearbeitungskräfte keine Unterscheidung zwischen Aalfanger und schwarzem Granit ermöglichen. Einzig die Streuung der Kraftwerte während eines Eingriffs zeigte einen Unterschied zwischen beiden Gesteinen, der augenscheinlich mit der Schneidenbeanspruchung zusammenhängt. Dies deutet stark auf den mineralischen Aufbau der Granite, als Ursache für die unterschiedliche Beanspruchung der Schneiden. Auch ohne Mineralanalyse der beiden Granite lässt sich also folgende Aussage formulieren: Ein Granit, der aus gleichmäßig harten Mineralen besteht, beansprucht eine Schneide weniger, als ein Granit, der neben harten Mineralen auch aus deutlich weicheren aufgebaut ist. Eine schwellende Belastung schädigt das Werkzeug somit mehr, als eine konstant hohe.

Fazit ist, dass die verschiedenen Gesteine die Schneiden unterschiedlich belasten. Der Hauptverschleißmechanismus ist die Abrasion des Binders im PKD und das damit einhergehende Lösen bzw. Herausreißen einzelner Diamantkörner. Bei den Weichgesteinen laufen diese Vorgänge deutlich langsamer ab, als bei Granit. Granite unterscheiden sich zudem stark in ihrer Bearbeitbarkeit. Hier spielt die mineralische Zusammensetzung eine Rolle.

6.1.7 Zustellung

Die Zustellung wurde bei fast allen Versuchsreihen der Werkzeugentwicklung auf den drei Stufen 30, 50 und 70 μm variiert. Innerhalb dieses Bereichs hatte die Änderung der Zustellung meist nur eine geringfügige Auswirkung auf die absoluten Bearbeitungskräfte.

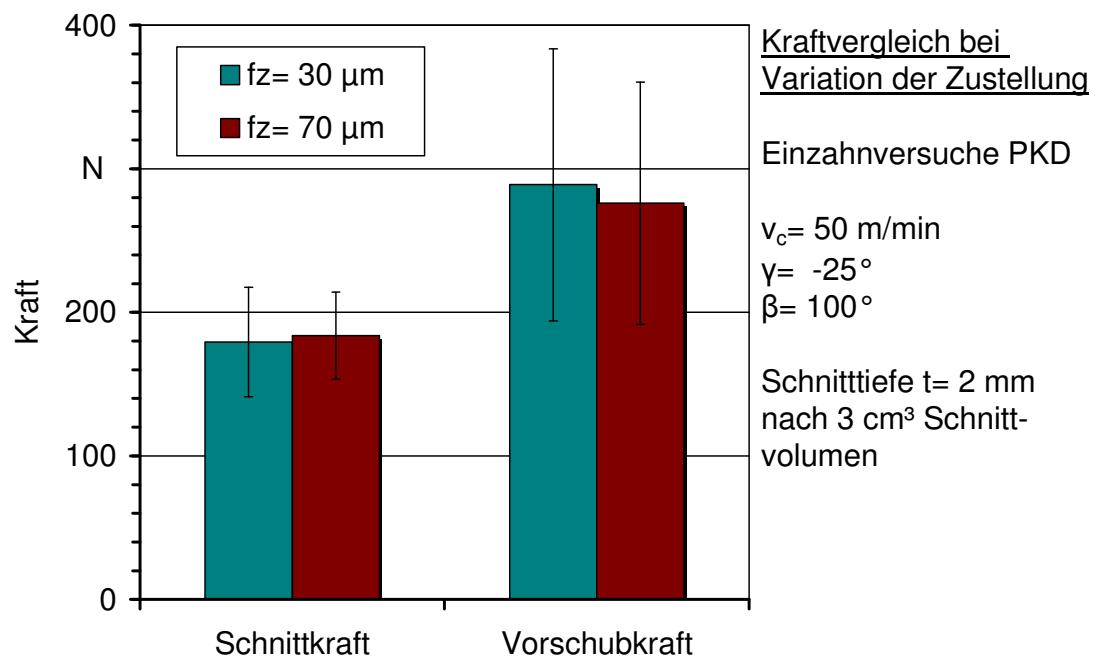


Abb. 6.15: Vergleich der absoluten Zerspankraftkomponenten bei 30 und 70 μm Zustellung

Da jedoch mit der Zustellung auch die Größe des belasteten Teils der Spanfläche sinkt, erwiesen sich die spezifischen Bearbeitungskräfte bei der kleinsten Zustellung als deutlich am höchsten. Zusätzlich werden bei einer geringen Zustellung mehr Eingriffe für das gleiche Zerspanvolumen benötigt als bei größeren Zustellungswerten.

Eine Schneide muss also bei einer kleinen Zustellung mehr Schläge auf eine kleinere Fläche ertragen, als bei einer größeren Zustellung. Vorausgesetzt die Schlagbelastung erfolgt mit annähernd der gleichen Kraft, wird die Schneide große Zustellungen immer besser verkraften. Die annähernde Kraftausgeglichenheit liegt jedoch nur in einem begrenzten Zustellungsbereich vor.

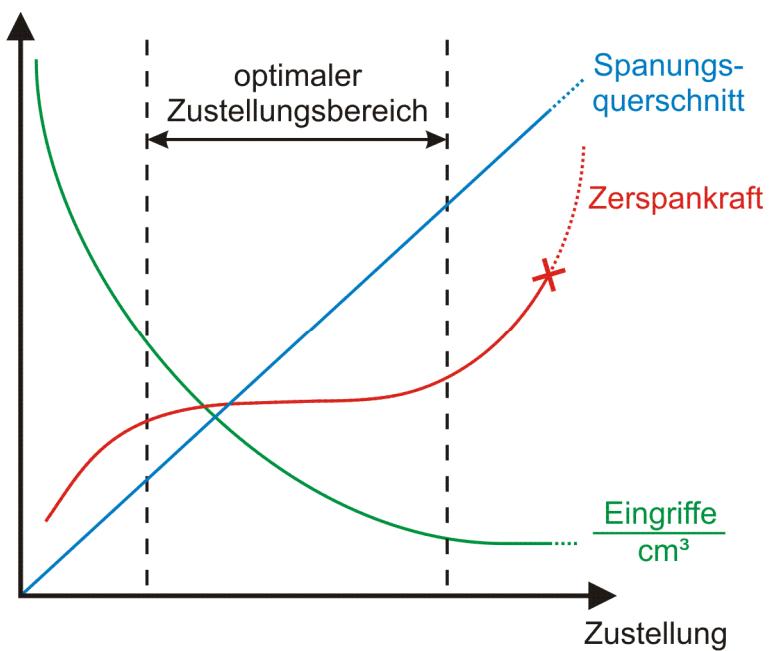


Abb. 6.16: Einfluss der Zustellung auf die absolute Zerspankraft, die pro Schnittvolumen nötige Eingriffszahl und den Spanungsquerschnitt (qualitative Darstellung)

Oberhalb dieses Zustellungsbereichs, erfordert das pro Eingriff zu zerspanende Materialvolumen eine große absolute Zerspankraft, sodass das Werkzeugsystem (Schneide, Fügestellen, Werkzeugkörper) diese Last nicht mehr ohne dauerhaften Schaden erträgt. Abb. 6.16 verdeutlicht diese Zusammenhänge qualitativ. Der, im Hinblick auf Verschleiß und Standmenge optimale Zustellungsbereich wird nach unten durch eine zu hohe Eingriffszahl pro Schnittvolumen und nach oben durch zu hohe absolute Zerspankräfte begrenzt. Ein scheinbar zwischen 30 und 70 μm Zustellung vorhandener Sattelpunkt der absoluten Zerspankraft begünstigt die Ausbildung dieses Optimalbereichs.

6.2 Theorie zur Spanbildung

Das Ergebnis des aktuellen Kapitels soll eine Theorie über die Vorgänge an der Schneide bei der Bearbeitung von mineralischen Werkstoffen, speziell Naturstein, sein. Die durchgeführten Untersuchungen und Diskussionen lassen sich zu folgendem Ergebnis zusammenfassen:

Eine geometrisch bestimmte Schneide aus dem Schneidstoff PKD trifft auf den Werkstoff Naturstein. Der wichtigste Vorteil des Schneidstoffs gegenüber dem Werkstoff ist seine höhere Druckfestigkeit. Durch negative Spanwinkel werden diese Eigenschaften zur Spanbildung genutzt, d.h. die Schneide belastet den Werkstoff so stark mit Druck, dass dessen Druckfestigkeit überschritten wird, während die Schneide diese Bean-

spruchung noch erträgt. Da Gesteine auf Druck zuerst elastisch reagieren, sind drei Vorgänge zu unterscheiden:

- Bei einer sehr kleinen Zustellung der Schneide (bei der verwendeten, runden Schneidenform ist dies immer im Randbereich gegeben) reagiert das Gestein größtenteils elastisch auf die Belastung. Das heißt, der Werkstoff wird durch die Schneide gestaucht und federt direkt danach schadlos wieder aus. Dieser Vorgang wird elastisches Rückfedern genannt.
- Wird das Gestein stark elastisch verformt, erzeugt die Reibung zwischen Schneide und Werkstoff eine Scherbelastung des oberflächennahen Materials, in deren Folge Risse entstehen. Bei der Rückfederbewegung nach der Schneide entsteht eine Zugbeanspruchung, die die Belastbarkeit des vorgesägten Werkstoffs übersteigt. Das Material reißt aus. Dieser Prozess wird als Sekundärspanbildung bezeichnet.
- Die primäre Spanbildung erfolgt, bei ausreichender Zustellung, vor der Schneide. Der Werkstoff kann der Schneide nicht mehr elastisch ausweichen und wird deshalb durch die Spanfläche mit einer Druckkraft F_D beaufschlagt. Der Druck erzeugt Scherspannungen in und zwischen den Mineralkristallen, aus denen das Gestein aufgebaut ist. Diese Scherspannungen wirken materialtrennend. Je nach Größe der Kontaktfläche zwischen Spanfläche und Werkstoff bildet sich ein großer Bruchspan oder es werden kleine Volumina zerdrückt.

Während diese drei Vorgänge im Anschnitt, mit steigender Zustellung recht klar unterschieden werden können, überlagern sie sich im vollen Eingriff. Vor allem das Erscheinungsbild der Sekundärspanbildung wird dadurch verändert: Während im Anschnitt relativ große Schollen ausbrechen, sind die im Volleingriff erzeugten Bruchstücke und Oberflächenstrukturen deutlich kleiner, da die vorangegangene primäre Spanbildung das Material durch Risseinleitung vorgeschädigt hat.

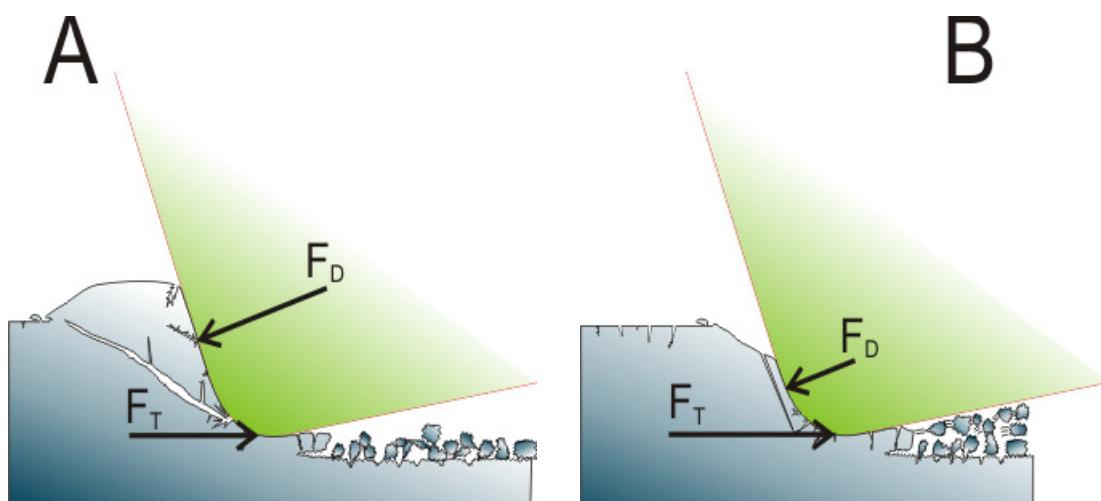


Abb. 6.17: zwei Phasen der Spanbildung

In Abb. 6.17 sind nun die beiden Phasen der Spanbildung im vollen Eingriff dargestellt. Diese Darstellung wurde anhand der recherchierten Theorien in Abschnitt 2.3 und der durchgeführten Untersuchungen im aktuellen Kapitel entwickelt.

In der ersten Phase (A) liegt ein großflächiger Kontakt zwischen Spanfläche und Werkstoff vor. Der Stein bietet einen großen Widerstand für das Werkzeug, sodass die erzwungene Relativbewegung zur elastischen Verformung der beiden Kollisionspartner führt. Es baut sich eine potentielle Energie auf, die in dem Moment frei wird, indem die Druckfestigkeit des Werkstoffs überschritten ist. Es bildet sich ein großer Bruchspan, der eine schräg ansteigende Bruchfläche vor der Schneide hinterlässt. Das Werkzeug läuft in der Ausfederbewegung gegen diese Schräge. Durch die frei werdende potentielle Energie und die kleine Kontaktfläche wird das Material der Schräge in kleinen Schritten zertrümmert (zweite Phase B). Bei der Bearbeitung der vorliegenden schrägen Bruchfläche steigt die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstoff wieder an, bis diese erneut groß genug ist, um das Werkzeug zu blockieren und elastisch zu verformen. Somit liegt wieder Phase A vor und der Zyklus beginnt von neuem.

Gleichzeitig zum beschriebenen Wechsel der Phasen A und B der Primärspanbildung, läuft an der Werkzeugspitze die sekundäre Spanbildung ab. Aufgrund der mehr oder weniger runden Schneidkante wird das verbleibende Material unter den Schneidkörper gequetscht. Die Reibung zwischen Schneide und Werkstoff schädigt das oberflächennahe Material, da sie eine Scherbelastung bewirkt. Im Freiwinkel federt dieses vorgeschädigte Material dann sprunghaft zurück und erfährt so kritische Zugbeanspruchungen. Auch auf diesen Vorgang wirkt sich der Wechsel der Phasen A und B aus: Da bei A die Bewegung der Schneide nahezu blockiert ist, findet nur geringe Reibung im Kontaktbereich Werkzeug – Werkstoff (kleine Tangentialkraft) und kaum Materialfreigabe hinter der Schneide statt. Durch die hohe Druckbelastung, kurz bevor der große Span entsteht, werden Scherrisse im Material erzeugt. Diese verursachen später die Bildung kleiner Sekundärspäne.

Zu Beginn der zweiten Phase bewegt sich das Werkzeug weiter. Der Anfang der schrägen Bruchfläche wird sofort zertrümmert. Da in dieser Situation eine große Energie für ein kleines Volumen zur Verfügung steht, kann die Zerstörung des Werkstoffs auch in tiefere Schichten reichen, sodass hier Vertiefungen entstehen, die anschließend die Sekundärspanbildung unterbrechen. Je weiter das Werkzeug in die Schräge fortschreitet, desto unwahrscheinlicher wird das Entstehen dieser Vertiefungen, da die zu zerstörenden Volumina ansteigen. Stattdessen wird eine Bruchfläche erzeugt, die durch die Rundung der Schneidkante unter das Werkzeug geleitet und dabei gestaucht wird. Da die Bruchfläche durch die vorangegangene primäre Spanbildung mit Rissen geschädigt ist, bilden sich bei der sekundärspanbildenden Scherung und dem anschließenden Rückfedern hinter der Schneide viele kleine Bruchstücke und eine entsprechend fein geschuppte Oberflächenstruktur. Unterbrochen wird diese Struktur

durch die Vertiefungen, die von den großen Ausbrüchen der Primärspanbildung stammen. Die Materialtrennung erfolgt bei der Sekundärspanbildung vor allem durch die Scherwirkung der Tangentialkraft F_T , die aufgrund der Reibung zwischen Schneide und Werkstück entsteht. Hinter der Schneide wird das geschädigte Material durch das rückfedernde anstehende Gestein mit Zugbeanspruchungen beaufschlagt, die es von der erzeugten Bruchfläche lösen.

Die Verschleißmechanismen der Schneiden treten dabei hauptsächlich bei der Sekundärspanbildung auf. Harte Partikel des Werkstoffs befinden sich auf der Bruchfläche, die durch die Schneide gestaucht wird. Durch die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstoff schaben diese Partikel mit einer Anpresskraft über die Schneidkante und reißen Teile des Binders aus dem PKD – Verbund. Je nach Gesteinsart variiert die Anpresskraft sowie die Härte und Größe der Partikel. Daher werden die Diamanten des PKD bei weicheren Gesteinen langsam freigelegt, bis die Einbindung nicht mehr ausreicht, um das Diamantkorn zu stützen bzw. vor Zugbelastungen zu schützen. Bei härteren Gesteinen laufen diese Vorgänge deutlich schneller ab, da die höheren Kräfte sowohl den Abtrag des Binders beschleunigen, als auch das Herausreißen der Diamanten erleichtern. Unabhängig vom Gestein wird ein Effekt des Verhältnisses zwischen der Größe der abrasiv wirkenden Gesteinspartikel und der Diamantkorngröße im Schneidstoff auf den abrasiven Verschleiß vermutet. Entscheidend ist, ob die abrasiven Partikel klein genug sind, um die Bindefase auch tief aus dem PKD – Gefüge abzutragen.

Zusätzlich zum abrasiven Verschleiß wird die Schneide bei grobkörnigen Gesteinen durch eine Stoßbeanspruchung belastet. Diese resultiert aus den größeren Ausbrüchen bei der Primärspanbildung, die eine unstetige Sekundärspanbildung bewirken. Durch diese diskontinuierliche Schlagbeanspruchung können im PKD – Verbund Risse entstehen und Diamantpartikel absplittern.

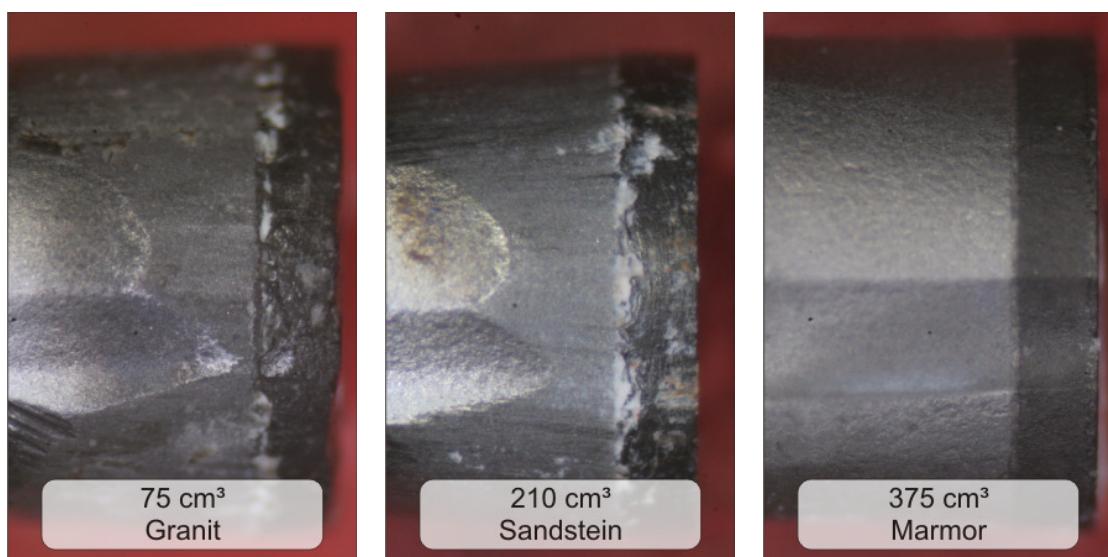


Abb. 6.18: Verschleiß durch verschiedene Gesteine

Wasser beeinflusst das Verschleißverhalten der Schneiden positiv. Es wirkt vor allem als Schmier- und Spülmittel. Bei der Stauchung der Bruchfläche durch die Schneide bildet das Wasser einen Film, der teilweise das ineinanderhaken von Unebenheiten verhindert, sodass die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstoff verringert wird und Belastungen durch Rattern reduziert werden. Auch die abrasive Wirkung der harten Werkstoffpartikel wird durch den Wasserfilm vermindert. Außerhalb der Bearbeitungsstelle wird das zerspannte Gestein vom Wasser abtransportiert.

Die Gesteinszerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide basiert also auf einer gezielten Druckbelastung des Werkstoffs. Der Druck bewirkt zwei verschiedene Zerstörungsmechanismen. Zum einen wird direkt die Druckfestigkeit des Gesteins überschritten und dadurch das Material zerstört (Primärspanbildung). Zum anderen reagiert der Werkstoff elastisch auf die Druckbelastung, unterliegt dabei aber einer starken Scherung und erfährt dann beim Zurückfedern kritische Zugbeanspruchungen, die zum Abreißen der betreffenden Werkstoffpartie führt (Sekundärspanbildung). Die größere verschleißende Wirkung auf das Werkzeug hat die sekundäre Spanbildung, da ihr der, mit starker Reibung behaftete Prozess der elastischen Druckbeanspruchung voran geht. Der Einsatz von Wasser verringert dabei die Reibungsbelastung.

7 Zusammenfassung

Das Trennen mineralischer Werkstoffe mit geometrisch bestimmter Schneide hat für viele Bereiche der Bauwirtschaft und der Natursteinbranche ein großes Potential zur Kostenreduktion. Schnittleistungserhöhung, Steigerung der Materialeffizienz und Senken des Energieverbrauchs sind die wesentlichen Vorteile eines Übergangs von geometrisch unbestimmten auf bestimmte Schneiden an den verwendeten Werkzeugen. Da die Schneidstoffentwicklung erst in den letzten Jahren Produkte hervorbrachte, die für diese Anwendung geeignet sind, ist die Zahl der Veröffentlichungen über geometrisch bestimmte Schneiden für mineralische Werkstoffe sehr gering. Experimentell ausgerichtete Arbeiten waren bislang nicht zu finden. Das Ziel dieser Arbeit lautete deshalb, einen Grundstein für das Thema des geometrisch bestimmten Trennens von mineralischen Werkstoffen zu legen.

Den Ausgangspunkt bildete die Überlegung, dass die Untersuchungen anwendungsneutral durchzuführen sind. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Ergebnisse dieser Arbeit als Grundlage für die Entwicklung unterschiedlicher Werkzeugtypen nutzbar sein können. Deshalb wurde ein Versuchsstand errichtet, auf dem einzelne Schneiden in einer linearen Schnittbewegung erprobt und beurteilt werden konnten. Diese Schnittbewegung ist auf einen Großteil der Werkzeuge der Natursteinbranche übertragbar.

Die Vorgehensweise teilte sich in zwei Hauptbereiche: Im Ersten Teil erfolgte eine Werkzeugentwicklung, deren Ergebnisse die Grundlage für die anschließende Diskussion und Betrachtung der Vorgänge an der Schneide bildeten.

Bei der Werkzeugentwicklung wurde weiterhin großer Wert auf die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse gelegt. Die grundlegenden Einstellgrößen des Spanens mit geometrisch bestimmter Schneide wurden innerhalb der realisierbaren Grenzen variiert, um vorläufige Optimalwerte sowie Tendenzen und Korrelationen zu benennen. Ausgangspunkt war die Festlegung von PKD als zu verwendenden Schneidstoff, da er im Gegensatz zu monokristallinen Diamanten in nahezu beliebige Schneidengeometrien gebracht werden konnte und im Gegensatz zu CVD etablierter und deshalb erheblich kostengünstiger war. Erste Versuchsreihen, welche verschiedene PKD – Sorten miteinander verglichen, ergaben einen Vorteil der feinkörnigen Varianten. Die Form des Schneidelements entwickelte sich über einen halben Zylinder zu einer komplexen Geometrie, die am höchsten Punkt der halbrunden Spanfläche einen Keilwinkel von 100° aufweist, der zu den Schneidenseiten hin auf 88° reduziert wird. Das Spanwinkeloptimum liegt zwischen -20 und -25° , wobei eine Wechselwirkung mit der Zustellung existiert. Diese ist mit $70 \mu\text{m}$ bei -20° Spanwinkel optimal; alternativ ergab sich die Kombination $50 \mu\text{m}$ und -25° als günstig. Die Zustellung wurde bei nahezu allen Versuchs-

reihen, zusätzlich zum eigentlich untersuchten Einflussfaktor, auf den Werten 30, 50 und 70 μm variiert, da die alleinige Weiterführung des Optimalwerts 70 μm bereits eine Einschränkung der späteren Anwendbarkeit auf vielschneidigen Werkzeugtypen bedeutet hätte. Eine weitere Versuchsreihe beschäftigte sich mit der Kühlung der Werkzeuge. Dabei zeigte sich erwartungsgemäß ein deutlicher Vorteil des Wassers gegenüber Luft. Später konnte festgestellt werden, dass in diesem Fall weniger eine Kühl- als eine Schmierwirkung des Wassers vorlag. Im letzten Schritt wurde das Potential der bis dato entwickelten Schneiden auf anderen Werkstoffen erprobt. Bis zu diesem Punkt fand Entwicklung der Schneiden auf schwer bearbeitbaren Graniten statt, sodass eine Anwendung auf den beiden Weichgesteinen Sandstein und Marmor große Standmengen erwarten ließen. Diese konnten auch erreicht werden, jedoch mit unterschiedlichem Verschleißfortschritt. Während die Schneiden Marmor fast ohne jegliche Verschleißerscheinungen zerspanten, war bei Sandstein eine deutliche Abrasion des Schneidstoffs und des dahinter liegenden Trägers zu erkennen.

Mit dieser Versuchsreihe wurde das Kapitel „Werkzeugentwicklung“ abgeschlossen. Die entwickelte Schneidenform und die zugehörigen Betriebsparameter sollen einen Ausgangspunkt für die Entwicklung verschiedener Werkzeugtypen bilden. Die ermittelten Tendenzen und Zusammenhänge konnten im anschließenden Kapitel als Diskussionsgrundlage verwendet werden.

Im ersten Teil des Kapitels „Vorgänge an der Schneide“ wurden die Erkenntnisse aus „Werkzeugentwicklung“ erneut aufgegriffen und hierbei das Verhalten jeder Einflussgröße dahingehend diskutiert, welche Aussagen sich für die Vorgänge bei der Zerspanung formulieren lassen. Um Vermutungen zu belegen oder mehrdeutige Effekte klären zu können, wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt. So konnten beispielsweise die Ergebnisse der Versuchsreihen zum Schneidstoff und zusätzliche rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Schneidkanten unterschiedlicher Schneidstoffe zur Erklärung der Verschleißmechanismen genutzt werden. Mittels Temperaturmessungen wurde der Verdacht hinsichtlich des Einflusses der höheren Schnittgeschwindigkeit bestätigt. Anhand von Anschnittversuchen auf Glasplatten wurden verschiedene recherchierte Theorien zur Spanbildung im Gestein überprüft. Teilweise genügte auch eine freigestellte Darstellung der geometrischen Verhältnisse zwischen Schneide und Werkstoff, um Begründungen für aufgetretene Effekte abzuleiten.

Der zweite Teil des Kapitels wurde dann zur Formulierung einer Theorie über die Spanbildung und die Vorgänge an der Schneide bei der Gesteinszerspanung genutzt. Der grundlegende Gedanke war dabei, dass die Zerstörung des Werkstoffs auf der Druckbelastung durch das Werkzeug basiert. Es werden zwei prinzipielle Spanvorgänge unterschieden: Die primäre und die sekundäre Spanbildung. Die primäre Spanbildung findet in Schnittrichtung vor der Spanfläche statt und wird selbst in zwei Phasen unterteilt. Bei der Grobspanbildung löst sich durch die Druckbelastung des

Werkstoffs ein relativ großes Bruchstück, das eine schräg ansteigende Bruchfläche hinterlässt. Läuft das Werkzeug gegen diese Schrägen, beginnt die zweite Phase der primären Spanbildung. Die Schrägen wird in kleinen Schritten zertrümmert, da dann kleine Volumina einer großen Last gegenüberstehen. Der Wechsel dieser beiden Phasen hat Auswirkungen auf die sekundäre Spanbildung, die in Schnittrichtung hinter der Schneidkante stattfindet. Hier federt das durch den Druck der Schneide zuerst elastisch verformte und dann durch die Scherwirkung der Reibung zwischen Schneide und Werkstoff geschädigte Material zurück und verursacht so kritische Zugspannungen im Oberflächenbereich, wodurch Teile des Materials abreißen können. Die durch die beiden Phasen der primären Spanbildung eingebrachten Risse und Ausbrüche bestimmen das Erscheinungsbild der Sekundärspäne und der erzeugten Oberfläche.

Der Verschleiß der Schneidkante wird durch harte Werkstoffpartikel verursacht, die den Binderanteil des PKD – Schneidstoffs abtragen. Vor allem bei der stark reibungsbehafteten sekundären Spanbildung werden Teile des Binders gelöst und so der Verbund der Diamanten geschwächt. Wird das Medium Wasser eingesetzt, wird diese Abrasion verringert. Die Bearbeitungskräfte sinken und die Standmenge der Schneide steigt.

Allgemein ist die Sekundärspanbildung, als Hauptverschleißtreiber, ein Ansatzpunkt für nachfolgende Arbeiten. Der Anteil dieses Prozesses an der gesamten Spanbildung muss entweder reduziert oder dessen Auswirkungen eingeschränkt werden.

Die Reduzierung des Anteils könnte durch eine dauerhaft scharfe Schneidkante erreicht werden. Dabei bieten sich Schneidkantenarchitekturen, vor allem Fasen an, die eine Stabilisierung der Schneidkante ermöglichen. Ein weiterer Ansatzpunkt ist der Wechsel des Schneidstoffs. In den Grundlagen dieser Arbeit wurde bereits das Potential von CVD-Dickschicht – Diamant recherchiert. Dieser Schneidstoff verbindet die Vorteile von PKD mit den Vorzügen der Abwesenheit eines Binders. Es besteht jedoch auch die Gefahr, dass die fehlende Zähigkeit des Binders einen frühen Sprödbruch des Schneidstoffs fördert.

Eine Einschränkung der Auswirkungen der sekundären Spanbildung kann durch den Einsatz von Schmiermitteln erfolgen. Da sich bereits zeigte, dass Wasser in diesem Zusammenhang einen deutlichen Fortschritt bringt, wäre der Schritt zu Emulsionen oder sogar zu Ölen durchaus konsequent. Eine Reduzierung der Reibung bei gleichzeitig aufrechterhaltener Druckeinleitung bringt dem Prozess deutliche Vorteile.

Ein weiteres Feld für nachfolgende Arbeiten ist die Anpassung der entwickelten Schneiden für weichere Gesteine als die in dieser Arbeit hauptsächlich verwendeten Granite. Das Potenzial der Schneiden für diese Werkstoffe wurde bereits bewiesen.

Die entwickelten Schneiden und die formulierte Spanbildungstheorie bieten zahlreiche Ansätze für nachfolgende Arbeiten. Das Ziel der Grundsteinlegung für das Thema des geometrisch bestimmten Trennens mineralischer Werkstoffe wurde somit erfüllt.

8 Schrifttum

- /1/ Abele, E. et al. „Gussbearbeitung mit PKD“, in: *VDI-Z Integrierte Produktion* 151 (2009) 18-21.
- /2/ Anonym „Rorschacher Sandstein - Komplettbearbeitung mit Diamant“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 28 (1994), Heft 4, 207-209
- /3/ Barthelmä, F.; Lahmann, H.-W.; Stöckmann, M. „Qualitätsbewertung von galvanisch gebundenen Diamant-Schleifwerkzeugen mittels Bildverarbeitung“, in: *Industrie Diamanten Rundschau*. 37 (2003), Nr. 4, 302-307
- /4/ Benedix, R. *Bauchemie. Einführung in die Chemie für Bauingenieure*. 3. Auflage. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2006.
- /5/ Brook, B. „Principles of diamond tool technology for sawing rock“, in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39 (2002) 41–58.
- /6/ Bunger, S. Schriftreihe aus dem Institut für Rohleitungsbau Oldenburg. *Grundlagen der Horizontalbohrtechnik*. Band 13, 2. Auflage. Oldenburg: Vulkan Verlag, 2007.
- /7/ Büttner, A., Picker, M., „Naturstein-Bandsäge zum Trennen von Gestein“, in *Industrie Diamanten Rundschau*. 18 (1984), Heft 1, 24-28
- /8/ Buyuksagis, I.S. „Effect of cutting mode on the sawability of granites using segmented circular diamond sawblade“, in: *Journal of Materials Processing Technology* 183 (2007) 399–406.
- /9/ Carrino, L., Polini, W., Turchetta, S. “Wear progression of diamond mills” in *Diamond and related materials*. (2003), Heft 12, 728-732
- /10/ Chang, S., Choi, S., Bae, G., Jeon, S., “Performance prediction of TBM disc cutting on granitic rock by linear cutting test” in *Tunnelling and underground space technology*. (2006), Heft 21, 271
- /11/ Checkina, O, Goryacheva, I., Krasnik, V. “The model for tool wear in rock cutting” in *Wear* (1996), Heft 198, 33-38
- /12/ Clark, I. E., Sen, P. K. “Fortschritte bei der Entwicklung ultraharter Schneidstoffe“, in: *Industrie Diamanten Rundschau*. 32 (1998), Nr. 4, 274-284
- /13/ Clausen, R., Meding, M, „Untersuchungen zum Spanbildungssprozeß bei Gestein“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 28 (1994), Heft 4, 224-227

- /14/ Clausen, R., Meding, M. „Sensorgestützte Ermittlung des Diamantverschleißes beim Gattersägen von Gestein“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 29 (1995), Heft 1, 31-37
- /15/ Clausen, R., Stangenberg, J. „Untersuchungen zur Ermittlung der Zerspankraft beim Gattersägen“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 34 (2000) Heft 4, 348-352
- /16/ Clausen, R., Stangenberg, J. „Grundlagen zur Prozeßbeurteilung beim Gattersägen“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 32 (1998), Heft 4, 312-324
- /17/ Clausen, R., Stangenberg, J., „Gattersägen – Werkzeugbeurteilung an einer Modell-Maschine“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 31 (1997), Heft 4, 316-324
- /18/ Coe, S.E. et al. CVD-Diamant: Vorteile und Anwendungen“, in: *Industrie Diamanten Rundschau*. 38 (2004), Nr. 3, Seite 300 – 312
- /19/ Collin, G. „Diamanten – Zur Geschichte des technischen Kohlenstoffs (2)“, in: Erdöl-Erdgas-Kohle 116 (2000), Nr. 10, 513-516
- /20/ Collins, J. L. „CVD Diamant – ein aufstrebendes Material für ein neues Jahrtausend“, in: *Industrie Diamanten Rundschau*. 33 (1999), Nr. 3, Seite 234 – 239
- /21/ Cook, M. W. „Verschleißeigenschaften und Tribolanwendungen von PKD“, in: *Industrie Diamanten Rundschau*. 32 (1998), Nr. 4, 28-34
- /22/ Cools, P. M., “Temperature measurements upon the chisel surface during rock cutting” in *Int. journal of rock mech. min. sci. and geomech. Abstr.*. (1993), Heft 30, 25-35
- /23/ Dachroth, W. R. *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik*. 3. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2002.
- /24/ Denkena, B., Tönshoff, H. K., Friemuth, T., Gierse, A., Glatzel, T., Hillmann-Apmann, H., „Innovative Trennschleifprozesse in der Natursteinbearbeitung“, in *Werkstattstechnik online*. (2002), Heft 6, 290-296
- /25/ Denkena, B. et al. „Innovative Trennschleifprozesse in der Natursteinbearbeitung“, in: *Werkstattstechnik online* 92 (2002), Nr. 6, Seite 290 – 296
- /26/ Denkena, B., Tönshoff, H.K., Friemuth, T., Gierse, A., „Die Bandsäge als Werkzeug in der Natursteinindustrie“, in *Industrie Diamanten Rundschau*. 37 (2003), Heft 1, 33-39
- /27/ Dennis, P. „Einsatz von galvanisch belegten Diamant-Werkzeugen“, in: *Magazin Neue Werkstoffe* (1989), Nr. 4, 16-23
- /28/ DIN EN 12372. *Biegefestigkeit* Berlin. Deutsches Institut für Normung e.V.. Februar 2007

- /29/ DIN EN 1926. *Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit*. Berlin. Deutsches Institut für Normung e.V.. März 2007
- /30/ DIN ISO 857-2. *Schweißen und verwandte Prozesse* Berlin. Deutsches Institut für Normung e.V.. März 2007
- /31/ Ersoy, A., Atici, U. "Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks" in *Diamond and related materials*. (2004), Heft 13, 22-37
- /32/ Ersoy, A.; Buyuksagic, S.; Atici, U. „Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks“, in: *Wear* 258 (2005) 1422–1436.
- /33/ Filgueira, M., Pinatti, D., "In situ diamond wires: diameter determination of the external cutting rope" in *Refractory Metals and hard materials*. (2005), Heft 23, 85-90
- /34/ Geiger, W., Kotte, W. *Handbuch Qualität*. 5. Auflage. Wiesbaden. Vieweg Verlag, 2008
- /35/ Gerlach, D. „Bandsägen mit geführtem Band- eine Vision“, in *Industrie Diamanten Rundschau*. 39 (2005), Heft 2, 128-132
- /36/ Gleim, P. *Untersuchungen zum Bandsägen mit diamantbeschichteten Werkzeugen*. Dissertation. Kassel: kassel university press GmbH, 2006.
- /37/ Göktan, R. M. "Brittleness and micro-scale rock cutting of efficiency", in *Mining science and technology*. (1991), Heft 13, 237-241
- /38/ Goktan, R. M., Gunes, N. „A comparative study of Schmidt hammer testing procedures with reference to rock cutting machine performance prediction“ in *International journal of rock mechanics and mining sciences* (2005), Heft 42, 466-472
- /39/ Graf, U., Henning, H. J., Stange, K., Wilrich, P. T. *Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik* 3. Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer Verlag, 1987.
- /40/ Grüneis, H., Grüneis, T. „Sintern und Löten in Einem“, in: *Industrie Diamanten Rundschau*. 32 (1998), Nr. 1, 24-27
- /41/ Guo, H., Aziz, N., Schmidt, L. „Rock cutting study using liear elastic fracture mechanics“ in *Engineering fracture mechanics*. (1992), Heft 5, 771-778
- /42/ Härig, S., Klausen, D., Hoscheid, R. *Technologie der Baustoffe: Handbuch für Studium und Praxis*. 14. Auflage. Heidelberg: Müller Verlag, 2003.
- /43/ Harper, C. A. [Hrsg.]. *Handbook of ceramics, glasses, and diamonds*. New York. McGraw-Hill, 2001

- /44/ Henneke, M., Czichos, H. *Hütte – Das Ingenieurwissen*. 33. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2008.
- /45/ Heydt, F. "Bandsawing machines for stone cutting – state of the art", in *Mat.-wiss. U. Werkstofftech.* 36 (2005), Heft 8, 386-388
- /46/ Hoffmann, J. „Polykristalliner Diamant macht's möglich“, in: *Technische Rundschau*. 1990, Nr. 23, Seite 46 – 49
- /47/ Hogmark, S., Jacobson, S., Larsson, M. "Desing and evaluation of tribological coatings" in *Wear*. (2000), Heft 246, 20-33
- /48/ Holsten, S. *FEM unterstützte Parameterstudie des Innengewinde - Fertigungsverfahrens Gewindefurchen*. Dissertation. Kassel. Kassel university press. 2006
- /49/ Kaitkay, P., Lei, S. "Experimental study of rock cutting under external hydrostatic pressure", in *Journal of materials processing technology*. (2005), Heft 159, 206-213
- /50/ Karagöz, S., Zeren, M. "The microstructural design of diamond cutting tools" in *Materials characterization*, 2001, Heft 47, 89-91
- /51/ Karagöz, S., Zeren, M. „The property optimization of diamond-cutting tools with the help of micro-structural characterization" in *Int. Journal of refractory metals and hard materials*. (2001), Heft 19, 23-26
- /52/ Kenny, P., Johnson, S. "An investigation of the abrasive wear of mineral cutting tools" in *Wear*. (1976), Heft 36, 337-361
- /53/ Kleppmann, W. *Taschenbuch Versuchsplanung*. 5. Auflage. München, Wien. Carl Hanser Verlag, 2008
- /54/ Klocke, F., König, W. *Fertigungsverfahren – Drehen, Fräsen, Bohren*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg. Springer Verlag, 2008
- /55/ König, J. *Herstellung und Einsatz CVD-diamantbeschichteter Bohrgewindefräser*. Dissertation. TU Berlin, [Online-Veröffentlichung] Berlin 2009
- /56/ Kou, S., Lindqvist, P., Tang, C., Xu, X. „Numerical simulation of the cutting of inhomogeneous rocks" in *International journal of rock mechanics and mining sciences*. (1999), Heft 36, 711-717
- /57/ Krüger, A. *Neue Kohlenstoffmaterialien – Eine Einführung*. 1. Auflage. Wiesbaden. Teubner Verlag, 2007.
- /58/ Künze, G., Göhring, H., Jacob, K. *Baumaschinen*. 1. Auflage. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2002
- /59/ Li, X., Boland, J., "The wear characteristics of superhard composite materials in abrasive cutting operations" in *Wear*. (2005), Heft 259, 1128-1136

- /60/ Li, X., Summers, D., Rupert, G., Santi, P. "Experimental investigation on the breakage of hard rock by the PDC cutters with combined action modes" in *Tunneling and underground space technology*. (2001), Heft 16, 107-114
- /61/ Liniger, M., Kündig, R. „Naturstein“ in: *Schweizer Baudokumentation* [Elektronische Publikation]. Zürich, Juni 1990, Nr. e1 06875
- /62/ Lou, S., Liao, Y. "Study of the behaviour of diamond saw-blades in stone processing" in *Journal of materials processing technology*. (1995), Heft 51, 296-308
- /63/ Lou, S.Y. "Characteristics of diamond sawblade wear in sawing" in *International Journal of Machine tools and Manufacture* (1995), Heft 6, 661-672
- /64/ Lou, S.Y. "Investigation of the worn surfaces of diamond sawblades in sawing granite" in *Journal of materials processing technology*. (1997), Heft 70, 1-8
- /65/ Matthes, K.-J., Riedel, F. *Fügetechnik* 1. Auflage. München, Wien. Carl Hanser Verlag, 2003
- /66/ Merkel, M., Thomas, K.-H. *Taschenbuch der Werkstoffe*. 7. Auflage. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2008.
- /67/ Merkel, M., Thomas, K.-H.. *Taschenbuch der Werkstoffe*. 7. Auflage. München. Carl Hanser Verlag, 2008
- /68/ Mirinda, R. M. "Structural analysis of the heat affected zone of marble and limestone tiles cut bei CO₂ laser" in *Materials characterization*. (2004), Heft 53, 411-417
- /69/ Muhs, D. et al. *Roloff / Matek Maschinenelemente*. 17. Auflage. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2005.
- /70/ Müller, F. *Gesteinskunde: Lehrbuch und Nachschlagewerk über Gesteine für Hochbau, Innenarchitektur, Kunst und Restauration*. 3. Auflage. Ulm/Donau: Ebner Verlag, 1991.
- /71/ Muro, T., Takegaki, Y., Yoshikawa, K. "Impact cutting property of rock material using point attack bit" in *Journal of Terramechanics* (1997), Heft 34, 83-108
- /72/ N.N. *Announcement: Syndite – CTM 302* Firmenschrift elementsix, von URL: www.e6.com/en/businessareas/e6advancedmaterials/products/title,305,en.html, 14.12.2009
- /73/ N.N. *Diamond Tool Materials for Metalworking* Firmenschrift elementsix April 2009
- /74/ N.N. *Eine Einführung in Hochleistungs-Schneidstoffe (1.2.1)* Firmenschrift elementsix April 2009

- /75/ Nailer, S.; Gallagher, J.; Leahy, W. "Die Eigenschaften natürlicher und synthetischer Diamantschleifkörnungen", in: *Industrie Diamanten Rundschau*. 41 (2007), Nr. 4, Seite 54 – 63
- /76/ Nitkiewicz, Z., Swierzy, M. "Tin influence on diamond-metal matrix hot pressed tools for stone cutting" *Journal of materials processing technology*. (2006), Heft 175, 306-315
- /77/ Oliveira, L., Bobrovitchii, G., Filgueira, M. "processing and characterization of impregnated diamond cutting tools using a ferrous metal matrix" in *International journal of refractory metals and hard materials*. (2005), Heft 25, 328-335
- /78/ Owers, C. N. C. "Industriediamant: Anwendung, Wirtschaftlichkeit und Perspektiven", in: *Industrie Diamanten Rundschau*. 34 (2000), Nr. 3, Seite 186 – 192
- /79/ Paucksch, E., Holsten, S., Linß, M., Tikal, F. *Zerspanetechnik*. 12. Auflage. Wiesbaden. Vieweg + Teubner Verlag, 2008
- /80/ Peschel, P. *Tabellenbuch Bautechnik: Tabellen - Formeln - Regeln - Bestimmungen bearb. von Lehrern und Ingenieuren an berufsbildenden Schulen und Fachhochschulen*. 8. Auflage. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer Verlag, 2006.
- /81/ Polini, W., Turchetta, S. "Force and specific energy in stone cutting by diamond mill" in *International journal of machine tools and manufacture*. (2004), Heft 44, 1189-1196
- /82/ Reinhardt, K.-D., „Neue Form von Diamant-Segmenten für die Natur-/ Kunststeinbearbeitung“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 37 (2003), Heft 2, 174-175
- /83/ Reinhold, R., Becker, S. *Superharte Schneidwerkstoffe der Spanungstechnik*. 1. Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik, 1982
- /84/ Reinsch, D. *Natursteinkunde: eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze*. 1. Auflage. Stuttgart: Enke Verlag, 1991.
- /85/ Richard, T., Germay, C., Detournay, E. "A simplified model to explore the root cause of stick-slip vibrations in drilling systems with drag bits" in *Journal of sound and vibrations*. (2007), Heft 305, 432-456
- /86/ Richard, T., Germay, C., Detournay, E. "Self-excited stick-slip oscillations of drill bits" in *Mecanique*. (2004), Heft 332, 619-626
- /87/ Rothe, Peter. *Gesteine: Entstehung, Zerstörung, Umbildung*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2002
- /88/ Rüdrich, J. M. *Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore*. Dissertation. Göttingen, [Onlineveröffentlichung]. Göttingen, 2003.

- /89/ Schaffranke, U. „Moderne Werkzeugtechnologie trennt schlesischen Granit“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 30 (1996), Heft 1, 4-5
- /90/ Schlund, P., Kindermann, P., Sockel, H., Schleinkofer, U., u.a. „Mechanical behaviour of PVD- and CVD-coated hard metals under cyclic loads“ in *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. (1999), Heft 17, 193-199
- /91/ Scholz, W., Hiese W. *Baustoffkenntnis*. 15. Auflage. Düsseldorf: Werner Verlag, 2003.
- /92/ Schönburg, K. *Beschichtungstechniken heute*. 1. Auflage. Berlin: Verlag Bauwesen, 2005.
- /93/ Schwarz, U.. „Diamant: naturgewachsener Edelstein und maßgeschneidertes Material“, in: *Chemie in unserer Zeit*. 34. Jahrgang (2000), Nr. 4, Seite 212 – 222
- /94/ Sebastian, U. *Gesteinskunde: Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- /95/ Skury, A.L.D., Bobrovitchii, G.S., Monteiro, S.N., Gomes, C.C. „Recovery of synthetic diamonds from scrapped sawblades“ in *Separation and Purification Technology*. (2004), Heft 35, 185-190
- /96/ Spriano, S., Chen, Q., Settineri, L., Bugliosi, S. „Low content and free cobalt matrixes for diamond tools“ in *Wear* (2005), Heft 259, 1190-1196
- /97/ Stöck, M. „Discussion of stress distributions in rock drill heads“ in *International journal of machine tools and manufacture*. (1995), Heft 35, 1241-1250
- /98/ Thuro, K. „Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb“, in: *Münchener geologische Hefte* [Elektronische Publikation]. 1996, Reihe B: Heft 1.
- /99/ Tönshoff, H. K., Asche, J. „Verschleißverhalten von Diamantwerkzeugen in der Natursteinbearbeitung“ in: *Industrie und Diamanten Rundschau*. 30 (1996), Nr. 2, S. 107-114
- /100/ Tönshoff, H.K., Hillmann-Apmann, H. „Diamond tools for wire sawing metal components“ in *Diamond and related materials*. (2002), Heft 11, 742-748
- /101/ Tönshoff, H.K., Hillmann-Apmann, H., Asche, J. „Diamond tools in stone an civil engineering industry: cutting principles, wear and applications“ in *Diamond and related materials*. (2002), Heft 11, 736-741
- /102/ Turchetta, S., Carrino, L., Polini, W. „CVD diamond insert in stone cutting“ in *Diamond and related materials*. (2005), Heft 14, 641-645
- /103/ Uhlmann, E.; Brücher, M. „CVD-Diamant als Schneidstoff“, in: *Industrie Diamanten Rundschau*. 37 (2003), Nr. 4, Seite 340 – 353

- /104/ Unver, B. „A statistical method for practical assessment of sawability of rocks“, in: G. Berla (Hg.) *Proceedings of ISRM International Symposium. Eurock '96*. Rotterdam: Balkema, 1996, 59–65
- /105/ URL: http://planetas.ru/encyclopedia_p_12.html, 30.10.2009
- /106/ URL: www.cvd-diamant-werkzeuge.de/cvd-diamantabscheidung.php, 05.09.2009
- /107/ URL: www.cvd-diamant-werkzeuge.de/dick.php, 05.09.2009
- /108/ URL: www.cvd-diamant-werkzeuge.de/duenn.php, 05.09.2009
- /109/ URL: www.dhv-hilk.de/bandsaege, 01.03.2010
- /110/ URL: www.eurodima.com/de/produkte/saegen, 10.11.2009
- /111/ URL: www.f-koegel.de/nero_assoluto.htm, 25.01.2010
- /112/ URL: www.geodienst.de/ibbenbuerener.htm, 25.01.2010
- /113/ URL: www.juwelenmarkt.delexikon_brillanten.htm, 09.11.2009
- /114/ URL: www.merge-natursteine.de/rohmaterial.php, 30.10.2009
- /115/ URL: www.naturstein-reiners.de/nero_assoluto_zimbabwe.html, 01.02.2010
- /116/ URL: www.natursteint.de/deutsch/produkte/marmor/biancarrara.htm, 30.10.2009
- /117/ URL: www.pronaturstein.at/natursteine/aalfanger_granit.htm, 25.01.2010
- /118/ URL: www.sommerergmbh.de/fraeswerkzeuge.htm, 10.11.2009
- /119/ Wagenbreth, O. *Technische Gesteinskunde*. 3. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1979.
- /120/ Wagner, H. „Der Mechanismus der Spanentstehung beim Zerspanen von Gesteinen“, in: *Rock Mechanics*. (1971), Heft 3, 159-174
- /121/ Wang, C. Y., Clausen, R. „Marble cutting with single point cutting tool and diamond segments“ in *Machine tools and Manufacture*. 36 (2002), Heft 42 1045-1054
- /122/ Wang, C. Y., Wei, X., Tang, Z. L., Pan, Z. C. „The role of coolant in granite sawing“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 29 (1995), Heft 4, 156-160
- /123/ Wang, Y., Zang, J., Wang, M., Guan, Y., Zheng, Y. „Properties and applications of Ti-coated diamond grits“ in *Journal of materials processing technology*. (2002), Heft 129, 369-372
- /124/ Webb, S.W., Jackson, W.E. „Correlation of substitutional nitrogen in synthetic saw-grade diamond to crystal fatigue resistance“ in *Diamond and Related Materials*. (1998), Heft 7, 305-308

- /125/ Weinert, K., et al. „Produktiver und flexibler mit neuen Schneidstoffen“, in: *Werkstatt und Betrieb*. 135 (2002), Nr. 7/8, 25-32
- /126/ Weinz, E.A. „Mono- and polycrystalline diamond and boron nitride tools“ in *IPC business press*. (1980), 33-37
- /127/ Wright, D. N., Tagg, W. R. J., „Entwicklung eines Gesteins-Klassifizierungssystems für Diamantwerkzeuge“ in *Industrie Diamanten Rundschau*. 32 (1998), Heft 1, 6-20
- /128/ Wright, D., Wapler, H. „Investigations and prediction of diamond wear when sawing“ in *Annals of the CIRP*. (1986), Heft 1, 239-244
- /129/ Xi, F, Zhou, D, „Modeling surface roughness in the stone polishing process“ in *Machine tools and Manufacture* (2005), Heft 45 365-372
- /130/ Xu, X., Li, Y., Yu, Y. „Force ratio in the circular sawing of granites with a diamond segmented blade“ in *Journal of materials processing technology*. (2003), Heft 139, 281-285
- /131/ Xu, X., Li, Y., Zeng, W., Li, L. „Quantitative analysis of the loads acting on the abrasive grits in the diamond sawing of granites“ in *Journal of materials processing technology*. (2002), 50-55
- /132/ Yilmaz, N., Yurdakul, M., Goktan, R. M. „Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis“, in *International journal of rock mechanics and mining sciences*. (2007), Heft 44, 962-970
- /133/ Zeren, M., Karagöz, S., „Defect characterization in the diamond cutting tool“ in *Materials characterization*. (2006), 111-114