

Grundlagenuntersuchungen zum Einsatzverhalten von diamantimprägnierten Werkzeugen beim Kernbohren von hochfestem Beton

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

Dipl.-Ing. Michael Kansteiner

aus
Unna

Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2019

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann

Dortmund, 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN 978-3-8027-8918-2

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde während meiner Zeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Spanende Fertigung (ISF) an der Technischen Universität Dortmund erstellt. Dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann möchte ich meinen Dank für das entgegengebrachte Vertrauen und die Förderung aussprechen. Dem Leiter des Lehrstuhls für Werkstofftechnologie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann danke ich für die Übernahme des Koreferats. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther, dem Leiter des Fachgebiets Werkstoffprüftechnik, für die Mitwirkung in der Prüfungskommission und Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Menzel vom Institut für Mechanik für die Übernahme des Prüfungsausschussvorsitzes.

Meinen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am ISF gilt mein Dank für die angenehme und förderliche Arbeitsatmosphäre. Diese hat zusammen mit den fruchtbaren Gesprächen nicht nur einen kleinen Beitrag zur erfolgreichen Erstellung der vorliegenden Dissertationsschrift beigetragen. Herauszustellen sind dabei meine Kolleginnen und Kollegen aus dem Bereich der Schleiftechnologie, mit denen ich eine Vielzahl von besonderen Erlebnissen teilen darf. Hinsichtlich der bürokratischen und organisatorischen Herausforderungen sei dem „bewusst schlanken“ Verwaltungsapparat des Instituts zu danken. Für die praktische Unterstützung bei der Versuchskonzipierung, den Messaufbauten und der IT sei den Kollegen aus dem Messtechnik- und Elektroniklabor gedankt.

Für die belebende Zusammenarbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereich (SFB) 823 sei den Kolleginnen und Kollegen aus den Fakultäten der Statistik und dem Bauwesen zu danken. Dieser Austausch, mit der verbundenen notwendigen Reflektion, hat meinen fachlichen als auch menschlichen Horizont auf verschiedenen Ebenen erweitert. Zu erwähnen ist dabei die Kinderbetreuung „9x kluge Zwerge“ des SFB 823, die die Vereinbarkeit von Familie und Beruf deutlich vereinfacht hat.

Des Weiteren möchte ich mich herzlich bei den Studierenden bedanken, die als wissenschaftliche Hilfskräfte oder im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten, meine tägliche Arbeit und Forschungstätigkeiten unterstützt haben. Als Schattenmann hinter meinen Forschungsaktivitäten möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Tim Jansen danken. Dieser hat unwissentlich, aber maßgeblich meinen bisherigen Werdegang bis zur Promotion beeinflusst.

Meinen größten Dank möchte ich zum Abschluss meiner Partnerin Johanna Gerke aussprechen. Ohne sie hätte ich mein Studium nicht aufgenommen und damit in der Folge die schönen und umfänglichen privaten und beruflichen Erfahrungen nicht sammeln dürfen. Durch ihr Wesen und ihre Unterstützung ist die erfolgreiche Durchführung des Promotionsvorhabens erst möglich geworden.

Michael Kansteiner
Dortmund, November 2019

Kurzfassung

Grundlagenuntersuchungen zum Einsatzverhalten von diamantimprägnierten Werkzeugen beim Kernbohren von hochfestem Beton

Für die trennende Bearbeitung von Beton und Stahlbeton werden in großem Umfang diamantimprägnierte Schleifwerkzeuge eingesetzt. Die spezifische Herausforderung stellt dabei das Verbundverhalten aus sprödhartem Beton und zähelastischem Stahl dar. Nur wenige veröffentlichte Arbeiten beschäftigen sich mit der Erforschung der trennenden Bearbeitung des umfangreich eingesetzten Konstruktionswerkstoffs Stahlbeton. Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Verbesserung des Prozessverständnisses für das Diamantkernbohren von hochfestem Stahlbeton geleistet werden.

Seit einigen Jahren ist die wirtschaftliche Herstellung diamantimprägnierter Schleifwerkzeuge in größeren Stückzahlen möglich, die eine definierte Positionierung der Diamantkörner im Werkzeugvolumen aufweisen. Durch die Positionierung kann eine deutliche Leistungssteigerung erzielt werden. Da hierbei die Diamantkornanzahl reduziert wird, gewinnen in der Folge die Diamantkorneigenschaften, wie z. B. die Form, an Bedeutung für das Einsatzverhalten des Werkzeugs. Der Fokus dieser Arbeit liegt daher in der Identifizierung des Einflusses der Diamantkornform auf den Bearbeitungsprozess. Hierzu werden anstatt einzelner Diamantkörner Diamantwerkzeuge mit definierter Spitzenform eingesetzt, durch die eine höhere Reproduzierbarkeit gegeben ist. Die Versuche umfassen die Aspekte „Materialtrennung“, „Einfluss der Einzelphasen“ und „Verschleißverhalten“. Auf Grundlage der Versuche ist ein signifikanter Einfluss der Form festzustellen. Dabei weisen die getesteten Formen hinsichtlich der verschiedenen Aspekte unterschiedliche Vor- und Nachteile auf. So zeigt sich, dass hinsichtlich einer energetisch günstigen trennenden Bearbeitung von Stahl oder Beton unterschiedliche Kornformen zu wählen sind. Dagegen stellt sich eine verrundete Kornform unabhängig vom Material als unvorteilhaft dar.

Neben der Identifizierung des Einflusses der Diamantkornform erfolgen des Weiteren Einsegment- und Kernbohrversuche zur Ermittlung anwendungsbezogener Erkenntnisse. Im Rahmen dieser Versuche wird eine gute Übertragbarkeit qualitativer Größen von Einsegmentversuchen auf Kernbohrversuche deutlich. Sowohl durch die Einsegment- als auch die Kernbohrversuche lassen sich die material-spezifischen Einflüsse auf den Bearbeitungsprozess bestätigen. Zudem kann anhand der Einsegment-, aber auch der Einkornritzversuche dargestellt werden, dass eine materialabhängige minimal erforderliche Anzahl von Diamantkörnern bzw. Höhe der Diamantkonzentration notwendig ist.

Abstract

Fundamental Analysis of the Process Behaviour of Diamond Impregnated Tools for Core Drilling of High-Strength Concrete

Diamond impregnated grinding tools are used on a large scale for the cutting of concrete and reinforced concrete. The specific challenge regarding the cutting process is the behaviour of the composite material which comprises phases of brittle-hard concrete and ductile-elastic steel. Only a few published papers deal with the analysis of the cutting process of this extensively used construction material. Within this thesis, fundamental analysis of the cutting process of concrete and reinforced concrete at three different levels of detail are conducted. The aim of this work is the improvement of the process knowledge of the diamond core drilling process of high-strength reinforced concrete.

Several years ago, the production of diamond impregnated grinding tools in large quantities became economically, which enables a defined positioning of individual grains in diamond impregnated tools. The positioning allows a significant increase in tool performance. Due to a reduced number of grains, the diamond grain properties, such as the shape, become more important for the application behaviour of the tools. Hence, the focus of this work is the identification of the influence of the diamond grain shape on the process behaviour. Instead of individual diamond grains, diamond tools with a defined shape of the tip are used for this purpose, which ensure higher reproducibility. The experiments cover the aspects „material separation“, „influence of individual phases“ and „wear behaviour“. On the basis of these experiments a significant influence of the diamond shape can be determined. The tested shapes have different advantages and disadvantages with regard to the different aspects. Thus it can be seen that different grain shapes have to be selected with regard to an energetically favourable separation process of concrete or steel. On the other hand, a rounded grain shape is unfavourable irrespective of the material.

In addition to the identification of the influence of the diamond grain shape, single segment and core drilling tests are also carried out to determine application related findings. In the context of these tests, a good transferability of qualitative parameters from single segment tests to core drilling tests becomes clear. The material specific influence on the machining process can be confirmed both by the single segment and by the core drilling tests. In addition, the single segment and single grain scratch tests can be used to demonstrate that a minimum number of diamond grains or a minimum level of diamond concentration is required depending on the material.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	iii
Formelzeichen	v
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Beton	3
2.1.1 Grundlagen und Aufbau	3
2.1.2 Bewehrter Beton	5
2.1.3 Hochfester Beton	6
2.2 Diamant als Schneidstoff	7
2.2.1 Grundlagen und Eigenschaften	8
2.2.2 Herstellung	10
2.2.3 Klassifizierung von Diamantkörnern	14
2.3 Diamantimprägnierte Werkzeuge	16
2.3.1 Herstellungsroutinen	16
2.3.2 Werkzeuggestaltung	18
2.3.3 Verschleißverhalten	21
2.4 Diamantkernbohren	24
2.4.1 Einführung und Definition	25
2.4.2 Aufbau der Werkzeuge	25
2.5 Materialtrennungsmechanismen	26
2.5.1 Naturstein und Beton	27
2.5.2 Metallische Werkstoffe	29
2.6 Forschungsarbeiten zur trennenden Bearbeitung von Beton und Stahlbeton	31
2.6.1 Einkornritzversuche	31
2.6.2 Mehrkornritzversuche	37
2.7 Abgeleitete Problemstellungen	39
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	41
4 Einkornritzversuche	43
4.1 Diamantwerkzeuge	43
4.2 Probenspezifikationen	45
4.3 Messmittel	46
4.4 Analyse der Materialtrennungsmechanismen	48
4.4.1 Versuchsumgebung und -methodik	49
4.4.2 Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen	51
4.4.3 Prozesskräfte, abgetrenntes Volumen und Zerspanungsenergie	58
4.4.4 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion	65

4.5	Analyse des Einflusses der Materialphasen	66
4.5.1	Versuchsumgebung und -methodik	66
4.5.2	Exemplarische Prozesskraftverläufe und Auswertungsmethodik	69
4.5.3	Versuche an den Einzelphasen des Betons C100/115	70
4.5.4	Vergleich unterschiedlicher Betongüten	72
4.5.5	Einfluss der Diamantform auf die Zerspanungsarbeit	74
4.5.6	Einfluss der Stahlbewehrung	77
4.5.7	Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion	86
4.6	Analyse des Verschleißverhaltens	89
4.6.1	Versuchsumgebung und -methodik	90
4.6.2	Mikroskopische Ergebnisse	94
4.6.3	Prozesskräfte	99
4.6.4	Ritzspuren und spezifische Energie	103
4.6.5	Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion	110
4.7	Zwischenfazit	112
5	Einsegment- und Kernbohrversuche an hochfestem Stahlbeton	115
5.1	Versuchsumgebung und -durchführung	115
5.2	Einsegmentversuche	118
5.2.1	Exemplarische Darstellung des Einflusses der Stahlbewehrung auf die Prozesskräfte	118
5.2.2	Einfluss der Diamantkorngröße und der -konzentration	118
5.2.3	Ergebnisdiskussion	121
5.3	Kernbohrversuche	123
5.3.1	Exemplarische Darstellung des Einflusses der Stahlbewehrung auf die Wirkleistung	123
5.3.2	Einfluss der Diamantkorngröße und der -konzentration	123
5.3.3	Ergebnisdiskussion	128
5.4	Zwischenfazit	130
6	Zusammenfassung und Ausblick	133
	Literaturverzeichnis	137

Abkürzungen

Abkürzung

C
CBN
CO₂
CVD

DIN
HPHT

ISF
KSS
LWT
MKD
PKD
PPC

REM
USA

VDMA

Beschreibung

Kohlenstoff
Kubisches Bornitrid
Kohlenstoffdioxid
Gasphasenabscheidung, engl.
chemical vapour deposition
Deutsches Institut für Normung
Hochdruck-Hochtemperatur, engl.
high pressure–high temperature
Institut für Spanende Fertigung
Kühlschmierstoff
Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
Monokristalliner Diamant
Polykristalliner Diamant
Partikel pro Karat, engl. particles per
carat
Rasterelektronenmikroskop
Vereinigte Staaten von Amerika, engl.
United States of America
Verband Deutscher Maschinen- und
Anlagenbau

Formelzeichen

Großbuchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	mm ²	Fläche
A _{cu}	μm ²	Spannungsquerschnitt
A _r , A _c	μm ²	Ritzspurquerschnitt
A _{r,i}	μm ²	Ritzspurquerschnitt an der Stelle i
A ₁	μm ²	Querschnitt Materialaufwurf 1, links von Furche
A ₂	μm ²	Querschnitt Materialaufwurf 2, rechts von Furche
A _{Ring}	mm ²	Flächeninhalt Kreisring
A _{seg}	mm ²	Grundfläche Segmente
A _{seg,g}	mm ²	Gesamtfläche aller Segmente
A _{wz}	μm ²	Werkzeugquerschnitt
CFF	N	Compressive Fracture Force, Bruchfestigkeit
E	J	Energie
E _r	N/mm ²	Ritzenergie
F	N	Kraft
F _c	N	Schnittkraft
F _f	N	Vorschubkraft
F _n	N	Normalkraft
F _{n, nom.}	N	Nominelle Normalkraft
F _s	N	Seitliche Kraft
F _t	N	Tangentiale Kraft
F _x	N	Kraft in x-Richtung
F _y	N	Kraft in y-Richtung
F _z	N	Kraft in z-Richtung
G	mm ³ /mm ³	G-Verhältnis
L _{Ritz}	m	Geritzte Länge
L _{Roh}	mm	Länge im Rohzustand
P	W	Wirkleistung
P _B	W	Wirkleistung Bohren
P _L	W	Wirkleistung Leerlauf
Q _w	mm ³ /s	Zeitspanvolumen
Q' _w	mm ³ /s · mm	bezogenes Zeitspanvolumen
R	-	Datenspannweite
R ² _{adj}	-	adjustiertes Bestimmtheitsmaß

Formelzeichen

Rz	μm	Gemittelte Rautiefe
T	$^{\circ}\text{C}$ oder K	Temperatur
T_{μ}	μm	Schnitteinsatztiefe
TI	%	Toughness Index, Schlagfestigkeitswert
TTI	%	Thermal Toughness Index, thermischer Schlagfestigkeitswert
V_w	μm^3	Zerspannungsvolumen
V_r	μm^3	Ritzspurvolumen
$V_{r,a}$	μm^3	Ritzspurvolumen zwischen Messtelle i und i+1
$V_{r,ges}$	μm^3	Gesamtes Ritzspurvolumen
V_s	μm^3	Schleifscheibenverschleißvolumen
W_c	J	Arbeit in Richtung der Schnittkraft
W_n	J	Arbeit in Richtung der Normalkraft
W_z	J	Gesamtarbeit/Zerspanarbeit

Kleinbuchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a_e	mm	Zustellung
$a_{e,ges}$	mm	Gesamtzustellung
$a_{e,krit}$	μm	kritische Spannungstiefe
a_{Tiefe}	μm	Tiefenauflösung
b_r	μm	Ritzbreite
b_B	mm	Breite der Betonprobe
b_m	mm	Gemessene Breite
b_{seg}	mm	Breite Segment
d	mm	Durchmesser
d_{gs}	μm	Wirksame Kornbreite
d_k	US-Mesh oder mm	Diamantpartikelgröße
$d_{Schicht}$	μm	Schichtdicke
e_r	$\text{J}/\mu\text{m}^2$	spezifische Ritzenergie
d_{Roh}	mm	Durchmesser im Rohzustand
e_v	J/mm^3	bezogene Energie
$e_{v,ges}$	J/mm^3	bezogene Energie, gesamte Bohrung
f	mm/U	Vorschub

f_b	fps	Bildfrequenz
$f_{ck,cube}$	N/mm^2	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Würfeln
$f_{ck,cyl}$	N/mm^2	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern
f_e	μm	Ebenheitsfehler
f_p	μm	Planlauffehler
h	mm	Höhe
h_{cu}	μm	Einzelkornspannungsdicke
h_p	mm	Höhe der Betonprobe
Δh_{seg}	mm	Segmentabnahme/-verschleiß
$\Delta h_{seg}/l_{t,ges}$	mm/m	spezifischer Verschleiß
h_r	μm	Ritztiefe
i	-	Laufvariable
k_A	-	Flächenabtragsfaktor
k_b	-	Breitenabtragsfaktor
k_p	mm	Kantenlänge Betonproben
k_t	-	Tiefenabtragsfaktor
l_m	mm	Gemessene Länge
l_w	mm	Kantenlänge Würfel
$l_{r,a}$	mm	Messabstand zwischen Oberflächenmessungen
l_{stahl}	mm	Tiefe der Lage der Betonstahlstäbe
l_{seg}	mm	Länge Segment
l_t	mm	Bohrtiefe
$l_{t,ges}$	m	Gesamtbohrtiefe
m	g	Masse
m_w	$\mu m/mm$	winklige Anstellung der Versuchsprobe
n	U/min	Drehzahl
n_s	-	Anzahl Segmente
n_u	-	Anzahl Umdrehungen
n'_k	Dia/ mm^2	Diamantkörner pro Fläche
p	bar	Druck
r_{Spitze}	mm	Spitzenradius
r_t	mm	Versuchsradius
s	mm	Weg
s_{Ende}	mm	Standwegende/max. Standweg

s_p	mm	Probenstärke/-dicke
s_{st}	mm	Stegbreite Stahl
t	s	Zeit
t_B	s	Zeit/Dauer Bohrung
t_b	μm	Profilbreite
t_{Topfzeit}	min	Topfzeit
t_p	mm	Tiefe der Betonprobe
t_p	μm	Profiltiefe
u	-	Anzahl Teilvolumina
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v_u	m/min	Umfangsgeschwindigkeit
v_x	m/s	Verfahrgeschwindigkeit in x-Richtung
w/z	-	Wasser-Zement-Wert

Griechische Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	°	Freiwinkel
α_{trib}	°	Angriffswinkel
β	°	Keilwinkel
γ	°	Spanwinkel
$\gamma_{A,\text{pro}}; \gamma_{B,\text{pro}}$	°	Spanwinkel, projiziert
κ	°	Ausrichtungswinkel
λ_c	μm	Grenzwellenlänge
μ	N/N	Schnittkraftverhältnis
σ	V-%	Volumenprozent
$\sigma_A; \sigma_B$	°	Spitzenwinkel Pyramide
$\sigma_{A,\text{pro}}; \sigma_{B,\text{pro}}$	°	Spitzenwinkel, projiziert
σ_C	°	Öffnungswinkel Konus
ν	°	Öffnungswinkel Korn [154]
ω	°	Spitzenwinkel der Pyramide
$\omega_{i,\text{pro}}$	°	Projizierter Spitzenwinkel für Ausrichtung i

1 Einleitung und Motivation

In der Bauindustrie werden sowohl beim Neubau, beim Rückbau als auch der Nutzungsänderung von Bauwerken diamantimprägnierte Werkzeuge eingesetzt. Hierbei findet sich eine umfangreiche Anzahl von Anwendungsfällen diamantimprägnierter Werkzeuge wie z. B. bei Wand- und Seilsägen, Bodenschleifern, Trennscheiben oder Diamantkernbohrwerkzeugen. Das Diamantkernbohren wird dabei eingesetzt, um einzelne Bohrungen oder größere Öffnungen in verschiedenen Materialien wie z. B. Beton, Stahlbeton, Ziegelstein, Naturstein zu erzeugen. Die Werkzeugentwickler, aber auch die Anwender diamantimprägnierter Werkzeuge, weisen dabei umfangreiche empirische Prozesskenntnisse auf. Bislang sind jedoch nur wenige wissenschaftliche Arbeiten zur trennenden Bearbeitung von Beton und Stahlbeton veröffentlicht, weshalb ein eingeschränktes wissenschaftlich fundiertes Grundlagenverständnis und Prozesswissen vorliegt.

Bereits seit mehreren Jahren besteht die Möglichkeit der wirtschaftlichen Herstellung diamantimprägnierter Werkzeuge, bei denen die Diamantkörner in definierten Anordnungen vorliegen [107, 175, 199]. Werkzeuge dieser Art werden bereits erfolgreich in der Anwendung eingesetzt, da durch die Möglichkeit der gezielten Optimierung eine höhere Leistungsfähigkeit erzielt werden kann [37, 107, 169]. Aufgrund der bei diesen Werkzeugen höheren Belastung der einzelnen Diamantkörner kommt der genauen Kenntnis der Eigenschaften eines Diamantkörnungsprodukts eine steigende Bedeutung zu, um dieses gezielt für die Anwendung auswählen zu können [22, 133]. Der nächste Schritt der Werkzeugoptimierung stellt daher die gezielte Auswahl der Diamantkörner dar. Hierbei wurde für metallische Werkstoffe bereits ein Einfluss der Diamantkornform auf die Materialtrennung ermittelt. Untersuchungen von *Axinte et al.* haben allerdings gezeigt, dass sich der Einfluss der Kornform bei duktilen und spröden Materialien in unterschiedlicher Form ausprägen kann [9]. Grundlegende wissenschaftliche Untersuchungen zum Einfluss der Diamantkornform bei der Bearbeitung von Stahlbeton, bei dem eine Kombination sprödharter und duktiler Materialphasen vorliegt, fehlen jedoch bislang.

Für die gezielte und damit wirtschaftliche Optimierung von diamantimprägnierten Werkzeugen, erfolgen daher in dieser Arbeit fundamentale Analysen zur trennenden Bearbeitung von Beton und Stahlbeton auf verschiedenen Untersuchungsebenen. Der Hauptfokus liegt dabei auf der Analyse des Einflusses der Diamantkornform. Dazu werden Untersuchungen hinsichtlich der Aspekte „Materialtrennung“, „Einfluss der Materialphasen“ und „Verschleißverhalten“ durchgeführt, um Eigenschaften einer optimierten Diamantkornform für die trennende Bearbeitung von Stahlbeton zu identifizieren. Durch diese Untersuchungen werden umfangreiche Erkenntnisse gewonnen, die das Prozessverständnis steigern und damit eine nachhaltige Werkzeugoptimierung ermöglichen. Die durchgeführten Arbeiten umfassen dabei nicht nur Versuche mit speziellen Diamantwerkzeugen mit definierter Spitzenform, sondern auch Einsegment- und Diamantkernbohrversuche. Hierdurch werden unmittelbar anwendungsbezogene Erkenntnisse erlangt, die den Einfluss der unterschiedlichen Materialphasen des Verbundwerkstoffs Stahlbeton auf die für die Anwendung relevanten Kenngrößen aufzeigen.

2 Stand der Technik

2.1 Beton

Beton ist ein Baustoff, der durch das Mischen von Zement, Wasser und Gesteinskörnung, auch als Zuschlag bezeichnet, erzeugt wird [59]. Bereits bei den Römern im 2. Jahrhundert vor Christus wurden Steine, Sand, gebrannter Kalkstein, Puzzolane und Meerwasser vermengt, wodurch ein aushärtendes mineralisches Material hergestellt wurde, der lat. „opus caementitium“ genannt wurde und damit die römische Bauweise mit Beton meint [79, 81]. Bekanntestes Anwendungsbeispiel für diesen Baustoff und dessen Leistungsfähigkeit ist die Kuppel des Pantheons in Rom [89].

Heute ist in mehr als der Hälfte aller Bauten Beton eingesetzt, weshalb Beton neben Stahl der wichtigste Konstruktionsbaustoff ist [135]. Technische Gründe für den umfangreichen Einsatz sind unter anderem die hohe Druckfestigkeit, die leichte Verarbeitbarkeit und die Formbarkeit [137]. Wirtschaftlicher Grund ist der günstige Preis [89, 137]. Als kritisch ist jedoch die große Menge an freigesetztem Kohlenstoffdioxid (CO_2) anzusehen, die bei der Herstellung von Zement entsteht und die ca. 5 % des weltweit freigesetzten CO_2 ausmacht; in Deutschland ca. 4,4 % im Jahr 2009 [84, 89].

2.1.1 Grundlagen und Aufbau

Aufgrund seiner Zusammensetzung aus Zement, Wasser und Gesteinskörnung wird Beton als 3-Komponenten-Werkstoff bezeichnet [102]. Die plastische bis flüssige Mischung der drei Komponenten wird Frischbeton genannt. In diesem Zustand ist der Beton verarbeitbar und kann z. B. in Verschalungen gegossen werden. Nach dem Aushärten des Betons wird dieser als Festbeton bezeichnet.

Seine Festigkeit erhält der Beton durch die Wasseranbindung/Hydratation des Zements. Der Begriff Hydratation beschreibt Reaktionen, die ausgelöst werden, wenn der Zement mit Wasser vermischt wird. Durch die Vermischung von Wasser und Zement entsteht sogenannter Zementleim. Im ausgehärteten Zustand wird der Zementleim als Zementstein bezeichnet. Zusammen mit zugefügtem feinkörnigen Sand bildet dieser die Bindungsmatrix des Betons, in der sich die Gesteinskörnung befindet. Da der Zementstein eine deutlich geringere Druckfestigkeit als die Gesteinskörnung aufweist, ist die Druckfestigkeit des Zementsteins maßgebend für die Druckfestigkeit des Betons [80, 135]. Die Festigkeitseigenschaften des Zementsteins stehen daher im direkten Verhältnis mit der Druckfestigkeit des Betons [138]. Im ausgehärteten Zustand wird Beton als Zweistoffsystem aus Zementstein und Gesteinskörnung betrachtet [135].

Bei der Hydratation werden ca. 40 % des Zementgewichts durch Wasser chemisch und physikalisch gebunden. Dieser quantitative Wert wird als Wasserzementwert w/z bezeichnet, wobei die dimensionslose Angabe z. B. $w/z = 0,4$ üblich ist. Liegt der w/z -Wert über $w/z = 0,4$, bilden sich im aushärtenden Beton durch überschüssiges Wasser Kapillaren und Poren, die zu einer Absenkung der Druckfestigkeit führen. Nach *Nerth* verschlechtert ein hoher w/z -Wert alle Eigenschaften eines Betons, wohingegen niedrige Werte die Eigenschaften verbessern [135]. In

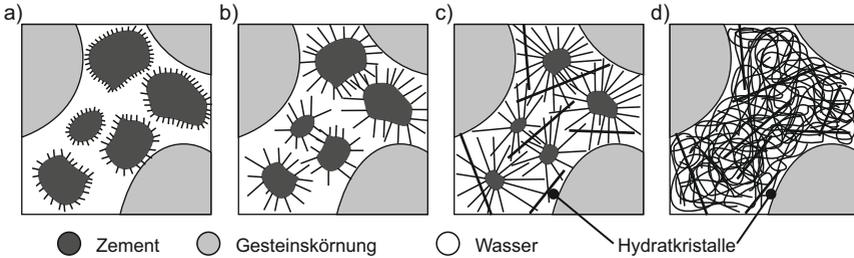


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Aushärtens von Beton nach [89, 138]
 a) Zement beginnt zu hydratisieren, Mischung noch verarbeitbar,
 b) Ausbildung faserförmiger Kristalle, Mischung nicht mehr verarbeitbar,
 c) Ausbildung langfaseriger Kristalle, Porenraum wird gefüllt,
 d) Zementpartikel vollständig hydratisiert, Porenraum gefüllt

der Praxis liegt der w/z -Wert zwischen $w/z = 0,4$ und $0,75$. Für hochfeste Betone liegen die w/z -Werte im Bereich von $w/z = 0,25$ bis $0,35$ [156].

Der zur Betonherstellung notwendige Zement wird aus Kalkstein, Kreide, Ton oder Kalkmergel gewonnen. Diese Ausgangsstoffe werden zermahlen und in Drehrohröfen bei Temperaturen von $T \approx 1450^\circ\text{C}$ zu Zementklinker gebrannt [89, 138]. Nach dem Brennen des Zementklinkers muss dieser erneut gemahlen werden, damit dieser als Bindemittel/Verkittungsmittel eingesetzt werden kann. Beim Anmachen des Zements, d. h. der Vermischung von Wasser und Zement, reagieren die Klinkerphasen des Zements mit dem Wasser. Die Zementpartikel lösen sich hierbei auf und bilden zunächst kurz- und anschließend auch langfaserige Kristalle, die sich zunehmend vernetzen, wodurch der Zementstein bzw. Beton seine Härte erhält [89, 202], siehe Abbildung 2.1. Die Hydratation setzt unmittelbar durch die Vermischung ein. Ungefähr ein bis drei Stunden nach dem Beginn der Hydratation kann das Gemisch nicht mehr verarbeitet werden. Die Hydratation bzw. der Aushärtungsvorgang verlangsamen sich mit fortlaufender Zeit und sind erst beendet, wenn keine Ausgangsstoffe mehr vorhanden sind. Da in Abhängigkeit der Dicke im Inneren eines Betonbauteils praktisch zu jedem Zeitpunkt noch überschüssiges Wasser und Klinkerphasen vorliegen, wird die Endfestigkeit eines Betonbauteils aufgrund der später sehr langsam ablaufenden Hydratation erst nach mehreren Jahren erreicht [80].

Als Gesteinskörnung werden üblicherweise die in der Umgebung vorliegenden natürlichen Ressourcen genutzt. Das bedeutet, dass z. B. in der Nähe von Flüssen der dort angeschwemmte Kies Verwendung findet, während dagegen in der Alpenregion Bruchstein eingesetzt wird. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften und der natürlichen Schwankungen ist eine sorgfältige Auswahl der Gesteinskörnung notwendig, um die geforderten Betonqualitäten einhalten zu können [135]. Entscheidend ist unter anderem die Größe der Gesteinskörnung, weshalb diese vor dem Einsatz durch Sieben in unterschiedliche Kornfraktionen aufgeteilt wird. Darüber hinaus ist die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung zu beachten, da diese den w/z -Wert des Frischbetons und damit auch die späteren Eigenschaften beeinflusst.

Die wichtigste Eigenschaft von Beton ist dessen Druckfestigkeit. Aus diesem

Grund ist die Druckfestigkeit das Hauptkriterium zur Einteilung von Betonen. Daneben kann z. B. auch eine Einteilung in Abhängigkeit der Dichte in Leicht- oder Normalbeton erfolgen. Die Druckfestigkeit wird gemäß der Norm 28 Tage nach der Herstellung der Betonmischung an genormten Probenkörpern bestimmt [57, 58]. Diese Probenkörper können würfelförmig mit einer Kantenlänge von $l_W = 150$ mm oder zylindrisch sein, wobei der Zylinder eine Höhe von $h = 300$ mm und einen Durchmesser von $d = 150$ mm aufweist [58, 202]. In Abhängigkeit der Probenform wird die charakteristische Druckfestigkeit von würfelförmigen Proben $f_{ck,cube}$ und zylindrischen Proben $f_{ck,cyl}$ unterschieden. Die Bezeichnung der Betone ergibt sich dabei durch die Angabe von „C“, für engl. concrete, und den Werten für $f_{ck,cube}$ und $f_{ck,cyl}$. Als Beispiel weist der Beton C20/25 eine Druckfestigkeit von mindestens $f_{ck,cube} = 20$ N/mm² und $f_{ck,cyl} = 25$ N/mm² auf.

2.1.2 Bewehrter Beton

Da Beton in der Anwendung hohe Druckkräfte aufnehmen kann, gleichzeitig aber nur geringe Zugkräfte erträgt, wird dieser in der Regel zusammen mit Stahlelementen, auch Betonstahl genannt [53], eingesetzt und kann aus diesem Grund zu den Verbundwerkstoffen hinzugezählt werden [89]. Die Betonstahlelemente werden dabei als Bewehrungsmaterial bezeichnet und nehmen in der Anwendung die wirkenden Zugbelastungen auf. Aufgrund der dadurch entstehenden Richtungsabhängigkeit der Belastbarkeit des Materialverbunds liegen anisotrope Eigenschaften vor. Die Betonstahlelemente werden in verschiedenen Formen als Stab, Draht, Ring, Matte oder Gitterträger verbaut. Der Querschnitt der einzelnen grundlegenden Elemente ist in der Regel nahezu kreisförmig. Da zwischen dem Beton und dem Stahl eine rein formschlüssige Verbindung entsteht, ist eine möglichst gute Einbindung notwendig, sodass in der Anwendung eine Übertragung der Belastungen vom Beton auf den Stahl und auch andersherum möglich ist [136]. Aus diesem Grund weisen die Betonstahlelemente eine Profilierung oder Verrippung auf. Eine Verbesserung der Einbindung wird zudem durch die Verwendung von kleinen Gesteinskornfraktionen sowie von ausreichend Zementleim bzw. Zementstein erzielt. Neben der Übertragung der mechanischen Belastungen ist ein enger Verbund zwischen Beton und Betonstahl notwendig, um eine Korrosion des Betonstahls zu verhindern. Dazu muss der Betonstahl vollständig durch Zementstein, der alkalisch wirkt, bedeckt sein [135]. Da der Kohlenstoff der Umgebungsluft zusammen mit der vorhandenen Feuchtigkeit die alkalische Wirkung des Betons im Laufe der Zeit neutralisiert, ist eine ausreichende Betonüberdeckung der Betonstahlelemente notwendig, um Korrosionsvorgänge, die zu einem vorzeitigen Bauteilversagen führen, zu verhindern [80, 139].

Bei der Anwendung von Bewehrungsstahl kann begrifflich zwischen Stahl- und Spannbeton unterschieden werden. Beim Stahlbeton werden die Stahlelemente schlaff in der Betonmatrix verbaut. In diesem Fall können die Stahlelemente erst Zugbelastungen aufnehmen, wenn die Betonmatrix überlastet ist und entsprechend Risse entstanden sind. Beim Spannbeton werden die verbauten Stahlelemente mit einer Zugspannung beaufschlagt [80, 136]. Durch das Spannen der Stahlelemente wird die Betonmatrix mit einer Druckspannung beaufschlagt, die im späteren Anwendungsfall den wirkenden Zugbelastungen entgegenwirkt. In der Folge kann das Bauteil höhere Zugbelastungen ertragen als dies bei einem

schaffen Einbau der Stahlelemente der Fall wäre, da zunächst die aufgebrachten Druckspannungen überwunden werden müssen.

Die Kombination der unterschiedlichen Eigenschaften des Betons und des Stahls werden ausgenutzt, um Bauteile mit verbesserten Eigenschaften zu erhalten. Dies stellt gleichzeitig die Herausforderung bei der trennenden bzw. spannenden Bearbeitung dieser Bauteile dar. Dieses Thema und die spezifischen Herausforderungen bei der Bearbeitung von Beton und Stahlbeton durch Schleifwerkzeuge werden im Kapitel 2.6 näher erläutert. Während Beton ein tendenziell sprödhartes Materialverhalten zugeschrieben werden kann, weist Stahl im Vergleich ein zähelastisches Verhalten auf. So liegt der E-Modul von Betonstahl bei ca. $E = 200.000 \text{ N/mm}^2$, während im Vergleich dazu der E-Modul von Beton mit $E = 20.000$ bis 30.000 N/mm^2 angegeben werden kann [136].

Neben Stahlelementen in den zuvor genannten Formen gibt es weitere Ansätze und Materialien, die zur Verbesserung des Einsatzverhaltens von Betonbauteilen eingesetzt werden können. So werden z. B. in Faserbeton vereinzelte freie Fasern als Bewehrung eingesetzt. Diese Fasern können aus Stahl, Glas, Kunststoff oder Kohlenstoff bestehen und wirken als einzelne Bewehrungselemente, wodurch die Rissbildung unterdrückt wird [202]. Bereits seit einigen Jahren wird erfolgreich am Einsatz und der Umsetzung von sogenanntem Textilbeton gearbeitet [164]. Stand 2018 finden umfangreiche Forschungsarbeiten im Projekt „C³ - Carbon Concrete Composite“ an der Technischen Universität Dresden statt [116, 165]. Hierbei werden Matten, die aus Kohlenstofffasern hergestellt werden, als Bewehrungsmaterial eingesetzt. Dieser Materialverbund erträgt im Vergleich zu Stahlbetonelementen deutlich höhere mechanischen Belastungen bei kleineren Bauteilvolumina. Gleichzeitig entfällt die Notwendigkeit hoher Betonüberdeckungen, da der Korrosionsschutz der Bewehrung entfällt [163]. Zum Einsatz kommen hierbei hochfeste und ultrahochfeste Betone, um nur geringe Materialvolumina einsetzen zu müssen [164].

2.1.3 Hochfester Beton

Konventioneller Beton, der zum Beispiel beim Bau von Wohnhäusern eingesetzt wird, weist Festigkeiten im Bereich von C20/25 bis C30/37 auf [202]. Als hochfester Beton wird Beton ab einer Druckfestigkeit von $f_{ck,cube} > 60 \text{ N/mm}^2$ bezeichnet [135, 156, 157]. Die Entwicklung hochfester Betone ist nach *Richter* durch den Hochhausbau motiviert und den daraus abgeleiteten Anforderungen [156]. Neben der Begrifflichkeit „hochfester Beton“ findet sich auch die Begrifflichkeit „Hochleistungsbeton“ [102]. Aus betontechnologischer Sicht besteht zwischen diesen kein Unterschied, allerdings kann eine Unterscheidung bzgl. der Anwendung getroffen werden. Hochfeste Betone zeichnen sich durch ihre hohe Druckfestigkeit aus, während bei Hochleistungsbetonen andere spezielle Nutzungsanforderungen, wie z. B. der Widerstand gegen chemische Beanspruchung im Fokus stehen [156, 157].

Zur Erzielung einer hohen Festigkeit, bei einer gleichzeitig guten Verarbeitbarkeit, sind bei der Herstellung hochfester Betone weitere Zusatzstoffe und -mittel zu verwenden. Aus diesem Grund wird hochfester Beton auch als 5-Komponenten-Werkstoff bezeichnet [102]. Zur Herstellung von hochfestem Beton können Standardzemente höherer Festigkeit eingesetzt werden [156]. Die verwendete Gesteinskörnung muss aufgrund der gewünschten hohen Festigkeit entsprechende Eigen-

schaften aufweisen. Eingesetzt werden gebrochene Gesteinskörnungen, z. B. Basalt [102, 157], Diabar und Mylaphyrkörnung [157] sowie Gabbro- oder Granitsplitt [102]. Um die hohen gewünschten Druckfestigkeiten erreichen zu können, ist es notwendig den Anteil von Kapillarporen, die durch die Wasserzugabe entstehen, im Festbeton zu reduzieren. Bei der Herstellung wird daher mit geringen Wasser-Zement-Werten im Bereich von $w/z = 0,25$ bis 35 gearbeitet [156]. Um eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, ist der Einsatz von Zusatzmitteln in Form von Betonverflüssigern bzw. Fließmitteln notwendig.

Aufgrund des geringen Wasseranteils können nicht alle Zementpartikel hydratisieren. Diese Partikel wirken im Beton wie eine Mikrokörnung, die die vorhandenen Poren füllt, wodurch die Dichte und die Festigkeit des Betons ansteigen [80]. In ähnlicher Weise wirkt das bei hochfesten Betonen eingesetzte Zusatzmittel Mikrosilikat, dessen Größe der Partikel ca. dreißig- bis hundertmal kleiner ist als die Partikelgröße von Zement [102]. Diese Partikel sind demnach in der Lage, die verbliebenen Freiräume zwischen den Zementpartikeln zu füllen, wodurch die Verbindung zwischen der Gesteinskörnung und dem Zementstein weiter gesteigert wird. Zudem werden durch das Mikrosilika puzzolanische Reaktionen verursacht, die ebenfalls zu einer Festigkeitssteigerung führen [102, 156, 157]. Aufgrund der Lungengängigkeit der Mikrosilikapartikel sollte dieses nur als Suspension (engl. slurry), d.h. als Gemisch aus Wasser und Mikrosilikastaub verarbeitet werden. Erst durch den Einsatz von Mikrosilika können Druckfestigkeitswerte von $f_{ck,cube} > 100 \text{ N/mm}^2$ erreicht werden [156]. Die hohen Festigkeitswerte hochfester Betone spiegeln sich in dem Bruchbild von Betonprobenkörpern wider. Während bei normalfesten Betonen die Bruchfläche um die Gesteinskörnung herum verläuft, kann diese bei hochfesten Betonen auch durch die Gesteinskörnung hindurch verlaufen, da hier die Zementsteinphase ähnliche Festigkeitswerte wie die Gesteinskörnung aufweisen kann [80, 156].

Die Anwendungen von hochfesten und ultrahochfesten Betonen sind aufgrund wirtschaftlicher Faktoren bislang auf wenige hochbelastete Konstruktionselemente beschränkt. So finden sich Anwendungen bei Hochhausfundamenten, bei denen die notwendigen Wandstärken und -dicken durch die Auswahl des Betons gering gehalten werden konnten [102, 156]. Im Verbund mit den in Kapitel 2.1.2 genannten in der Entwicklung befindlichen Bewehrungselementen aus Kohlenstofffasern kann hochfester Beton wirtschaftlich eingesetzt werden. Dies begründet sich darin, dass aufgrund der geringeren notwendigen Betonüberdeckungen sowie der besseren mechanischen Eigenschaften von hochfestem Beton, das eingesetzte Betonvolumen reduziert werden kann, weshalb zukünftig mit einem größeren Einsatz dieser Betongüte zu rechnen ist.

2.2 Diamant als Schneidstoff

Diamant findet aufgrund seiner herausragenden Eigenschaften, siehe Kapitel 2.2.1, in vielfältigen technischen Produkten Anwendung [114, 168, 203]. Nach Schwarz ist bezogen auf die eingesetzte Menge der Einsatz von Diamant als Hart- oder Schneidstoff das wichtigste Anwendungsgebiet [168]. In der Zerspanungstechnik wird Diamant aufgrund seiner hohen Härte als Schneidstoff sowohl bei Verfahren mit geometrisch bestimmter als auch unbestimmter Schneide eingesetzt. Einsatz findet Diamant dabei überall dort, wo die herausragenden Eigenschaften

des Diamanten zu einer höheren Produktivität führen, wodurch die im Vergleich zu anderen Schneidstoffen höheren Kosten kompensiert werden, sodass eine wirtschaftlichere Fertigung möglich ist [203]. Diamant wird zusammen mit kubischem Bornitrid (CBN) zu den hochharten Schneidstoffen gezählt [45, 99].

Unter der umgangssprachlich verwendeten Begrifflichkeit „Diamantwerkzeug“ können eine Vielzahl von Werkzeugen zusammengefasst werden [103, 170]. Gemein ist dabei allen Werkzeugen, sowohl bei Verfahren mit geometrisch bestimmter als auch unbestimmter Schneide, dass der Schneidteil aus Diamant oder Diamantpartikeln besteht. Einen Versuch der Klassifizierung von Diamantwerkzeugen hat *Konstanty* vorgenommen und dabei fünf Klassen definiert [103]:

- Durch Gasphasenabscheidung (engl. chemical vapour deposition, CVD) hergestellte Diamantwerkzeuge
- Polykristalline Diamantwerkzeuge (PKD)
- Einkristall Diamantwerkzeuge
- In einer Bindungsmatrix vorliegende Diamantschleifkörnung
- Ungebundene, lose Diamantschleifkörnung

Nachfolgend soll die Betrachtung von Diamant als Schneidstoff auf dessen Einsatz in Werkzeugen für die Bearbeitung von Beton und Gestein beschränkt bleiben. Der Hauptfokus liegt dabei auf Diamantwerkzeugen, die nach *Konstanty* eine Diamantschleifkörnung in einer Bindungsmatrix aufweisen. Diese Werkzeuge werden auch als diamantimpregnierte Werkzeuge bezeichnet, siehe Kapitel 2.3.

2.2.1 Grundlagen und Eigenschaften

Die besonderen Eigenschaften von Diamant begründen sich in seinem chemischen Aufbau. Diamant besteht aus reinem Kohlenstoff (C), der in der Natur in drei verschiedenen Modifikationen vorkommen kann, siehe Abbildung 2.2. Diamant ist somit eine allotrope Form des Kohlenstoffs. Im Bereich der spanenden Fertigung sind die beiden kristallinen Formen des Kohlenstoffs Graphit und Diamant relevant [110, 191]. Graphit ist unter Normalbedingungen die stabile Modifikation des Kohlenstoffs, während Diamant eine metastabile Phase ist [168, 203]. Darin ist auch begründet, warum Diamant in der Natur selten vorkommt [114]. Neben den in Abbildung 2.2 genannten Modifikationen sind noch weitere Kohlenstoffmodifikationen bekannt, z. B. die Fullerene, bei denen sich mehrere Kohlenstoffatome zu hohlen geschlossenen Molekülen anordnen [66, 110].

Der Grund für das Vorhandensein sowohl der stabilen Phase Graphit als auch der metastabilen Phase Diamant unter Normalbedingungen ist in einer hohen Aktivierungs-, genauer Energiebarriere zwischen den beiden Phasen begründet. Diese führt dazu, dass sich Graphit erst bei sehr hohen Drücken und Temperaturen in Diamant umwandelt und gleichzeitig Diamant erst bei Temperaturen von $T \approx 2000^\circ\text{C}$ graphitisiert [114]. Dieser Wert gilt allerdings nur für das Einstoffsystem des Kohlenstoffs, siehe Abbildung 2.3 a). In der Anwendung von Diamantwerkzeugen kann z. B. beim Kontakt von Diamant mit eisenhaltigen Materialien schon bei $T = 300^\circ\text{C}$ eine katalytische Graphitisierung des Diamanten eintreten [191]. An Luft verbrennt Diamant zu CO_2 bei Temperaturen von $T > 600^\circ\text{C}$ [114].

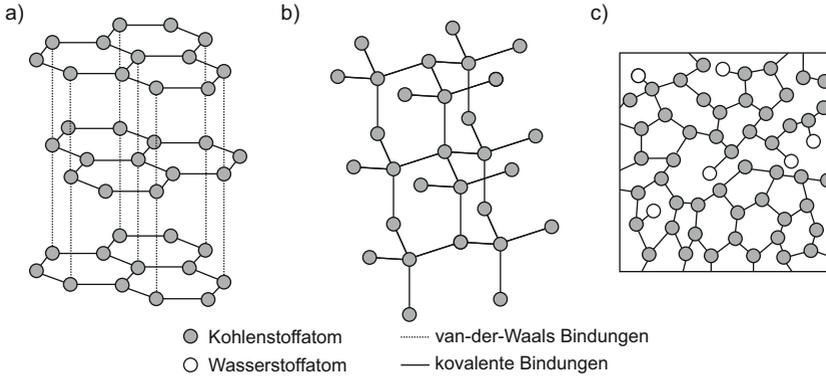


Abbildung 2.2: Mögliche Modifikationen von reinem Kohlenstoff und deren Aufbau nach [191] a) Graphit, b) Diamant, c) Amorpher Kohlenstoff mit vereinzelt Wasserstoffatomen

Obwohl Graphit wie auch Diamant aus reinem Kohlenstoff aufgebaut sind, weisen beide unterschiedliche Eigenschaften auf. Diamant ist das härteste bekannte Material, während Graphit z. B. als Festschmierstoff eingesetzt werden kann. Diese unterschiedlichen Eigenschaften sind in dem atomaren Aufbau begründet, siehe Abbildung 2.2. Während in der Elementarzelle des Graphits ein Kohlenstoffatom mit drei weiteren Kohlenstoffatomen über kovalente Bindungen direkt verbunden ist (sp^2 -Hybridisierung), weist ein Kohlenstoffatom in der Elementarzelle des Diamanten eine kovalente Bindung mit vier weiteren Kohlenstoffatomen auf (sp^3 -Hybridisierung) [161, 191]. Die fünf Kohlenstoffatome der Diamantstruktur bilden einen Tetraeder mit relativ geringem Abstand der Atome zueinander, siehe Abbildung 2.2. Aufgrund der geringen Atomabstände liegen große Bindungskräfte vor. Dagegen liegen im Graphit die vier Kohlenstoffatome in einer Ebene. Dies führt zu einem mehrlagigen Aufbau des Graphits, wobei die einzelnen Lagen durch relativ schwache van-der-Waals-Kräfte zusammengehalten werden und leicht gegeneinander verschoben werden können, während in den Lagen selbst im Vergleich große Bindungskräfte wirken [114, 161].

Nach *Ley* und *Schwarz* lassen sich fast alle herausragenden Eigenschaften von Diamant auf dessen chemischen Aufbau zurückführen [114, 168]. Die Bindungsenergie zwischen zwei Kohlenstoffatomen ist per se sehr hoch. Zusätzlich ist der Abstand der Atome im Diamantgitter sehr gering, wodurch ein Trennen der Atome erschwert wird. Durch die kurzen Bindungslängen zwischen den einzelnen Atomen und die dreidimensionale Verknüpfung liegt bei Diamant die höchste bekannte Atomdichte vor [114, 168]. Dies führt zu einer hohen Bindungsenergie, mit der eine hohe Härte, chemische Resistenz und Wärmeleitfähigkeit einhergehen [114]. Diamant ist ca. 1,5 mal so hart wie kubisches Bornitrid, das zweithärteste bekannte Material [99]. Die Eigenschaften von monokristallinen Diamanten sind richtungsabhängig und damit anisotrop [170]. In Abhängigkeit der Belastungsrichtung und Ebene variiert der Härtewert von Diamant bis um den Faktor 10. Aus diesem Grund ist es überhaupt möglich, Diamant durch andere Diamanten spanend zu bearbeiten, wobei genaue Kenntnisse über die

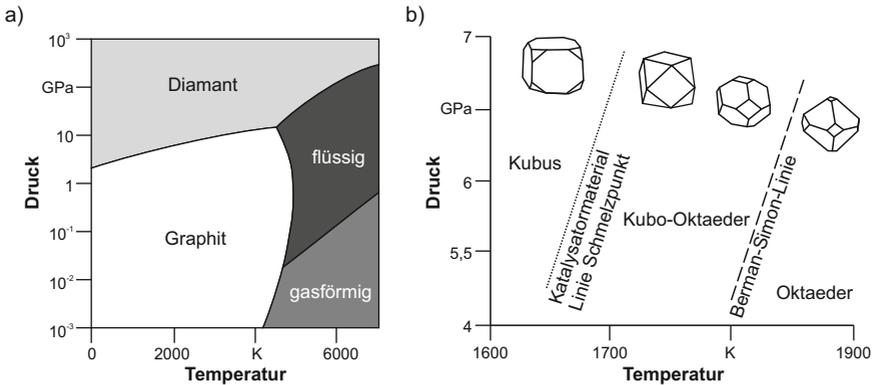


Abbildung 2.3: a) Ausschnitt des Phasendiagramms von reinem Kohlenstoff nach [168], b) Diamantsynthese - Steuerung der Diamantform durch die Synthesetemperatur und den Synthesedruck nach [25]

richtungsabhängigen Eigenschaften in den verschiedenen Ebenen vorliegen müssen [203, 210, 211]. So konnte *Hütt* bei Ritzversuchen mit einzelnen Diamanten an Naturstein feststellen, dass bei gleicher Form, aber anderer kristallographischer Ausrichtung, das Verschleißverhalten unterschiedlich ist [91].

2.2.2 Herstellung

Die natürliche Entstehung von Diamant benötigt, neben entsprechenden Ausgangsmaterialien, Hochdruck- und Hochtemperaturbedingungen [168]. Diese Gegebenheiten finden sich in vulkanischen Regionen und in Tiefen von ca. 160 km [83, 132]. Unter diesen Bedingungen sind Diamanten vor bis zu 3 Milliarden Jahren entstanden, bevor sie durch Vulkanausbrüche oder die Verschiebung von Erdplatten in die oberflächennahen Schichten, bis 1 km Tiefe, transportiert wurden [83, 203]. Primäre Lagerstätten von Naturdiamanten sind daher in der Nähe von Durchschusskaminen lange zurückliegender Vulkanausbrüche, wobei die Diamanten zumeist im sogenannten Kimberlitgestein vorliegen [83, 140, 168]. Sekundäre Lagerstätten entstanden durch die Freilegung und Erosion diamantführender Schichten, z. B. durch Flüsse, die die Diamanten anschließend an anderen Stellen, sogenannten Seifen, anschwemmten [132, 168]. Bereits im 19. Jahrhundert gab es viele Versuche und Ansätze, Diamant durch künstliche Prozesse herzustellen, wobei eine Vielzahl der Ansätze darauf beruhte, die natürlichen Entstehungsbedingungen von Diamant nachzuahmen [24, 140]. Die künstliche Synthese scheiterte aber zumeist an der noch nicht möglichen technischen Realisierbarkeit der notwendigen Drücke bei gleichzeitig hohen Temperaturen.

Für die technische Herstellung künstlicher Diamanten stehen heutzutage im industriellen Maßstab zwei Verfahren zur Verfügung: zum einen die Hochdruck-Hochtemperatur-Verfahren (eng. high pressure/high temperature, HPHT), bei denen eine Nachahmung des natürlichen Entstehungsprozesses von Diamanten erfolgt, und zum anderen Verfahren, bei denen Diamant aus einer Gasphase auf einem Substrat abgeschieden wird (engl. chemical vapour deposition, CVD). Nach

Palyanov et al. ist, bezogen auf das produzierte Gesamtvolumen, der Anteil der durch CVD-Verfahren hergestellten Diamanten deutlicher geringer als der durch HPHT-Verfahren [148].

HPHT-Verfahren

Bei der Herstellung von Diamant durch HPHT-Verfahren werden die natürlichen Entstehungsbedingungen von Diamant nachgebildet. Hierzu werden speziell entwickelte Hochdruckpressen eingesetzt, die Pressdrücke von $p > 5 \text{ GPa}$ bei gleichzeitig hohen Temperaturen von $T > 1300 \text{ C}^\circ$ realisieren können. Zum Erreichen dieser Prozessparameter werden verschiedene Pressenkonzepte eingesetzt [148], wie z. B. die in Abbildung 2.4 schematisch dargestellten Band-/Gürtelpressen a) und Würfelpressen b) [132, 176]. Zudem kommen Toroid-Pressen und BARS-Pressen zum Einsatz [148].

Als Kohlenstoffquelle wird bei HPHT-Verfahren bevorzugt Graphit verwendet, das zusammen mit Katalysatormaterialien, z. B. Eisen, Nickel oder Cobalt, in einer Presszelle den genannten hohen Drücken und Temperaturen ausgesetzt wird [50, 147, 148, 168, 176, 177]. Durch die Katalysatormaterialien werden die notwendigen Prozessdrücke und -temperaturen abgesenkt. Zudem wird hierdurch das Diamantwachstum beschleunigt. Bei der Diamantsynthese wird durch die hohen Temperaturen das metallische Katalysatormaterial aufgeschmolzen und zur sogenannten aktiven Zone [168]. In dieser Metallschmelze transportiert das Katalysatormaterial die Kohlenstoffatome vom Graphit zu den sich bildenden Kristallisationspunkten von Diamantkeimen, die sich in „kälteren“ Bereichen des Temperaturfeldes der aktiven Zone befinden [19, 50, 161]. Dort lagern sich die Kohlenstoffatome an die vorhandene Kristallstruktur der Diamantkeime an und führen zu einem Anwachsen des Diamanten [161]. Die Kristallisationspunkte können spontan entstehen oder werden bereits vor der Synthese dem Graphit und dem Katalysatormaterial hinzugefügt. Die zugegebenen Kristallisationspunkte werden als sogenannte Impfkeime bezeichnet. Impfkeime sind Diamantpartikel mit Abmessungen im Nanometerbereich, durch die es möglich ist, die Entstehung und das Wachstum der Diamanten zu beschleunigen und gleichzeitig die Kristallform und -struktur gezielt einzustellen [176].

Durch HPHT-Verfahren werden einzelne monokristalline Diamanten (MKD) in verschiedenen Größen hergestellt. Die Syntheszeit, z. B. für Diamanten der Größe $d_k = 0,3$ bis $0,6 \text{ mm}$, beträgt $t \approx 30 \text{ min}$ [177]. Durch die Änderung der Synthesetemperaturen und -drücke, siehe Abbildung 2.3, sowie den Einsatz von Impfkristallen können die Größe, die Morphologie und die Qualität der Diamanten eingestellt werden. In [50] wird zudem gezeigt, dass farblose Diamanten, d. h. Diamanten in Schmuckqualität, ohne sichtbare Einschlüsse hergestellt werden können. Anzumerken ist dabei, dass nach *Sung* sehr hohe Anforderungen bzgl. der Einhaltung der Prozessparameter erforderlich sind, um Diamanten mit den gewünschten Eigenschaften erzeugen zu können. Aus diesem Grund seien bislang nur wenige Firmen in der Lage, hochwertige Diamantkörnungen in großer Stückzahl herzustellen [177].

Die erste Publikation zur erfolgreichen Synthese von Diamanten erfolgte im Jahr 1955 von *Bundy et al.*, Fa. General Electric, Vereinigte Staaten von Amerika (USA) [4, 24]. *Bundy et al.* untersuchten dabei bereits den Einsatz von Impfkristallen und konnten feststellen, dass eine Diamantsynthese auch durch eine spon-

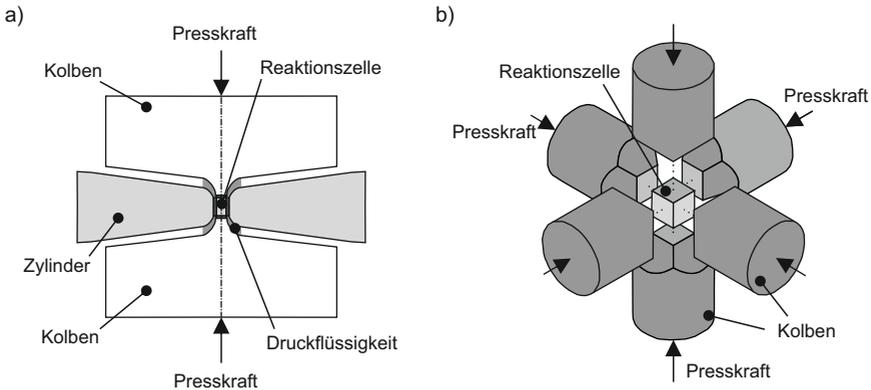


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau der zur Diamantsynthese im HPHT-Verfahren eingesetzten Pressen a) Band-/Gürtelpresse, b) Würfelpresse nach [19, 50, 168]

tane Keimbildung und ein spontanes Wachstum möglich ist [24]. 1959 konnte die gleiche Forschergruppe zeigen, dass z. B. durch die Wahl der Synthesetemperatur die entstehenden Kristallformen beeinflusst werden können [19]. Eingesetzt wurde bei diesen Versuchen eine Band-/Gürtelpresse. Fast zeitgleich zur Bekanntgabe der ersten erfolgreichen Synthese von Diamanten durch *Bundy et al.* wurde in Schweden von der Firma Allmänna Svenska Elektriska Aktibolaget ebenfalls die Synthese von Diamanten vermeldet [4, 161]. Hierbei wurde eine Würfelpresse mit sechs Presskolben eingesetzt [161].

Seit der ersten erfolgreichen Diamantsynthese im HPHT-Verfahren erfolgten mehrere Entwicklungsstufen hinsichtlich der erzielbaren Quantität und Qualität [176, 177]. Bei den ersten Diamantsynthesen wurde Graphit- und Katalysatormaterial übereinander geschichtet. Aufgrund der spontanen Entstehungsprozesse von Kristallisationspunkten wurde daher aber nur ein kleiner Teil der Presszellen ausgenutzt. 1984 wurde bei der Fa. Ernst Winter&Sohn GmbH in Deutschland der Einsatz von Impfkristallen optimiert, indem Graphit, Katalysatormaterialien und Impfkristalle miteinander vermengt werden. Hierdurch konnte eine bessere Verteilung der Materialien und damit der Kristallisationspunkte erreicht werden, wodurch eine bessere Ausnutzung der Presszelle erzielt wird. In der Folge wurde die Produktionsmenge an Diamanten sowie deren Partikelgröße größer [176, 177]. 20 Jahre später wurde von *Sung* die definierte Positionierung von Impfkristallen in dünnen Schichten aus Graphit- und Katalysatormaterialien erprobt. Hierdurch war es möglich, den seitlichen Abstand zwischen zwei Diamanten festzulegen, wodurch die Presszelle, in Abhängigkeit der gewünschten Partikelgröße, optimal ausgenutzt werden konnte. Zudem gelang es *Sung* Impfkristalle mit bestimmten Kristallstrukturen einzusetzen, sodass dabei neben der Einstellung der Partikelgröße die Kristallform der erzeugten Diamanten präzise eingestellt werden konnte [176, 177].

CVD-Verfahren

CVD-Verfahren sind die zweite technische Möglichkeit, künstlich Diamant herzustellen. Nach *Angus* kann die erste erfolgreiche Abscheidung von Diamant *William Eversole*, Fa. General Electric, USA im Jahre 1953 zugeschrieben werden [4]. Umfangreiche Arbeiten wurden zudem von einer russischen Forschergruppe um *Derjaguin* durchgeführt [48, 49]. Bei CVD-Verfahren wird Diamant aus einer Gasphase als Schicht auf einem Substrat abgeschieden. Das eingesetzte Gas ist dabei zumeist ein Gemisch aus Methan CH_4 und Wasserstoff H_2 [114, 148]. Der Volumenanteil des Methans am Gasgemisch, das als Kohlenstoffquelle dient, liegt zwischen $\sigma = 2$ bis 5 V-%. Das Gasgemisch wird bei Niederdruckbedingungen, $p = 1 \text{ hPa}$ bis 100 hPa , auf Temperaturen im Bereich von $T = 600$ bis 1600°C erhitzt [74, 114, 190], wodurch eine thermische Aktivierung der Gasphase erfolgt. Durch die Aktivierung des Gasgemisches werden reaktionsfreudige Wasserstoffradikale und in der Folge radikale Kohlenwasserstoffe erzeugt [114, 148]. Letztgenannte Moleküle schließen sich an die entstehende Diamantschicht an und führen somit zu einem Anwachsen der Schicht. Im Anschluss hieran finden noch weitere chemische Vorgänge statt, wobei auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen sei. Eine ausführliche Beschreibung der chemischen Vorgänge und theoretischen Überlegungen findet sich z. B. in [114]. Damit sich bei CVD-Verfahren überhaupt Diamantschichten bilden können, ist es notwendig, die Substratoberfläche mit Nanodiamantpartikeln zu impfen [114, 148, 190]. Diese Partikel dienen als Keim- bzw. Ausgangspunkt für das Wachstum der Diamantkristalle.

Eine Unterteilung der verschiedenen CVD-Verfahren kann in Abhängigkeit der Einbringungsart der notwendigen Energie zur Aktivierung der Gasphase erfolgen. Es gibt eine große Anzahl an CVD-Verfahren und Verfahrensarten, die z. B. in [167] beschrieben werden. Die wichtigsten Verfahren sind nach [114, 148, 167, 168] das „Hot-Filament-CVD“, das „Plasmastrahl-CVD“ und das „Mikrowellenfeld-CVD“. Beim „Hot-Filament-CVD“ wird eine wendelförmige Tantal- oder Wolframoberfläche auf $T = 2000^\circ\text{C}$ aufgeheizt. Beim „Plasma-CVD“, das auch „Plasmastrahl-CVD“ genannt wird, wird dagegen durch eine elektrische Spannung zusammen mit Gas ein Plasmastrahl erzeugt. Dieser Plasmastrahl wird beim „Mikrowellenfeld-CVD“ anstelle durch eine elektrische Spannung durch hochfrequente Mikrowellen erzeugt.

Durch CVD-Verfahren ist es möglich polykristalline, aber auch monokristalline Diamantschichten herzustellen [114, 191]. Anders als bei HPHT-Verfahren, bei denen einzelne monokristalline Partikel hergestellt werden, werden bei CVD-Verfahren im wesentlichen Diamantschichten hergestellt. Diese können bei hoher chemischer Reinheit relativ große laterale Abmessungen und Schichtdicken aufweisen [147]. Da sich die Kohlenstoffe an die Kristallstruktur der vorhandenen Nanodiamantpartikel anschließen, kann durch eine gezielte Ausrichtung der Nanopartikel die Richtung des Kristallwachstums und der Kristallorientierung beeinflusst werden. Zu unterscheiden ist bei den abgeschiedenen Diamantschichten zwischen Diamantdünn- und Diamantdickschichten. Diamantdünnschichten werden meist zur Verbesserung des Verschleißverhaltens des Endprodukts, z. B. Werkzeugen, eingesetzt und weisen eine Dicke von üblicherweise weniger als $s = 20 \mu\text{m}$ auf, wobei auch Schichtdicken bis $s = 40 \mu\text{m}$ möglich sind [191]. Diamantdickschichten haben dagegen Dicken von bis zu mehreren Millimetern. Diese Schichten werden in der Regel nach dem Beschichtungsprozess vom Substrat abgelöst und

als freistehende Diamantplatten weiterverarbeitet [190]. Diese Platten werden dann nicht mehr als CVD-Diamantschicht, sondern als CVD-Diamant bezeichnet [191]. Entsprechend hergestellte monokristalline CVD-Diamanten werden daher in Kurzform auch als CVD-MKD bezeichnet.

2.2.3 Klassifizierung von Diamantkörnern

Bei der Herstellung von synthetischen Diamanten durch HPHT-Verfahren wird in der Regel eine Bandbreite von unterschiedlichen Korngrößen und Kornqualitäten erzeugt. In Abhängigkeit der Diamantkorngröße kann zwischen sogenannter Schleif- oder Sägekörnung unterschieden werden [132]. Diese nicht genormte Unterscheidung beruht dabei auf der Diamantpartikelgröße. Die Sägekörnung umfasst große Diamantpartikel im Bereich $d_k = 20$ bis 50 mesh, was einer Korngröße von $d_k = 0,1$ bis 1 mm entspricht [159, 177]. Als Schleifkörnung werden dagegen Partikel bezeichnet, die kleiner als $d_k = 50$ mesh sind, was einer Korngröße von max. $d_k = 0,25$ mm entspricht [177].

Entsprechend der Eigenschaften der Diamantkörnung liegt in der Anwendung ein unterschiedliches Einsatzverhalten vor. Zur Beschreibung der Eigenschaften von Sägekörnungsprodukten, wie sie in diamantimprägnierten Werkzeugen für die Bearbeitung von Beton genutzt werden, sind als wesentliche Kenngrößen die Partikelgröße und die Partikelfestigkeit zu nennen. Während für die Schleifkörnungsprodukte nach *Sung* vornehmlich die Härte entscheidend ist, ist bei Sägekörnungsprodukten, die für die Zerspannung inhomogener Werkstoffe wie Beton oder Gestein eingesetzt werden, die Zähigkeit, genauer gesagt die Fähigkeit eine hohe Anzahl an impulsartigen Belastungen zu ertragen, ausschlaggebend [177]. Für die optimierte Entwicklung neuer diamantimprägnierter Werkzeuge sind daher entsprechend detaillierte Kenntnisse der Eigenschaften einer Diamantkörnung notwendig, um diese passend zur Arbeitsaufgabe bzw. dem Einsatzgebiet auswählen zu können [76, 192]. Insbesondere durch die Entwicklung von Maschinen, die die wirtschaftliche Produktion von diamantimprägnierten Segmenten mit gezielt positionierten Diamanten erlaubt, kommt der Klassifizierung und Charakterisierung der Diamanten eine steigende Bedeutung zu. Da bei diesen Werkzeugen die Position bekannt ist, können Abhängigkeiten zwischen dem Einsatzverhalten eines Werkzeugs und den Eigenschaften einer Diamantkörnung einfacher dargestellt werden. Daneben dient die Klassifizierung der Diamantkörnung der Warenkontrolle und kann als Beurteilungsgrundlage für den Vergleich unterschiedlicher Hersteller von synthetischen Diamanten herangezogen werden [76, 132, 192].

Die übliche Methode zur Klassifizierung einer Schleifmittelkörnung, und damit auch Diamantkörnung, ist das Sieben. Beim Sieben wird eine Einteilung in Abhängigkeit einer maximalen und minimalen Partikelgröße, die mit der Maschenweite der eingesetzten Siebe korrespondiert, erreicht. Diese Methode findet sich in unterschiedlichen Normen wieder, z. B. in der ISO Norm *Überprüfung der Korngrößen von Diamant oder kubischem Bornitrid* [60]. Daneben ist die Größeneinteilung nach „US-mesh-size“, kurz „mesh“, insbesondere für grobe Schleifkörnungen wie sie bei der Bearbeitung von Gestein und Beton eingesetzt werden, etabliert. Beiden Normen ist gleich, dass die Körnungsgröße auf die Angabe eines Wertes reduziert wird und keine genauen Kenntnisse über die tatsächliche Verteilung der Korngrößen innerhalb der gesiebten Kornfraktion vorliegen [70, 118, 133].

Aus diesem Grund ist die zusätzliche Angabe der Körnungsgröße in „particles per carat“, kurz „PPC“, d. h. wie viele Diamantkörner pro einem Karat vorliegen, ein genauerer Kennwert [70, 76, 118]. Durch die Angabe des PPC-Werts kann sowohl die Anzahl an Diamantpartikeln innerhalb eines Schleifsegmentvolumens als auch an der Schleifsegmentoberfläche bestimmt werden. Zudem sind damit die Schwankungen der Prozessergebnisse kleiner, da die Anzahl der auf der Werkzeugsegmentoberfläche vorliegenden Diamanten in einem kleineren Bereich streut [70].

Die detailliertesten Kenntnisse über die Diamantmorphologie können durch den Einsatz von Bildanalyse-Systemen gewonnen werden [76, 132, 133]. Hierdurch ist es möglich, Erkenntnisse über die Größen- und Formverteilung einer Diamantkörnung zu erlangen. Bei diesen Systemen wird jedes einzelne Diamantkorn einer Versuchsprobe an einer Kamera vorbeigeführt, um ein zweidimensionales Bild des Diamantpartikels aufzunehmen. Mithilfe einer entsprechenden Software werden die aufgenommenen Bilder, z. B. als Graustufenbild verarbeitet, sodass innerhalb einer kurzen Zeit automatisiert eine relativ große Anzahl an Diamantpartikeln erfasst und vermessen werden kann [117, 192]. Dabei ist es möglich, unterschiedliche Kennwerte zur Beschreibung der Diamantkörnung heranzuziehen. Als Beispiele hierfür seien die Kompaktheit oder die Elliptizität genannt [76].

Bei der Herstellung von synthetischen Diamanten verbleiben Einschlüsse der Katalysatormaterialien, wie z. B. Stickstoff, in den Diamantpartikeln. Der Umfang, die Art und die Verteilung der Einschlüsse haben einen direkten Einfluss auf das Bruch- und Einsatzverhalten der Diamantpartikel [133, 143, 192]. Die Einschlüsse wirken zum einen als Kerbe, zum anderen können insbesondere bei erhöhten Temperaturen, aber auch schon bei Raumtemperatur, chemische Reaktionen zwischen den Einschlüssen und dem umgebenden Diamanten ablaufen, die eine weitere Schwächung der Diamantstruktur verursachen [133]. Der Umfang der Einschlüsse in den Diamantpartikeln wirkt sich somit direkt auf die Belastbarkeit der Diamantkörnung aus. Weisen die Einschlüsse oder Teile der Einschlüsse magnetische Eigenschaften auf, ist es möglich, durch die Messung der magnetischen Suszeptibilität (Empfindlichkeit) Erkenntnisse über den Umfang der Einschlüsse zu erhalten.

Neben der Diamantpartikelform und -größe geben die Kennwerte „Schlagfestigkeitswert“, auch bekannt als „Bruchfestigkeit“ oder „dynamische Festigkeit“, und die „Bruchspannung“ Auskünfte über die Qualität einer Diamantkörnung. Der Schlagfestigkeitswert, engl. toughness index (TI), wird im Rahmen eines „Friability Tests“ gewonnen [45, 76, 132, 133, 192, 208]. Bei diesem wird eine Testkapsel mit einer Masse von $m = 2$ ct Diamantkörnung und einer Stahlkugel gefüllt. Anschließend wird diese Kapsel im Testgerät bei einer vorgegebenen Frequenz, Amplitude und Zyklenanzahl in Schwingung versetzt. Hierbei werden die Diamanten innerhalb der Kapsel teilweise zerstört. Nach dem Test erfolgt ein Sieben der Diamantkörnung, um den Anteil der nun vorhandenen Kornfraktionen bzw. zerstörten Diamanten bestimmen zu können. Je höher dabei der Anteil der unzerstörten Diamanten ist, desto höher ist der TI-Wert und damit die Qualität der Diamantkörnung. Da bei diesem Testverfahren die Diamantkörnung einer zyklischen schlagenden Belastung ausgesetzt ist, werden dieser Testmethode anwendungsnahe Ergebnisse zugesprochen [208]. Eine Erweiterung dieser Testmethodik stellt die vorherige thermische Behandlung der Diamanten dar [192].

Durch die eintretenden chemischen Reaktionen zwischen dem Diamanten und den vorhandenen Einschlüssen aufgrund der erhöhten Temperatur wird eine Schwächung der um den Einschluss vorhandenen Diamantstruktur verursacht. Ergebnis dieser Untersuchung ist die thermische Schlagfestigkeit, engl. thermal toughness index (TTI).

Erkenntnisse über die Verteilung der mechanischen Eigenschaften innerhalb einer Diamantkörnung können bei der Bestimmung der Bruchfestigkeit gewonnen werden [76, 117, 132, 133, 192]. Hierbei wird ein einzelnes Diamantkorn zwischen zwei Einsätze aus polykristallinem Diamant (PKD) eines Prüfstempels geführt und mit kontinuierlich ansteigender Kraft belastet, bis es zu einem Brechen des Partikels kommt. Die Kraft, die beim Auftreten des ersten Bruchs detektiert wird, ist die Kompressionsbruchkraft, engl. compressive fracture force (CFF). Dieser erste Bruch muss nicht mit der vollständigen Zerstörung des Partikels einhergehen. Eine ähnliche Testmethode, für die ein chinesisches Patent (No.ZL97203318.X) vorliegt, wird von *Liu, Zhang* und *Sun* beschrieben [119]. Da die Festigkeit eines Diamantpartikels nicht nur von seinem chemischen Aufbau bestimmt, sondern auch durch die Partikelform beeinflusst wird, ist es notwendig, über beide Kenngrößen entsprechende Kenntnisse zu besitzen. So besitzen Partikel mit einer kuboktaedischen Form eine höhere mechanische Festigkeit als Partikel mit einer länglichen Form. Quantifiziert wurde dies in [133]. Hier wird gezeigt, dass bei einer kompakteren Partikelform höhere Werte der Schlagfestigkeit (TI) vorliegen.

2.3 Diamantimprägnierte Werkzeuge

Die in dieser Arbeit untersuchten Werkzeuge, die beim Diamantkernbohren von Beton eingesetzt werden, bestehen aus einer metallischen Bindungsmatrix und darin stochastisch verteilten Diamanten. Eine metallische Bindung kann durch Sinter- oder durch Galvanikverfahren realisiert werden. Die Werkzeuge, die im Bereich der Gesteins- und Betonbearbeitung eingesetzt werden, werden mehrheitlich durch Sinterverfahren hergestellt. Aufgrund der stochastischen Verteilung der Diamanten im Bindungsmatrixvolumen hat sich für diese Werkzeuge die nicht genormte Begrifflichkeit „diamantimprägniert“ etabliert, deren Ursprung wahrscheinlich auf die englische Bezeichnung „diamond impregnated“, also mit „Diamant durchsetzt“, zurückzuführen ist.

Die Bohr- und Sägewerkzeuge zur Bearbeitung von Naturstein und Beton weisen in der Regel einen segmentierten Aufbau auf. Anders als z. B. bei einer Schleifscheibe für die Metallbearbeitung, bei der auf dem gesamten Umfang ein Schleifbelag vorliegt, sind bei einem segmentierten Aufbau mehrere einzelne Segmente auf dem Umfang aufgebracht. Der Raum zwischen den Segmenten dient zur Verbesserung der Zuführung des eingesetzten Kühlschmierstoffs. Beispiele für den Einsatz von Schleifwerkzeugen mit einem segmentierten Schleifbelag finden sich in [10, 187].

2.3.1 Herstellungsroutinen

Die Ausgangsmaterialien zur Herstellung diamantimprägnierter Werkzeuge bzw. Segmente sind verschiedene pulverförmige Metalle sowie Diamantkörnungen. Die Verarbeitung dieser Materialien erfolgt daher durch pulvermetallurgische Ferti-

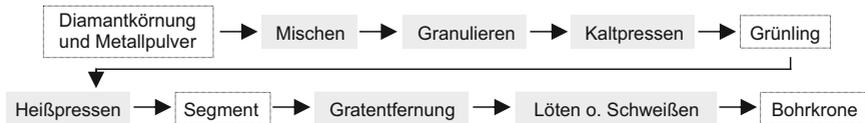


Abbildung 2.5: Exemplarische Herstellungsroutine von diamantimprägnierten Bohrwerkzeugen nach [65, 105]

gungsverfahren. Abhängig von den gewünschten Eigenschaften haben sich unterschiedliche Herstellungsroutinen und -abfolgen etabliert [67, 105, 108]. Beispielhaft sei die klassische Abfolge zur Herstellung von Segmenten für Diamantkernbohrwerkzeuge in Abbildung 2.5 aufgezeigt. Den ersten Schritt stellt das Mischen der Metallpulver und der Diamanten dar. Dabei ist eine ausreichend lange Mischzeit vorzusehen, um eine homogene Durchmischung zu erzielen. Zur Verbesserung der Weiterverarbeitung kann nach diesem ersten Schritt ein Granulieren erfolgen. Dabei werden beim Mischen zusätzliche Mittel wie z. B. Klebstoffe, Schmierstoffe oder Alkohole hinzugefügt, sodass eine Agglomeration des Pulvers und der Diamanten zu größeren zusammenhängenden Partikeln erfolgt. Nach dem Mischen erfolgt das Verpressen des Pulvers zu sogenannten Grünlingen in einer Kaltpresse. In diesem Zustand besteht nur ein geringer mechanischer Zusammenhalt des Grünlingsegments. Erst durch das Sintern erhalten die Segmente die endgültige Festigkeit und Form. Das Sintern kann in z. B. Durchlauföfen ohne Druckbeaufschlagung oder in Heißpressen erfolgen. In Heißpressen werden die Segmente hohen Temperaturen und gleichzeitig einer Druckbeaufschlagung ausgesetzt, wodurch eine höhere Kompaktierung und Dichte der Segmente in Vergleich zu Durchlauföfen erzielt wird. Prinzipiell können die Segmente in diesem Zustand bereits für die Zerspanung eingesetzt werden. Es kann sich aber auch noch eine Nachbearbeitung anschließen, bei der die durch das Heißpressen entstandenen Grate abgetragen werden. Die diamantimprägnierten Segmente werden durch Löten oder Laserschweißen am Grundkörper des Werkzeugs, also dem Bohrrohr, befestigt. Um das Laserschweißen einsetzen zu können ist es notwendig, eine diamantfreie schweißbare Fußzone des Segments vorzusehen. Vor dem erstmaligen Einsatz der Werkzeuge erfolgt ein initiales Abrichten, wodurch die erste Diamantlage der Segmente freigelegt wird.

Neben den Verfahren in der vorgestellten Herstellungsroutine finden sich weitere, die zur Herstellung diamantimprägnierter Werkzeuge genutzt werden können. In der industriellen Anwendung findet sich z. B. das Sinterschmieden, bei dem die Grünlinge in einem Hub gleichzeitig mit hohem Druck und Temperaturen beaufschlagt werden, wodurch im Vergleich zum konventionellen Sintern deutlich kürzere Taktzeiten bei einer geringeren Porosität möglich sind [29, 162]. Von *Wallmann* und *Glatzel* wurde ein lasergestützter Pulverbeschichtungsprozess, ähnlichem dem Auftragsschweißen, untersucht, um Trennschleifscheiben herstellen zu können [193, 194]. Erforscht wurden zudem von *Tillmann et al.* thermische Spritzverfahren zum Aufbringen von diamantimprägnierten Schichten [134, 182, 183]. Weitere Herstellungsverfahren und -routinen werden unter anderem beschrieben in [67, 103, 105, 108, 111, 134].

Diamantimprägnierte Segmente, die im Rahmen der vorgestellten pulvermetallurgischen Herstellungsroutine erzeugt werden, weisen eine stochastische Verteilung

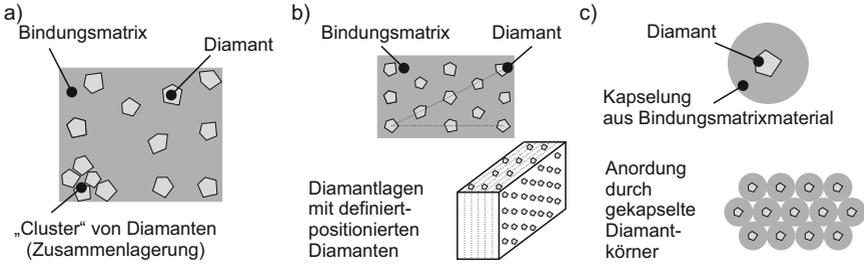


Abbildung 2.6: a) Stochastische Verteilung der Diamantkörnung, b) Mehrlagiger Segmentaufbau mit definiert gesetzten Diamanten nach [107], c) Gekapselte Diamanten als Möglichkeit der definierten Positionierung nach [69]

der Diamanten innerhalb des Segmentvolumens auf, siehe Abbildung 2.6 a). Daneben ist seit mehreren Jahren der Einsatz von diamantimprägnierten Segmenten etabliert, bei denen sich die Diamantkörner an definierten Positionen innerhalb des Segmentvolumens befinden, vergleiche Abbildung 2.6 a) und b). Für die Positionierung der Diamanten sind dabei aufwendige Maschinenkonzepte notwendig. Dabei werden die Segmente in mehreren Lagen aufgebaut, in denen die Position der Diamantkörner durch den abwechselnden Einsatz mehrerer Lochmasken variiert werden kann [103, 175, 199]. Eine einfachere Umsetzung zur Erzielung gleichmäßiger Abstände der Diamantkörner in den Segmenten zueinander, ist eine Einkapselung der Diamanten durch eine relativ dicke Beschichtung aus einem Metallpulvergemisch [69, 107], siehe Abbildung 2.6 c). Dieses Metallpulvergemisch bildet auch die metallische Matrix des Segments und ist entsprechend präpariert, sodass sich diese Schicht bei der Verarbeitung nicht ablöst. Die eingekapselten Diamanten können ähnlich wie ein granuliertes Diamant-Metallpulver-Gemisch verarbeitet werden.

Durch die definierte Positionierung der Diamanten kann die Diamantkonzentration in den Segmenten reduziert werden, da eine ungleichmäßige Verteilung oder Zusammenlagerung von Diamantkörnern verhindert wird. Bei Schleifwerkzeugen mit gesetzten Körnern wird die Anzahl der Körner, die eine Materialtrennung generieren, sowie deren Überstandshöhe maximiert, wodurch sich in der Folge eine höhere Produktivität bzw. Zerspanungsrate ergibt [38, 39, 200]. *Denkena et al.* stellten bei Trennschleifversuchen fest, dass durch die gezielte Einstellung der Kornabstände die mechanischen Belastungen und der Umfang von Ädhäsion in Form von Stahlanhaftungen an den Diamantkörnern minimiert werden [41].

2.3.2 Werkzeuggestaltung

Die Eigenschaften von diamantimprägnierten Werkzeugen werden durch die verwendeten Bindungsmatrixmaterialien und die Diamantkörnung bestimmt [159]. Da die Werkzeuge ohne ein zwischenzeitliches Abrichten eingesetzt werden sollen und damit zu jedem Zeitpunkt eine ausreichende Überstandshöhe der auf der Wirkfläche vorhandenen Diamantkörner vorliegen muss, ist eine genaue Abstimmung der Bindungsmatrix- und Diamantkörnungseigenschaften notwendig.

Üblicherweise bestand in der Vergangenheit der größte Teil der Bindungsmatrix aus Cobalt, da Cobalt im Vergleich zu anderen Metallen eine gute Einbindung der Diamanten in der Bindungsmatrix ermöglicht und zudem ein gutes Verschleißverhalten aufweist. Die Eigenschaften einer Bindungsmatrix aus Cobalt kann zudem leicht durch die Zugabe weiterer Metalle oder Metalllegierungen an die entsprechenden Anforderungen angepasst werden [18, 31, 106]. Aufgrund des hohen Preises und der erheblichen Preisschwankungen (Volatilität) von Cobalt, sowie der krebserzeugenden Wirkung, insbesondere in der Verarbeitungsform als Pulver, ist es angestrebt den Anteil von Cobalt in der Bindungsmatrix deutlich zu reduzieren oder sogar vollständig durch andere Metalle zu ersetzen [145, 172, 181]. Aus diesen Gründen wurden in der Vergangenheit Untersuchungen zur Substitution von Cobalt durchgeführt [11, 18, 31, 85, 106]. Als Alternative zu Cobalt finden Eisenlegierungen und Bronzelegierungen Anwendung [111]. Als weitere Zugaben sind Bronzen, Nickel, Kupfer, Zinn, Wolfram und deren Legierungen sowie weitere Elemente wie z. B. Kohlenstoff oder Phosphor, zu nennen [11, 90, 108]. Die Korngröße der Pulver liegt dabei im Bereich von $d_k = 0,5$ bis $10 \mu\text{m}$ [111]. Durch die Zugabe von z. B. Wolframcarbid kann die Härte und damit die Verschleißbeständigkeit der Bindungsmatrix erhöht werden, während durch die Erhöhung der Anteile von Bronze die Verschleißbeständigkeit abnimmt. Neben der Veränderung der Bindungsmatrixzusammensetzung zur Beeinflussung des Einsatzverhaltens der Werkzeuge, werden auch gezielt Materialien der Bindungsmatrix hinzugefügt, um z. B. die Schmelztemperaturen abzusenken und damit in der Folge die Sintertemperaturen, wodurch die Produktionskosten verringert werden.

In Abstimmung mit den Eigenschaften der Bindungsmatrix sind entsprechende Diamantkörnungen auszuwählen. Synthetische Diamanten können in Abhängigkeit des Anwendungsfalls in verschiedenen Größen, Formen, Qualitäten und Konzentrationen eingesetzt werden. Eine Beschreibung der Eigenschaften und der Klassifizierungsmöglichkeiten für synthetische Diamantkörner findet sich in Kapitel 2.2.

Da Diamant chemisch inert ist [74, 114, 167], findet die Einbindung der Diamantkörnung in der Bindungsmatrix im Wesentlichen durch eine mechanische Verklammerung, also formschlüssige Verbindung, statt [18, 31]. Eine Verbesserung der Einbindung kann durch eine chemische Bindung zwischen Diamant und Metallmatrix erreicht werden, wodurch die sogenannten Kornhaltekräfte der Bindung steigen. Dies kann durch die Zugabe von Metallpulvern in die Bindungsmatrix erzielt werden, die eine Carbiddbildung an der Diamantoberfläche verursachen und somit zu einer chemischen Verbindung zwischen Diamant und Bindungsmatrix führen [108, 115, 158]. *Tillmann et al.* haben bei Versuchen zur Carbiddbildung zwischen Diamant und metallischen Bindungsmatrizen aus Chrom, Eisen, Cobalt, Nickel und Kupfer festgestellt, dass nur bei Chrom eine chemische Einbindung durch die Bildung von Carbiden auftritt [179]. Wird eine zu große Menge von carbiddbildenden Metallpulvern zugegeben, kann es zu einer Schädigung der Diamantkörner durch eine zu umfangreiche Carbiddbildung kommen. Aufgrund der genannten Schwierigkeiten besteht zur Verbesserung der Einbindung der Trend, anstatt durch Zugabe von carbiddbildenden Metallpulvern, beschichtete Diamantkörnungen zu verwenden. Hierbei werden durch die chemische Einbindung der Körner über die Beschichtung höhere Kornhaltekräfte erzielt [108, 151, 198, 207, 209]. Die Beschichtung der Diamantkörner erfolgt

z. B. durch Titan, Chrom oder Silizium [68, 111, 197]. Dabei liegen die Beschichtungsdicken im Bereich von $d_{\text{Schicht}} = 1 \mu\text{m}$ [198]. Neben der besseren Einbindung der Diamanten verhindert die Beschichtung eine direkte chemische Verbindung zwischen den Diamanten und der Bindungsmatrix, wodurch die Diamanten z. B. vor Graphitisierung geschützt sind und somit der Verschleiß reduziert wird [68, 151, 206]. Bei Bindungsmatrizen basierend auf Bronzelegierungen ist eine Beschichtung der Diamantkörner notwendig, da ohne eine Beschichtung keine ausreichenden Kornhaltekräfte allein aufgrund der mechanischen Verklammerung gegeben sind und ein frühzeitiges Ausbrechen der Diamanten stattfindet. Durch eine Beschichtung mit Nickel kann eine rauere Oberfläche erzeugt werden, die die Einbindung der Diamanten verbessert und damit die Kornhaltekräfte erhöht [111]. Die bessere Bindung zwischen metallischer Matrix und beschichteten Diamanten wird im Rahmen von Drei-Punkt-Biegeversuchen deutlich [151]. Bei Segmenten mit beschichteten Diamanten läuft die Bruchfläche teilweise durch einzelne Diamantpartikel, während bei unbeschichteten Diamanten die Bruchfläche um die Diamantpartikel herum verläuft [207].

Durch die Prozessführung und die gewählten Prozessparameter beim Sintern können die Eigenschaften der Werkzeuge beeinflusst werden [51, 158]. Durch hohe Temperaturen beim Sintern wird eine höhere Dichte und Kompaktheit der Segmente erzielt. Gleichzeitig kann jedoch eine Beschädigung der Diamanten verursacht werden [143, 180, 184]. Insbesondere, wenn carbidbildende Elemente wie Eisen, Nickel oder Wolfram vorliegen, können hohe Sintertemperaturen zu einer umfangreichen Graphitisierung und damit Schädigung der Diamanten führen. Neben der Sintertemperatur haben eine Vielzahl von weiteren Parametern Einfluss auf das Prozessergebnis. In unvollständiger Liste sind dies die Sinterzeit, die gewählten Aufheiz- und Abkühlphasen, die Umgebungsatmosphäre (Schutzgas oder Vakuum), die Presskraft u. a. [13, 162].

Produktionstechnisch bedingt weisen einfache diamantimprägnierte Segmente eine rechteckige Grundform auf, siehe Abbildung 2.7 a). In der Anwendung verwenden jedoch die seitlichen Kanten der Segmente aufgrund ihrer exponierten Position. Um dieses Verschleißverhalten vorwegzunehmen und zudem das Anbohrverhalten von Bohrkronen zu verbessern, kann der obere Teil des Segments giebelgedachförmig gestaltet werden, siehe Abbildung 2.7 b). Durch einen mehrlagigen Aufbau mit unterschiedlichen metallischen Matrizen kann z. B. die Schweißbarkeit durch eine diamantfreie Segmentfußzone verbessert werden oder gezielt die Verschleißbeständigkeit der seitlichen Segmentflächen beeinflusst werden [78,

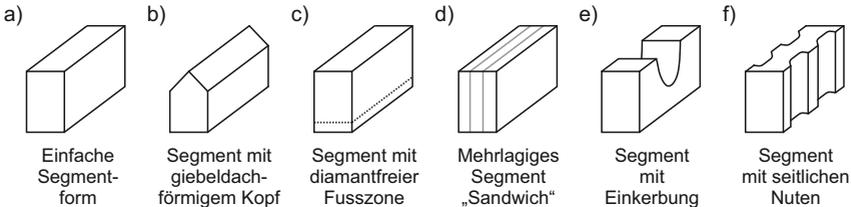


Abbildung 2.7: Exemplarische Beispiele für die Gestaltung von diamantimprägnierten Segmenten für Bohrwerkzeuge nach [104, 107]

107, 108], siehe Abbildung 2.7 c) und d). Darüber hinaus versehen mehrere Diamantwerkzeughersteller ihre Segmente z. B. mit Einkerbungen oder seitlichen Nuten, um das Anwendungsverhalten zu beeinflussen, siehe Abbildung 2.7 e) und f). Je komplexer die Form der Segmente gestaltet wird, desto höher wird der Aufwand in der Produktion der Segmente.

2.3.3 Verschleißverhalten

Beim Einsatz von Schleifwerkzeugen, z. B. zur Bearbeitung von Metallen, ist es in der Regel vor dem ersten Einsatz und nach festen Intervallen erforderlich, eine Konditionierung der Werkzeuge zur Sicherstellung des Bearbeitungsergebnisses durchzuführen [189]. Da in der Bauindustrie keine Nebenzeiten für das Abrichten der Werkzeuge gewünscht sind, ist es notwendig, dass die Werkzeuge in der Anwendung „selbstschärfend“ arbeiten [169]. Dies bedeutet, dass der Verschleiß der Diamantkörnung und der metallischen Bindungsmatrix so aufeinander abgestimmt sind, dass über die gesamte Einsatzzeit des Werkzeugs eine ausreichende Anzahl von schneidfähigen Diamanten an der Oberfläche des Werkzeugs vorliegen. Dieses Verhalten stellt sich ein, wenn sowohl die Bindung als auch die Diamanten kontinuierlich verschleifen und damit stetig neue Diamanten, die sich zu Beginn noch innerhalb der Bindung befinden haben, freigelegt werden. Das Verschleißverhalten der Diamanten sowie der Bindungsmatrix ist dabei abhängig von dem zu zerspanenden Werkstoff und dessen Eigenschaften, den Prozessparametern, wie z. B. den Anpressdrücken.

In der Tribologie werden vier Grundmechanismen aufgeführt, die ursächlich für die Entstehung von Verschleiß sind [171]. Diese können für die Beschreibung des Verschleißverhaltens der Diamanten sowie der Bindungsmatrix herangezogen werden. Dabei handelt es sich um die Adhäsion, die Abrasion, die Oberflächenzerüttung und die tribochemischen Reaktionen. Unter Adhäsion wird ein Anhaften von Material an den Diamanten oder der Bindungsmatrix und ein anschließendes Abscheren verstanden, wodurch Diamant- und Bindungsvolumen verloren gehen. Die Abrasion umfasst dagegen Furchungsvorgänge der Diamanten oder der Bindungsmatrix durch härtere Partikel. Die Furchung einer Diamantoberfläche kann dabei erst auftreten, wenn entsprechende Vorgänge, z. B. eine Erwärmung, zu einer Erweichung der obersten Diamantschicht geführt haben. Risse und Brüche an den Diamanten oder der Bindungsmatrix entstehen durch wiederkehrende thermische und/oder mechanische Belastungen, die unter der Begrifflichkeit Oberflächenzerüttung zusammengefasst werden. Tribochemische Reaktionen umfassen alle chemischen Reaktionen zwischen dem Betonwerkstoff, dem Umgebungsmedium und den Diamanten sowie der Bindungsmatrix, die zu einem Materialverlust/Verschleiß an den Diamanten bzw. der Bindungsmatrix führen.

Nach *Ertingshausen* spielen bei der Natursteinbearbeitung der Adhäsionsverschleiß und der Diffusionsverschleiß, der den tribochemischen Reaktionen zu zurechnen ist, eine untergeordnete Rolle [71]. Diese Annahmen trifft auch bei der Bearbeitung von unbewehrtem Beton zu [15]. Bei der Bearbeitung von Stahlbeton kommen diese Effekte jedoch aufgrund der Eigenschaften des Baustahls zum Tragen, z. B. aufgrund der chemischen Affinität des Kohlenstoffs der Diamanten und dem Eisen der Stahlbewehrung. So zeigen *Denkena et al.* deutliche Anhaftungen von Stahl an Diamantkörnern beim Trennschleifen von Stahlbeton. Dabei nimmt der Umfang der Anhaftungen mit der Vorschubgeschwindigkeit zu [38].

Zur Beschreibung des Verschleißverhaltens diamantimprägnierter Werkzeuge sind zum einen Kenntnisse über das Verschleißverhalten der Diamantkörner zum anderen auch über Verhalten des Verbunds aus Diamantkörnern und metallischer Bindungsmatrix notwendig. Es können mehrere Verschleißerscheinungsformen von Diamanten klassifiziert werden, siehe Abbildung 2.8 [71, 166, 196, 206]. Die Übergänge zwischen den Erscheinungsformen

- unvollständig freigelegtes Diamantkorn,
- freigelegtes Diamantkorn,
- angerautes Diamantkorn,
- angeflachtes/stumpfes Diamantkorn,
- gebrochenes/gespaltenes Diamantkorn und
- Leerstelle

sind fließend, sodass nicht immer eine eindeutige Zuordnung erfolgen kann. Unter optimalen Bedingungen weisen in Abhängigkeit der Einsatzzeit nach *Miller* and *Ball* der größte Teil der Diamantkörner, die auf einem Werkzeugsegment vorliegen, die gleichen Erscheinungsformen auf [130]. Bei freigelegte Diamantkörnern können in der Regel leichte Beschädigungen festgestellt werden. Partielle Diamantausbrüche oder ein Splintern der Diamanten tritt durch die wiederholt auftretende mechanische Stoßbelastung der Diamanten beim Eindringen in das Werkstoffmaterial auf [166]. Dabei breiten sich Mikrorisse kontinuierlich aus und führen schließlich auf Grund der Spaltwirkung zu einem Abbrechen von Materialpartikeln oder -fragmenten, siehe Abbildung 2.8 c) und e) [130]. Angeflachte Diamanten entstehen nach *Miller et al.* durch abrasiven Gleitverschleiß. Hartstoffe aus dem zu zerspanenden Material, wie z. B. Silikate, können jedoch den Diamanten erst furchen, wenn eine entsprechende Schädigung in Form einer Erweichung der obersten Diamantschicht stattgefunden hat [130]. Ist eine Schädigung der obersten Schicht eingetreten, z. B. durch eine Graphitisierung infolge von erhöhten Temperaturen, dann können entsprechend der Schnittbewegungsrichtung Ritzspuren auf der Diamantoberfläche vorliegen [130]. In der Anwendung verrunden die Ecken und Kanten eines Diamanten bereits nach kurzen Standwegen aufgrund der exponierten Lage. Um ein fortschreitendes Verrunden bis hin zum Anflachen und damit ein sogenanntes „Polieren“ des Diamantkorns zu vermeiden, müssen entsprechend partielle Ausbrüche am Diamantkorn stattfinden, damit neue Schneidkanten entstehen. Wenn die Belastung der einzelnen Diamanten in der Anwendung zu gering ist, z. B. weil der Anpressdruck zu klein ist und damit die Zustellung, treten vermehrt angeflachte oder verrundete Diamantkörner auf der Wirkfläche auf [30]. Ist der Anpressdruck dagegen zu hoch, werden die Diamanten überlastet, sodass die Anzahl an gebrochenen Diamanten oder Leerstellen an der Segmentoberfläche ansteigt [44]. Dementsprechend gibt es einen optimalen Parameterbereich zwischen einer Überbelastung des Werkzeugs und einer minimal notwendigen Grundbelastung. Einfluss auf diese Grundbelastung haben die Zusammensetzung des zu zerspanenden Materials, die Spezifikation des Segments und die Prozessparameter [130, 185].

Trotz der Forderung eines selbstschärfend arbeitenden Werkzeugs sollen die Diamantkörner erst im verschlissenen Zustand aus der Matrix entlassen werden. Erst

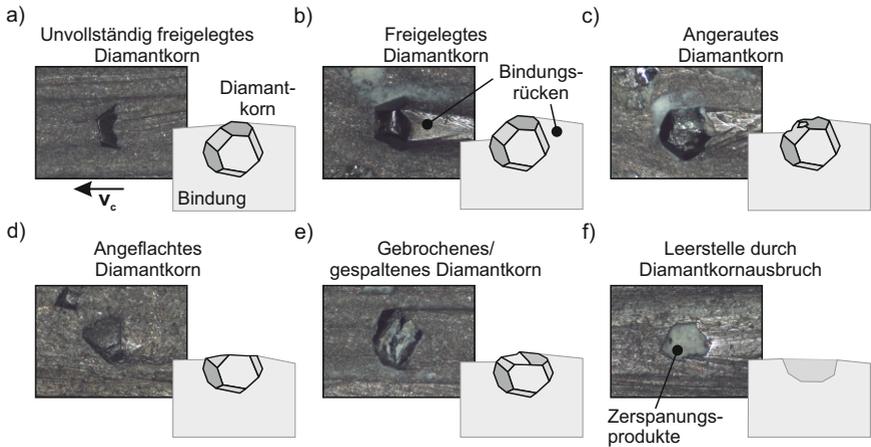


Abbildung 2.8: Verschleißerscheinungsformen von Diamantkörnern beim Kernbohren von Beton nach [71, 166, 173]

wenn die Diamantkörner einen bestimmten Verschleißzustand erreicht haben, sollen neue Diamantkörner, die zu Anfang noch innerhalb des Bindungsmatrixvolumens liegen, freigelegt werden, siehe Abbildung 2.8 a). Durch den Verschleiß der Bindungsmatrix steigt die Überstandshöhe der Diamanten an, sodass diese eine Materialtrennung generieren können. Die Überstandshöhe der Diamantkörner wird mit zunehmendem Verschleiß der Bindungsmatrix immer größer und es bildet sich hinter dem Diamantkorn ein schweiförmiger Bindungsrücken aus [15], siehe Abbildung 2.8 b). Vor dem Diamantkorn ist zudem meist eine Auskolkung zu beobachten [185]. Der Verschleiß der Bindungsmatrix entsteht im Wesentlichen durch Erosion [185], wobei der Übergang zwischen Erosion und Abrasion fließend ist [171]. Dafür verantwortlich sind Hartstoffe, die sich beim Diamantkernbohren im sogenannten „Bohrschlamm“ befinden und durch Furchungsvorgänge an der Bindungsmatrix eine Materialtrennung verursachen. Der Bohrschlamm besteht aus den Zerspanungsprodukten des gebohrten Materials, den Verschleißpartikeln der diamantimprägnierten Segmente und dem zugeführten Wasser. Neben der Erosion der Bindungsmatrix kann auch ein Verschleiß durch unmittelbaren Kontakt zwischen der Bindungsmatrix und dem Beton erfolgen. Der dabei auftretende Verschleiß des Segments ist deutlich größer als der Verschleiß, der durch die Erosion hervorgerufen wird, weshalb dieser direkte Kontakt, z. B. durch eine gleichmäßige Diamantverteilung im Segmentvolumen, vermieden werden sollte.

Um in der Anwendung eine hohe Leistungsfähigkeit des Bohrwerkzeugs erzielen zu können, muss die Bindungsmatrixspezifikation, genauer das Verschleißverhalten der Bindung, an den zu bearbeitenden Werkstückwerkstoff angepasst werden [44]. Eine zu weiche Bindungsmatrix führt zu einem zu schnellen Bindungsverschleiß, wodurch die Diamanten schnell freigelegt werden. Hierdurch können hohe Vorschübe erzielt werden. Allerdings führt die Wahl einer weichen Bindungsmatrix gleichzeitig dazu, dass die Diamanten vorzeitig, ohne vollständig verschlissen zu sein, aus der Bindungsmatrix ausbrechen, und im Ergebnis nur kurze Werkzeug-

standzeiten erreicht werden. Die Wahl einer harten Bindungsmatrix führt dagegen dazu, dass diese nur langsam verschleißt, wodurch die freigelegten Diamanten sehr lange auf der Werkzeugoberfläche verbleiben. Diese weisen dabei nur geringe Überstandshöhen auf, weshalb tendenziell der Anteil der angeflachten Diamanten ansteigt [44, 108, 185]. Für die Anwendung ergeben sich hierdurch geringe Vorschubgeschwindigkeiten bei langen Werkzeugstandzeiten.

2.4 Diamantkernbohren

Das Diamantkernbohren ist ein Verfahren, das in großem Umfang in der Bauindustrie eingesetzt wird. Durch den Einsatz von Diamant als Schneidmittel können mit Diamantkernbohrwerkzeugen eine Vielzahl der in der Bauindustrie eingesetzten Materialien, wie Beton, Stahlbeton, Ziegelstein, Asphalt, Naturstein usw. durchtrennt werden. Dabei fehlen zumeist genaue Kenntnisse über die Zusammensetzung des gebohrten Materials, weshalb die Werkzeuge auch bei ungünstigen Bedingungen eine ausreichende Leistungsfähigkeit aufweisen müssen. Durch das Diamantkernbohren können einzelne Bohrlöcher erzeugt werden, z. B. für Abwasserleitungen, es können aber auch durch mehrere aneinander gereihete Bohrungen große Durchbrüche/Öffnungen erzeugt werden [88, 109]. Eine umfangliche Darstellung von Anwendungsbeispielen findet sich auf der Homepage www.derbetonbohrer.de des gleichnamigen Magazins „Der Betonbohrer“ des Fachverbands Betonbohren und -sägen e.V. [142], Stand Dezember 2018. Daneben kann beim Diamantkernbohren die Gewinnung des sogenannten Bohrkerns im Vordergrund stehen, wobei die Analyse des Bohrkerns z. B. der Beurteilung des Ist-Zustands eines Bauwerks dient [52].

Das Diamantkernbohren steht prinzipiell in Konkurrenz mit anderen Bohrverfahren in der Bauindustrie, z. B. dem Hammerbohren. Gegenüber dem Hammerbohren zeigen sich jedoch diverse Vorteile, die den Nachteilen höherer Werkzeug- und Maschinenkosten gegenüber stehen. Beim Diamantkernbohren treten geringere Emissionen in Form von Staub und Geräuschen auf. Zudem wird das Betongefüge um die Bohrung herum nicht geschädigt, der gewünschte Durchmesser wird unmittelbar erzielt und es wird eine glatte Bohrungswand erzeugt, weshalb keine oder nur geringe manuelle Nacharbeiten der Bohrung notwendig sind. Im Vergleich zum Hammerbohren können zudem Stahlbewehrungen mit höheren Vorschubgeschwindigkeiten durchtrennt werden.

Einsatz findet das Diamantkernbohren sowohl beim Neubau, bei der Nutzungsänderung oder Sanierung, als auch beim Abriss von Bauwerken. So begründet sich z. B. der umfangliche Einsatz des Diamantkernbohrens bei Neubauten im geringeren Planungsaufwand in der Anfangsphase und im Wegfallen zeitlicher und kostenintensiver Schalungsarbeiten beim Gießen der Betonelemente um Aussparungen erzeugen zu können. Die Bohrlöcher/Öffnungen werden erst im Rahmen der Rohbauphase, also zu einem späteren Zeitpunkt der Bauphase erzeugt, wenn deren erforderliche Position und Größe z. B. für Installationsarbeiten endgültig feststehen [82].

2.4.1 Einführung und Definition

Beim Diamantkernbohren wird das Bohrrohr, an dessen Ende mehrere diamantimprägnierte Segmente angebracht sind, durch einen Bohrmotor in Rotation versetzt. Die beim Diamantkernbohren üblichen Schnittgeschwindigkeiten liegen im Bereich von $v_c = 60$ bis 360 m/min [72]. Gleichzeitig wird zur Erzielung eines Vorschubs das Diamantkernbohrwerkzeug bei einem ständergeführten Prozess über ein mechanisches Getriebe, bestehend aus einem Ritzel und einer Zahnstange, in das Werkstückmaterial gedrückt. Somit handelt es sich um einen vorschubkraftabhängigen Prozess, wobei die maximal mögliche Vorschubkraft vom maximalen Drehmoments des Bohrmotors abhängig ist. Die Vorschubrichtung verläuft parallel zur Drehachse des Werkzeugs. Das Diamantkernbohren von Beton ist kein in einer Norm aufgefasstes Bearbeitungsverfahren. Werden der Aufbau des Grundkörpers und die Kinematik berücksichtigt, besteht die Möglichkeit, das Verfahren der *DIN 8580* der Hauptgruppe 3 *Trennen* und dabei den *Spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide*, genauer den Bohrverfahren, zuzuordnen [55, 56]. Innerhalb der Bohrverfahren ist das Kernbohren als eigenes Verfahren definiert. Hierbei wird das Werkstückmaterial ringförmig zerspannt, sodass gleichzeitig eine Bohrung und ein zylindrischer Bohrkern entstehen. Allerdings umfassen die in der Norm beschriebenen Bohrverfahren nur Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide. Aufgrund des Aufbaus der Schneidelemente, bei denen eine Vielzahl von Diamantkörnern in einer metallischen Matrix gebundenen sind, muss das Diamantkernbohren den Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide, genauer den Schleifverfahren mit rotierendem Werkzeug zugeordnet werden [61]. In der Literatur finden sich Untersuchungen zur Bearbeitung von CFK durch Schleifwerkzeuge, bei denen die nicht genormte hybride Begrifflichkeit „Bohrschleifen“ verwendet wird [73, 155]. Hierbei ist der vordere Bereich des eingesetzten Werkzeugs, dessen Grundkörper aus einem zylindrischen Hohlkörper besteht, mit metallisch gebundenen Diamanten belegt. Diese Werkzeuge werden zur Bohrungsbearbeitung von CFK-Elementen eingesetzt. Darüber hinaus findet sich die Begrifflichkeit „Bohrschleifen“ in den Normen DIN58744-1 bis -3, in denen „...diamantbesetzte Bohrschleifkörper, die in der Optikfertigung zum Bohrschleifen an sprödharten Werkstoffen verwendet werden.“, beschrieben werden [54].

2.4.2 Aufbau der Werkzeuge

Diamantkernbohrwerkzeuge, auch „Bohrkronen“ genannt, bestehen aus einem Grundkörper, dem sogenannten Bohrkronenrohr, dem Deckel mit Anchlusselement zur Verbindung mit der Antriebsmaschine am oberen Ende des Bohrkronenrohrs und den Wirkelementen bzw. diamantimprägnierten Schleifsegmenten, die stirnseitig am unteren Ende des Bohrkronenrohrs befestigt sind, siehe Abbildung 2.9 a). Der Grundkörper besteht bei Standarddurchmessern in der Regel aus nahtlosen Stahlrohren. Bei Sonderdurchmessern werden die Rohre auch aus Stahlblechen durch Biegen und anschließendes Verschweißen hergestellt. Das Anchlusselement stellt in der Regel eine Schraubenmutter mit einer G 1 1/4“ Gewindebohrung dar, die mit dem Deckel verschweißt ist. Dementsprechend werden die Bohrrohre auf einen Gewindeflansch der Antriebsmaschinen bzw. des Bohrmotors aufgeschraubt. Daneben existieren weitere, auch firmenspezifische Schnellspannsysteme zur Verbindung des Bohrrohrs mit dem Bohrmotor. Einen neuen

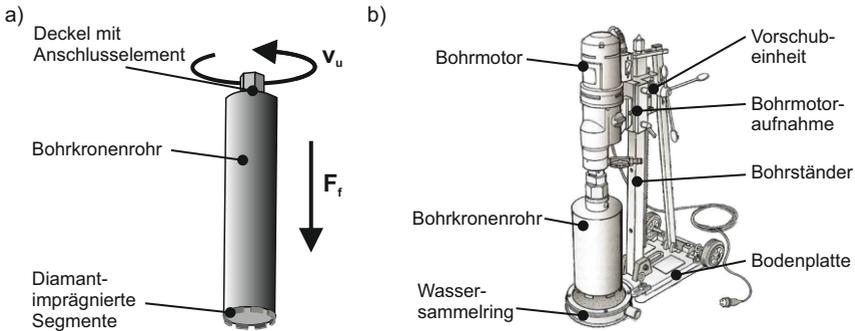


Abbildung 2.9: a) Diamantkernbohrwerkzeug, b) Ständergeführtes Diamantkernbohren mit elektrischem Bohrmotor nach [72]

durch den *Fachverband Betonbohren und -sägen*, sowie dem *Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau* (VDMA) geförderten Standard für einen werkzeuglosen Bohrkronenwechsel stellt das patentfreie und damit firmenübergreifende Bohrkronenanschlusselement PQ6 dar [141].

Die Standarddurchmesser von Diamantbohrkronen, die in der Bauindustrie eingesetzt werden, beginnen ab $d = 6 \text{ mm}$ und reichen bis $d = 1500 \text{ mm}$ [72]. Bei Werkzeugen mit Durchmessern oberhalb des genannten Bereichs, handelt es sich um Sonderwerkzeuge. Manuelle, handgeführte Kernbohrungen werden aufgrund der auftretenden Kräfte tendenziell bei kleineren Durchmessern durchgeführt. Bei größeren Durchmessern und einhergehenden Prozesskräften ist der Einsatz eines Bohrständers notwendig, siehe Abbildung 2.9 b). An diesem wird der Bohrmotor befestigt. Der Bohrständer muss am Ort der Bohrung fixiert werden. Dazu wird der Fuß des Bohrständers über einen Verankerungsdübel im Boden verschraubt. Alternativ ist der Einsatz von Vakuumplatten oder Schnellspannsäulen möglich [72].

2.5 Materialtrennungsmechanismen

In der Literatur finden sich eine Vielzahl von Arbeiten bei denen die Begrifflichkeiten „Spanen“, „Trennen“ und „Abtragen“ synonym verwendet werden, um die grundlegenden Vorgänge bei der Bearbeitung von Beton oder Naturstein durch diamantimprägnierte Werkzeuge zu beschreiben. Da bei der Bearbeitung von Beton keine Späne wie z. B. bei der Metallbearbeitung auftreten und unter dem Begriff „Abtragen“ thermische, chemische und elektrochemische Verfahren zusammengefasst werden, erscheint es sinnvoll, die auftretenden Vorgänge bei der Bearbeitung von Beton der DIN 8580 folgend als Materialtrennungsmechanismen zu bezeichnen. Aus diesem Grund werden die im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Modelle unter der Begrifflichkeit „Materialtrennungsmechanismen“ zusammengefasst.

2.5.1 Naturstein und Beton

Die in der Literatur beschriebenen Modelle basieren im Wesentlichen auf Erkenntnissen und Beobachtungen, die bei Ritzversuchen an Naturstein gewonnen wurden [91, 127, 166]. Eine Übertragung auf den Werkstoff Beton, als künstlichen Stein, erfolgte durch *Bienert* [15]. Durch die Inhomogenität des Betons findet ein stetiger Wechsel der zu zerspanenden Materialphasen und damit der wirksamen Trennmechanismen statt, die eine einfache Modellbildung für Beton erschweren. Aufgrund des sprödharten Verhaltens ist die Materialtrennung nicht durch Späne als durch Bruchstücke infolge von Rissbildung und Abplatzungen geprägt. Beim Zerspanen von Naturstein dominiert das sprödharte Werkstoffverhalten die Materialtrennung. Daneben kann eine plastische Verformung des Werkstückmaterials beobachtet werden [15, 32, 91, 127, 166]. Welche Mechanismen auftreten, ist unter anderem von den Werkstoffeigenschaften und den Bearbeitungsparametern abhängig. Als etablierte Materialtrennungsmodelle gelten die Beschreibungen nach *Hütt* [91], *Schulze* [166], *Bienert* [15] und *Meding* [127]. Diese Beschreibungen umfassen ein Modell, das in drei Teilprozesse aufgeteilt ist:

1. Teilprozess „Vor und neben dem Schneidkorn“:

Vor und neben dem Schneidkorn entstehen druckspannungsinduzierte Scherrisse in radialer und lateraler Richtung. Die hierdurch abgelösten Partikel werden vor dem Korn aufgeworfen und zum Spurrand verschoben. Diese Vorgänge werden auch als „Primärspanbildung“ bezeichnet. Bei höheren Geschwindigkeiten werden die Partikel größtenteils durch die eingebrachte Energie schlagartig gelöst und daher von der Wirkstelle weggeschleudert.

2. Teilprozess „Unter dem Schneidkorn“:

Unter dem Schneidkorn befindliches Werkstückmaterial wird aufgrund der hohen wirkenden Drücke plastisch verformt und komprimiert. Hierdurch erscheint die Randschicht, wenn diese erhalten bleibt, glatt und glänzend. Zu dem Material, das sich unter dem Schneidkorn befindet, gehören auch Partikel, die sich vor dem Schneidkorn gelöst haben, jedoch unter dieses geraten, anstatt nach vorne oder seitlich verdrängt zu werden.

3. Teilprozess „Hinter dem Schneidkorn“:

Hinter dem Schneidkorn entstehen zugspannungsinduzierte Sprödbbruchvorgänge. Verursacht werden diese durch die Entlastung und das Zurückfedern des Werkstückmaterials, das unterhalb des Schneidkorns durch Druckspannungen beaufschlagt wurde. Dabei entstehen entweder schollenartige Ausbrüche, oder das durch das Schneidkorn komprimierte Material, löst sich als sogenannter „Sekundärspan“ von der Werkstückoberfläche ab. Der Anteil der Sekundärspäne am Gesamtvolumen des abgetragenen Materials ist sehr gering.

Meding hat diese Teilprozesse in eine modellhafte zweidimensionale Darstellung übertragen, siehe Abbildung 2.10 a). Bei der Darstellung der Materialtrennung von *Tönshoff et al.* in Abbildung 2.10 b) wird zusätzlich der Bindungverschleiß dargestellt. Für Marmor hat *Stangenberg* eine zwei- und dreidimensionale Darstellung entwickelt, um die Auswirkungen des Ritzprozesses auf die erzeugte Spur

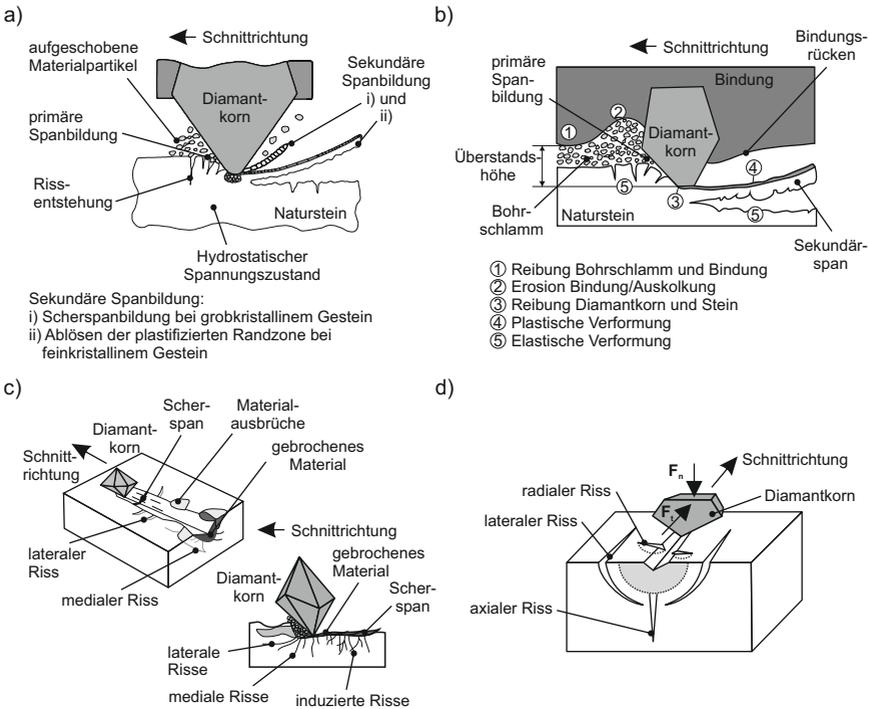


Abbildung 2.10: Materialtrennungsmodelle nach a) *Meding* für Naturstein [128], b) *Tönshoff et al.* für Naturstein [186], c) *Stangenberg* für Marmor [173, 195], d) *Tönshoff* für spröde Materialien [45]

zeigen zu können [173, 195]. Ein dreidimensionales Modell des Korneingriffs bei sprödharten Werkstoffen, bei der die Rissbildung im Vordergrund steht, wurde von *Tönshoff* entwickelt [45]. Diese Darstellung basiert auf Arbeiten von *Mars-hall* [121] und *Lawn* [113], die die Materialtrennung bei Keramiken untersucht haben, siehe Abbildung 2.10 d).

Die beschriebenen Beobachtungen sind unter anderem abhängig von der Struktur des Natursteinmaterials [127]. Je feinkörniger das Material ist, desto eher findet eine plastische Verformung statt. Daneben ist es notwendig, dass ein hydrostatischer Spannungszustand vorliegt, sodass eine Plastifizierung des Materials eintreten kann. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass sich bei grobkörnigen Materialien mit ausgeprägter Rissbildung ein solcher Zustand nur selten und diskontinuierlich einstellen wird. Nach *Bienert* kann bei der Bearbeitung von Beton zwischen feinkörnigen und grobkörnigen Bestandteilen des Betons unterschieden werden [15]. Feinkörnige Bestandteile, die in ihrer Größe dem Schleifkorn entsprechen, werden durch dieses aus dem Werkstoffverbund herausgedrückt oder -geschlagen. Dagegen treten bei größeren, grobkörnigen Bestandteilen die zuvor beschriebenen Trennmechanismen auf. Zur Quantifizierung der Materialtrennung im Rahmen von Ritzversuchen an Beton und Naturstein wurden der Tiefenabtragsfaktor k_t

und der Breitenabtragsfaktoren k_b von *Denkena et al.* definiert [34]. Der Tiefenabtragsfaktor k_t stellt das Verhältnis der Ritzspurtiefe h_r zur Spannungsdicke h_{cu} dar, Formel 2.1. Analog dazu ist der Breitenabtragsfaktor k_b das Verhältnis der Ritzspurbreite b_r zu der wirksamen Kornbreite d_{gs} , Formel 2.2.

$$k_t = \frac{h_r}{h_{cu}} \quad (2.1)$$

$$k_b = \frac{b_r}{d_{gs}} \quad (2.2)$$

Alternativ dazu kann das Verhältnis des Ritzspurquerschnitts A_r zum Werkzeugquerschnitt A_{wz} betrachtet werden [14, 120, 166]. Dieses Verhältnis soll in Analogie zu den zuvor genannten Kennwerten als Flächenabtragsfaktor k_A bezeichnet werden und berechnet sich nach Formel 2.3.

$$k_A = \frac{A_r}{A_{wz}} \quad (2.3)$$

2.5.2 Metallische Werkstoffe

Zur Beschreibung der Vorgänge an einzelnen Schneidkörnern bei der schleifenden Bearbeitung von Metallen stehen mehrere Spanbildungsmodelle zur Verfügung. Nach *Klocke* [99] und *Tönshoff* [45] können bei der Betrachtung eines einzelnen Schneidkorns, das entlang einer festen Eingriffsbahn geführt wird, unterschiedliche Phasen der Spanbildung beschrieben werden, die insbesondere abhängig von der Zustellung sind. Zu Beginn des Korneingriffs liegt eine rein elastische Formänderung des Werkstückmaterials vor. Mit zunehmender Zustellung erfolgen neben elastischen Vorgängen auch plastische Materialverdrängungsvorgänge, die zu Materialaufwürfen führen. Entspricht die Zustellung der Schnitteinsatztiefe T_μ , bildet sich vor dem Schneidkorn ein Span aus. Daneben wirken weiterhin elastische und plastische Verformungen. Tritt das Schneidkorn aus dem Material aus, laufen die Vorgänge in umgekehrter Reihenfolge ab. *Rasim* hat nachgewiesen, dass die unterschiedlichen Spanbildungsphasen einen signifikanten Einfluss auf die umgesetzte Energie haben [152]. Sobald die Spanbildung und damit das Abscheren des Werkstückmaterials einsetzt, sinkt die momentane spezifische Ritzenergie deutlich ab. Die spezifische Ritzenergie stellt das Verhältnis der Ritzenergie E_r zum Ritzspurvolumen V_r dar. Durch Umstellung der Formel 2.4 kann die spezifische Energie durch die Tangential- bzw. Schnittkraft F_c bezogen auf den Ritzspurquerschnitt A_r berechnet werden [47].

$$e_r = \frac{E_r}{V_r} = \frac{F_c \cdot v_c}{A_r \cdot v_c} = \frac{F_c}{A_r} \quad (2.4)$$

Zur Beschreibung der Materialtrennung beim Schleifen können Erkenntnisse aus tribologischen Forschungsarbeiten von *Zum Gahr* herangezogen werden. Dabei bestehen Analogien hinsichtlich der wirkenden Mechanismen beim Schleifen und beim abrasiven Werkstoffverschleiß. Bei diesem liegt ein Furchungverschleiß des Werkstücks vor, der durch den Mechanismus Abrasion erzeugt wird. Hierbei

dringt durch die Relativbewegung zwischen einem harten Grundkörper, z. B. einem Diamantkorn und einem weicheren Gegenkörper, z. B. einer Stahlbewehrung, der Grundkörper in die Oberfläche des Gegenkörpers ein und verursacht eine plastische Verformung [212, 214, 215]. Nach *Zum Gahr* können beim Furchungsverschleiß durch Abrasion bei duktilen Werkstoffen, wie z. B. Stahl, die Mechanismen Mikrospanen, Mikropflügen, Mikroermüden und Mikrobrechen unterschieden werden [212, 213].

Beim Mikrospanen erzeugt das im Eingriff stehende Abrasivkorn eine Materialtrennung, bei der ein Span entsteht. Dabei wird das vor dem Korn liegende Material, genauer der Span, vollständig von der Oberfläche entfernt. Beim Mikropflügen dagegen wird das Werkstoffmaterial plastisch verdrängt. Es bilden sich lediglich Materialaufwürfe an der erzeugten Furche bzw. Ritzspur und der Anteil des Materials, das vom Werkstück abgetrennt wird, ist gering. Erfolgt dieser Vorgang mehrmals, tritt nach *Zum Gahr* eine Werkstoffermüdung ein [212]. In der Folge entstehen Risse, sodass sich das Material mit der Zeit von der Werkstückoberfläche ablöst. Es ist anzumerken, dass bei fast allen tribologischen Systemen in der Regel mehrere der genannten Mechanismen gleichzeitig wirken. Es ist daher davon auszugehen, dass neben der Abrasion auch Adhäsionseffekte, Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen in geringem Umfang den Materialtrennungsprozess beeinflussen.

Um den Materialtrennprozess bei Ritzversuchen quer zur Vorschubrichtung zu quantifizieren, wurde von *Zum Gahr* der f_{ab} -Wert eingeführt, der das Verhältnis des abgetrennten Werkstoffvolumens zum Volumen der erzeugten Furche bzw. Ritzspur darstellt, und nach Formel 2.5 berechnet werden kann [215]. Bei einem idealen Mikrospanen, bei dem das vor dem Schneidkorn befindliche Material vollständig abgetrennt wird, stellt sich ein Wert von $f_{ab} = 1$ ein. Bei einem idealen Mikropflügen, bei dem kein Material abgetrennt wird, sondern lediglich eine plastische Verdrängung stattfindet, ergibt sich ein Wert von $f_{ab} = 0$.

$$f_{ab} = \frac{A_r - (A_1 + A_2)}{A_r} \quad (2.5)$$

Bei grundlegenden Spanbildungsmodellen erfolgt eine vereinfachte zweidimensionale Betrachtung der Vorgänge am Schneidkorn. Die Kornform und die Kornausrichtung haben jedoch einen signifikanten Einfluss auf den Spanbildungsprozess, weshalb *Martin* und *Yegenoglu* die vorhandenen Modelle aus dem Bereich der Tribologie zur Beschreibung des Spanbildungsprozesses beim Schleifen erweitert haben [124]. Dabei wurden vier unterschiedliche Wirkmechanismen definiert, siehe Abbildung 2.11. Diese umfassen das Mikrospan-Schälspanen, das vergleichbar mit dem Mikrospanen nach *Zum Gahr* ist, das Mikrospanen-Fließspanen, das Mikropflügen und das Mikrofurchen. Beim Mikrospan-Schälspanen steht das Schneidkorn mit einer Fläche senkrecht zur Schnittrichtung im Eingriff. Hierdurch staut sich das Werkstückmaterial vor dem Korn und es bildet sich ein Span. Beim Mikrospanen-Fließspanen stehen die im Eingriff befindlichen Flächen des Schneidkorns in einem Winkel zur Schnittrichtung, weshalb das Werkstückmaterial vornehmlich seitlich verdrängt und aufgeworfen wird. Beim Mikropflügen steigt der Anteil des Materials, das seitlich verdrängt wird und am Rand der erzeugten Furche verbleibt. Dieser Mechanismus wird durch die bestehenden Prozessbedingungen, wie z. B. einer geringen Schnittgeschwindigkeit begünstigt. In der Folge

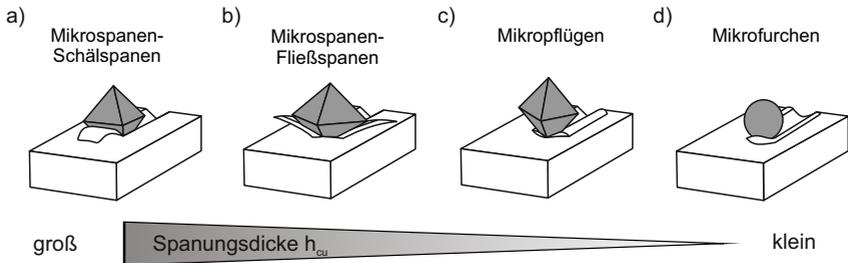


Abbildung 2.11: Trennmekanismen beim Schleifen nach [124]

wird das Material nicht abgeschert, sondern reißt durch eine Materialermüdung vom Rand der erzeugten Furche ab. Ist die Zustellung des Schleifkorns sehr klein, sodass die Zustellung im Bereich der Verrundung der Schneidkörner liegt, tritt das Mikrofurchen auf. Hierbei liegen nur elastische und plastische Verformungen vor, ohne dass das Material unmittelbar abgetrennt wird. Die Materialtrennung erfolgt daher durch Rissbildung infolge von Werkstoffermüdung.

2.6 Forschungsarbeiten zur trennenden Bearbeitung von Beton und Stahlbeton

Nachfolgend sind die wissenschaftlichen Arbeiten zur Analyse der Bearbeitung von Beton und Stahlbeton durch diamantimprägnierte Werkzeuge zusammengefasst. Die Arbeiten sind dabei in Abhängigkeit des Detailgrades in Einkornritz- und in Mehrkornritzversuche unterteilt.

2.6.1 Einkornritzversuche

Einkornritzversuche stellen eine fundamentale Untersuchungsmethodik zur Analyse von Schleifverfahren dar. Nachfolgend sind Forschungsarbeiten zusammengefasst, in deren Fokus die Analyse der Materialtrennung bei duktilen und spröden Werkstoffen steht. Eine grundsätzliche Unterscheidung der Arbeiten kann anhand der eingesetzten Werkzeuge erfolgen. Dabei handelt es sich entweder um normale Schleifkörner in vereinzelter Form, die auf Trägerkörpern fixiert sind oder um entsprechend präparierte Werkzeuge, die meist schleiftechnisch hergestellt werden und eine definierte Form aufweisen. Diese definierten, idealisierten Formen sind z. B. Kegel oder Pyramiden. Der Vorteil beim Einsatz von Werkzeugen mit definierter Form ist das reproduzierbare Einsatzverhalten, das beim Einsatz von normalen und damit hinsichtlich der Form veränderlichen Schleifkörnern nicht gegeben ist [77].

Für das Diamantkernbohren sind insbesondere Forschungsergebnisse von Interesse, bei denen mit Schnittgeschwindigkeiten im Bereich von $v_c < 300$ m/min gearbeitet wurde, da dies die beim Diamantkernbohren von Beton und Stahlbeton üblichen Geschwindigkeiten sind. Die nachfolgend dargestellten Arbeiten sind unterteilt in die drei Themenbereiche „Sprödharte mineralische Werkstoffe“,

„Duktile Werkstoffe“ und „Verbundwerkstoff Stahlbeton“. Zudem erfolgt eine gesonderte Darstellung der Arbeiten, bei denen der Einfluss der Kornform untersucht wurde.

Sprödharte mineralische Werkstoffe

Für spröde Werkstoffe können Schwellwerte der mechanischen Belastungen bzw. kritischen Spannungstiefen beschrieben werden, ab denen eine Änderung der Materialtrennungsmechanismen auftreten [91, 125]. Bei geringen Zustellungen und damit mechanischen Belastungen liegt zumeist ein plastisches Verdrängen von Material vor. Hierdurch entstehen Ritzspuren, deren Flanken glatt erscheinen, weshalb hohe Oberflächengüten erzielt werden können. Werden die mechanischen Belastungen erhöht und wird dadurch der materialabhängige Schwellwert überschritten, bilden sich laterale und radiale Risse, die zu Materialausbrüchen und damit großen Materialabtragsraten führen. Angaben zu materialspezifischen Schwellwerten bei sprödharten und/oder mineralischen Werkstoffen finden sich z. B. für Glas [63], Granit [35], Hartmetall [100, 204], Marmor [178, 195] und technische Keramiken [98, 150].

Bienert hat auf Basis von Ritzversuchen an Beton ein Materialtrennungsmodell entwickelt, das in Kapitel 2.5.1 dargestellt ist. Er stellte bei seinen Untersuchungen fest, dass die spezifische Kornbelastung, d.h. die auf den Kornquerschnitt bezogene Schnittkraft, mit steigender Einzelkornspannungstiefe sinkt [15]. Die bei den Ritzversuchen getesteten Schnittgeschwindigkeiten liegen im Bereich von $v_c = 1, 15, 30, 45$ und 60 m/s. Bei diesen Versuchen variiert die Ritztiefe entlang des Eingriffsbogens zwischen $h_r = 0..50$ μm [15].

Die von *Meding* durchgeführten Untersuchungen an verschiedenen Natursteinen führen zur Unterscheidung unterschiedlicher Sekundärspäne in Abhängigkeit des Kristallgefüges, siehe 2.5.1. Die Ritzversuche werden mit Schnittgeschwindigkeiten im Bereich von $v_c = 3..6$ mm/s = $0,003..0,006$ m/s durchgeführt, wobei die Ritztiefen max. $h_r = 250$ μm betragen [127].

Bei Ritzversuchen an Beton [35] und Marmor [195] konnte festgestellt werden, dass die Prozesskräfte F_n und F_t mit steigender Zustellung linear ansteigen. Da die erzeugten Ritzspuren in Abhängigkeit der Zustellung bzw. kritischen Spannungstiefen infolge der induzierten Rissbildung und den dadurch auftretenden Materialausbrüchen deutlich größer werden, sinkt die notwendige spezifische Energie asymptotisch mit steigender Zustellung an [35, 38].

Sprödharte mineralische Werkstoffe - Einfluss der Kornform

Löns hat kegelige Ritzwerkzeuge mit unterschiedlichen Spitzenradien verwendet und diese bei Ritzversuchen an verschiedenen Gesteinsarten bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 4$ cm/min = $0,0066$ m/s eingesetzt [120]. Dabei konnte er feststellen, dass ein größerer Spitzenradius und eine kleinere Einzelkornspannungsdicke zu höheren spezifischen Kräften führen.

Ähnliche Erkenntnisse haben *Dai et al.* beim Ritzen von Keramiken aus Siliciumcarbid gewonnen, allerdings bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 20$ m/s. Hierbei führt ein größerer Verrundungswert der Schneidkante der dominierenden Kornfläche ebenfalls zu höheren Normalkräften, da hierdurch der effektive Spanwinkel stärker negativ wird [33].

Hütt hat bei Ritzversuchen an Gesteinen pyramidenförmige Diamanten verwen-

det und diese in zwei verschiedenen Ausrichtungen eingesetzt [91]. Bei der ersten Ausrichtung steht eine Fläche der Pyramide senkrecht zur Schnitttrichtung. Bei der zweiten Ausrichtung liegt eine der Seitenkanten der Pyramide in Schnitttrichtung. Diese Ausrichtung wurde vorwiegend bei den Untersuchungen eingesetzt. Da *Hütt* Informationen zur kristallographischen Struktur der Diamanten vorlagen, konnte er feststellen, dass die Kristallstruktur einen erheblichen Einfluß auf die Höhe des Verschleißes und das Zerspannungsvolumen hat [91]. Diese Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit Ergebnissen von *Busch* [26], bei denen ebenfalls ein Einfluss der Kristallstruktur auf das Verschleißverhalten beim Ritzen festgestellt wurde.

Schulze hat Untersuchungen an den Gesteinen Colombo und Impala durchgeführt und dabei drei Modellkörner mit definierter Form eingesetzt, um neue unbeschädigte Körner, abgeflachte verrundete Körner und gesplitterte Körner nachzubilden [166]. Bei Ritzversuchen mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 20$ m/s wurde festgestellt, dass die Kornform einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Tangentialkräfte hat, jedoch signifikante Unterschiede bei der Normalkraft und den erzeugten Ritzspuren bestehen. Bezogen auf die Querschnittsfläche liegen beim angeflachten Modellkorn, das eine verrundete Spitze aufweist, die höchsten Kräfte vor. Die kleinsten Kräfte sind beim gesplitterten Modellkorn festzustellen, das eine längliche Schnittkante aufweist. Diese Schneidkante steht nach *Schulze* nur punktuell mit dem Werkstück in Kontakt, weshalb auch kleine Normalkräfte zu hohen Druckspannung führen, die eine Rissbildung im Gestein initiieren. Beim angeflachten Modellkorn geht *Schulze* davon aus, dass hohe Spannungen unterhalb des Kornes auftreten, die zu einer Materialzerstörung und Ausbrüchen führen, weshalb hier eine unregelmäßige Ritzspur vorliegt. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass aufgrund der Kornform gelöstes Material nicht vor dem Korn weggeschleudert, sondern sich unter dem Korn durchdrückt und hier komprimiert wird und mitunter als Sekundärspan sichtbar wird. Im geringeren Umfang tritt dieser Effekt auch beim Modellkorn auf, das ein unbeschädigtes Korn repräsentiert, da bei diesem unterhalb der Freifläche ebenfalls Material komprimiert wird. Anders als beim angeflachten Modellkorn wird der größere Teil des Werkstückmaterials als Primärspan vor dem Korn abgetrennt [166].

Denkena et al. stellten bei Ritzversuchen an Beton und Granit mit „...geometrisch definierten Diamanten...“ [35, 46], ohne die Form näher zu spezifizieren, fest, dass tendenziell mit höheren Schnittgeschwindigkeiten kleinere Prozesskräfte auftreten. Gleichzeitig sinkt das Schnittkraftverhältnis μ . Die kleineren Prozesskräfte werden durch eine höhere Impulswirkung erklärt, was eine Rissbildung begünstigt. Dies führt wiederum zu einem geringeren notwendigen Energieeintrag zur Materialtrennung und somit zu einem energieeffizienteren Prozess. Je größer der Anteil an sprödharten Gesteinpartikeln im Beton wird, desto mehr wirkt sich der Effekt der stoßartigen Impulse aus [35]. Die bei diesen Untersuchungen getesteten Schnittgeschwindigkeiten sind $v_c = 1, 5, 10, 15, 20$ und 30 m/s [35, 46]

Tanovic et al. haben Ritzversuche mit konischen, abgerundeten Diamanten durchgeführt und dabei verschiedene Versuchsaufbauten verwendet. Dabei konnte festgestellt werden, dass die im Marmor vorliegenden Materialinhomogenitäten direkt die auftretenden mechanischen Belastungen beeinflussen. Auch hier führen wie bei *Schulze* höhere Schnittgeschwindigkeiten zu höheren Normalkräften [178].

Azinte et al. haben Versuche mit durch Laserablation hergestellten Modellwerk-

zeugen aus Diamant durchgeführt. Diese wurden als Stümpfe mit einer dreieckigen, quadratischen und runden Grundform ausgeführt. Beim Ritzten von Saphir zeigte sich, dass das dreieckige Werkzeug, das mit einer Ecke in Schnittrichtung eingesetzt wurde, geringere Prozesskräfte, eine größere Ritzfurche und damit geringere spezifische Zerspankräfte im Vergleich zu den anderen beiden Werkzeugen hervorruft [9].

Duktile Werkstoffe

Kato et al. haben Ritzversuche an Aluminium mit einem speziellen Aufbau in einem Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt [96]. Das eingesetzte Ritzwerkzeug, in Form eines Tetraeders wird hinsichtlich des Angriffswinkels α_{trib} und des Öffnungswinkels v variiert. In Abhängigkeit dieser Einflussgrößen können drei Bereiche der Materialtrennung unterschieden werden, die mit den in Kapitel 2.5.2 eingeführten Begrifflichkeiten von *Martin* und *Yegenoglu* in Übereinstimmung gebracht werden können: das Mikrofliegen („shearing“), Mikrospanen-Schälspanen („wedge forming“) und das Mikro-Fließspanen („cutting“). Das Mikro-Fließspanen liegt bei Öffnungswinkeln im Bereich von $v = 75$ bis 120° vor. Das Mikrospanen-Schälspanen liegt ab einem Öffnungswinkel von $v > 140^\circ$ vor. Ab einem Angriffswinkel von $\alpha_{\text{trib}} < 40^\circ$ wird davon ausgegangen, dass ein Mikrofurche vorliegt [96].

Matsuo et al. haben bei Ritzversuchen an Stahl festgestellt, dass bei höheren Schnittgeschwindigkeiten kleinere Prozesskräfte auftreten und das Schnittkraftverhältnis μ kleiner wird, da die Abnahme der Schnittkraft größer ist, als die Abnahme der Normalkraft [126]. *Martin* argumentiert bei Analysen zum Materialabtrag beim Honen, dass der Werkstoff bei höheren Geschwindigkeiten „härter“ wirkt, weshalb bei höheren Geschwindigkeiten und gleicher Normalkraft das Korn weniger weit in den Werkstoff gedrückt werden kann [123].

Ausführliche Untersuchungen in dem Geschwindigkeitsbereich von $v_c = 0,3$ m/s bis 5 m/s im Rahmen von Ritzversuchen wurden von *Gwierzew* und *Brinksmeier* durchgeführt. Allerdings werden dabei Einzelkornspannungsdicken im Bereich von $h_{\text{cu}} < 3 \mu\text{m}$ betrachtet [20, 21, 77]. Bei diesen Einzelkornspannungsdicken wird aufgrund ungünstiger Eingriffbedingungen überproportional viel Energie für die Materialtrennung benötigt. Nach *Brinksmeier* liegt bei diesen geringen Einzelkornspannungsdicken ein Mikrofliegen vor [20, 21].

Beim Ritzten von ferritischem Stahl (St37, 1.0037), der eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie der normalerweise als Betonstabstahl eingesetzte Stahl BSt500 (1.0439, neue Bezeichnung B500B) hat, wird beobachtet, dass die Kräfte mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit abnehmen. Dies wird mit einer geringeren notwendigen Umformarbeit aufgrund einer thermischen Entfestigung erklärt [5, 46, 47]. Auswirkungen auf die Ausprägung der Ritzspuren werden dagegen nicht festgestellt, woraus *Denkena et al.* schließen, dass der wirkende Materialtrennungsmechanismus unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit ist [46, 47]. Des Weiteren erfolgten im Rahmen der gleichen Untersuchungen Versuche an einem austenitischen Stahl (X5CrNi1810, 1.4301), dessen mechanischen Eigenschaften ähnliche Werte aufweisen, wie der zuvor genannten Betonstabstahl. Bei diesen Versuchen steigen die Kräfte ab einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c > 20$ m/s an. Dies wird durch steigende mechanische Spannungen erklärt, die mit höheren plastischen und elastischen Verformungen einhergehen [5, 46, 47]. Demnach müssen

diese Effekte gegenüber der thermischen Entfestigung des Materials überwiegen.

Duktile Werkstoffe - Einfluss der Kornform

Ohbuchi et al. haben keilförmige Diamant- und CBN-Körner, aber auch Hartmetallwerkzeuge bei Ritzversuchen von Stahl und Blei eingesetzt, um den Einfluss der Kornform und des Spanwinkels untersuchen zu können [144]. Dabei wurde festgestellt, dass je größer negativ der Spanwinkel wird, desto größer wird die Normalkraft und kleiner das Schnittkraftverhältnis. Zudem vergrößert sich durch größere negative Spanwinkel die Zone, die durch plastische Deformationen beeinflusst ist.

In mehreren Untersuchungen wird gezeigt, dass, wenn die größte im Eingriff stehende Kornfläche senkrecht zur Schnittrichtung oder nur in einem kleinen Winkel dazu verdreht steht, Werkstückmaterial bei duktilen Werkstoffen abgespannt wird [8, 9, 126, 174]. Je mehr diese Fläche in Relation zur Schnittrichtung verdreht wird, desto mehr Material wird nur plastisch verdrängt und fließt an der Schneide vorbei. Da hierbei geringe maximale Fließspannungen auftreten, wird weniger Material abgespannt und es verbleiben umfängliche Materialaufwürfe am Ritzspurrand [8, 9, 174]. Diese Erscheinungen werden sowohl bei Versuchen mit definierter Werkzeugform [9, 126] als auch bei Versuchen mit normalen Schleifkörnern, deren Form vor den Versuchen analysiert wurde, festgestellt [8, 126, 174]. Neben Versuchen mit Körnern, die in Einschränkungen eine senkrechte Fläche in Bezug zur Schnittrichtung aufweisen, wurden in einer Vielzahl von Untersuchungen verrundete und/oder konische Körner verwendet. Versuche mit Körnern, die eine verrundete Spitze aufweisen zeigten, dass bei dieser Kornform ungünstige Eingriffsbedingungen vorliegen, durch die das Material im Wesentlichen plastisch verdrängt wird und nur ein geringer Teil abgespannt wird. Bei Versuchen mit konischen Werkzeugen haben *Matsuo et al.* festgestellt, dass je größer der Öffnungswinkel und je stärker negativ der Spanwinkel wird, desto größer der Normalkraftanteil an der Zerspankraft wird [126].

Anderson vergleicht in seinen Untersuchungen ein abgestumpftes konisches und ein verrundetes konisches Diamantwerkzeug [2, 3]. Hierbei zeigt sich, dass sich bei dem abgestumpften Diamantwerkzeug, das eine Schneidkante aufweist, ein Span an der Schneidkante ausbilden kann. Eine FEM-Analyse der Materialtrennung zeigt, dass die maximalen Spannungen nach *von Mises* im Werkstückwerkstoff bei beiden Kornformen zwar ähnlich sind, aber beim Kegelstumpf konzentriert im aufgeworfenen Material vor der Schneide in der Scherebene vorliegen, während diese beim verrundeten Korn in einem großen Volumen vor, neben und unter dem Korn vorliegen.

Umfangreiche und detaillierte Untersuchungen im Rahmen einer Analyse zum Honräumen hat *Vargas* durchgeführt [188]. Dabei wurden oktaedrische Diamantkörner manuell selektiert, ausgerichtet und bei Ritzversuchen an einem Einsatzstahl eingesetzt. Bei Schnittgeschwindigkeiten von $v_c = 0,18$ m/s stellten sich diejenigen Kornausrichtungen als zielführend hinsichtlich der Materialtrennung dar, bei denen eine große Fläche des Kornes in Schnittrichtung liegt. *Vargas* nimmt an, dass hierdurch der Mechanismus des Mikrospanens begünstigt wird, da weniger Material quer zur Schnittrichtung fließen kann.

Azinte et al. haben die bereits zuvor beschriebenen Werkzeuge mit dreieckiger, runder und quadratischer Grundform neben Saphir auch beim Ritzen von Kupfer

eingesetzt [9]. Hierbei stellt sich das Werkzeug mit quadratischer Grundform als vorteilhaft dar, da durch dieses das Material abgespannt wird, während bei der dreieckigen Grundform seitliche Materialaufwürfe verursacht werden. Sowohl bei Saphir als auch bei Kupfer ist die runde Grundform hinsichtlich der spezifischen Kräfte die schlechteste der drei getesteten Grundformen.

Umfängliche Untersuchungen zum Einfluss der Kornform beim Ritzten des Stahls 100Cr6 wurden von *Rasim* durchgeführt [153]. Dabei wird dargelegt, dass die Beschreibung des Kornes durch zweidimensionale Werte und deren Auswirkungen auf die Spanbildung nicht ausreichen. Neben der Betrachtung und Beschreibung des Schneidkornprofils in Schnittrichtung ist auch eine Charakterisierung der Kornform quer zur Schnittrichtung durchzuführen. *Rasim* stellte fest, dass je größer negativ der Winkel des Kornes in Schnittrichtung ist, desto größer wird die Schnitteinsatztiefe T_{μ} . Demzufolge muss das Korn tiefer in das Material eindringen, um plastische Deformationen und eine Spanbildung erzeugen zu können. Dahingegen ist bei größeren Werten für den Öffnungswinkel des Kornes zu beobachten, dass kleinere Werte für die Schnitteinsatztiefe vorliegen, wobei ein Korn mit einem Öffnungswinkel von $\nu = 180^\circ$ in der projizierten Ansicht von oben eine senkrecht zur Schnittrichtung stehende Kante aufweisen würde. Höhere Werte der Schnitteinsatztiefe sind zudem bei größeren Kornwinkeln quer zur Schnittrichtung (Spitzenwinkel) zu sehen [154]. Den größten Einfluss auf die Schnitteinsatztiefe hat der Spanwinkel, gefolgt von dem Öffnungswinkel. Der Einfluss des Spitzenwinkels ist dagegen nach *Rasim et al.* sehr klein. In weiterführenden Analysen wurde von *Rasim* auch die momentane spezifische Energie in Abhängigkeit von der am Korn definierten Winkel analysiert [152]. Tendenziell haben die Winkel am Korn die gleichen Auswirkungen auf die momentane spezifische Energie wie auf die Schnitteinsatztiefe.

Verbundwerkstoff Stahlbeton

Die Analyse der Materialtrennung bei Stahlbeton erfolgte in den veröffentlichten Arbeiten mehrheitlich auf Grundlage von Einzelkornritzversuchen an Proben aus Beton oder Stahl. Nur wenige Versuche wurden unmittelbar an Stahlbetonproben durchgeführt.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Einzelkornkräfte und damit auch die Prozesskräfte, die auf das Werkzeug wirken, im Stahl höher sind als im Beton [5, 34, 35, 38]. Zudem gilt, dass aufgrund des elastisch-plastischen Materialverhaltens von Stahl beim Ritzten das Verhältnis des Querschnitts des eingesetzten Kornes zur erzeugten Ritzspur tendenziell $k_A \leq 1$ ist. Dementsprechend sind die Abtragsfaktoren ungefähr $k_b \approx 1$ und $k_t \approx 1$ [38, 47]. Dagegen sind im Beton die erzeugten Ritzspuren in der Regel größer als der Querschnitt des eingesetzten Kornes, weshalb die Werte für $k_A \geq 1$ sind.

Apmann und *Denkena et al.* haben Ritzversuche an Stahl und Beton mit abgestumpften konischen Diamanten durchgeführt und dabei festgestellt, dass beim Ritzten von Stahl im Vergleich zu Beton höhere Schnittkraftverhältnisse vorliegen. Im Stahl beträgt das Schnittkraftverhältnis $\mu \approx 0,5$, während im Beton das Schnittkraftverhältnis bei $\mu \approx 0,3$ liegt. Die geringeren Werte für Beton werden durch eine höhere Härte und eine geringe Biegefestigkeit erklärt [5, 46]. Diese Erkenntnisse stimmen mit Ergebnissen von *Busch* überein, der Ritzversuche an duktilen und sprödharten Werkstoffen durchgeführt hat. Das Fazit dieser Unter-

suchungen ist, dass bei duktilen Werkstoffen, die eine höhere Zähigkeit aufweisen, höhere Tangentialkräfte vorliegen [26].

Versuche an Proben aus Stahlbeton wurden von *Apmann* durchgeführt [5]. Hierbei wurde im Rahmen der Ritzversuche eruiert, dass die gemessenen Prozesskräfte in den einzelnen Beton- und Stahlphasen vergleichbar zu den Versuchen an reinen Stahl- oder Betonwerkstücken sind. Durch den Phasenwechsel zwischen Stahl und Beton sollte nach *Apmann* der Diamant einer höheren mechanischen Belastung ausgesetzt sein. Allerdings konnten von *Apmann* keine impulsartigen Belastungen aufgrund der gewählten Versuchsmethodik festgestellt werden [5].

Beim Ritzen von Beton kann beobachtet werden, dass die Zunahme des Tiefen- und Breitenabtragsfaktors über der Zustellung größer ist als die Zunahme der Normal- und Tangentialkraft. Hierdurch ergibt sich, dass durch größere Zustellungen eine energetisch effizientere Bearbeitung erfolgen kann. Aus diesem Grund empfehlen sowohl *Apmann* als auch *Denkena et al.* für Beton als auch Stahl eine möglichst große Einzelkornspannungstiefe zu wählen [46, 47].

2.6.2 Mehrkornritzversuche

In diesem Kapitel sind die Untersuchungen zur Bearbeitung von Beton und Stahlbeton durch Mehrkornritzwerkzeuge zusammengefasst. Dies umfasst Untersuchungen mit einzelnen Segmenten, auch Einsegmentversuche genannt, sowie Untersuchungen, bei denen anwendungsnahe Versuche durchgeführt wurden. Berücksichtigt werden hierbei aufgrund der wenigen veröffentlichten Arbeiten auch Untersuchungen zu Trennschleifscheiben und zum Seilschleifen, die in der Praxis auch unter „Sägeverfahren“ zusammengefasst werden. Die hierbei üblichen Schnittgeschwindigkeiten sind für das Seilschleifen $v_c > 10$ m/s und für das Trennschleifen $v_c > 20$ m/s.

Untersuchungen zu Trennschleifscheiben und zum Seilschleifen

Busch und *Walker* haben Kreissägeversuche an bewehrtem und unbewehrtem Beton durchgeführt [28]. Durch die Bewehrung des Betons treten höhere Verschleißkennwerte auf. Zudem wird beim Sägen der Stahlbewehrung empfohlen, die Umfangsgeschwindigkeit zu reduzieren, um die thermische Belastung der diamantimprägnierten Segmente und damit den Verschleiß zu reduzieren.

Biener hat Untersuchungen zum Trennschleifen an Beton mit Kreissägen durchgeführt und dabei das in Kapitel 2.5.1 vorgestellte Materialtrennungsmodell für Beton entwickelt. Innerhalb der durchgeführten Untersuchungen wurde der Trennschleifprozess durch Einzelkorn-, Einsegment- und Sägeversuchen analysiert [14, 15]. Es zeigte sich dabei eine gute Übertragbarkeit zwischen den Ergebnissen der Einsegment- und Sägeversuche.

Denkena et al. haben Trennschleifversuche an Beton und Stahlbeton durchgeführt, um die Auswirkungen deterministischer Setzmuster bei einlagig belegten Diamantschleifwerkzeugen zu untersuchen [38, 43]. Die deterministischen Setzmuster wurden dabei auf Grundlage von Einkornritzversuchen ausgelegt. Es konnte festgestellt werden, dass hinsichtlich der mechanischen Belastungen kein unmittelbarer Einfluss des Setzmusters vorliegt, allerdings Vorteile hinsichtlich der Effizienz und der Sicherheit bestehen. Aufgrund einer homogeneren Verteilung der Einzelkornspannungsdicken bei deterministischen Setzmustern zeigten

sich weniger Stahlanhaftungen bei der Bearbeitung von Stahlbeton. Zudem wurde festgestellt, dass bei einer höheren gewählten Diamantkonzentration geringere Normalkräfte sowohl in der Beton- als auch der Stahlphase vorliegen.

Bei weiterführenden Versuchen zum Trennschleifen von Beton und Stahlbeton mit Kreissägen wurde von *Denkena et al.* festgestellt, dass sich die Inhomogenität verschiedener Betongüten unmittelbar auf die Bearbeitungsprozesse auswirkt [40]. Die unterschiedlichen Gesteinskörnungen führen zu instationären Prozesskräften und beeinflussen die auftretenden Verschleißerscheinungsformen. Die Durchtrennung der Bewehrung führt zu hohen mechanischen und thermischen Belastungen aufgrund ungünstiger Materialtrennmechanismen und Reibungsvorgänge. In der Folge kann ein höherer Verschleiß der Diamantkörner beobachtet werden. Die Normalkräfte beim Durchtrennen des bewehrten Betonbereichs sind bis zu 150 % höher im Vergleich zum unbewehrten Betonbereich. Daher konnten *Denkena et al.* bei Trennschleifversuchen an bewehrtem Beton eine Verschleißzunahme um bis zu 200 % beobachten.

Neben dem Trennschleifen von Beton und Stahlbeton mit Kreissägen und Schleifscheiben untersuchten *Denkena et al.* auch das Verfahren Seilschleifen, das in der Praxis „Seilsägen“ genannt wird. Hier wurden deterministische Setzmuster der Diamanten mit einer stochastischen Verteilung verglichen. Die Setzmuster wurden dabei wie bei den Trennschleifscheiben auf Grundlage der Ergebnisse von Einkornritzversuchen ausgelegt. Bei der Bearbeitung von Beton konnten Vorteile der Seilschleifwerkzeuge mit deterministischem Setzmuster der Diamanten gegenüber Werkzeugen mit stochastischer Verteilung der Diamanten erkannt werden. Durch die deterministische Anordnung der Diamanten konnte die Diamantkonzentration im Vergleich geringer gewählt werden [42].

Bei weiteren Untersuchungen von *Denkena et al.* zum Seilschleifen wurde der Einfluss verschiedener Herstellungsverfahren auf die Leistungsfähigkeit der Werkzeuge untersucht [101]. Hierbei wurde festgestellt, dass mehrlagige Werkzeuge aufgrund des Selbstschärfungseffekts Vorteile gegenüber einlagig belegten Werkzeugen aufweisen können.

Zur Analyse des seitlichen Abstands im Rahmen von Mehrkornritzversuchen wurden von *Denkena et al.* diamantbeschichtete Modellwerkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide entwickelt [34]. Die seitlichen Abstände wurden dabei auf Grundlage der in Einkornritzversuchen ermittelten Breitenabtragsfaktoren eingestellt. In weiterführenden Untersuchungen [36] mit diesem Werkzeugtyp wurde festgestellt, dass der Tiefenabtragsfaktor sowohl im Stahl als auch Beton $k_t \approx 1$ ist. Der Breitenabtragsfaktor im Beton ist dagegen $k_b > 1$, während er bei Stahl ebenfalls $k_b \approx 1$ ist. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass durch die Einstellung des seitlichen Abstands eine Reduzierung der notwendigen spezifischen Energie erzielt werden kann [36].

Untersuchungen zum Kernbohren

Busch erzielt beim Kernbohren von Beton und Stahlbeton durch höhere Vorschubkräfte bzw. Anpressdrücke der Bohrkronen höhere Vorschubgeschwindigkeiten [27]. Allerdings sinkt hierdurch die Werkzeugstandzeit, da sowohl die Diamanten als auch die Bindung schneller verschleifen. In der Folge gibt es ein Optimum hinsichtlich der Gesamtkosten, die sich aus den Werkzeugkosten und den Kosten für den zeitlichen Aufwand berechnen lassen.

Bullen und *Brown* haben bei Kernbohrversuchen an Beton und Stahlbeton unterschiedliche Diamantkornqualitäten, -größen und -konzentrationen getestet [23]. Hierbei wurde festgestellt, dass beim Bohren von Stahlbeton größere Diamantkörner Vorteile gegenüber kleineren Diamantkörnern aufweisen. Zudem können längere Standzeiten durch eine höhere Diamantkonzentration erzielt werden. Auch bei den Untersuchungen von *Bailey* und *Collin* stellt sich der Einsatz größerer Diamantkörner von $d_k = 25/35$ mesh beim Bohren eines Betons mit Flintgesteinskörnung als vorteilhaft gegenüber kleineren Diamantkörnern dar [12].

Miller und *Ball* führten Bohrversuche mit diamantimprägnierten Werkzeugen an verschiedenen Natursteinen durch [129, 130]. Hierbei wurde festgestellt, dass es einen minimalen spezifischen Wert des Anpressdrucks der Segmente gibt, ab dem ein kontinuierlicher Bohrprozess möglich ist, da eine Selbstschärfung durch Kornbruch eintritt. Zudem konnte ein Optimum der spezifischen Energie in Abhängigkeit des Anpressdrucks beim Bohren ermittelt werden.

Lammer hat Diamantkernbohrversuche an zwei verschiedenen Stahlbetonen durchgeführt [112]. Hierbei zeigt sich eine Abnahme der erzielbaren Vorschubgeschwindigkeit beim Bohren der Bewehrung um den Faktor 4, bei gleichzeitigem Anstieg der spezifischen Energie um ungefähr den Faktor 3,5. Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wurde ein optimaler Vorschub in Abhängigkeit der spezifischen Energie ermittelt.

Moseley zeigt in seinem Beitrag die Vielzahl von Einflussgrößen auf, die bei der Entwicklung von Komplettsystemen beim Diamantkernbohren zu beachten sind [131]. Anzumerken ist hierbei insbesondere, dass verschiedene Modelle darauf hinweisen, dass ca. 50 % der auf der Oberfläche sichtbaren Diamanten einen Materialabtrag generieren und damit als „aktiv“ bezeichnet werden können. Die Anzahl der „aktiven“ Diamanten ist dabei von verschiedenen Faktoren abhängig. Beim Bohren von Graniten mit diamantimprägnierten Werkzeugen haben *Wright et al.* die Überstandshöhe der Diamanten gemessen und diese klassifiziert, um die Anzahl aktiver Diamanten zu bestimmen. Auf Grundlage der Überstandshöhen gehen *Wright et al.* davon aus, dass nur ca. 24 % der auf der Oberfläche vorliegenden Diamanten eine Materialtrennung verursachen [205].

2.7 Abgeleitete Problemstellungen

In der Bau- und der Natursteinindustrie findet sich ein großes Einsatzfeld diamantimprägnierter Schleifwerkzeuge. Angewendet werden diese Werkzeuge in der Bauindustrie beim Neubau, bei der Sanierung oder der Nutzungsänderung oder beim Abriss von Bauwerken. Trotz des umfangreichen Einsatzes dieser Werkzeuge existieren nur in geringem Maße wissenschaftliche Forschungsarbeiten zur trennenden Bearbeitung von Beton und Stahlbeton durch diamantimprägnierte Werkzeuge. Dies erscheint verwunderlich, da bis heute die trennende Bearbeitung des Verbundwerkstoffs Stahlbeton durch diamantimprägnierte Werkzeuge eine Herausforderung darstellt, die nur unzureichend, d. h. bei geringen erzielbaren Vorschubgeschwindigkeiten oder hohem Werkzeugverschleiß, gelöst ist.

Die meisten der durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen sind auf das Trennschleifen fokussiert, bei dem entweder Trennschleifscheiben oder Seilschleifwerkzeuge eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde das Trennschleifen mithilfe von Einkornritzversuchen und auf Anwendungsebene der Werk-

zeuge analysiert. Der untersuchte Bereich der Schnittgeschwindigkeit ist hinsichtlich der Anwendung ausgelegt. Dabei ist die Schnittgeschwindigkeit beim Einsatz von Trennschleifscheiben in der Regel $v_c > 20$ m/s. Zum Diamantkernbohren von Beton finden sich dagegen nur vereinzelte veröffentlichte Untersuchungen. Da der Bereich der Schnittgeschwindigkeit für das Diamantkernbohren bei $v_c < 5$ m/s liegt und im Vergleich zum Trennschleifen kein unterbrochener Schnitt vorliegt, können die Erkenntnisse der Untersuchungen zum Trennschleifen nur bedingt auf das Diamantkernbohren übertragen werden.

Die in Kapitel 2.5.1 vorgestellten Materialtrennungsmodelle für Naturstein und Beton basieren im Wesentlichen auf Untersuchungen, die aufgrund technischer Einschränkungen mit Schnittgeschwindigkeiten von $v_c \ll 1$ m/s und zudem im Wesentlichen an Naturstein durchgeführt wurden. Die Übertragung dieser Materialtrennungsmodelle auf Beton scheint zulässig, da der größere Teil des Betons aus Gesteinskörnung besteht. Allerdings wird dabei die Inhomogenität des Betons und der Einfluss der Zementsteinphase vernachlässigt.

Unberücksichtigt bleibt bislang der Einfluss der Kornform auf die Materialtrennung bei Beton und Stahlbeton. Die von *Martin* und *Yegenoglu* eingeführten Spanbildungsmodelle, siehe Kapitel 2.5.2, bei duktilen metallischen Werkstoffen berücksichtigen die Eingriffssituation des Schleifkorns und beschreiben damit den Einfluss der Kornform auf die Materialtrennung. Bei der Beschreibung der Trennmechanismen bei Gesteinen und Beton ist dagegen der Einfluss der Kornform noch nicht abgebildet, obwohl in mehreren Untersuchungen, siehe Kapitel 2.6.1, gezeigt wurde, dass die Kornform, d. h. die Anzahl der im Eingriff stehenden Flächen und Schneidkanten sowie deren Orientierung sowohl bei duktilen als auch bei sprödharten mineralischen Materialien einen signifikanten Einfluss auf die Materialtrennung hat.

Daraus ergibt sich die Problemstellung, dass die grundlegenden Vorgänge der Materialtrennung beim Bearbeitungsverfahren Diamantkernbohren von Beton und Stahlbeton bisher nur unzureichend beschrieben werden. Auf Ebene einzelner Diamanten bestehen keine Erkenntnisse zum Einfluss der Diamantkornform auf das Einsatzverhalten, wie z. B. die Materialtrennung und das Verschleißverhalten. Die vorhandenen Erkenntnisse zum Einfluss der Diamantform bei Naturstein, z. B. von *Löns* [120], *Hütt* [91] und *Schulze* [166], lassen sich eingeschränkt auf die Bearbeitung von Beton, aber nicht auf die Bearbeitung des Verbundwerkstoffs Stahlbeton übertragen. Darüber hinaus fehlen Kenntnisse zur Bearbeitung von hochfestem Beton und Stahlbeton durch diamantimprägnierte Werkzeuge.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Trotz des umfangreichen Einsatzes diamantimprägnierter Werkzeuge in der Bau- und Natursteinindustrie finden sich nur wenige veröffentlichte wissenschaftliche Arbeiten, deren Fokus die trennende Bearbeitung ist. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher Grundlagenuntersuchungen auf verschiedenen Ebenen zum Einsatzverhalten von diamantimprägnierten metallisch gebundenen Diamantwerkzeugen durchgeführt, siehe Abbildung 3.1. Durch die Erarbeitung und Darstellung der Wirkzusammenhänge auf verschiedenen Untersuchungsebenen können die fundamentalen Zusammenhänge aufgezeigt und damit die Grundlage zur Optimierung von diamantimprägnierten Werkzeugen gelegt werden. Als Anwendungsfall dient dabei das Diamantkernbohren von Stahlbeton.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Analyse der Vorgänge am einzelnen Diamantkorn in sogenannten Einkornritzversuchen. Hierbei stellt der Einfluss der Diamantkornform hinsichtlich verschiedener Untersuchungsaspekte einen wesentlichen Schwerpunkt dar. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass beim Einsatz unterschiedlicher Diamantkornformen und damit Kontaktbedingungen verschiedenartige Wirkmechanismen vorliegen. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher in Abhängigkeit der Diamantkornform die grundlegenden Materialtrennungsmecha-

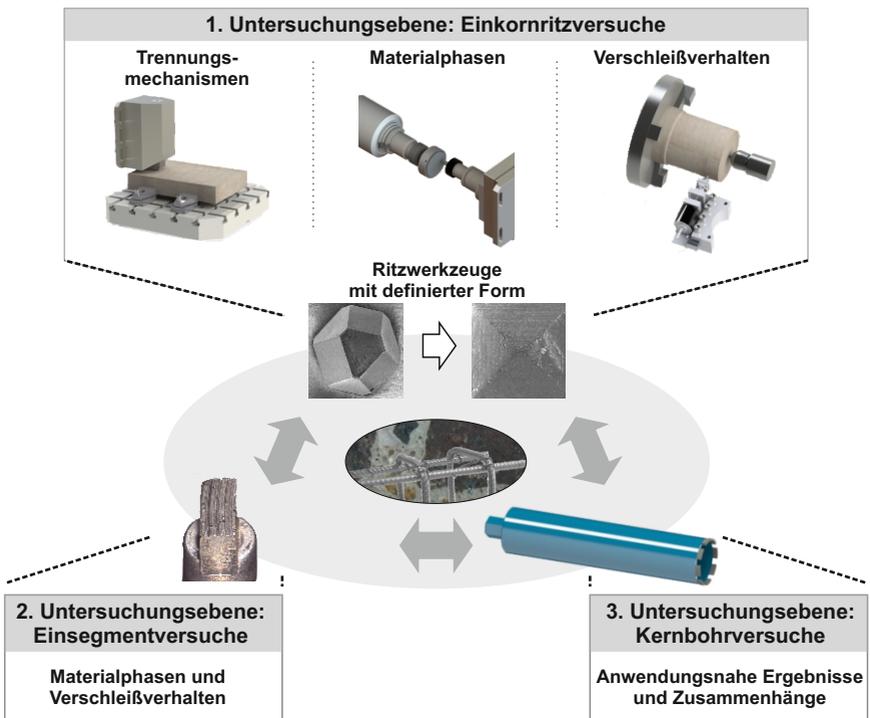


Abbildung 3.1: Untersuchungsebenen und -aspekte

nismen, der Einfluss der Materialphasen sowie das Verschleißverhalten analysiert. Darüber hinaus erfolgen Einsegmentversuche zur Analyse des Verschleißverhaltens diamantimprägnierter Segmente. Durch Diamantkernbohrversuche an Stahlbeton kann des Weiteren eine anwendungsbezogene Analyse durchgeführt werden, die der Darstellung der grundlegenden Zusammenhänge und Herausforderungen bei der Stahlbetonbearbeitung dient.

Im ersten Teil der Einkornritzversuche werden die grundlegenden Materialtrennungsmechanismen in Abhängigkeit der Diamantkornform analysiert. Hierzu erfolgen Versuche mit zwei verschiedenen Betongüten auf einer Sondermaschine zur Spanbildungsanalyse mit linear ansteigender Zustelltiefe. Da Beton ein mehrphasiger Baustoff ist, erfolgen im zweiten Teil Versuche an ein- und mehrphasigen Proben. Hierdurch soll der Einfluss der Einzelphasen auf das Verhalten des mehrphasigen Werkstoffs Beton quantifiziert werden. Aufgrund seiner Eigenschaften wird Beton nur in wenigen Anwendungsfällen ohne Bewehrungsstahl eingesetzt, weshalb in weiteren Untersuchungen der Einfluss einer Stahlbewehrung und dessen Auswirkung auf die Materialtrennung analysiert werden. Abschließend erfolgen Verschleißuntersuchungen an einem hochfesten Beton unter Variation der Diamantkornform.

Durch Einkornritzversuche ist es möglich, die fundamentalen Vorgänge bei der Materialtrennung detailliert darzustellen. Die Abbildung der Verschleißmechanismen und -erscheinungen der metallischen Bindung der diamantimprägnierten Segmente ist hierdurch jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund ist die Übertragbarkeit der Versuche auf den realen Prozess eingeschränkt, weshalb weitergehende Einsegment- und Diamantkernbohrversuche durchzuführen sind. Einsegmentversuche stellen dabei wie Einkornritzversuche Modellversuche dar, die eine gegenüber der Anwendung detailliertere Analyse der Wirkzusammenhänge erlauben. Diese sind dabei für den Übertrag der Ergebnisse aus den Modellversuchen auf die Anwendung essentiell. Durch diese Versuche kann das Verschleißverhalten bei der Bearbeitung von Stahlbeton materialspezifisch in Abhängigkeit der Segmentspezifikation untersucht werden. Durch Diamantkernbohrversuche werden anwendungsgerecht die grundlegenden Zusammenhänge des Bearbeitungsprozesses untersucht. Hierbei wird der Einfluss der Segmentspezifikation auf die prozessrelevanten Kenngrößen dargestellt.

4 Einkornritzversuche

Beim Diamantkernbohren von Beton oder Stahlbeton sind in Abhängigkeit der Werkzeugspezifikation mehrere hundert von Diamanten gleichzeitig im Eingriff. Dabei weist jedes Diamantkorn eine unterschiedliche Größe, Form, Überstandshöhe und Einzelkornspannungsdicke auf. Zudem finden Interaktionen zwischen neben- und/oder hintereinander liegenden Diamantkörnern statt. Aufgrund dieser umfangreichen Menge von Einflussgrößen ist die Analyse fundamentaler Zusammenhänge erschwert. Einkornritzversuche sind eine etablierte Methodik, um einzelne Aspekte, die die Materialtrennung beeinflussen, gezielt untersuchen zu können. Im Rahmen der nachfolgend vorgestellten Arbeiten werden die Aspekte „Materialtrennungsmechanismen“, „Einfluss der Materialphasen“ und „Verschleißverhalten“ eingehend untersucht und die grundlegenden Zusammenhänge erarbeitet. Als Referenz für die durchgeführten Arbeiten hinsichtlich der gewählten Bearbeitungsparametergrenzen dient das Diamantkernbohren von Stahlbeton.

4.1 Diamantwerkzeuge

Bei Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide ist die Eingriffsform der einzelnen Schleifkörner nicht bekannt und unterliegt einer statistischen Verteilung. Um reproduzierbare Ergebnisse bei Versuchen mit einzelnen Schneidkörnern gewinnen zu können, ist es erforderlich, den Einfluss unterschiedlicher Kornformen zu minimieren bzw. auszuschließen. Aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Untersuchungen Diamantabrichtwerkzeuge der Fa. Dr. Kaiser mit definierter Spitzenform anstatt von Werkzeugen mit vereinzelt Diamantkörnern verwendet. Bei den eingesetzten Werkzeugen ist ein Diamantstäbchen in einen metallischen Grundkörper eingelötet. Die Diamantstäbchen können dabei durch HPHT-Prozesse oder durch CVD-Verfahren hergestellt sein. Zur Einstellung einer definierten Spitzenform werden die eingelöteten Diamantstäbchen durch Schleifprozesse bearbeitet. Da bei diesen Werkzeugen kein einzelntes Diamantkorn genutzt wird und die Form durch einen Schleifprozess erstellt wird, werden die Werkzeuge in den nachfolgend dargestellten Analysen nicht als Einkornwerkzeuge oder Diamantkorn, sondern als Diamantwerkzeuge bezeichnet.

Eingesetzt werden Diamantwerkzeuge mit zwei unterschiedlichen Spitzenformen. Bei der ersten Variante ist der Wirkteil des Werkzeugs pyramidenförmig angeschliffen, wobei der Spitzenwinkel der Pyramide $\sigma = 110^\circ$ beträgt. Diese Werkzeugvariante besteht aus CVD-MKD-Diamanten. Durch das Verdrehen der Werkzeuge um κ , siehe Abbildung 4.1, können zwei Ausrichtungen realisiert werden. Bei der als Ausrichtung A bezeichneten Variante liegt eine Seitenfläche der Pyramide in Schnittrichtung. Diese Fläche soll vereinfachend als Spanfläche bezeichnet werden. Der Ausrichtungswinkel κ für diese Ausrichtung ist mit $\kappa_A = 0^\circ$ definiert. Durch das Verdrehen der Pyramide um den Wert $\kappa_B = 45^\circ$ wird die zweite Eingriffssituation, die als Ausrichtung B deklariert werden soll, erzielt. Hierbei steht eine der vier Seitenkanten der Pyramide in Schnittrichtung nach vorn. Aufgrund dieser „führenden“ Seitenkante, die im Weiteren als führende Schneidkante bezeichnet werden soll, liegt eine keilartige Grundform vor. Dementsprechend sind

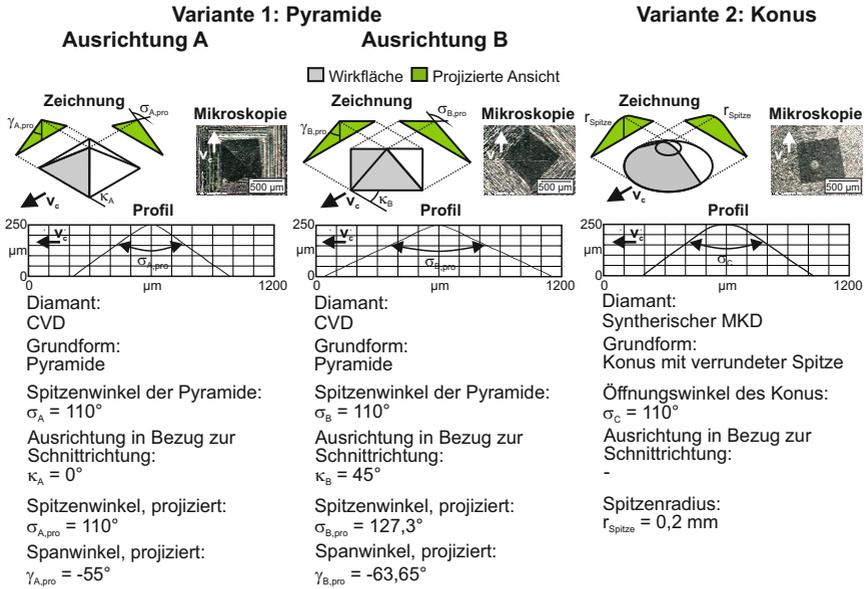


Abbildung 4.1: Verwendete Diamantwerkzeuge - Darstellung der eingesetzten Werkzeugformen und -ausrichtungen

hier aufgrund der Symmetrie zwei winklig zur Schnitttrichtung stehende Spanflächen zu definieren. Diese können weitergehend als linke und rechte Spanfläche bezeichnet werden. Durch den Einsatz der pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge in den Ausrichtungen A und B wird der Einfluss neuer oktaederförmiger Diamantkörner untersucht. Die definierte Form der Diamantwerkzeuge ermöglicht es anhand der projizierten Querschnittsflächen einen Span-, Keil- und Freiwinkel zu bestimmen. Die projizierten Spitzenwinkel $\sigma_{A,pro}$ und $\sigma_{B,pro}$ entsprechen dabei dem Keilwinkel β . Aufgrund der Symmetrie der Diamantwerkzeuge und ihrer senkrechten Ausrichtung der Mittelachse zur Werkstückprobenoberfläche weisen die Spanwinkel $\gamma_{A,pro}$ bzw. $\gamma_{B,pro}$ und die entsprechenden Freiwinkel $\alpha_{A,pro}$ bzw. $\alpha_{B,pro}$ die gleichen Werte auf.

Bei der zweiten Werkzeugvariante besteht das eingesetzte Diamantstäbchen aus einem monokristallinen Diamanten. Diese Werkzeugvariante weist einen konischen Anschliff mit einem Öffnungswinkel von $\sigma_C = 110^\circ$ auf. Die Spitze ist mit einem Radius von $r_{Spitze} = 0,2 \text{ mm}$ verrundet. Durch den Einsatz dieser Diamantwerkzeugform soll das Einsatzverhalten von verrundeten bzw. verschlissenen Diamantkörnern nachgebildet werden. Verrundete Diamantkörner können bei diamantimprägnierten Werkzeugen vorgefunden werden, die in der Praxis als „stumpf“ bezeichnet werden. Für diese Werkzeugvariante ist keine einfache Angabe der Span-, Keil- und Freiwinkel möglich. Aufgrund der verrundeten Spitze kann hier nur ein effektiver Span-, Keil- und Freiwinkel abhängig von der Eingriffshöhe des Diamanten angegeben werden.

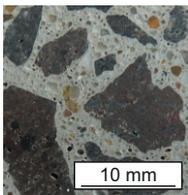
Im Stand der Technik wurde bereits beschrieben, dass monokristalline Diamanten

in Abhängigkeit der Kristallstruktur richtungsabhängige Eigenschaften besitzen [170]. Bei den durch ein CVD-Verfahren hergestellten Diamanten ist laut Hersteller von richtungsunabhängigen Eigenschaften auszugehen, d. h. der Einfluss der Kristallstruktur auf das Verschleißverhalten der CVD-Werkzeuge kann bei den durchgeführten Untersuchungen als vernachlässigbar eingestuft werden. Die konischen monokristallinen Diamanten weisen dagegen ein richtungsabhängiges Verhalten auf, das in die Versuche als nicht messbare Störgröße eingeht.

4.2 Probenspezifikationen

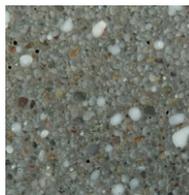
Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche erfolgen an zwei verschiedenen Betongütern. Zum einen wird ein konventioneller Beton der Druckfestigkeitsklasse C20/25 eingesetzt. Betone dieser Druckfestigkeitsklasse finden im allgemeinen Bauwesen Anwendung. Zum anderen wird ein hochfester Laborbeton der Druckfestigkeitsklasse C100/115 eingesetzt. Betone dieser Druckfestigkeitsklasse werden für hochbelastete Bauteile, wie z. B. im Fundament eines Hochhauses eingesetzt. Die Herstellung der Betonproben erfolgte durch das Institut für Bau- forschung der TU Dortmund. Eine Übersicht mit den Bestandteilen der beiden Betongütern zeigt Abbildung 4.2. Nachfolgend werden die Betongüter in gekürzter Form als „Beton C20/25“ und „Beton C100/115“ bezeichnet.

Beim Beton C100/115 wird Basaltsplitt als Gesteinskörnung, in zwei unterschiedlichen Korngrößen verwendet. Zudem ist hier der Einsatz eines hochfesten Zements (CEM I 52,5 R 3, Fa. Holcim), von Mikrosilika (Elkem Grade 971-U, Fa. BASF) und von Fließmittel (MasterGlenium 51, Fa. BASF) notwendig. Beim Beton C20/25 findet Rheinkies als Gesteinskörnung Verwendung. Wie der Abbildung 4.2 entnommen werden kann, befinden sich im Rheinkies unterschiedliche Gesteinsarten u. a. Basalt, Granit und Bims in unterschiedlichem Umfang. Anders als beim Basaltsplitt, bei dem es sich um gebrochene Steine handelt, weist Rheinkies runde bzw. abgerundete Formen auf. Bei beiden Betonen wird Sand als feinkörnige Gesteinskörnung eingesetzt. Der feinkörnige Sand wird der Ze-



Beton C100/115

Zusammensetzung:
Zement: CEM I 52,5 R
Zusatzmittel/-stoffe:
Mikrosilika, Fließmittel
Zuschlag: Sand 0/2,
Basalt 2/8 und 8/16
w/z-Wert: w/z = 0,3



Zementstein

Zusammensetzung:
Zement: CEM I 52,5 R
Zuschlag: Sand 0/2



Basalt

Nickenich,
Rheinland-Pfalz,
Fa. Schwab Mayen



Beton C20/25

Zusammensetzung:
Zement: CEM I 32,5
Zuschlag: Sand 0/2,
Rheinkies 2/8 und 8/16
w/z-Wert: w/z = 0,7

Abbildung 4.2: Zusammensetzung der Betongüter und der Einzelphasen

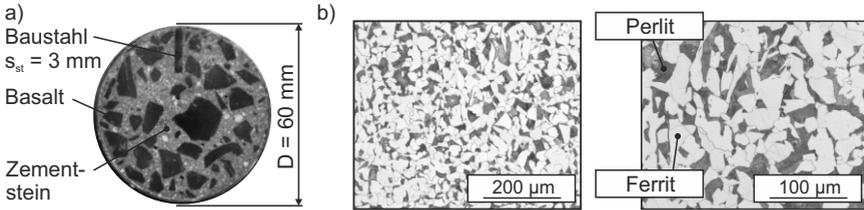


Abbildung 4.3: a) Stahlbetonprobe, b) Gefüge des verwendeten Baustahls 1.0577

mentsteinphase zugezählt. Hierdurch ist es möglich, den Beton C100/115 in zwei Hauptphasen aufzuteilen. Dies sind die Basaltphase, als Gesteinskörnung, und die Zementsteinphase, als Bindungsphase des Betons. Durch diese Aufteilung wird die Inhomogenität des Werkstoffs aufgelöst und es können Versuche an den Einzelphasen durchgeführt werden. Der Zementstein als Einzelphase sowie als Bindungsphase beim Beton C100/115 weist nur wenige Luftporen auf und das Gefüge ist relativ dicht. Im Vergleich dazu, ist die Zementsteinphase des Betons C20/25 deutlich offenerporiger. Dies erklärt sich insbesondere durch die deutlich höheren w/z -Werte bei der Herstellung des Betons C20/25.

Neben Versuchen an Betonen und deren Einzelphasen erfolgen Versuche an durch Stahl bewehrten Beton sowie an Stahl, siehe Abbildung 4.3. Die durch Stahl bewehrten Proben weisen dabei einen $s_{st} = 3$ mm breiten Steg auf. Betonstahl, wie z. B. B500B (1.0439, alte Bezeichnung BSt500), ist jedoch nur in Formelementen z. B. Stäben erhältlich, die für die Anwendung im Bauwesen benötigt werden. Eingesetzt wird daher als Ersatzmaterial ein allgemeiner Baustahl mit der Werkstoffnummer 1.0577 und der Bezeichnung S355J3. Das Gefüge dieses Stahls besteht aus Ferrit und Perlit. Bei Perlit handelt es sich um eine eutektoische Mischung aus Ferrit und Zementit, wobei das Zementit in lamellarer Form im Ferrit vorliegt [99].

Die Proben für die in Kapitel 4.4 und Kapitel 4.5 dargestellten Ritzversuche werden auf einer Flachsleifmaschine Typ FS 635-Z CNC der Fa. Geibel und Hotz bearbeitet. Zum Planen der Werkstücke wird eine Diamantschleifscheibe der Spezifikation 300-30-5-D126-MN50R 1A1 der Fa. Wendt eingesetzt. Zum Schrumpfen der Proben wird eine Werkstückgeschwindigkeit von $v_w = 15.000$ mm/min und eine Zustellung von $a_e = 30$ µm eingestellt. Zur Erzielung hinreichender Oberflächenqualitäten erfolgt ein abschließendes Schlichten bei einer Werkstückgeschwindigkeit von $v_w = 5000$ mm/min und einer Zustellung von $a_e = 5$ µm. Die durch die Prozessparameter erzielbare Oberflächenrauheit der Proben beträgt $Ra \leq 1,5$ µm ($\lambda_c = 0,25$ µm). Dabei ist zu berücksichtigen, dass sowohl Beton als auch Zementstein und Basalt Poren aufweisen, die die Höhe des Rauheitswertes beeinflussen.

4.3 Messmittel

Nachfolgend sind die Messmittel dargestellt, die im Rahmen mehrerer Untersuchungsreihen eingesetzt werden. Dies betrifft vornehmlich bildgebende Messmittel wie Mikroskope. Diese werden zur Kontrolle der Werkzeuge und zur Analyse der Ritzspuren verwendet. Dagegen werden versuchsspezifisch eingesetzte Messmittel,

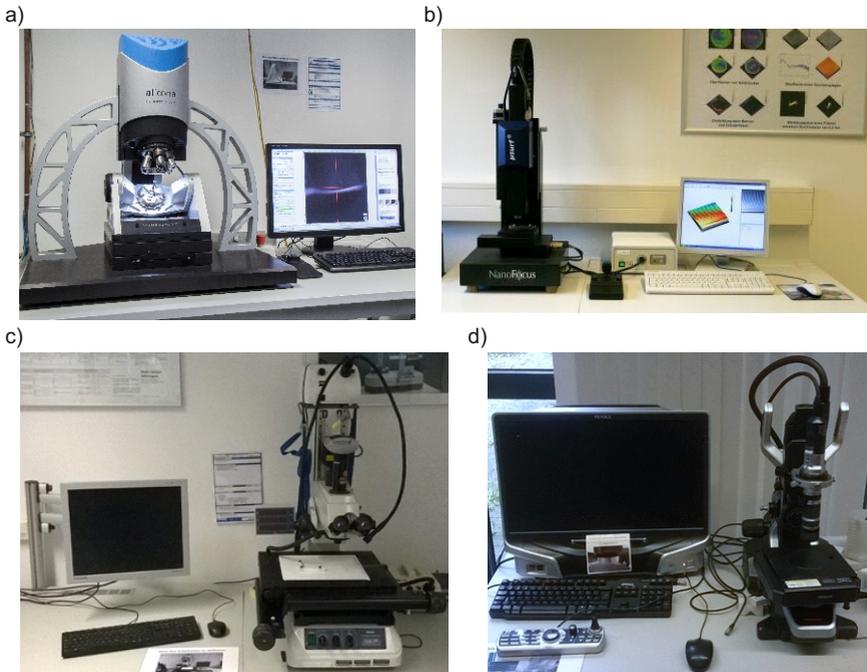


Abbildung 4.4: Fotos der eingesetzten Messmittel a) Optisches Form- und Rauheitsmessgerät, b) Konfokales Weißlichtmikroskop, c) Messmikroskop und d) Digitalmikroskop

wie z. B. die Kluftmesstechnik, unmittelbar in den jeweiligen Kapiteln der Untersuchungsreihen im Rahmen der Versuchsbeschreibung dargestellt.

Optisches Form- und Rauheitsmessgerät

Zur Anfertigung dreidimensionaler Oberflächenaufnahmen der erzeugten Ritzspuren auf den Betonproben sowie den Einzelphasen des Betons wird das Messmikroskop Typ InfiniteFocus G5 der Fa. Alicona eingesetzt, siehe Abbildung 4.4 a). Das Messprinzip dieses Mikroskops basiert auf der Fokus-Variation. Aufgrund von drei linearen Achsen und einer entsprechenden Softwaresteuerung besteht die Möglichkeit Mehrfachmessungen für größere Oberflächenaufnahmen sowie Messzyklen zu programmieren. Hierdurch werden Ritzspuren mit einem Objektiv mit 5-facher Vergrößerung vermessen, die bei den in Kapitel 4.4 dargestellten Versuchen erzeugt werden.

Konfokales Weißlichtmikroskop

Das konfokale Weißlichtmikroskop Typ μ surf der Fa. Nanofocus wird zur Erfassung dreidimensionaler Oberflächendaten verwendet, siehe Abbildung 4.4 b). Eingesetzt wird dieses Mikroskop zur Vermessung der Ritzspuren der Einkornritzversuche an Stahl und Stahlbetonproben in Kapitel 4.5 sowie der Ritzspuren bei

den Einsegmentversuchen an Stahlbeton in Kapitel 5.2. Die Aufnahmen erfolgen mit einem Objektiv mit 20-facher Vergrößerung. Bei der konfokalen Messtechnik werden durch den Einsatz von zwei Lochblenden nur die Oberflächenbereiche aufgezeichnet, die sich im Fokus des Objektivs befinden.

Messmikroskop

Das Messmikroskop MF-A der Fa. Mitutoyo, (siehe Abbildung 4.4 c), wird im Wesentlichen für die in Kapitel 4.4 dargestellten Untersuchungen eingesetzt. Dieses Mikroskop dient der Kontrolle und dem Ausrichten der Diamantwerkzeuge. Zudem werden mit diesem Mikroskop die Ritzspuren qualitativ untersucht.

Digitalmikroskop

Zur allgemeinen Verschleißkontrolle der Diamantwerkzeuge sowie zur Anfertigung der Verschleißbilder in Kapitel 4.6 wird das Digitalmikroskop Typ VHX-5000 der Fa. Keyence eingesetzt, (siehe Abbildung 4.4 d). Mit diesem Mikroskop können Tiefenschärfebilder in den Vergrößerungen von 5- bis 200-fach aufgenommen werden. Für die Verschleißbilder wird eine 100- und 200-fache Vergrößerung genutzt.

Digitale USB-Mikroskopkamera

Die digitale USB-Mikroskopkamera Typ Digimicroprofi der Fa. dnt weist ein kleines Bauvolumen und damit Flexibilität hinsichtlich des Einsatzortes auf, z. B. in Abbildung 4.5. Die Mikroskopkamera wird wie das zuvor genannte Messmikroskop MF-A zur Kontrolle und zum Ausrichten der Diamantwerkzeuge verwendet. Dabei kann es unmittelbar innerhalb der Werkzeugmaschinen bzw. der Versuchsaufbauten eingesetzt werden. Aus den gleichen Gründen wird die Mikroskopkamera für Aufnahmen der diamantimprägnierten Segmente bei den Einsegment- und Kernbohrversuchen eingesetzt.

4.4 Analyse der Materialtrennungsmechanismen

Wie im Stand der Technik, Kapitel 2.5.1 vorgestellt, wurde unter anderem von *Meding* ein Modell zur Beschreibung der Materialtrennung bei Naturstein entwickelt [128]. Dieses Modell beruht jedoch auf Ergebnissen und Beobachtungen, die bei sehr geringen Schnittgeschwindigkeiten gewonnen wurden. *Bienert* hat dieses Modell auf Beton übertragen und angepasst, wobei er Erkenntnisse berücksichtigte, die er bei Einsegmentversuchen ohne definierte Diamantkornform erzielte [15]. Bislang finden diese Modelle Anwendung bei der Erklärung der Wirkmechanismen der Materialtrennung. Es fehlt jedoch die Verifizierung der Modelle für höhere Schnittgeschwindigkeiten, wie sie sich z. B. beim Diamantkernbohren finden lassen, bei dem eine Schnittgeschwindigkeit von ca. $v_c = 2 \text{ m/s} = 120 \text{ m/min}$ vorliegt. Zudem ist die Abhängigkeit der Materialtrennungsmechanismen von der Diamantkornform ungeklärt. Im Rahmen der nachfolgend dargestellten Versuche sollen Erkenntnisse über die wirkenden Materialtrennungsmechanismen und Vorgänge in Abhängigkeit der Diamantkornform und der Zustelltiefe werden. Dies umfasst u. a. die Ermittlung einer Schnitteinsatztiefe bzw. kritischen Spannungstiefe und die detaillierte Analyse der primären und sekundären Spannbildung. Dabei werden Diamantwerkzeuge mit definierter Spitzenform anstatt Diamantkörnern eingesetzt. Auszüge dieser Arbeiten wurden in [17] veröffentlicht.

4.4.1 Versuchsumgebung und -methodik

Bei den Versuchen zur Analyse der Materialtrennungsmechanismen wird auf einen bei Fräsverfahren üblichen Ansatz zurückgegriffen, bei dem während der Versuchsdurchführung eine lineare Erhöhung der Zustellung erfolgt. Dieses Vorgehen wird umgangssprachlich auch als „Rampe abfahren“ bezeichnet. Hierdurch ist es möglich, z. B. die kritische Zustelltiefe, ab der Ratterschwingungen auftreten, im Rahmen eines einzelnen Fräsversuchs zu ermitteln [62, 201]. Wird dieser Ansatz auf Ritzversuche übertragen, bietet sich der Vorteil, dass der Fehler, der durch das notwendige Ankratzen der Probenoberfläche entsteht, also das Festlegen der Nullebene, vermieden wird. Bei den nachfolgend dargestellten Versuchen werden plane Betonproben eingesetzt. Zur Realisierung einer linear ansteigenden Zustelltiefe sind diese Proben winklig zur Schnitttrichtung anzustellen.

Die Versuche werden mithilfe einer Sondermaschine Typ PFS 5558/1 der Fa. Berger, siehe Abbildung 4.5 a), durchgeführt. Diese Maschine ist speziell zur Analyse von Zerspanungsprozessen auf Ebene von Grundlagenuntersuchungen ausgelegt. Der horizontale Maschinentisch, der entlang der x-Achse verfährt, verfügt über einen Linearmotor, der eine maximal mögliche Verfahrgeschwindigkeit von $v_x = 3 \text{ m/s} = 180 \text{ m/min}$ erlaubt. Ein zweiter Maschinentisch, der vertikal angeordnet ist, kann entlang der y- und z-Achse verfahren werden. Die Bewegungen erfolgen durch Kugelgewindespindeltriebe. Am vertikalen Maschinentisch wird die bei den Versuchen eingesetzte Kraftmesstechnik in Form eines 3-Komponenten-Dynamometers des Typs 9263 A der Fa. Kistler angebracht, siehe Abbildung 4.5 a). Das eingesetzte Dynamometer erlaubt das Spannen eines Werkzeughalters, der entsprechend für die Aufnahme der eingesetzten Diamantwerkzeuge ausgelegt ist. Die planen Betonproben werden für die Versuche auf dem horizontalen Maschinentisch ausgerichtet und befestigt. Hierzu ist eine Nutenplatte auf dem Maschinentisch gespannt, auf der Positionierungselemente befestigt sind, durch die die winklige Anstellung der Probe möglich ist. Die winklige Anstellung wird zuerst grob mithilfe einer Messuhr überprüft. Anschließend erfolgt eine finale Ausrichtung eines Teilbereichs der Probe, auf dem die Versuche durchgeführt werden mit einem Feinzeiger. Innerhalb dieses Bereichs ist die erlaubte Abweichung des Ebenheitsfehlers mit $f_e = \pm 2,5 \mu\text{m}$ festgelegt. Die winklige Anstellung der Versuchsproben in Relation zur Vorschubbewegung des Maschinentischs beträgt $m_w = 80 \mu\text{m}/120 \text{ mm}$ und wird entsprechend bei der Ausrichtung und Bestimmung des Ebenheitsfehlers berücksichtigt.

Durch die winklige Anstellung der Versuchsprobe wird erreicht, dass bei der Versuchsdurchführung nur eine Bewegung des horizontalen Maschinentischs zur Realisierung der Schnittgeschwindigkeit notwendig ist. Dies hat den Vorteil, dass die Dynamik der Versuchsmaschine in Bezug auf die Zustellung keinen Einfluss auf den Ritzversuch hat. Entsprechend wird vor dem Versuch der vertikale Maschinentisch mit dem angebrachten Werkzeug auf die voreingestellte y- und z-Position verfahren, bevor der horizontale Maschinentisch mit der darauf befestigten Versuchsprobe unter diesem hindurchgeführt wird. Da durch die gewählte Versuchskinetik das Werkzeug stillsteht, bietet sich die Möglichkeit, den Ritzvorgang durch eine Hochgeschwindigkeitskamera aufzeichnen zu können.

Bei den Versuchen werden die im Kapitel 4.1 dargestellten Diamantwerkzeuge verwendet. Die Diamantwerkzeuge werden nach jeweils drei bis vier Versuchen mikroskopisch untersucht, um eine Formänderung durch Verschleiß ausschließen zu

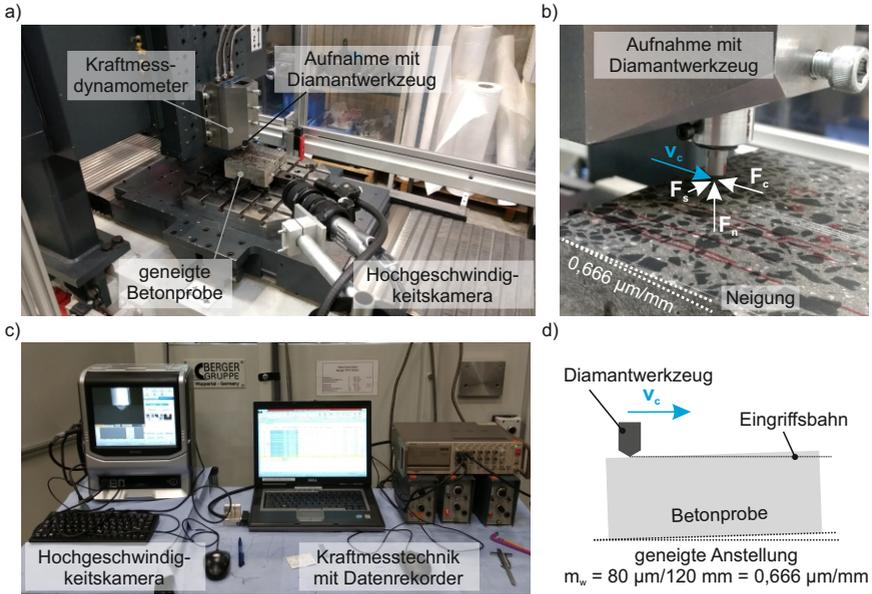


Abbildung 4.5: a) Darstellung des eingesetzten Versuchsaufbaus mit linearer Versuchskinetik, b) Detailansicht mit schematischer Darstellung der Prozesskräfte, c) Messeripherie, d) Schematische Darstellung der Kinematik der Ritzversuche

können. Die Versuche erfolgen an den beiden Betongütern C20/25 und C100/115, deren Zusammensetzung in Kapitel 4.2 beschrieben ist. Die Versuchsproben weisen eine quadratische Grundfläche mit einer Kantenlänge von $l_w = 150 \text{ mm}$ auf. Die Probendicke ist ca. $s_p = 60 \text{ mm}$. Die Vorschubgeschwindigkeit des Maschinentisches, die bei der Versuchsdurchführung der Schnittgeschwindigkeit v_c entspricht, wird auf zwei Stufen variiert, $v_c = 60 \text{ m/min}$ und $v_c = 120 \text{ m/min}$. Jede Versuchseinstellung wird dabei zweimal wiederholt, um die Streubreite der Ergebnisse abschätzen zu können. Die Ritzversuche werden zufällig über der Versuchsprobenbreite verteilt, um einen Einfluss bestimmter Materialphasen auf das Ergebnis zu vermeiden. Jede Versuchseinstellung wird mit einer Hochgeschwindigkeitskamera Typ VW-9000 mit Makrozoom Typ VW-Z2 der Fa. Keyence aufgezeichnet, siehe Abbildung 4.5 a) und c). Dabei werden Aufnahmen mit einer Bildfrequenz von $f_b = 15.000 \text{ fps}$ angefertigt, die die Vorgänge beim Ritzten der Versuchsproben vor und hinter dem Ritzwerkzeug zeigen. Um die Vorgänge, die hinter dem Ritzwerkzeug stattfinden, aufzeichnen zu können, muss die Schnitttrichtung aufgrund der ortsfesten Hochgeschwindigkeitskamera umgekehrt werden. Dem entsprechend ist auch die winklige Anstellung der Proben anzupassen, weshalb die Versuche in zwei verschiedenen Versuchsreihen durchgeführt werden müssen.

Die erzeugten Ritzspuren werden mithilfe des Messsystems Alicona InfiniteFocus G5 aufgezeichnet, siehe Kapitel 4.3. Das Messsystem bietet die Möglichkeit der Programmierung einer Messprozedur, so dass automatisiert in einem festen

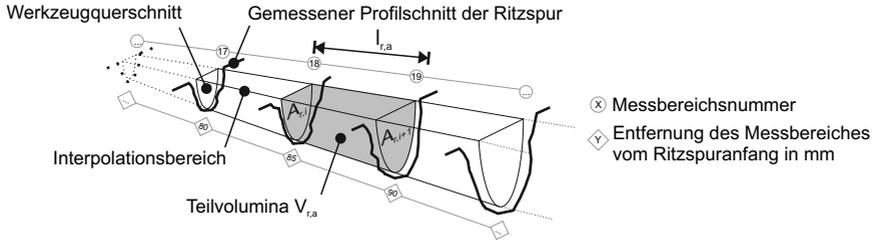


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung der Ritzspurvermessung und -analyse

Abstand $l_{r,a}$ mehrere Messungen entlang einer Ritzspur durchgeführt werden können. Auf Grundlage der aufgezeichneten dreidimensionalen Oberflächenmessungen der Ritzspuren werden repräsentative Profile und Querschnittsflächen ermittelt, die zur Berechnung eines idealisierten Ritzspurvolumens $V_{r,ges}$ herangezogen werden können, siehe Abbildung 4.6. Durch das Vermessen der Ritzspuren ist der Ritzspurquerschnitt $A_{r,i}$ an der Messstelle i sowie der Ritzspurquerschnitt $A_{r,i+1}$ an der Messstelle $i+1$ bekannt. Das Volumen $V_{r,a}$ zwischen den beiden bekannten Querschnittsflächen kann durch die Formel 4.1 berechnet werden.

$$V_{r,a} = \frac{l_{r,a}}{3} (A_{r,i} + \sqrt{A_{r,i} + A_{r,i+1}} + A_{r,i+1}) \quad (4.1)$$

Das Gesamtvolumen der Ritzspur $V_{r,ges}$ bestimmt sich durch das Aufsummieren der Teilvolumina $V_{r,a}$ nach Formel 4.2.

$$V_{r,ges} = \sum_{a=1}^u V_{r,a} \quad (4.2)$$

4.4.2 Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen

In der Literatur werden beim Ritzen von Naturstein und Beton eine Primärspanbildung und eine Sekundärspanbildung beschrieben, vgl. Kapitel 2.5.1. Die Primärspanbildung beschreibt Vorgänge vor und neben dem Schneidkorn, während die Sekundärspanbildung insbesondere die Ausbildung zusammenhaftender größerer Materialpartikel und Bruchstücke meint, die durch das Auffedern des Materials der geritzten Oberfläche hinter dem Schneidkorn entstehen. Durch den Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera mit entsprechendem Vergrößerungsobjektiv können diese Vorgänge sichtbar gemacht werden.

In Abbildung 4.7 sind Bildausschnitte der aufgenommenen Hochgeschwindigkeitsvideos der durchgeführten Ritzversuche mit angestellter Versuchsprobe bei einer Zustelltiefe von ca. $a_e = 40 \mu\text{m}$ gezeigt, um den Einfluss der Diamantwerkzeugform auf die Materialtrennung und die ablaufenden Vorgänge vor und neben dem Diamantwerkzeug zu verdeutlichen. Wie den Aufnahmen entnommen werden kann, liegen bei allen getesteten Einstellungen aufgrund der sprödharten Eigenschaften der Betone Materialabplatzungen und -brüche vor. Zwischen den beiden getesteten Schnittgeschwindigkeiten kann bei derselben Betongüte kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Materialtrennung bzw. die Vorgänge

Diamantwz.:	CVD, Pyramide Ausrichtung $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, Konus $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$
Schnittgeschw.:	$v_c = 60; 120 \text{ m/min}$ Zustellung: $m_w = 80 \mu\text{m}/120 \text{ mm}$
Werkstoff:	Beton C100/115, Beton C20/25 Kühlung: keine

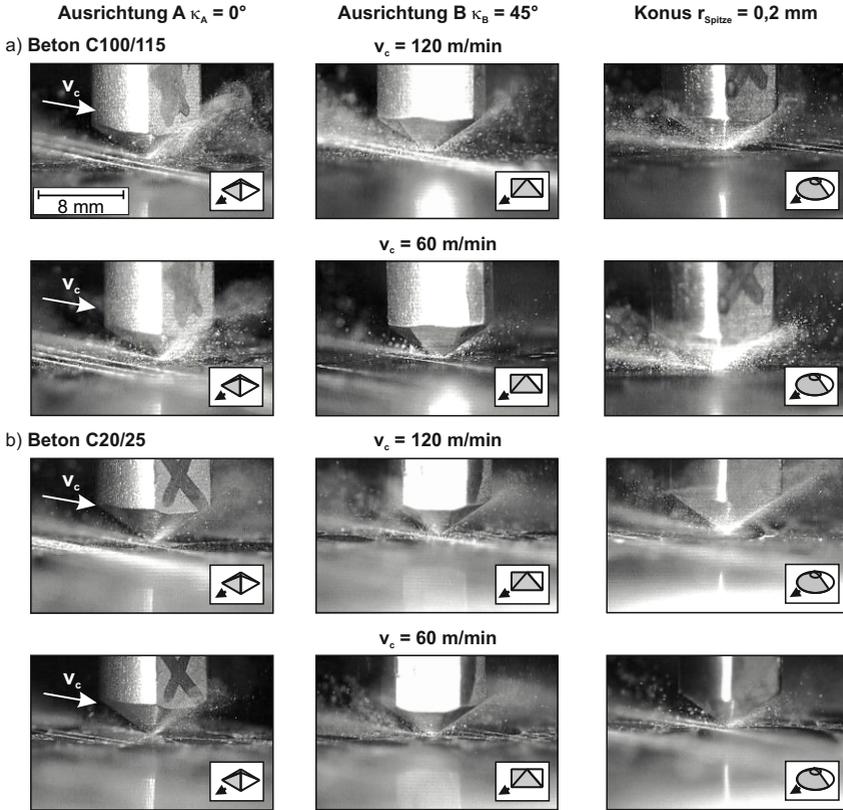


Abbildung 4.7: Ausschnitte von Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen zur Analyse des Einflusses der Diamantwerkzeugform auf die Materialtrennungsmechanismen für a) Beton C100/115 und b) Beton C20/25

vor dem Diamantwerkzeug festgestellt werden. Dagegen hat die Diamantwerkzeugform einen wesentlichen Einfluss auf die beobachtbaren Vorgänge.

Bei der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ findet die Materialtrennung im Wesentlichen an der senkrecht zur Schnittrichtung stehenden Fläche, die als Spanfläche bezeichnet werden kann, statt. Hier können in Abhängigkeit der Materialphase eine Vielzahl von kleinsten Materialausbrüchen erkannt werden, bei denen kleine Materialpartikel von der Oberfläche abplatzen und von der Wirkstelle weggeschleudert werden. Aufgrund der schlagartig stattfindenden Prozesse weisen die abplatzenden Materialpartikel teilweise eine Geschwindigkeit auf, die größer ist als die Schnittgeschwindigkeit. Die Hauptbewegungsrichtung der Materialpartikel zeigt in Richtung der Schnittbewegung des Diamantwerkzeugs. Dies entsteht

dadurch, dass ein Großteil der abplatzenden Materialpartikel aus der Wirkstelle gegen die Spanfläche des Werkzeugs prallen und von dort entsprechend umgeleitet werden. Ein Teil der Partikel wird auch über diese Fläche nach oben hinweggeführt. Aufgrund der großen Anzahl kleinster Materialpartikel, deren Größe auf Grundlage der Aufnahmen geschätzt im Submikrometerbereich liegt, bildet sich eine Art „Partikelwolke“ vor der Spanfläche. Bei der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ können die gleichen Materialtrennungsmechanismen und Vorgänge wie bei der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ beobachtet werden. Hier werden die Materialpartikel aber aufgrund der winklig zur Schnittrichtung stehenden Spanflächen seitlich abgelenkt. In der Folge entstehen neben dem Diamantwerkzeug kleinere Partikelwolken, da sich diese nicht in einer zusammenhängenden Partikelwolke vor dem Diamantwerkzeug stauen. Auch bei dem konischen Diamantwerkzeug mit verrundeter Spitze finden Materialabplatzungen und -brüche statt. Anders als bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in den Ausrichtungen A und B mit definierbaren Spanflächen finden diese Vorgänge über die gesamte Vorderseite verteilt statt. Aus diesem Grund erscheint der Umfang des abgetrennten Material optisch deutlich größer und staut sich als Partikelwolke um das Werkzeug herum.

Bei beiden Betongüten ist die Materialtrennung instationär, wobei die Frequenz der Änderungen bei der Betongüte C20/25 größer ist als bei der Betongüte C100/115. Der grundlegende Unterschied zwischen beiden genannten Betongüten C20/25 und C100/115 findet sich in der Größe der abgeplatzten Materialpartikel. Während bei der Betongüte C100/115 eine große Anzahl kleinster Materialpartikel sowohl in der Zementstein- als auch Basaltphase erzeugt wird, sind bei der Betongüte C20/25 auch größere Materialpartikel, die von der Oberfläche gelöst werden, erkennbar. Im Vergleich erscheint daher in Abhängigkeit der Diamantwerkzeugform bei der Betongüte C20/25 der Umfang der entstehenden Materialpartikelwolke vor und neben dem Werkzeug beim Ritzten kleiner zu sein. In Abhängigkeit der Materialphase Zementstein oder Gesteinskörnung können dabei Unterschiede erkannt werden. Bei der Betongüte C20/25 liegt in der Zementsteinphase ein im Vergleich offeneres Gefüge vor, weshalb größere Materialpartikel ausbrechen können, siehe Abbildung 4.8. Die Gesteinskörnung (Rheinkies) der Betongüte C20/25 weist unterschiedliche Gesteine bzw. Kristallstrukturen mit sprödharten Eigenschaften auf, weshalb bei dieser Betongüte größere schollenartige Ausbrüche entstehen können. Bei der Betongüte C100/115 dagegen besitzt die Zementsteinphase eine hohe Dichte und feinkörnige Bestandteile, siehe Abbildung 4.8. Die Gesteinskörnung, die hier überwiegend aus Basalt besteht, weist ebenfalls ein relativ feinkörniges Gefüge auf. Dies führt dazu, dass im direkten Vergleich der Betongüten beim Beton C100/115 in den Einzelphasen ein gleichmäßigerer Ritzvorgang stattfindet als beim Beton C20/25. Bei beiden Betongüten führen jedoch die Übergänge zwischen den Materialphasen Zementstein und Gesteinskörnung zu schlagartigen Änderungen des Ritzvorgangs.

In Abhängigkeit der geritzten Länge, und damit der Zustelltiefe, können unabhängig von der Diamantwerkzeugform zwei Phasen der Materialtrennung in den Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen unterschieden werden, siehe Abbildung 4.9. In der erste Phase des Ritzvorgangs wird eine erkennbare Ritzspur erzeugt, siehe Detail A, ohne dass eine Materialtrennung z. B. in Form von Materialbrüchen vor dem Diamantwerkzeug auftritt. Das bedeutet, dass das Material in dieser Phase plastisch verformt und verdichtet wird. In der zweiten Phase beginnt eine

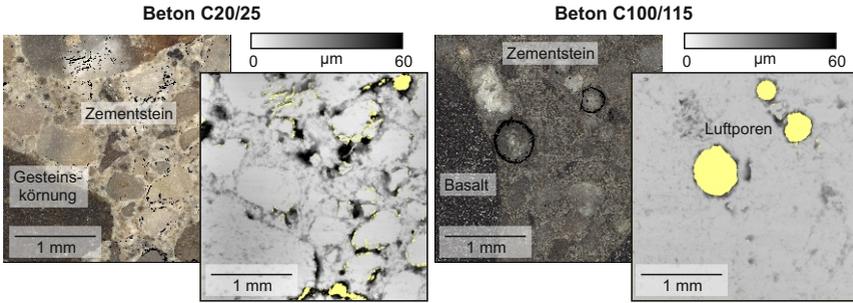


Abbildung 4.8: Fotorealistische Bilder und korrespondierende Oberflächentopografien der Betongüten C20/25 und C100/115

Materialtrennung, die durch Materialabplatzungen und -brüche vor dem Diamantwerkzeug geprägt ist, siehe Detail B. Diese Mechanismen bleiben bis zum Versuchsende und damit bis zu Zustelltiefen von mindestens $a_e = 80 \mu\text{m}$ unverändert.

Die Zustelltiefe, bei der der Übergang zwischen diesen beiden Phasen stattfindet, kann anhand der Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen bestimmt werden und wird als kritische Spannungstiefe $a_{e,krit}$ oder auch Schwellwert bezeichnet, siehe Kapitel 2.6.1. Die beobachteten Phasen der Materialtrennung stehen damit in Übereinstimmung mit der Literatur, in der kritische Spannungstiefen für sprödharte Materialien, wie z. B. Naturstein oder technische Keramiken beschrieben werden, siehe Kapitel 2.6.1. Nach *Bienert* treten bei Beton im Bereich kleiner Zustellungen elastische Verformungen auf [14], weshalb davon auszugehen ist, dass auch bei den dargestellten Versuchen entsprechende Vorgänge stattfinden. Diese können jedoch anhand der Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen nicht identifiziert werden.

In Abbildung 4.10 sind die für die beiden Betongüten C20/25 ermittelten Wer-

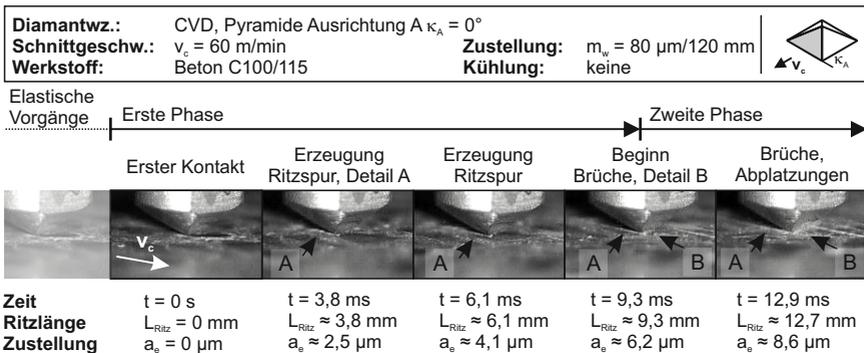


Abbildung 4.9: Exemplarische Darstellung der Detektion der kritischen Spannungstiefe durch die Analyse von Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen

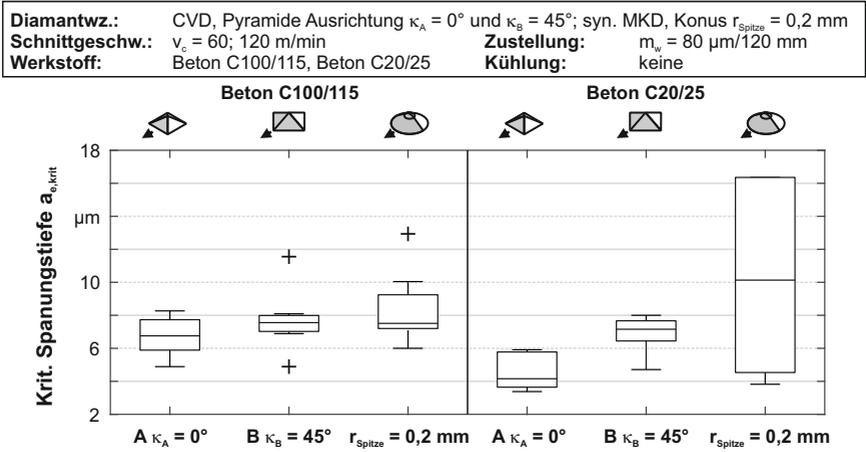


Abbildung 4.10: Kritische Spannungstiefen in Abhängigkeit der Betongüte und der Diamantwerkzeugform

te der kritischen Spannungstiefe in einem Box-Plot-Diagramm dargestellt. Dabei sind die Ergebnisse der beiden getesteten Geschwindigkeiten zusammengefasst. Die kleinsten Werte liegen für die Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ und die größten Werte für die konischen Diamantwerkzeuge mit verrundeter Spitze vor. Anhand der Streubreite der Ergebnisse wird sichtbar, dass der Fehler, der durch die Bildfrequenz von $f_b = 15.000 \text{ fps}$ entsteht und damit eine auswertbare Zeit von minimal $t = 0,07 \text{ ms}$ erlaubt, vernachlässigbar klein ist. Bei den Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung A wird das Material vor der Spanfläche gestaucht, wodurch relativ schnell eine Rissinitiierung und damit Materialabplatzungen entstehen. Dahingegen liegen bei den anderen beiden Diamantwerkzeugformen zunächst in einem größeren Umfang plastische Vorgänge vor, bei denen das Material seitlich und/oder unter dem Diamantwerkzeug plastisch verdrängt und verdichtet wird, weshalb hier größere Werte der kritischen Spannungstiefe vorliegen. Insbesondere bei dem konischen Diamantwerkzeug wird das Material zunächst unter dem Werkzeug hindurchgedrückt, bevor ein Abplatzen durch Rissinitiierung vor dem Werkzeug einsetzt.

Trotz des gewählten Betrachtungswinkels von schräg vorne, können anhand der Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen keine Erkenntnisse über die Vorgänge hinter dem Diamantwerkzeug erlangt werden. So können in den Videos keine Sekundärspäne erkannt werden, wie sie in den Materialtrennungsmodellen in Kapitel 2.5.1 beschrieben werden. Aus diesem Grund werden weitere Hochgeschwindigkeitsvideos aufgenommen, bei denen die Kinematik des Ritzprozesses umgekehrt wird, sodass bei stationärer Kamertechnik und gleichbleibendem Betrachtungswinkel die Vorgänge hinter dem Ritzwerkzeug aufgezeichnet und analysiert werden können. In Abbildung 4.11 sind exemplarisch Bildausschnitte der Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen dargestellt.

Bei den Versuchen an der Betongüte C100/115, siehe Abbildung 4.11 a), sind bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in beiden Ausrichtungen nur ge-

ringe Mengen an abplatzenden Materialpartikeln erkennbar. Dabei handelt es sich zudem in der Regel um kleinste Materialpartikel. Dies gilt sowohl für die Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 60 \text{ m/min}$ als auch $v_c = 120 \text{ m/min}$. Dagegen treten bei den Versuchen mit dem konischen Diamantwerkzeug mit verrundeter Spitze größere Bruchstücke und längliche Partikel auf, siehe Abbildung 4.11 a), Detail A. Diese länglichen Partikel können als Sekundärspäne nach *Meding* identifiziert werden [128]. Die Entstehung der Sekundärspäne wird durch die große Kontaktfläche des Diamantwerkzeugs mit verrundeter Spitze und das feinkörnige Gefüge des Zementsteins und der Gesteinskörnung beim Beton C100/115 begünstigt. Insbesondere in der Zementsteinphase wird das Material leicht plastifiziert bzw. zusammengedrückt, anstatt spröde zu brechen. Sowohl bei dem Diamantwerkzeug mit verrundeter Spitze als auch bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung A und B verläuft die Hauptbewegungsrichtung der abgetrennten Partikel, die hinter den Diamantwerkzeugen beobachtet werden können, entgegen der Richtung der Schnittbewegung.

Bei den Ritzversuchen an der Betongüte C20/25, siehe Abbildung 4.11 b), sind unabhängig von der Form hinter dem Diamantwerkzeug umfangreichere Abplatzungen von kleinsten Materialpartikeln, aber auch von größeren Bruchstücken erkennbar. Wie bei den Vorgängen, die auf der Vorderseite der Diamantwerkzeuge stattfinden, ist die Geschwindigkeit dieser Partikel mitunter deutlich höher als die Schnittgeschwindigkeit. Auch hinter dem Diamantwerkzeug verursacht das heterogene Materialverhalten der Betongüte C20/25 instationäre Vorgänge. So können in dem exemplarischen Videoausschnitt bei dem Ritzversuch mit dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 120 \text{ m/min}$ auch größere Materialabplatzungen seitlich hinter dem Diamantwerkzeug erkannt werden, siehe Detail B in Abbildung 4.11. Die Hauptbewegungsrichtung der beobachtbaren Partikel verläuft dabei entgegen der Richtung der Schnittbewegung.

Die im Rahmen der Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen erlangten Erkenntnisse sind zusammenfassend schematisch in Abbildung 4.12 dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass bei den durchgeführten Ritzversuchen die Schnittgeschwindigkeit und die Diamantwerkzeugform nur einen eingeschränkten Einfluss auf die beobachtbaren Materialtrennungsmechanismen hat. Dagegen wirkt sich die Diamantwerkzeugform auf die ablaufenden Vorgänge vor dem Diamantwerkzeug aus. Vor dem Diamantwerkzeug entstehen umfangreiche schlagartig auftretende Ausbrüche und Abplatzungen in Form von überwiegend kleinsten Materialpartikeln. Dies führt zur Entstehung von Partikelwolken vor und neben den Diamantwerkzeugen. Die Bewegungsrichtung des abgetrennten Materials verläuft bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen entlang der im Eingriff stehenden Spanflächen. Bei den Diamantwerkzeugen mit konischer Grundform und verrundeter Spitze ist dagegen keine Vorzugsrichtung zu erkennen. Die Diamantwerkzeugform beeinflusst somit im Wesentlichen die Bewegungsrichtung der abgetrennten Materialpartikel.

Da bei den Ritzversuchen an der Betongüte C20/25 im Vergleich zur Betongüte C100/115 teilweise größere Ausbrüche erkennbar sind, ist der Umfang der entstehenden Materialpartikelwolke kleiner. Das Abplatzen größerer Materialpartikel entsteht insbesondere in der Zementsteinphase. Die Diamantwerkzeugform weist einen Einfluss auf die kritische Spannungstiefe auf, ab der ein Wechsel der beob-

Diamantwz.:	CVD, Pyramide Ausrichtung $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, Konus $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$
Schnittgeschw.:	$v_c = 60; 120 \text{ m/min}$ Zustellung: $m_w = 80 \mu\text{m}/120 \text{ mm}$
Werkstoff:	Beton C100/115, Beton C20/25 Kühlung: keine

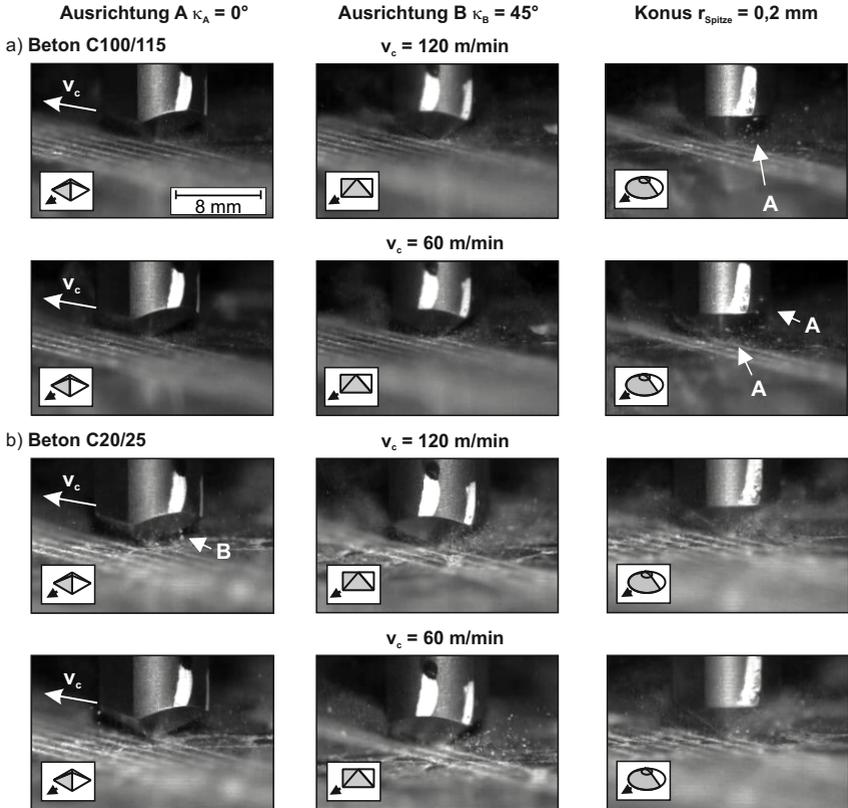


Abbildung 4.11: Ausschnitte von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zur Analyse des Einflusses der Diamantwerkzeugform auf die Vorgänge hinter dem Diamantwerkzeug bei a) Beton C100/115 und b) Beton C20/25

achtbaren Materialtrennungsmechanismen eintritt. Hierbei kann zwischen zwei Phasen unterschieden werden, in denen eine sichtbare Ritzspur erzeugt wird. In der ersten Phase erfolgt eine plastische Verdrängung des Materials. In der zweiten Phase, die mit dem Erreichen der kritischen Spannungstiefe beginnt, setzen Materialabplatzungen durch Rissinitiierung ein.

Die Diamantwerkzeugform beeinflusst des Weiteren die beobachtbaren Vorgänge hinter dem Diamantwerkzeug in Abhängigkeit der Betongüte. Hinter den Diamantwerkzeugen treten materialabhängig unterschiedliche Vorgänge auf. Bei der Betongüte C100/115 kann bei den Ritzversuchen mit den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen nur ein geringfügiges Auftreten von abgeplatzen Materialpartikeln beobachtet werden. Dahingegen treten bei dem Diamantwerkzeug mit

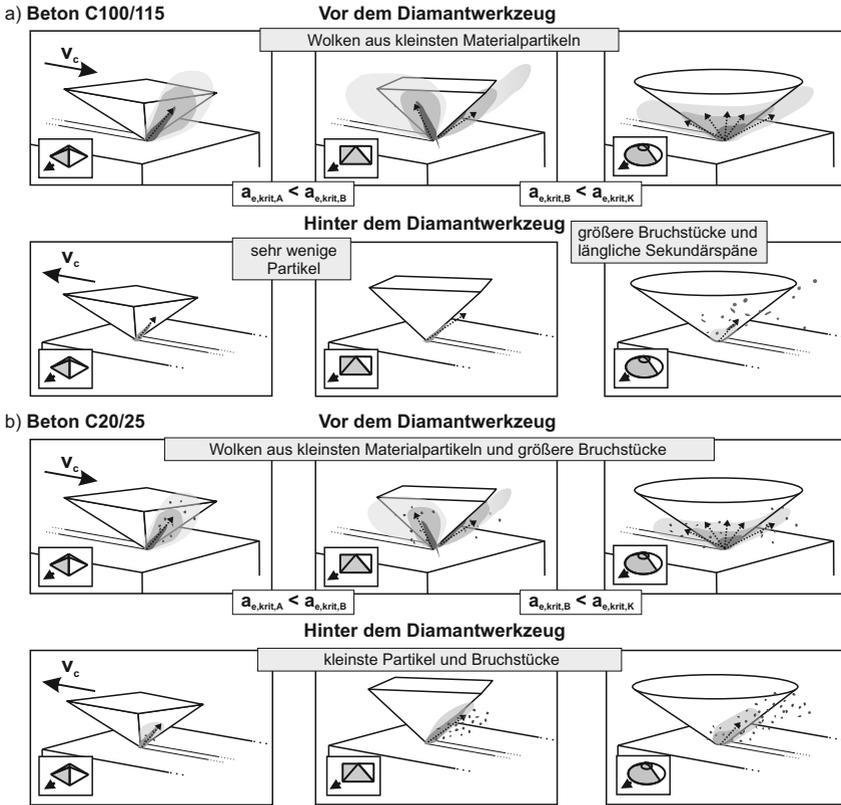


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung der beobachteten Materialtrennungsmechanismen und -vorgänge in Abhängigkeit der Diamantwerkzeugform vor und hinter dem Diamantwerkzeug für a) Beton C100/115 und b) Beton C20/25

konischer Grundform und verrundeter Spitze längliche Sekundärspäne und größere Bruchstücke auf. Dahingegen liegen unabhängig von der Diamantwerkzeugform bei der Betongüte C20/25 vornehmlich schlagartige Materialbrüche vor. Hierbei platzen hinter dem Diamantwerkzeug größere Partikel ab als bei der Betongüte C100/115.

4.4.3 Prozesskräfte, abgetrenntes Volumen und Zerspanungsenergie

Neben den vorgestellten Untersuchungen der Materialtrennungsmechanismen erlauben die aufgezeichneten Daten der Prozesskräfte und der Ritzspuren weitergehende Analysen zur Quantifizierung des Einflusses der Diamantwerkzeugform durchzuführen. In Abbildung 4.13 sind exemplarisch für jede Diamantwerkzeugform und Betongüte bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 120$ m/min die gemessenen Prozesskräfte eines Ritzversuchs dargestellt. Zudem sind die korre-

spondierenden gemessenen Ritzspurquerschnittsflächen bis zu einer Ritzspurlänge von $L_{\text{Ritz}} = 100 \text{ mm}$ bzw. einer Zustelltiefe von $a_e = 66,6 \mu\text{m}$ gezeigt. Die dargestellten Kraftsignale beginnen dabei ab dem Zeitpunkt, ab dem in den gemessenen Daten eine Veränderung des Signals eintritt und somit ein Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück angenommen werden kann. Bei allen dargestellten Bearbeitungsparameterkombinationen kann erkannt werden, dass die Kräfte einen instationären Verlauf aufweisen, dabei aber mit der geritzten Länge tendenziell größer werden. Das Ende der dargestellten Kraftsignale umfasst jeweils den Austritt des Werkzeugs aus der Versuchsprobe, der durch ein Überschwingen der Normalkraft in negativer Richtung gekennzeichnet ist. Danach ist zudem ein Zeitbereich von ca. $t = 0,1 \text{ s}$ dargestellt, indem kein Kontakt zwischen Werkzeug und Probe besteht. Bei allen Einstellungen sind aufgrund der effektiven negativen Spanwinkel die Normalkräfte F_n größer als die Schnittkräfte F_c . Die seitliche Kraft F_s schwankt um das Nullniveau aufgrund der symmetrischen Eingriffsform. Einseitige Ausschläge liegen vor, wenn aufgrund der Lage z. B. einer harten Gesteinskörnung das Diamantwerkzeug abgedrängt wird. Die Bereiche in den Kraftsignalen, in denen in Relation über einen längeren Zeitraum eine höhere Kraft gemessen wird, siehe Detail ①, können Bereichen auf der Ritzspur zugeordnet werden, in denen eine Gesteinskörnungphase vorliegt, das bedeutet, dass die kurzen zeitlichen Bereiche, in denen die Kräfte relativ klein sind, zumeist durch das Ritzen einer Zementsteinphase entstehen. Ein Abfall auf Null liegt zudem bei Luftporen vor, siehe Detail ②. Kurzzeitige Ereignisse, wie z. B. Kraftspitzen, können sowohl beim Ritzen einer Gesteinskörnungsphase als auch einer Zementsteinphase auftreten. In beiden Fällen sind hierfür die sprödharten Materialeigenschaften ursächlich, die zu einem steilen Anstieg mit einer folgenden schlagartigen Entlastung und damit einem Abfall der Kräfte durch ein Abplatzen des Materials führen.

Die in Abbildung 4.13 dargestellten Messergebnisse der Ritzspurquerschnitte A_r beginnen mit der ersten sichtbaren Oberflächenveränderung, die dem Ritzversuch zugeordnet werden und durch die Mikroskopierung der Versuchsproben erkannt werden kann. In diesem Bereich kleiner Zustelltiefen muss noch keine messbare Ritzspur vorliegen. Nach *Bienert* können hier elastische Vorgänge vorliegen [14]. Aus diesem Grund sind im ersten Bereich der Ritzspur, bis zu einer Ritzspurlänge von $L_{\text{Ritz}} = 20 \text{ mm}$, sehr geringe Werte des Ritzspurquerschnitts vorhanden. Diese steigen anschließend mit zunehmender Zustellung progressiv/exponentiell an. Dabei liegen in Abhängigkeit der Materialphase deutliche Streuungen der gemessenen Ritzspurquerschnitte vor. Größere Werte finden sich zumeist in Gesteinskörnungsphasen oder an den Phasengrenzen zwischen Gesteinskörnung und Zementstein. In der Gesteinskörnung brechen durch die Kristallstruktur größere Bruchstücke schollenartig ab. Da an den Phasengrenzen nur eine formschlüssige Verbindung zwischen der Zementstein- und Gesteinskörnungsphase vorliegt, können hier größere Ausbrüche entstehen.

Anhand der dargestellten Kraftsignale und der Ritzspurquerschnitte kann erkannt werden, dass, unabhängig von der Betongüte, bei den konischen Diamantwerkzeugen mit verrundeter Spitze die größten Prozesskräfte vorliegen. Der Vergleich der Prozesskräfte zwischen den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in den beiden getesteten Ausrichtungen A und B lässt dagegen auf Grundlage des Vergleichs der Kraftmessschriebe keine Unterscheidung zu. Aus diesem Grund

4 Einkornritzversuche

Diamantzw.: CVD, Pyramide Ausrichtung $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, Konus $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$
Schnittgeschw.: $v_c = 120 \text{ m/min}$ **Zustellung:** $m_w = 80 \mu\text{m}/120 \text{ mm}$
Werkstoff: Beton C100/115, Beton C20/25 **Kühlung:** keine

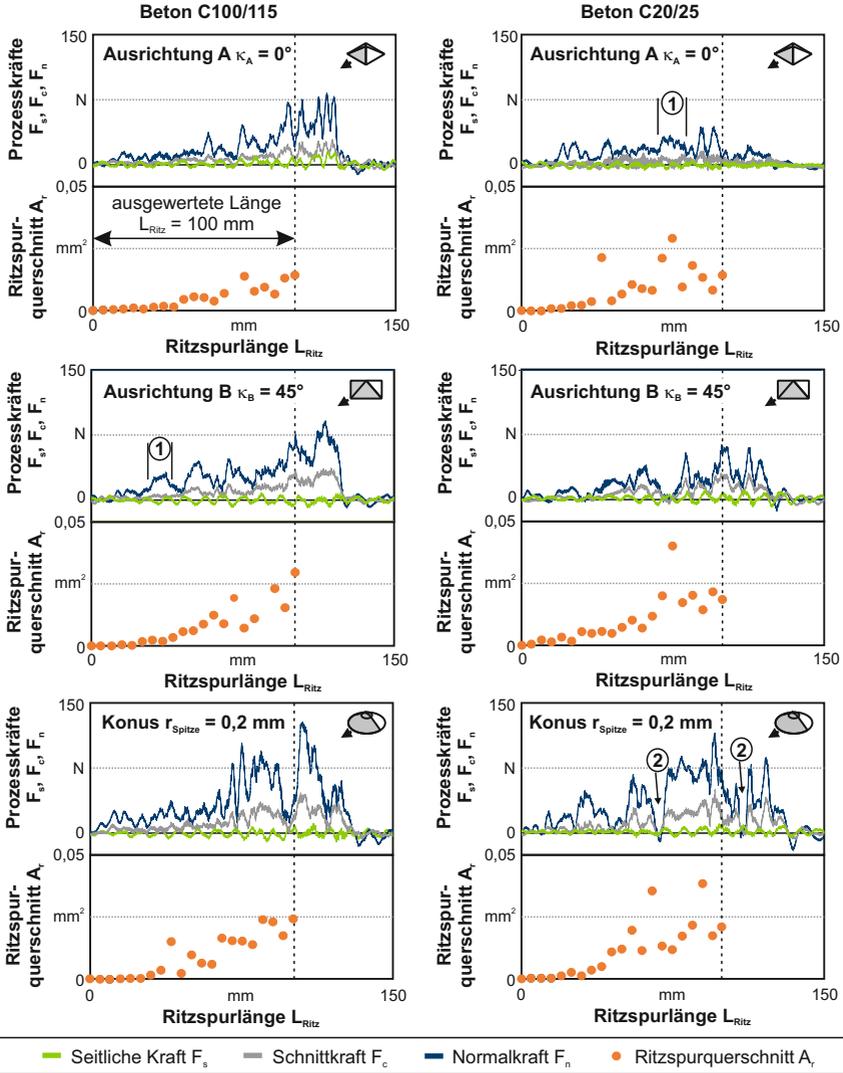


Abbildung 4.13: Verlauf der Prozesskräfte und der Ritzspurquerschnitte über der Ritzlänge

werden zur Quantifizierung der getesteten Bearbeitungsparameterkombinationen die aufgezeichneten Kraftmessungen bis zu einer Ritzlänge von $L_{\text{Ritz}} = 100 \text{ mm}$ ausgewertet und für diesen Datenbereich die mechanische Arbeit in Richtung

der Schnittkraft W_c und der Normalkraft W_n ermittelt. Die mechanische Arbeit entspricht dem Integralwert der Kraft F über dem Weg s , siehe Formel 4.3. Die mechanische Arbeit in Richtung der Normalkraft ergibt sich durch die Normalkraft F_n und die erzielte Zustelltiefe $a_{e,ges}$. Für die Arbeit in Schnittrichtung ist dagegen die Schnittkraft F_c und die geritzte Länge L_{Ritz} einzusetzen. Der Vorteil dieser Auswertungsmethodik ist, dass durch die Berücksichtigung der gesamten Datenmenge der Einfluss von Ausreißern in Form von Kraftspitzen im Prozesssignal gedämpft wird. Zudem werden hierdurch zeitlich nicht lineare Veränderungen des Prozesssignals berücksichtigt.

$$W = \int F(s) ds \quad (4.3)$$

Abbildung 4.14 zeigt die berechneten Werte der mechanischen Arbeit für jeden der drei Versuche pro Bearbeitungsparametereinstellung. Variiert sind die Diamantwerkzeugform, die Schnittgeschwindigkeit und die Betongüte. Die Varianz der Versuchsergebnisse ergibt sich im Wesentlichen aus der Inhomogenität der Versuchsmaterialien, die, wie in Abbildung 4.13 gezeigt, zu instationären Verläufen der Prozesskräfte führt. Unabhängig von der Diamantwerkzeugform und der Betongüte zeigt sich kein signifikanter Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die mechanische Arbeit. Sowohl bei der Betongüte C100/115 als auch bei der Betongüte C20/25 liegen die höchsten Werte der mechanischen Arbeit bei den Versuchen mit den konischen Diamantwerkzeugen vor. Dies lässt sich durch die Eingriffsverhältnisse und die dadurch wirkenden Materialtrennungsmechanismen und Reibungsvorgänge erklären. Der Einfluss der Ausrichtungen A und B bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen ist dagegen bei der Betongüte C20/25 und C100/115 unterschiedlich. Bei der Betongüte C100/115 ist die mechanische Arbeit sowohl in Richtung der Schnittkraft als auch der Normalkraft bei der Ausrichtung B größer als bei der Ausrichtung A, siehe Abbildung 4.14 a). Bei der Betongüte C20/25 ist dagegen tendenziell die mechanische Arbeit in Richtung der Normal- als auch Schnittkraft bei der Ausrichtung A tendenziell größer als bei Ausrichtung B.

Obwohl die Absolutwerte der Normalkraft größer sind als die der Schnittkraft, vgl. Abbildung 4.13, ergeben sich aufgrund der deutlich kürzeren Wegstrecke in Normalkraftrichtung im Vergleich zur Schnittkraftrichtung kleinere Werte für die mechanische Arbeit. Für die energetische Betrachtung des Materialtrennungsprozess kommt somit der Arbeit in Schnittrichtung eine größere Bedeutung zu als für die Arbeit in Richtung der Normalkraft.

Neben der mechanischen Arbeit ist der Umfang des abgetragenen Materialvolumens zu untersuchen. Zur Quantifizierung der Materialtrennung wird der Flächenabtragsfaktor k_A nach Formel 2.3 für die durchgeführten Ritzversuche berechnet. Da im Bereich kleiner Zustellungen eine Veränderung der auftretenden Materialtrennungsmechanismen auftreten, siehe Kapitel 4.4.2, wird für die Berechnung des Flächenabtragsfaktors nur die Ritzspur im Bereich von $L_{Ritz} = 50$ und 100 mm berücksichtigt. Dies korrespondiert mit einer Zustelltiefe zwischen $a_e = 33,3$ bis $66,6$ μm . Zur Berechnung des Flächenabtragsfaktors wird der Mittelwert aus elf im genannten Intervallbereich von $L_{Ritz} = 50$ und 100 mm vorliegenden Messstellen berechnet. In Abbildung 4.15 a) und b) sind jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung der drei mit einer Parameterkombinati-

Diamantwz.:	CVD, Pyramide Ausrichtung $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, Konus $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$
Schnittgeschw.:	$v_c = 60; 120 \text{ m/min}$ Zustellung: $m_w = 80 \mu\text{m}/120 \text{ mm}$
Werkstoff:	Beton C100/115, Beton C20/25 Kühlung: keine

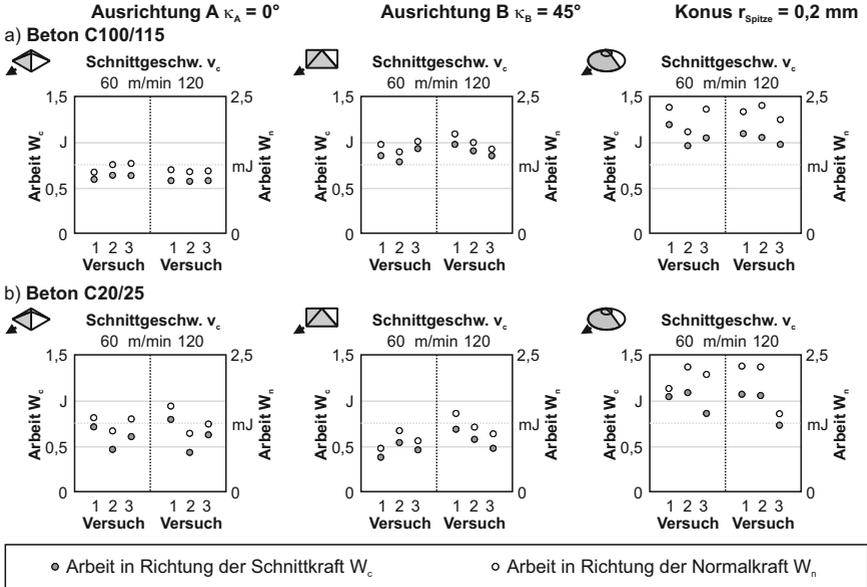


Abbildung 4.14: Einfluss der Diamantwerkzeugform auf die mechanische Arbeit für den a) Beton C100/115 und b) Beton C20/25

on durchgeführten Versuche angegeben. Unabhängig von der Betongüte liegen die kleinsten Werte des Flächenabtragsfaktors bei den Diamantwerkzeugen mit konischer Grundform und verrundeter Spitze vor. Die Werte liegen unabhängig von der Betongüte in einem ähnlichen Wertebereich. Bei der Betongüte C100/115 ist der Flächenabtragsfaktor für die Ausrichtung B am größten. Hier ist die Ritzspurfäche im Durchschnitt 2,5 mal so groß wie der eingesetzte Werkzeugquerschnitt. Bei der Betongüte C20/25 dagegen besteht hinsichtlich des Flächenabtragsfaktors kein Unterschied zwischen den Ausrichtungen der pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge. Aufgrund der Materialeigenschaften sind im Beton C20/25 die Werte des Flächenabtragsfaktors größer als beim Beton C100/115. Die Schnittgeschwindigkeit hat keinen eindeutigen Einfluss auf den Flächenabtragsfaktor.

Da die Flächenabtragsfaktoren bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen größer als bei dem Diamantwerkzeug mit verrundeter Spitze sind, kann abgeleitet werden, dass hier in einem größeren Umfang eine Rissinitiierung verursacht wird. Beim Flächenabtragsfaktor handelt es sich um eine bezogene Kenngröße, weshalb bei der weitergehenden Analyse berücksichtigt werden muss, dass die Querschnittsflächen der eingesetzten Diamantwerkzeuge unterschiedlich groß sind, siehe Abbildung 4.15 c). So ist z. B. die Querschnittsfläche $A_{Wz,K}$ des Diamantwerkzeugs mit verrundeter Spitze mehr als doppelt so groß wie die Querschnittsfläche $A_{Wz,A}$ des pyramidenförmigen Diamantwerkzeugs in der Ausrichtung A. Nach-

Diamantwz.:	CVD, Pyramide Ausrichtung $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, Konus $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$
Schnittgeschw.:	$v_c = 60; 120 \text{ m/min}$ Zustellung: $m_w = 80 \text{ } \mu\text{m}/120 \text{ mm}$
Werkstoff:	Beton C100/115, Beton C20/25 Kühlung: keine

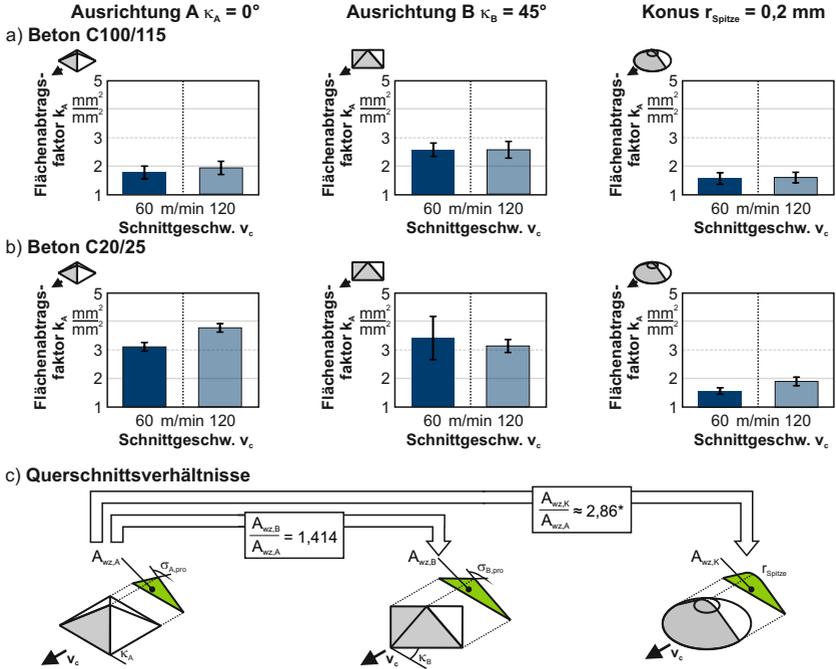


Abbildung 4.15: Einfluss der Diamantwerkzeugform auf den Flächenabtragsfaktor k_A für den a) Beton C100/115 und b) Beton C20/25, c) Verhältnisse der Werkzeugquerschnittsflächen; *da das Verhältnis der Flächen nicht konstant ist, ist dies exemplarisch für eine Zustelltiefe von $a_e = 40 \text{ } \mu\text{m}$ berechnet

folgend erfolgt daher eine erweiterte Betrachtung der mechanischen Arbeiten der Ritzversuche unter Berücksichtigung des Ritzspurvolumens $V_{r,\text{ges}}$, das auf Grundlage der Ritzspurquerschnitte nach Formel 4.2 berechnet wird. Hierbei werden die mechanischen Arbeiten in Richtung der Schnittkraft W_c und der Normalkraft W_n zur Gesamtarbeit des Ritzprozesses W_z addiert. Indem die Gesamtarbeit auf das Ritzspurvolumen bezogen wird, werden Erkenntnisse über die notwendige Arbeit pro Volumeneinheit erlangt. Dadurch können Rückschlüsse auf die energetische Effizienz des Prozesses gewonnen werden. Sowohl für die Bestimmung des Ritzspurvolumens als auch für die mechanischen Arbeiten wird eine Ritzspurlänge von $L_{\text{Ritz}} = 100 \text{ mm}$, beginnend vom ersten Kontakt, berücksichtigt. Neben der bezogenen Gesamtarbeit $W_z/V_{r,\text{ges}}$ ist in der Abbildung 4.16 das ermittelte Ritzspurvolumen $V_{r,\text{ges}}$ dargestellt. In Abbildung 4.16 sind der Mittelwert und die korrespondierende Standardabweichung aus den jeweils drei pro Parameterkombination durchgeführten Versuche dargestellt.

Das erzeugte Ritzspurvolumen $V_{r,\text{ges}}$ zeigt keine signifikante Abhängigkeit von

Diamantwz.:	CVD, Pyramide Ausrichtung $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, Konus $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$
Schnittgeschw.:	$v_c = 60; 120 \text{ m/min}$ Zustellung: $m_t = 80 \mu\text{m}/120 \text{ mm}$
Werkstoff:	Beton C100/115, Beton C20/25 Kühlung: keine

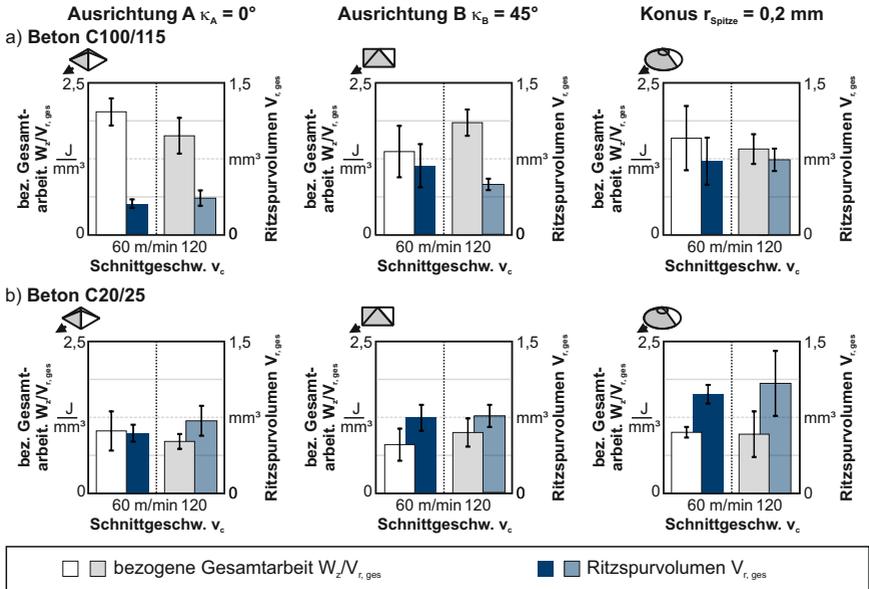


Abbildung 4.16: Einfluss der Diamantwerkzeugform auf die bez. Arbeit $W_z/V_{r,ges}$ und das Ritzspurvolumen $V_{r,ges}$

der Schnittgeschwindigkeit. Dagegen ist der gleiche Einfluss der Diamantwerkzeugform sowohl bei der Betongüte C110/115 als auch bei der Betongüte C20/25 sichtbar, siehe Abbildung 4.16 a) und b). Die kleinsten Ritzspurvolumina liegen bei der Ausrichtung A der pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge vor. Die größten Ritzspurvolumina finden sich bei den konischen Diamantwerkzeugen mit verrundeter Spitze. Diese Ergebnisse korrelieren mit den unterschiedlichen Werkzeugquerschnitten der Diamantwerkzeuge, vergleiche Abbildung 4.15 c). Die Ergebnisse der Ritzspurvolumina bestätigen somit die zuvor auf Grundlage der Flächenabtragsfaktoren angenommenen Unterschiede hinsichtlich der Materialtrennungsmechanismen und deren Auswirkung auf den Umfang des abgetrennten Materials. Im Vergleich zwischen den beiden Betongüten C100/115 und C20/25 liegen bei der Betongüte C20/25 tendenziell höhere Ritzspurvolumina vor. Diese Ergebnisse erklären sich durch die unterschiedlichen Materialtrennungsmechanismen in Abhängigkeit der Materialeigenschaften. Durch das im Vergleich offenporigere, sprödere Zementsteingefüge sowie die sprödharte Gesteinskörnung bei der Betongüte C20/25 brechen beim Ritzprozess größere Materialpartikel aus als bei der Betongüte C100/115.

Wird die mechanische Energie auf das Ritzspurvolumen bezogen zeigt sich, dass beim Beton C100/115 unabhängig von der Diamantwerkzeugform höhere Werte vorliegen als beim Beton C20/25. Dies erklärt sich im Wesentlichen durch die im

Vergleich kleineren Ritzspurvolumina beim Beton C100/115, bei ähnlichen Werten der mechanischen Arbeit. Die kleinsten Werte der bezogenen Gesamtarbeit liegen sowohl bei der Betongüte C100/115 als auch bei C20/25 bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 60$ m/min und den pyramidenförmigen Diamanten in der Ausrichtung B vor.

4.4.4 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion

Auf Grundlage der durchgeführten Ritzversuche mit linear ansteigender Zustelltiefe können diverse qualitative und quantitative Erkenntnisse zum Einfluss der Diamantwerkzeugform gewonnen werden. Anhand der durchgeführten Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen, die die Vorgänge vor, neben und hinter den Diamantwerkzeugen zeigen, kann bei der Materialtrennung eine Abhängigkeit von der Diamantwerkzeugform ermittelt werden. Generell bestätigen die Aufnahmen die grundlegenden Trennungsmechanismen, die im Stand der Technik beschrieben werden. Diese umfassen einen durch Rissinitiierung, Materialausbrüche und -abplatzungen geprägten Materialtrennungsprozess. Die Diamantwerkzeugform wirkt sich insbesondere auf die Hauptbewegungsrichtung der abgetrennten Materialpartikel aus. Diese brechen bei der Betongüte C100/115 in Materialpartikeln mit einer Größe im Submikrometerbereich. Dahingegen sind bei der Betongüte C20/25 auch größere Partikel erkennbar.

Hinter dem Diamantwerkzeug können bei den Versuchen mit den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen bei der Betongüte C100/115 nur geringfügige Abplatzungen und damit eine sekundäre Spannbildung beobachtet werden. Bei den konischen Diamantwerkzeugen liegen dagegen längliche Materialpartikel vor. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um komprimiertes Material, das unter dem konischen Diamantwerkzeug verdichtet oder plastisch verdrängt wird. Bei der Betongüte C20/25 treten diese nicht auf. Hier finden unabhängig von der Diamantwerkzeugform umfangreiche Abplatzungen kleiner Materialpartikel statt. Neben der Identifizierung der Materialtrennungsmechanismen kann durch die Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen gezeigt werden, dass die Diamantwerkzeugform einen Einfluss auf die kritische Spannungstiefe hat. Als kritische Spannungstiefe wird die Tiefe bezeichnet, ab der die Materialtrennung durch Rissinitiierung und Materialbrüche einsetzt. Durch den Eingriff des Diamantwerkzeugs wird zunächst eine rein plastische Verdrängung des Materials verursacht, wodurch eine sichtbare Ritzspur entsteht, ohne dass eine Materialtrennung stattfindet. Wird die kritische Spannungstiefe überschritten, erfolgt eine Materialtrennung vornehmlich durch Materialbrüche und -abplatzungen. Diese Vorgänge verlaufen instationär, wobei eine Abhängigkeit von der Materialphase vorliegt. Eine Phase, in der rein elastische Vorgänge auftreten, kann durch die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen nicht ermittelt werden.

Hinsichtlich der aufgezeichneten Kraftsignale ergeben sich keine qualitativen Unterschiede zwischen den beiden Betongüten C20/25 und C100/115. Bei beiden ist der Verlauf der Prozesskräfte durch instationäre Vorgänge gekennzeichnet. Aus diesem Grund wurde für den quantitativen Vergleich zwischen den Diamantwerkzeugformen und der Schnittgeschwindigkeit die mechanische Arbeit berechnet. Während bei beiden Betongüten die höchsten Werte der mechanischen Arbeit bei den konischen Diamantwerkzeugen mit verrundeter Spitze vorliegen, sind die Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Ausrichtung bei den pyramiden-

förmigen Diamantwerkzeugen nicht eindeutig. Erst durch die Berücksichtigung des abgetrennten Materialvolumens bzw. des Ritzspurvolumens kann sowohl bei der Betongüte C100/115 als auch bei der Betongüte C20/25 ein Optimum bei der gleichen Bearbeitungsparameterkombination erkannt werden. So ist das Minimum der bezogenen mechanischen Arbeit sowohl bei der Betongüte C100/115 als auch bei C20/25 bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 60$ m/min und dem pyramidenförmigen Diamanten in der Ausrichtung B vorzufinden.

Bei der Ausrichtung B ist anzunehmen, dass die keilartige Form des Werkzeugs im Vergleich zur Ausrichtung A eine energetisch günstigere Materialtrennung erlaubt. Dies zeigt sich jedoch nicht unmittelbar in den berechneten mechanischen Arbeiten. Dabei führt die keilartige Form zu einem Aufspalten des Materials bei relativ kleinen Kräften. Zudem kommt es durch die führende Schneidkante zu einer Spannungskonzentration, die die Rissinitiierung vor dem Diamantwerkzeug begünstigt. Andererseits sind der Querschnitt und die Kontaktfläche beim Werkzeug in der Ausrichtung B größer als in der Ausrichtung A, weshalb hier der Reibungsanteil größer sein kann. Aufgrund des dichten, feinkörnigen Gefüges muss bei der Betongüte C100/115 der Effekt der größeren Kontaktfläche und damit der Reibung den Effekt der Keilwirkung überwiegen, sodass hier die mechanischen Arbeiten in Richtung der Schnitt- und Normalkraft größer sind als bei der Ausrichtung A. Bei der Betongüte C20/25, bei der im Vergleich ein offenporiges, sprödes Gefüge vorliegt, muss dagegen der Effekt der Keilwirkung überwiegen, wodurch sich kleinere mechanische Arbeiten ergeben. Ein Hinweis für einen geringeren Einfluss der Reibung sind die kleineren Normalkraftanteile an der mechanischen Arbeit beim Ritzen der Betongüte C20/25 im Vergleich zur Betongüte C100/115.

4.5 Analyse des Einflusses der Materialphasen

In den nachfolgend dargestellten Untersuchungen wird der Einfluss der unterschiedlichen Materialphasen von Beton und Stahlbeton in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit sowie der Diamantwerkzeugform analysiert. Hierzu erfolgen Versuche an den Einzelphasen Zementstein und Basalt sowie an dem mehrphasigen Werkstoff Beton C100/115. Daneben erfolgt ein Vergleich zwischen dem hochfesten Beton C100/115 und dem konventionellen Beton C20/25. Zur Analyse des Einflusses einer Stahlbewehrung werden Versuche an Baustahl- und Stahlbetonproben durchgeführt. Als Zielgrößen werden bei den Untersuchungen die Prozesskräfte und die mechanischen Arbeiten herangezogen. Auszüge dieser Arbeiten wurden in [92, 95, 97] veröffentlicht.

4.5.1 Versuchsumgebung und -methodik

Die Versuche erfolgen auf einem Tiefbohrbearbeitungszentrum der Fa. IXION Typ TLF 1004. Aufgrund des großen Arbeitsraums ist eine gute Zugänglichkeit des Versuchsaufbaus gegeben. Der Versuchsaufbau und die Bewegungen sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Bei der Versuchsdurchführung wird mit einem stehenden Werkzeug gearbeitet. Die Diamantwerkzeuge werden dabei auf einem Kraftdynamometer mit entsprechenden Halterungen gespannt. Zum Einsatz kommen ein Mehrkomponenten-Dynamometer Typ 9257B der Fa. Kistler und bei Wieder-

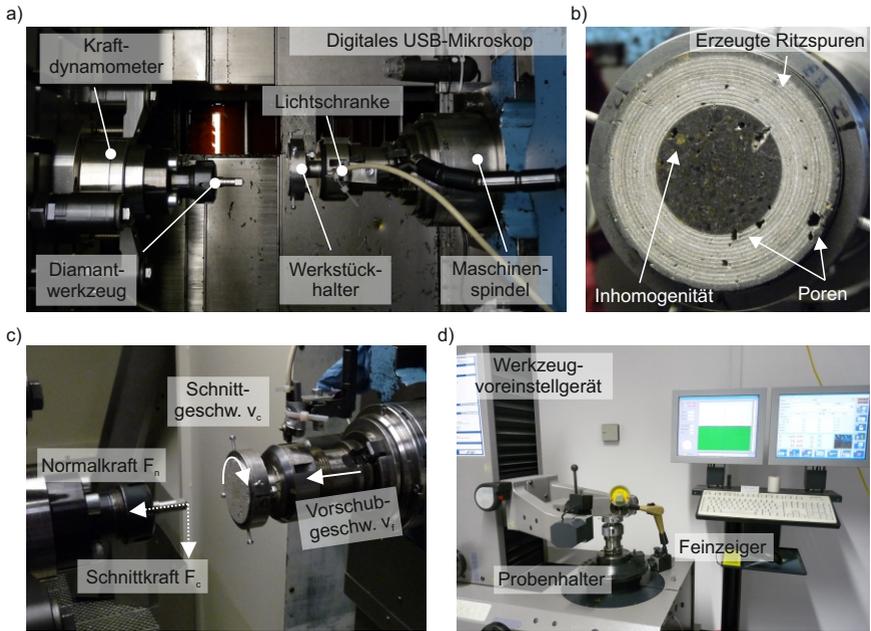


Abbildung 4.17: a) Versuchsaufbau, b) Exemplanische Versuchsprobe aus Basalt nach der Durchführung der Versuche, c) Darstellung der Bewegungen und Prozesskräfte, d) Ausrichtung der Versuchsprobe mittels Werkzeugvoreinstellgerät und Feinzeiger

holungsversuchen ein 4-Komponenten-Dynamometer Typ 9272 der Fa. Kistler. Die translatorischen und rotatorischen Bewegungen bei der Versuchsdurchführung werden durch die Maschinenspindel ausgeführt. Während des Versuchs ändert sich der Versuchsradius nicht, sodass mehrere unabhängige Versuche bzw. Ritzspuren auf einer Probe erzeugt werden können, siehe Abbildung 4.17 c). Hierdurch wird die idealisierte Kinematik eines Kernbohrprozesses nachgebildet, bei der sich ein Diamantkorn entlang einer helixförmigen Eingriffsbahn bewegt. An der Maschinenspindel werden die Versuchsproben mit einer entsprechenden Aufnahme und einer Spannvorrichtung, die die Ausrichtung der Versuchsproben erlaubt, befestigt. Durch die gewählte Kinematik mit einer kontinuierlich zunehmenden Gesamtzustellung hat die Genauigkeit des sogenannten „Ankratzwertes“ bzw. das Feststellen des Werkstücknullpunktes eine Auswirkung auf die tatsächlich erzielte Gesamtzustellung, aber nicht auf den prinzipiellen Verlauf der Kraftsignale. Die notwendige Ausrichtung und Einstellung der Diamantwerkzeuge erfolgt innerhalb der Werkzeugmaschine. Hierzu wird eine USB-Mikroskopkamera Typ Digimicroprofi der Fa. dnt verwendet, die spindelseitig befestigt ist, siehe Abbildung 4.17 a). Mithilfe der Kamera wird zudem der Zustand der Diamantwerkzeuge kontrolliert, um den Einfluss einer Formänderung durch den Verschleiß auf die Versuchsergebnisse ausschließen zu können. Die Versuchsproben werden außerhalb der Werkzeugmaschine ausgerichtet. Dazu werden diese in einem Pro-

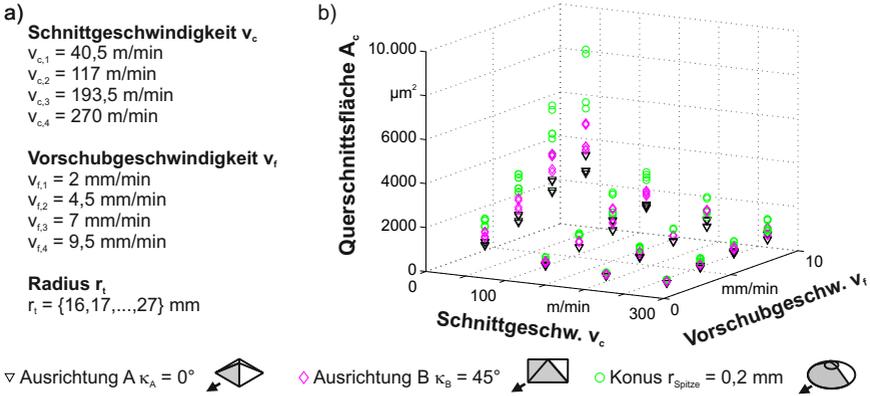


Abbildung 4.18: a) Einstellwerte der Eingangsgrößen des Versuchsplans, b) Berechnete idealisierte Querschnittsflächen der Eingriffsflächen der drei eingesetzten Diamantwerkzeugformen in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter

benhalter auf drei Schrauben positioniert und anschließend radial gespannt. Für eine grobe Ausrichtung der Versuchsproben wird ein Werkzeugvoreinstellgerät der Fa. Zoller Typ smarTcheck verwendet. Im Anschluss daran erfolgt die finale Ausrichtung mit einem Feinzeiger, siehe Abbildung 4.17 d). Die Toleranz des Planlauffehlers der Proben ist dabei auf $f_p = \pm 2,5 \mu\text{m}$ festgesetzt.

Die Versuche werden auf Grundlage eines D-optimierten Versuchsplans durchgeführt. Bei diesem wird berücksichtigt, dass aufgrund der Inhomogenität des Versuchsprobenmaterials eine Variation der Messergebnisse zu erwarten ist und ausreichend Wiederholungsversuche durchzuführen sind. Als weitere Randbedingungen sind eine maximale Anzahl von 12 Versuchen pro Versuchsprobe bei variierendem Versuchsradius und einer vorgegebenen Anzahl von fünf Versuchsproben gegeben. Aus diesem Grund wird in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für computergestützte Statistik, Prof. Weihs, Technische Universität Dortmund ein vollfaktorieller Versuchsplan hinsichtlich der Bearbeitungsparameter Schnittgeschwindigkeit v_c und Vorschubgeschwindigkeit v_f ausgelegt, der als zusätzliche Eingangsgrößen den Versuchsradius r_t und die Versuchsprobe berücksichtigt [86, 87]. Dieser Versuchsplan beinhaltet 60 Versuche, wobei die Bearbeitungsparameter Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit auf jeweils vier Einstellungsstufen variiert werden, siehe Abbildung 4.18. Hierdurch ergeben sich in Abhängigkeit des Versuchsradius unterschiedliche Vorschubwerte und damit Querschnittsflächen.

Der Versuchsplan wird mit jeder Diamantwerkzeugform an den Materialien Beton C20/25, Beton C100/115, Zementstein, Basalt, Stahl und Stahlbeton durchgeführt. Bei der Erstellung der nachfolgenden Modelle sind alle Versuche berücksichtigt. Diese sind durch die „Min PRESS“-Methode optimiert, um die Terme aus dem Modell zu entfernen, die einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis haben. Für die Darstellung der Modelle wird der Versuchsradius r_t auf den Mittelwert der Einstellungsstufe $r_t = 21,5 \text{ mm}$ gesetzt.

4.5.2 Exemplarische Prozesskraftverläufe und Auswertungsmethodik

In Abbildung 4.19 sind für die drei Diamantwerkzeugformen exemplarische Kraftverläufe bei den gleichen Bearbeitungsparametern bei Ritzversuchen an Basalt dargestellt. Aufgrund der kreisförmigen Schnittbewegung sind periodisch wiederkehrende Muster in den Kraftsignalen erkennbar. Diese treten mitunter über einen längeren Zeitraum wiederkehrend auf und korrelieren zumeist mit entsprechenden Materialphasen oder Poren. Durch die linear ansteigende Gesamtzustellung, die zu einem größeren Kontaktbereich zwischen dem Werkzeug und der Versuchsprobe führen, steigen die Kräfte mit der Versuchsdauer an. Da der effektive Spanwinkel bei allen Diamantwerkformen negativ ist, sind die Normalkräfte F_n größer als die Schnittkräfte F_c . Aufgrund der symmetrischen Eingriffsform der Diamantwerkzeuge schwanken die seitlichen Kräfte um das Nullniveau, weshalb auf die Darstellung verzichtet wird.

Bei den drei exemplarischen Kraftsignalen können in den gezeigten Normalkraftverläufen Bereiche mit unterschiedlichen Steigungen erkannt werden, siehe Abbildung 4.19. So zeigt sich zu Beginn der Versuche ein relativ rascher Anstieg der Kraft, siehe Bereich a. An diesen schließt sich ein Bereich b an, indem bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen die Steigung des Kraftsignals nahe Null ist. Bei dem konischen Diamantwerkzeug mit verrundeter Spitze liegt dagegen eine negative Steigung des Kraftsignals vor. Die zeitliche Dauer dieses Bereichs zeigt sich dabei für die drei Diamantwerkzeugformen unterschiedlich. Im Bereich c steigt die Kraft bis zum Erreichen der Gesamtzustellung $a_{e,ges}$ linear an.

Die Erklärung für diese Prozesskraftverläufe muss in der gewählten Kinematik begründet sein, durch die mehrmalig mit linear zunehmender Zustellung in derselben Ritzspur geritzt wird. Für den Bereich a ist davon auszugehen, dass hier das Material zunächst plastifiziert und verdichtet wird. Im Bereich b beginnt die Materialtrennung durch Rissinitiierung und damit Materialabplatzungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass das zunächst ungeschädigte Material durch das wiederholte Ritzen und die dadurch eingebrachten Risse geschwächt wird. Hierdurch bleibt die Kraft bei den nachfolgenden Umdrehungen nahezu konstant oder ist sogar kleiner als bei der Umdrehung zuvor. So haben z. B. *Wang* und *Clausen* bei Ritzversuchen an Marmor festgestellt, dass durch das mehrmalige Ritzen in der gleichen Ritzspur die Kräfte kleiner werden [195]. Nach diesem Bereich, mit nahezu konstanter oder sogar abfallender Kraft, steigen die Prozesskräfte erneut an, Bereich c. Dieser Anstieg erklärt sich durch die größer werdende Eingriffsbreite der Diamantwerkzeuge mit steigender Gesamtzustellung. Es ist davon auszugehen, dass hierdurch die Reibungskräfte größer werden, und in der Folge die Kräfte ansteigen.

Nachfolgend werden die Schnitt- und die Normalkraft sowie die korrespondierenden mechanischen Arbeiten in Richtung der Schnitt- und der Normalkraft bestimmt. Diese Daten dienen zur Beurteilung des Einflusses der im Versuchsplan variierten Bearbeitungsparameter und dem Vergleich zwischen den Diamantwerkzeugformen. Die Prozesskräfte werden hierbei für eine Gesamtzustellung von $a_{e,ges} = 60 \mu\text{m}$ ermittelt. Zur Bestimmung der Prozesskräfte wird dabei ein Datenintervall berücksichtigt, das einer Viertelumdrehung entspricht, wobei der Zeitpunkt des Erreichens der Gesamtzustellung von $a_{e,ges}$ mittig innerhalb dieses Datenintervalls liegt, siehe Abbildung 4.19. Die Zeitdauer einer Viertelumdrehung ist dabei abhängig von der eingestellten Schnittgeschwindigkeit. Die Berücksich-

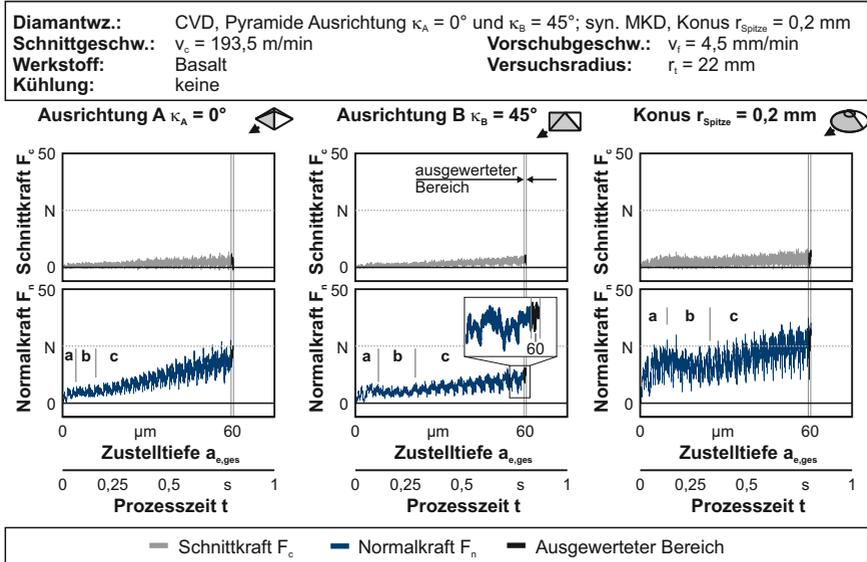


Abbildung 4.19: Exemplarische Darstellung der Kraftverläufe in Abhängigkeit der Diamantwerkzeugform

tigung der Datenpunkte einer Viertelumdrehung wird durchgeführt, um mehrere Phasen der Versuchsprobe und damit die Inhomogenität abzubilden. Für dieses Datenintervall wird der Mittelwert bestimmt und zur Berechnung der nachfolgend dargestellten Regressionsmodelle herangezogen. Die mechanische Arbeit wird dagegen für die Zeitdauer bzw. das Datenintervall berechnet, das zwischen dem Zeitpunkt des ersten Kontakts und dem Zeitpunkt des Erreichens der Gesamtzustellung von $a_{e,ges} = 60 \mu\text{m}$ liegt. Wie bereits im Kapitel 4.4.3 vorgestellt, ergibt sich die mechanische Arbeit nach Formel 4.3 als Integral der Kraft über dem Weg. Dieser ergibt sich aus dem Versuchsradius und der Anzahl der Umdrehungen bis zum Erreichen der Gesamtzustellung von $a_{e,ges} = 60 \mu\text{m}$.

4.5.3 Versuche an den Einzelphasen des Betons C100/115

Beton stellt sich als Gemisch unterschiedlicher Materialphasen dar, wobei im ausgehärteten Zustand Beton als Zweistoffsystem aus Zementstein und Gesteinskörnung betrachtet wird [135]. Für die nachfolgend dargestellten Versuche wird der hochfeste Beton C100/115 verwendet, der im Wesentlichen aus zwei Materialphasen, einer Zementsteinphase aus hochfesten Zement und Sand und einer Gesteinskörnungphase aus Basaltspplitt besteht. Durch Versuche an einphasigen Versuchsproben aus Zementstein und Basalt sowie an dem mehrphasigen hochfesten Beton C100/115 soll ermittelt werden, inwieweit eine einzelne Phase das Verhalten bei der trennenden Bearbeitung des mehrphasigen Betons beeinflusst. Exemplarisch sind nachfolgend die Versuchsergebnisse mit dem Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A in Abbildung 4.20 dargestellt. Die schwarzen Rauten stel-

Schnittgeschw.: $v_c = 40,5; 117; 193,5; 270$ m/min	Diamantzw.: CVD, Pyramide	Ausrichtung A 
Vorschubgeschw.: $v_f = 2; 4,5; 7; 9,5$ mm/min	Ausrichtung: $\kappa_A = 0^\circ$	
Kühlung: keine	Spanwinkel: $\gamma_A = -55^\circ$	
Werkstoff: Basalt, Zementstein, Beton C100/115		

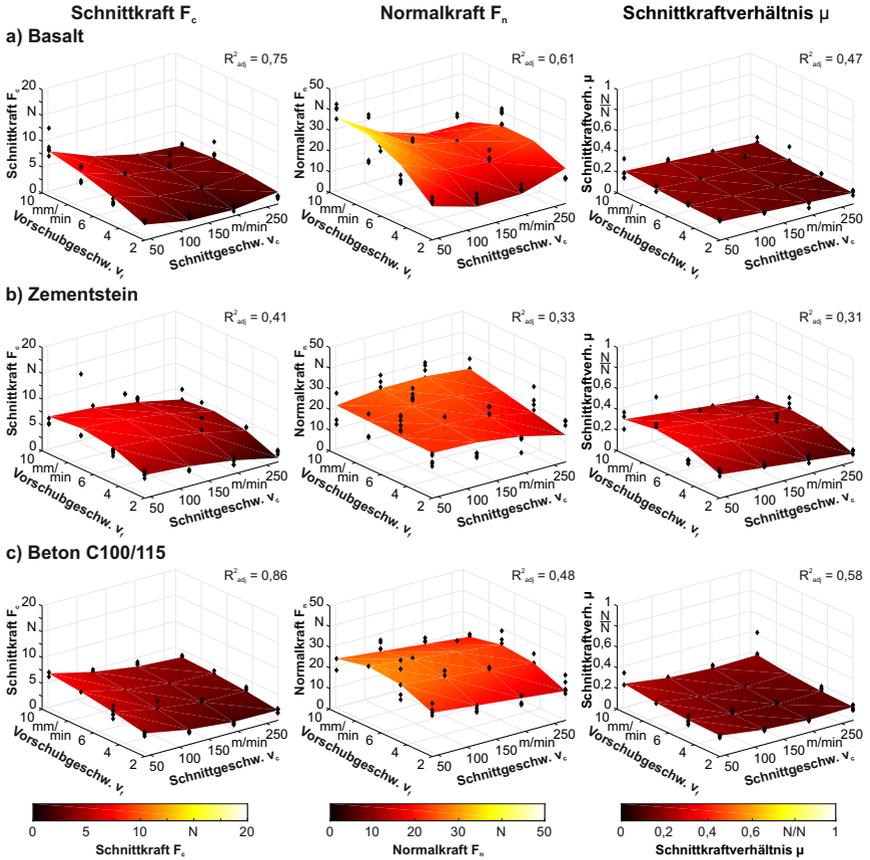


Abbildung 4.20: Ermittelte Modelle der Prozesskräfte beim Ritzvorgang von a) Basalt, b) Zementstein und c) Beton C100/115 mit pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung A κ_A

len dabei die ermittelten Kennwerte dar. Die dreidimensionalen Oberflächen entsprechen Regressionsmodellen von max. 2. Ordnung, die auf Basis der ermittelten Kennwerte berechnet sind. Die gleichen qualitativen Zusammenhänge die bei den Versuchen mit dargestelltem Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A ermittelt werden können, liegen auch bei den Versuchen mit den anderen Diamantwerkzeugen vor. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur hinsichtlich der Absolutwerte, weshalb auf die Darstellung verzichtet wird.

Die ermittelten Kraftmodelle für die drei untersuchten Materialien Basalt, Zementstein und Beton C100/115 liegen in einem ähnlichen Werteintervall. Sowohl

in der Basalt- als auch Zementsteinphase treten Prozesskräfte der gleichen Größenordnung auf. Es kann erkannt werden, dass der qualitative Einfluss der Bearbeitungsparameter Vorschubgeschwindigkeit v_f und Schnittgeschwindigkeit v_c auf die Schnittkraft F_c und die Normalkraft F_n nur geringfügig von der Materialphase beeinflusst ist. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit geht ein Anstieg der Schnitt- und Normalkraft einher. Mit höheren Schnittgeschwindigkeiten ist tendenziell eine Abnahme der Schnitt- und Normalkraft verbunden. Entsprechend dieser Tendenzen liegen die Minima der Prozesskräfte bei hohen Schnittgeschwindigkeiten und kleinen Vorschubgeschwindigkeiten vor. Da bei allen Materialien nur ein geringer Unterschied zwischen den Prozesskräften vorliegt, ergibt sich auch für das Schnittkraftverhältnis ein ähnlicher Wert, (siehe Abbildung 4.20). Die höchsten Werte liegen dabei für hohe Vorschubgeschwindigkeiten und kleine Schnittgeschwindigkeiten vor. Dies kann mit der höheren Zustelltiefe und damit einem geringeren Umfang an Reibungskräften begründet werden.

Für den hochfesten Beton C100/115 kann zusammengefasst werden, dass hinsichtlich der mechanischen Belastungen keine dominierende Materialphase vorliegt und sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Ergebnissen an den Einzelphasen und dem mehrphasigen Werkstoff Beton C100/115 zeigen. Dieses Resultat kann durch die mechanischen Eigenschaften der Materialphasen erklärt werden und steht im Einklang mit in der Literatur beschriebenen Eigenschaften hochfester Betone [156]. Aufgrund ähnlicher Eigenschaften der Gesteinskörnung und der Zementsteinphase ist die strukturelle Heterogenität im Vergleich zu konventionellem Beton verringert, sodass z. B. bei Druckfestigkeitsanalysen von hochfestem Beton die Bruchflächen durch die Zementsteinphase und durch die Gesteinskörnung hindurch verlaufen. Bei konventionellem Beton dagegen verläuft die Bruchfläche entlang der Oberflächen der Gesteinskörnung, da die Zementsteinphase die im Vergleich geringeren mechanischen Festigkeiten aufweist.

4.5.4 Vergleich unterschiedlicher Betongüten

Nachfolgend sind Untersuchungsergebnisse dargestellt, die bei Versuchen an hochfestem Beton C100/115 und im Vergleich dazu an konventionellem Beton C20/25 gewonnen wurden. In Abbildung 4.21 sind die Normalkraft und das Schnittkraftverhältnis in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit sowie der Diamantwerkzeugform dargestellt. Die Auswirkungen der Bearbeitungsparameter auf die Prozesskräfte wurden bereits im vorhergehenden Kapitel erläutert. Wesentlich größere Auswirkungen auf die Prozesskräfte hat, unabhängig von der Betongüte, die gewählte Diamantwerkzeugform. So zeigt sich für den Beton C100/115, dass die Normalkräfte beim Einsatz der konischen Diamantwerkzeuge ungefähr um den Faktor 2 größer sind als beim Einsatz der pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge mit der Ausrichtung B. Ein ähnliches Verhältnis kann auch beim Beton C20/25 beobachtet werden. Bei den Versuchen mit dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A liegen die Werte der Normalkräfte bei beiden Betongüten ungefähr zwischen denen der anderen beiden Diamantwerkzeugformen. Tendenziell liegen unabhängig von der eingesetzten Diamantwerkzeugformen bei den Ritzversuchen an dem Beton C20/25 kleinere Kräfte vor als bei dem Beton C100/115.

Werden die Schnittkraftverhältnisse in der Abbildung 4.21 hinsichtlich des Einflusses der Werkzeugform verglichen, zeigt sich sowohl für den Beton C100/115

Diamantwz.:	CVD, Pyram. $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$	Werkstoff:	Beton C100/115, Beton C20/25
Schnittgeschw.:	$v_c = 40,5; 117; 193,5; 270 \text{ m/min}$	Vorschubge.:	$v_f = 2; 4,5; 7; 9,5 \text{ mm/min}$
Kühlung:	keine		

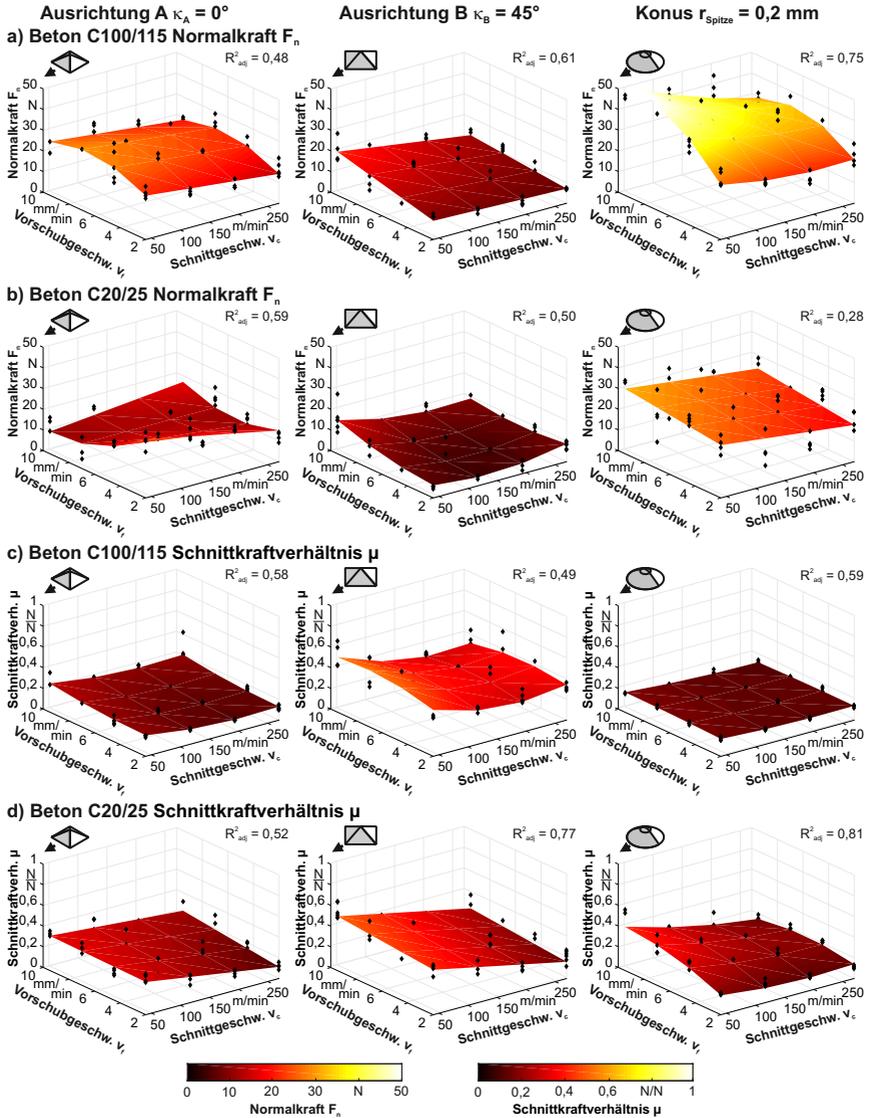


Abbildung 4.21: Ermittelte Modelle der Normalkräfte beim Ritzen von a) Beton C100/115, b) Beton C20/25 und der Schnittkraftverhältnisse beim Ritzen von c) Beton C100/115, d) Beton C20/25 in Abhängigkeit der Diamantwerkzeugform

als auch für den Beton C20/25, dass bei dem pyramidenförmigen Werkzeug in der Ausrichtung B die höchsten Werte vorliegen. Für beide Betongüten liegt das Schnittkraftverhältnis dabei in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter im Bereich $\mu = 0,3$ bis $0,5$. Im Vergleich dazu, liegen die Schnittkraftverhältnisse beim Beton C100/115 beim Einsatz des konischen Diamantwerkzeugs bei $\mu \leq 0,15$ und bei dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A im Bereich von $\mu \approx 0,2$. Ähnliche Auswirkungen dieser beiden Diamantwerkzeugformen auf die Schnittkraftverhältnisse liegen auch beim Beton C20/25 vor. Die Werte sind hierbei im Vergleich zum Beton C100/115 tendenziell etwas höher. Daraus folgt, dass der Anteil der Schnittkraft an der Gesamtkraft beim Ritzen des Betons C20/25 entsprechend höher ist.

Die Unterschiede der Prozesskräfte für die untersuchten Betongüten C100/115 und C20/25 erklären sich durch die unterschiedlichen Zusammensetzungen. Der Beton C100/115 besteht, wie bereits im vorherigen Kapitel dargestellt, aus zwei Materialphasen, die hinsichtlich der auftretenden mechanischen Belastungen ähnliche Werte aufweisen. Der Beton C20/25 weist dagegen deutlich größere Unterschiede hinsichtlich der Eigenschaften der Materialphasen auf. Die Zementsteinphase besteht aus normalfestem Zement und Sand. Beim Aushärten verbleiben jedoch deutlich mehr Poren im Gefüge des Zementsteins, was zu einem offenporigen Gefüge mit einer geringeren strukturellen Festigkeit führt, sodass größere Materialausbrüche entstehen können. Darin eingebettet ist die Gesteinskörnungsphase, die sich jedoch anders als beim Beton C100/115, als inhomogen darstellt, da verschiedene Gesteinskörnungsarten (Rheinkies) vorliegen. Insgesamt betrachtet hat dies jedoch keine Auswirkungen, da der Einfluss der Zementsteinphase den Einfluss der Gesteinskörnung übertrifft, weshalb im Vergleich zum Beton C100/115 beim Beton C20/25 kleinere Kräfte vorliegen. Die größeren Unterschiede der Eigenschaften der Materialphasen beim Beton C20/25 zeigen sich allerdings nicht in der Streubreite der Versuchsergebnisse.

4.5.5 Einfluss der Diamantform auf die Zerspanungsarbeit

Bereits im vorhergehenden Kapitel 4.5.4 konnte anhand des Vergleichs der Prozesskräfte der Einfluss unterschiedlicher Diamantwerkzeugformen auf die mechanischen Belastungen erarbeitet werden. Nachfolgend soll zusätzlich eine energetische Betrachtung der Ritzversuche durchgeführt werden. Dazu wird die mechanische Arbeit in Richtung der Normalkraft und der Schnittkraft ermittelt. Diese kann nach Formel 4.3 durch die Berechnung des Integrals der Prozesskraft in Abhängigkeit des Eingriffswegs berechnet werden.

Nachfolgend sind die mechanischen Arbeiten in Richtung der Normalkraft, siehe Abbildung 4.22, und in Richtung der Schnittkraft, siehe Abbildung 4.23, für die Werkstoffe Basalt, Zementstein, Beton C100/115 und Beton C20/25 dargestellt. Da sich die Maxima in den Modellen der mechanischen Arbeiten bei anderen Bearbeitungsparameterkombinationen ergeben, als bei den Modellen der Prozesskräfte, ist es aus Darstellungsgründen notwendig, die Achsen und die Richtung der Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit zu vertauschen.

Die Arbeit in Richtung der Normalkraft W_n weist bei allen Einstellungen der Eingangsgrößen deutlich geringere Werte auf als die Arbeit in Richtung der Schnittkraft W_c . Dies ergibt sich durch die kürzere Wegstrecke in Richtung der Normalkraft, sodass sich trotz höherer Absolutwerte der Normalkraft F_n im Vergleich

Diamantwz.:	CVD, Pyram. $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$	Werkstoff:	Basalt, Zementstein, Beton C100/115, Beton C20/25
Schnittgeschw.:	$v_c = 40,5; 117; 193,5; 270 \text{ m/min}$	Vorschubge.:	$v_f = 2; 4,5; 7; 9,5 \text{ mm/min}$
Kühlung:	keine		

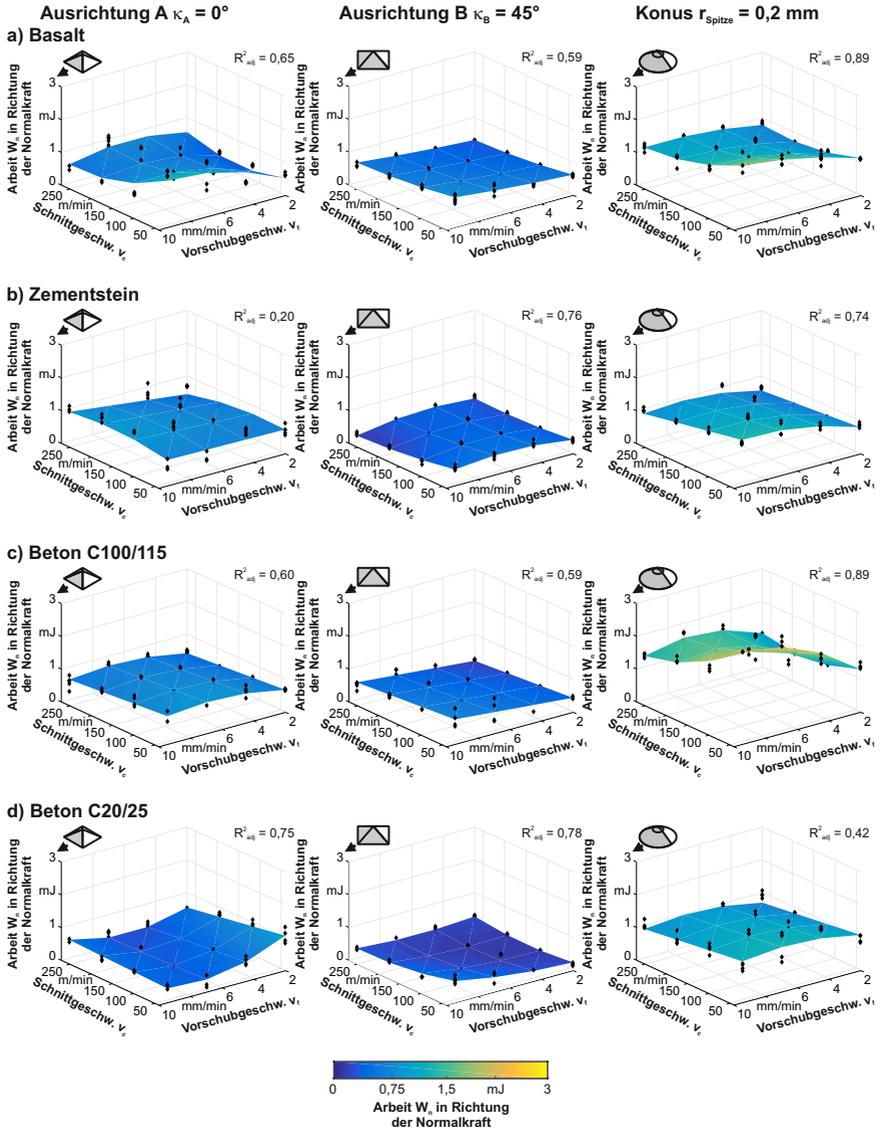


Abbildung 4.22: Ermittelte Modelle der Arbeit W_n in Richtung der Normalkraft beim Ritzten von a) Basalt, b) Zementstein, c) Beton C100/115 und d) Beton C20/25 in Abhängigkeit der Diamantwerkzeugform

Diamantwz.:	CVD, Pyram. $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$;	Werkstoff:	Basalt, Zementstein, Beton C100/115, Beton C20/25
Schnittgeschw.:	$v_c = 40,5; 117; 193,5; 270$ m/min	Vorschubge.:	$v_f = 2; 4,5; 7; 9,5$ mm/min
Kühlung:	keine		

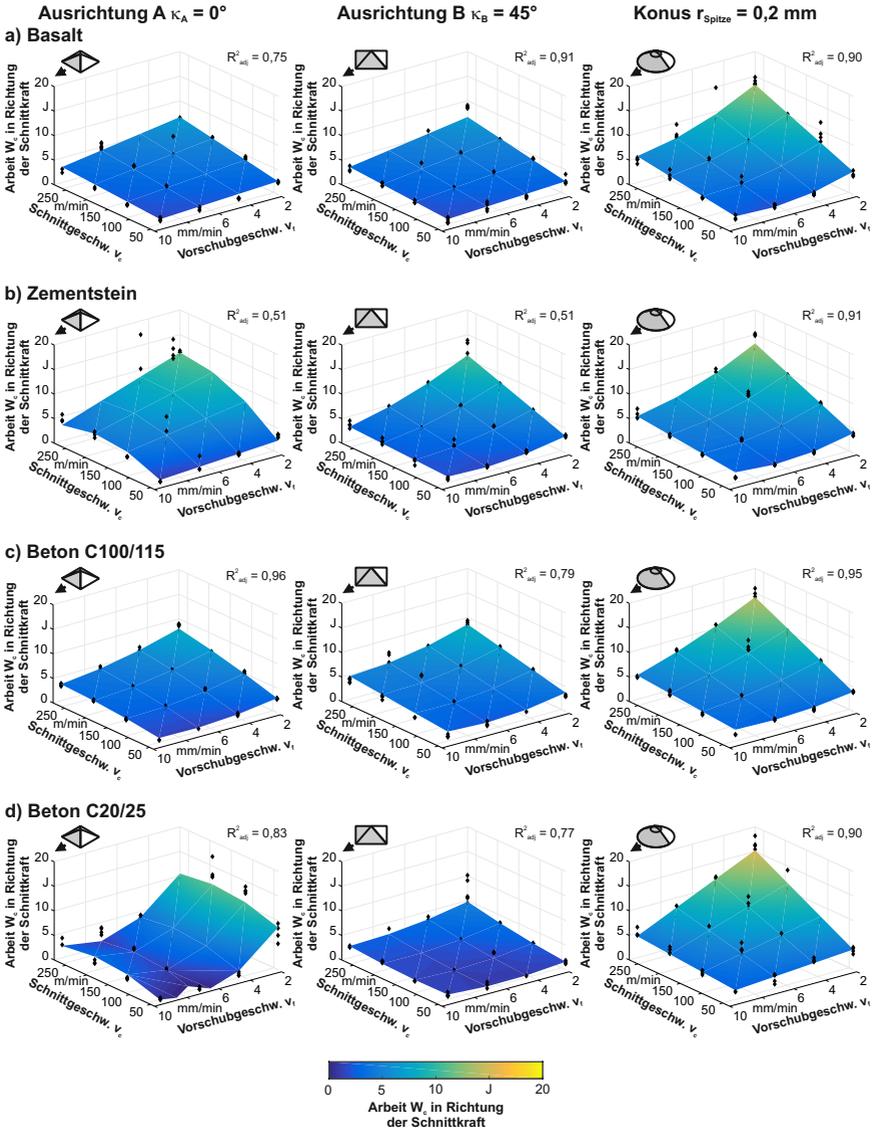


Abbildung 4.23: Ermittelte Modelle der Arbeit W_c in Richtung der Schnittkraft beim Ritzten von a) Basalt, b) Zementstein, c) Beton C100/115 und d) Beton C20/25 in Abhängigkeit der Diamantwerkzeugform

zu den Werten der Schnittkraft F_c geringere mechanische Arbeiten ergeben. Die Wegstrecke in Richtung der Normalkraft entspricht dabei der maximalen Gesamtzustellung von $a_{e,ges} = 60 \mu\text{m}$. Dahingegen betragen die Wegstrecken in Richtung der Schnittkraft in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter minimal $s = 0,255 \text{ m}$. Trotz der geringeren Kräfte in Schnittrichtung ergeben sich hierdurch im Vergleich deutlich größere Werte der mechanischen Arbeit.

Der qualitative Einfluss der Bearbeitungsparameter Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit auf die mechanische Arbeit in Richtung der Normalkraft ist nicht eindeutig, siehe Abbildung 4.22. Für die untersuchten Kombinationen der Diamantwerkzeugformen und Werkstoffe zeigen sich verschiedene Auswirkungen. Dagegen liegt bei der mechanischen Arbeit in Richtung der Schnittkraft ein ähnlicher Einfluss der Bearbeitungsparameter bei allen Diamantwerkzeugformen und Materialien vor. So zeigt sich z. B. mit fallender Vorschubgeschwindigkeit und steigender Schnittgeschwindigkeit ein Anstieg der mechanischen Arbeit in Richtung der Schnittkraft. Die geringsten Werte zeigen sich jeweils bei hohen Vorschub- und geringen Schnittgeschwindigkeiten.

Der Vergleich zwischen den drei eingesetzten Diamantwerkzeugformen zeigt die geringsten Werte der mechanischen Arbeit für die Versuche mit dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B sowohl in Richtung der Normalkraft als auch Schnittkraft. Beim Einsatz der konischen Diamantwerkzeuge ergeben sich dagegen die höchsten mechanischen Arbeiten. Große Unterschiede zwischen den drei Diamantwerkzeugformen bei der mechanischen Arbeit in Schnittrichtung sind insbesondere bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten und geringen Schnittgeschwindigkeiten vorzufinden. Bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten und geringen Schnittgeschwindigkeiten sind die Unterschiede dagegen weniger deutlich ausgeprägt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die mechanischen Arbeiten bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten und hohen Schnittgeschwindigkeiten deutlich zunehmen. Bei diesen Bearbeitungsparameterkombinationen liegen die geringsten Werte des Vorschubs pro Umdrehungen vor. Es ist davon auszugehen, dass hier aufgrund der geringen Zustelltiefen in einem größeren Umfang ungünstige Reibungsvorgänge beim Ritzen verursacht werden. Die Form des Diamantwerkzeugs mit konischer Grundform und verrundeter Spitze begünstigt per se das Auftreten von Reibungsvorgängen wegen einer fehlenden Schneidkante. Dementsprechend finden sich die höchsten Werte der mechanischen Arbeiten bei dieser Diamantwerkzeugform. Bei einer geringen Schnittgeschwindigkeit verringern sich mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit die Unterschiede der Werte zwischen den Diamantwerkzeugformen. Trotzdem liegen auch hier weiterhin die kleinsten Werte bei den Versuchen mit dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B vor. Aufgrund der im Vergleich zur mechanischen Arbeit in Schnittrichtung deutlich geringeren Werte der mechanischen Arbeiten in Richtung der Normalkraft kann diese als nachrangig bei der Beurteilung des Ritzprozesses eingestuft werden.

4.5.6 Einfluss der Stahlbewehrung

Bei der trennenden Bearbeitung von Stahlbeton stellen die Kombination der beiden Werkstoffe bzw. die verschiedenen Werkstoffeigenschaften die Herausforderung dar. Dabei sind die Prozesskräfte und die notwendige spezifische Energie bei der trennenden Bearbeitung in Stahl höher als in Beton. Durch die Kombination

der beiden Werkstoffe tritt ein schlagartiger Lastwechsel durch den Phasenwechsel auf mit dem gleichzeitig eine Veränderung der wirkenden Materialtrennungsmechanismen einhergeht.

Versuche an Stahlproben

Zunächst soll die Materialtrennung im Rahmen von Ritzversuchen auf Proben aus Baustahl (1.0577) untersucht werden. In Abbildung 4.24 sind exemplarisch die aufgezeichneten Kraftsignale bei den Ritzversuchen mit den maximalen Einstellwerten des zu Grunde liegenden Versuchsplans gezeigt, vgl. Abbildung 4.18. Es ist erkennbar, dass beim überwiegenden Teil der Versuche instationäre Vorgänge stattfinden. Dabei liegt zunächst ein kurzer Zeitbereich vor, in dem die Kräfte linear ansteigen. Danach erfolgen in Abhängigkeit der Prozessparameter unterschiedliche Vorgänge. Instationäre Vorgänge können insbesondere bei den Versuchen mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 40,5$ m/min, unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit und der Diamantwerkzeugform, beobachtet werden. Linear ansteigende Kraftsignale liegen überwiegend bei den Versuchen mit der Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 270$ m/min vor. Hier sind zudem die Maximalwerte der Prozesskräfte deutlich niedriger als bei den Versuchen mit $v_c = 40,5$ m/min. Teilweise liegen aber auch hier kurzzeitige instationäre Ereignisse vor.

Aufgrund der instationären Vorgänge erscheint eine Auswertung der Versuche an den Stahlproben zur Modellbildung der Prozesskräfte und der mechanischen Arbeiten nicht sinnvoll. Als ursächlich für die instationären Kraftsignale kann die Bildung einer Aufbauschneide angenommen werden, die durch ein Anhaften von Stahl am Werkzeug entsteht. Diese wird begünstigt durch die relativ geringen Schnittgeschwindigkeiten und den ununterbrochenen Ritzprozess sowie die Stauzonen vor den Diamantwerkzeugen aufgrund der negativen effektiven Spanwinkel. Durch die Bildung der Aufbauschneide liegen zum einen ungünstige Kontaktbedingungen vor, die zu hoher Reibung und plastischen Verdrängungen führen, wodurch die Prozesskräfte ansteigen, zum anderen löst sich das anhaftende Material oder Teile davon wiederkehrend ab, sodass eine instabile Eingriffsform vorliegt. Durch das Anhaften eines größeren Umfangs von Material variiert zudem die effektive Zustelltiefe. Dies führt dazu, dass abschnittsweise die Zustelltiefe ansteigt und mehr Material abgespannt wird als durch den Vorschub vorgegeben. Nach dem Ablösen des anhaftenden Materials besteht hierdurch in der darauf folgenden Umdrehung kein Kontakt zwischen der Probe und dem Werkzeug, wodurch die Prozesskräfte teilweise bis auf Null absinken.

In Abbildung 4.25 sind Gefügeschliffe und mikroskopische Aufnahmen der erzeugten Ritzspuren gezeigt. Diese wurden an drei Stellen der Probe in einem Winkelabstand von 120° angefertigt. Da zwischen den drei untersuchten Stellen keine Unterschiede vorliegen, sind exemplarisch die Ergebnisse für eine der drei Stellen gezeigt. Durch die Anfertigung von Gefügeschliffen senkrecht zur Schnittrichtung kann sowohl eine mechanische als auch eine thermische Beeinflussung des Grundwerkstoffs durch den Ritzversuch erkannt werden. Neben der Analyse der Gefügestruktur ermöglichen die Aufnahmen zudem eine qualitative Analyse des Ritzspurprofils. Die dargestellten Ritzspurprofile in den Gefügeschliffe weisen unterschiedliche Tiefen und damit auch Breiten auf. Dies erklärt sich dadurch, dass jeder Ritzversuch bei einer anderen Winkelposition der Versuchsprobe beginnt,

Diamantwz.: CVD, Pyram. $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; **Werkstoff:** Stahl (1.0577)
 syn. MKD, $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$
Schnittgeschw.: $v_c = 40,5; 270 \text{ m/min}$ **Vorschubge.:** $v_f = 2; 9,5 \text{ mm/min}$
Kühlung: keine

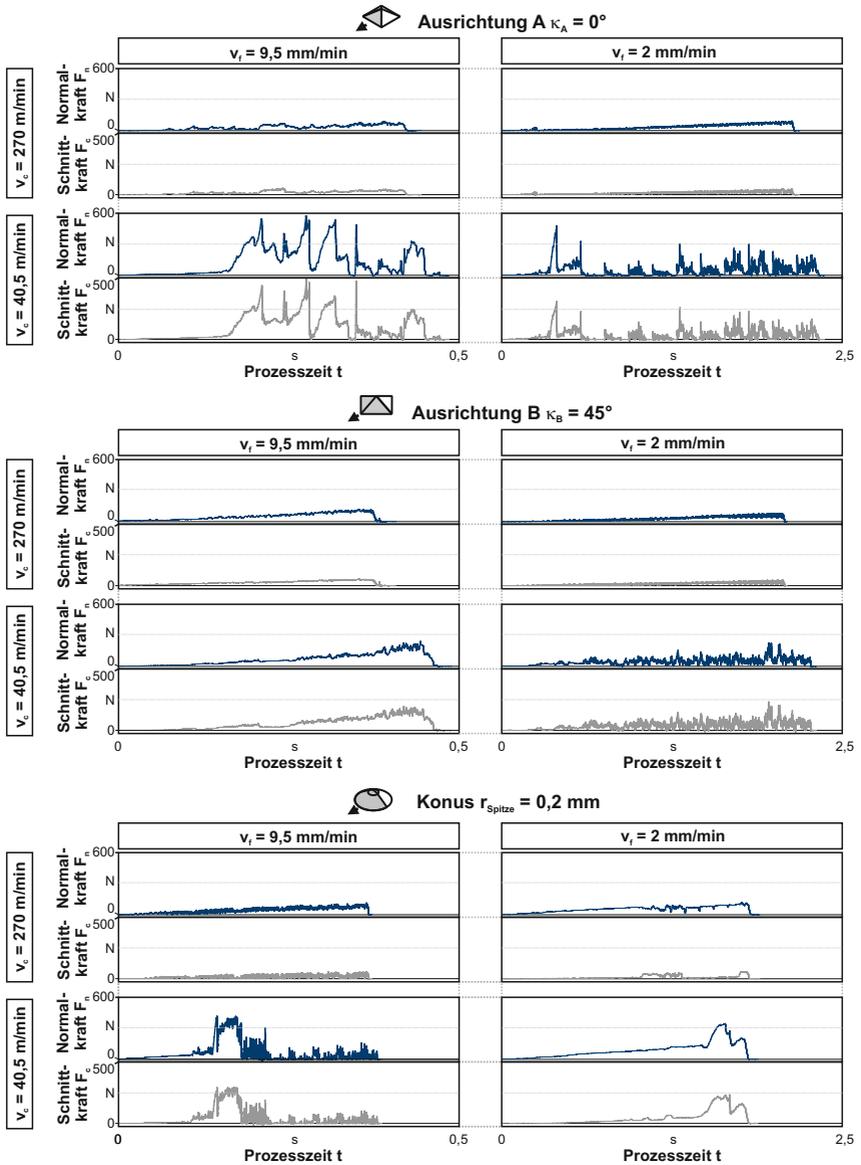


Abbildung 4.24: Kraftsignale beim Ritzen von Stahl in Abhängigkeit der Diamantwerkzeugform, der Schnitt- und der Vorschubgeschwindigkeit

die Gefügeschliffen jedoch alle an der gleichen Winkelposition der Versuchsprobe angefertigt sind

Die erzeugten Ritzspuren weisen spezifische Unterschiede in Abhängigkeit der eingesetzten Diamantwerkzeuge auf. Bei den Versuchen mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 270$ m/min entsprechen die Ritzspurprofile im Wesentlichen der Konturlinie der eingesetzten Diamantwerkzeugformen. Aufgrund der unterschiedlichen Querschnittsflächen der Diamantwerkzeuge, vgl. Abbildung 4.15 c), ergeben sich unterschiedlich breite Ritzspuren. Dabei wird die Ritzspurbreite ausgehend von den Versuchen mit dem Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A über die Versuche mit dem Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B bis zu den Versuchen mit dem Diamantwerkzeug mit der verrundeten Spitze in aufsteigender Reihenfolge größer. Die Oberfläche des Ritzspurgunds erscheint bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 270$ m/min im Vergleich zu den Versuchen mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 40,5$ m/min deutlich glatter. Der Umfang der seitlich vorhanden Aufwürfe bzw. Grate scheint abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit zu sein. So finden sich bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 2$ mm/min größere seitliche Materialaufwürfe als bei der Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 9,5$ mm/min.

Bei den Versuchen mit der Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 40,5$ m/min entsprechen die Profile der Ritzspuren nur eingeschränkt den Konturlinien der Diamantwerkzeuge. Insbesondere bei den Versuchen mit der Ausrichtung A weichen die Ritzspurprofile deutlich von der Diamantwerkzeugkontur ab. Hier finden sich zudem Materialschuppen und -aufquetschungen.

Unabhängig von den Bearbeitungsparametern kann bei allen Ritzspuren eine Beeinflussung der Gefügerandzone festgestellt werden. Dabei sind die vorliegenden Kristalle in der beeinflussten Gefügezone im Vergleich zum unbeeinflussten Gefüge flacher. Dies Bild ergibt sich durch die Verformung der Kristalle in Schnittrichtung. Bei einer Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit, womit auch der Vorschub pro Umdrehung abgesenkt wird, ist im Gefügeschliff eine größere Zone von verformten Gefügekristallen erkennbar. Dies weist darauf hin, dass aufgrund des geringeren Vorschubs der Umfang plastischer Verformungen größer ist. Bei der geringeren Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 2$ mm/min kann daher davon ausgegangen werden, dass das Material beim Ritzen im Wesentlichen umgepflügt, aber nicht direkt abgespant wird.

Sowohl die instationären Verläufe der Kraftsignale als auch die vorliegenden Bilder der erzeugten Ritzspuren weisen darauf hin, dass bei den durchgeführten Ritzversuchen eine Aufbauschneidenbildung stattgefunden hat. Begünstigt wird diese durch die relativ lange Kontaktzeit zwischen Werkzeug und Versuchsprobe sowie die geringen Schnittgeschwindigkeiten. Bei der Aufbauschneidenbildung kommt es zu Materialanhaftungen am Diamantwerkzeug, wodurch sich die effektiven Winkel bzw. die Eingriffsform verändern [45]. Da sich das anhaftende Material wiederkehrend ablöst und aufbaut, liegen variierende Eingriffsformen und damit instationäre Prozesse vor. Durch das anhaftende Material werden die effektiven Winkel tendenziell stärker negativ, wodurch insbesondere die Normalkraft ansteigt. Gleichzeitig verändert sich hierdurch die tatsächliche Eingriffstiefe des Werkzeugs, d. h. solange die Aufbauschneide stabil ist, wird zeitlich begrenzt mehr Material abgetrennt als eingestellt ist. Löst sich die Aufbauschneide vom Werkzeug bzw. ist der Umfang der Aufbauschneide durch abgelöstes Material

Diamantwz.:	CVD, Pyram. $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$	Werkstoff:	Stahl (1.0577)
Schnittgeschw.:	$v_c = 40,5$; 270 m/min	Vorschubge.:	$v_f = 2$; $9,5 \text{ mm/min}$
Kühlung:	keine		

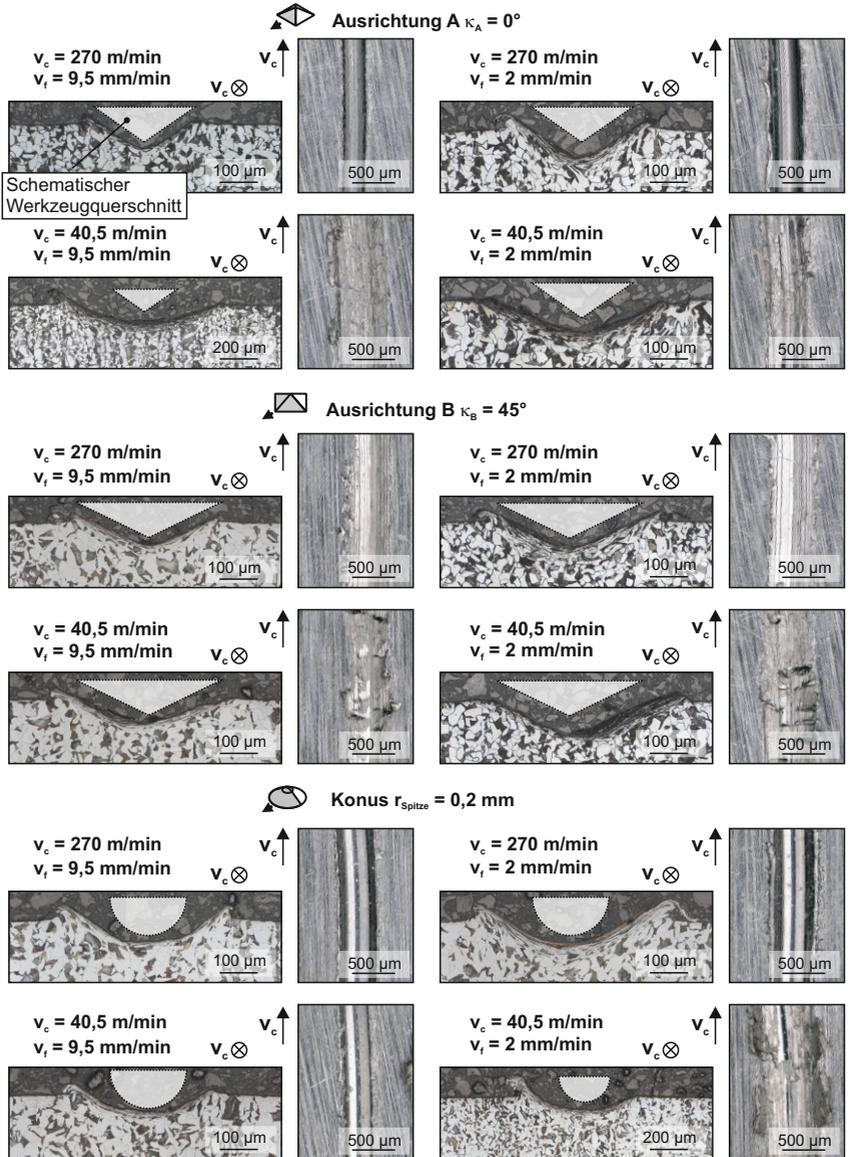


Abbildung 4.25: Gefügeschliffe und mikroskopische Aufnahmen der Ritzspuren bei Versuchen an Stahl in Abhängigkeit der Diamantwerkzeugform, der Schnitt- und der Vorschubgeschwindigkeit

kleiner, sinkt in der Folge die Eingriffstiefe für eine gewisse Dauer ab. Es findet daher keine kontinuierliche Spannbildung statt, sondern ein dauernder Wechsel der aktiven Mechanismen in Abhängigkeit des aktuellen Zustands bzw. der Form der Aufbauschniede. Daneben führt die Wahl der Bearbeitungsparameter zu ungünstigen Eingriffstiefen. So kann insbesondere bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 2 \text{ mm/min}$ das Auftreten von Materialschuppen und Materialaufquetschungen in der Ritzspur festgestellt werden. Zudem zeigt sich bei diesen Versuche eine ausgeprägtere Gratbildung.

Versuche an Stahlbetonproben

In Abbildung 4.26 sind die bei den Ritzversuchen an Stahlbetonproben aufgezeichneten Kraftsignale dargestellt. Bei diesen Proben liegt ein $s_{st} = 3 \text{ mm}$ breiter Stahlsteg vor, vgl. Abbildung 4.3. Wie bei den Versuchen an den Stahlproben sind jeweils die maximalen Einstellungen der Bearbeitungsparameterkombinationen dargestellt, um die grundlegenden Zusammenhänge untersuchen zu können. Da auch hier jeder Versuch bei einer anderen Winkelposition der Versuchsprobe beginnt, wird die Stahlphase zu unterschiedlichen Zeitpunkten geritzt. Damit liegen entsprechend unterschiedliche Werte der Gesamtzustellung beim Ritzten der Stahlphase vor, wodurch sich unterschiedliche Prozesskräfte ergeben.

Bei den Versuchen mit dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ kann die Stahlphase bzw. die Veränderung des Kraftsignals durch das Ritzten der Stahlphase direkt in der Schnittkraft erkannt werden. Hier liegen entsprechend drehzahlabhängig periodisch wiederkehrende Kraftspitzen vor. In der Normalkraft dagegen sind die Kraftspitzen, die durch die Durchtrennung der Stahlphase entstehen, auf einem Niveau mit der umgebenen Betonphase. Die Kraftsignale bei der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ zeigen dagegen sowohl in der Schnitt- als auch in der Normalkraft unmittelbar erkennbare Kraftspitzen. Bei dem Diamantwerkzeug mit konischer Grundform und verrundeter Spitze entstehen durch die Durchtrennung der Stahlphase, wie bei dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A, unmittelbar erkennbare Kraftspitzen in der Schnittkraft, während die Kraftspitzen in der Normalkraft ungefähr gleich hoch sind wie die die in der Betonphase auftreten.

Die größten Normalkräfte liegen bei allen Bearbeitungsparameterkombinationen bei den Versuchen mit dem Diamantwerkzeug mit konischer Grundform und verrundeter Spitze vor. Die kleinsten Normalkräfte in der Betonphase liegen tendenziell bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ vor. Hinsichtlich der Stahlphase ist eine Abhängigkeit von den Bearbeitungsparametern erkennbar. So sind die Normalkräfte in der Stahlphase bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 270 \text{ m/min}$ bei der Ausrichtung B kleiner als bei der Ausrichtung A. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 40,5 \text{ m/min}$ dagegen scheinen die Normalkräfte der beiden Ausrichtungen des pyramidenförmigen Diamantwerkzeugs ungefähr gleich groß zu sein. Bei der Schnittkraft zeigt sich keine eindeutige Tendenz hinsichtlich des Einflusses der Diamantwerkzeugform über alle Bearbeitungsparameterkombinationen. Hier kann jedoch beobachtet werden, dass bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 40,5 \text{ m/min}$ unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit höhere Schnittkräfte vorliegen als bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 270 \text{ m/min}$. Bei allen Bearbeitungsparameterkombinationen und Diamantwerkzeugformen ist die Schnittkraft im Verhältnis

zur Normalkraft in der Betonphase kleiner als die Schnittkraft im Verhältnis zur Normalkraft in der Stahlphase. Damit ist das Schnittkraftverhältnis in der Stahlphase größer als in der Betonphase, was sich durch das zähelastische Verhalten erklären lässt.

Wie bei den Versuchen an den Proben aus Baustahl können durch die Analyse der Ritzspuren weitergehende Erkenntnisse erlangt werden. In Abbildung 4.27 sind entsprechend mikroskopische Aufnahmen der Ritzspuren und Ritzspurprofile dargestellt. Zudem ist auf Grundlage der Ritzspurprofile der korrespondierende f_{ab} -Wert dargestellt. Die mikroskopischen Bilder zeigen mittig den Stahlsteg, wobei die Schnittrichtung von links nach rechts verläuft. Dementsprechend ist die Ritzspur auf der linken Seite des Stahlstegs, die als Eintrittseite bezeichnet werden soll, geringer ausgeprägt als auf der rechten Seite, die als Austrittsseite bezeichnet werden kann. Hier kann beim überwiegenden Teil der Ritzspuren festgestellt werden, dass der Stahl in die Betonphase gedrückt wird. Am umfangreichsten scheint dies beim Diamantwerkzeug mit konischer Grundform und verrundeter Spitze zu erfolgen.

Bei den Ritzversuchen mit dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ erscheinen die Ritzspuren bis auf die Bearbeitungsparameterkombination mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 40,5$ mm/min und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 9,5$ mm/min sehr ähnlich. Bei dieser Bearbeitungsparameterkombination ist der Umfang der am Ritzspurrand vorliegenden Grate sowie der Materialaufquetschungen größer. Zudem sind die Flanken und der Grund der Ritzspur weniger glatt. Bei den Versuchen mit dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B erscheinen die erzeugten Ritzspuren unabhängig von der Parameterkombination qualitativ sehr ähnlich. Hier sind zudem die Ritzspuren breiter und der Umfang der seitlichen Grate größer als bei dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A.

Wie bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen kann auch bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen mit konischer Grundform und verrundeter Spitze ein vernachlässigbarer Einfluss der Bearbeitungsparameter auf die erzeugten Ritzspuren erkannt werden. Alle vier Ritzspuren weisen glatte Oberflächen der Flanken auf, ohne dass erkennbare Defekte vorliegen. Im Vergleich liegen hier die größeren seitlichen Materialaufwürfe bzw. Grate vor als bei dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A. Der Umfang der Aufwürfe erscheint hier jedoch kleiner zu sein als bei den Versuchen mit den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung B.

Die in Abbildung 4.27 gezeigten Ritzspurprofile entsprechen den unterschiedlichen Querschnittsflächen der eingesetzten Diamantwerkzeuge. So sind die Querschnittsflächen der Ritzspuren bei den Versuchen mit dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A am kleinsten. Dahingegen sind der Öffnungswinkel und die Querschnittsfläche der Ritzspurprofile, die durch das pyramidenförmige Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B erzeugt werden, erkennbar größer. Bei den Versuchen mit dem Diamantwerkzeug mit konischer Grundform und verrundeter Spitze dagegen ist der Spitzenradius im Ritzspurgrund der Profile erkennbar.

Durch die Bestimmung des f_{ab} -Werts nach Formel 2.5 für die in der Abbildung 4.27 dargestellten Ritzspurprofile können Rückschlüsse auf die Materialtrennungsmechanismen gezogen werden, die beim Ritzen der Stahlphase der Stahl-

Diamantwz.: CVD, Pyram. $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; Werkstoff: Stahlbeton mit C100/115 und syn. MKD, $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$
 Schnittgeschw.: $v_c = 40,5; 270 \text{ m/min}$ Vorschubge.: $v_f = 2; 9,5 \text{ mm/min}$
 Kühlung: keine

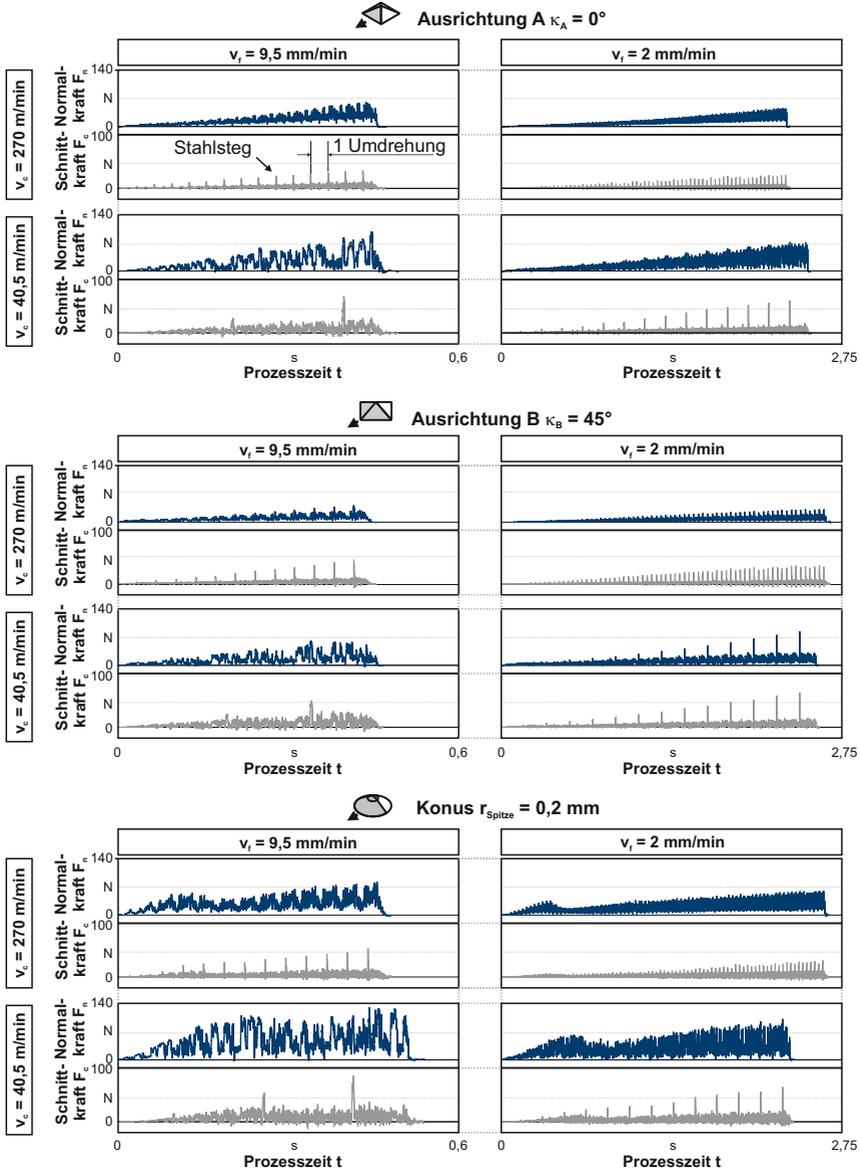


Abbildung 4.26: Kraftsignale beim Ritzan Stahlbeton in Abhängigkeit der Diamantwerkzeugform, der Schnitt- und der Vorschubgeschwindigkeit

Diamantzw.:	CVD, Pyram. $\kappa_A = 0^\circ$ und $\kappa_B = 45^\circ$; syn. MKD, $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$	Werkstoff:	Stahlbeton mit C100/115 und Stahlsteg (1.0577) $s_{\text{st}} = 3 \text{ mm}$
Schnittgeschw.:	$v_c = 40,5$; 270 m/min	Vorschubge.:	$v_f = 2$; $9,5 \text{ mm/min}$
Kühlung:	keine		

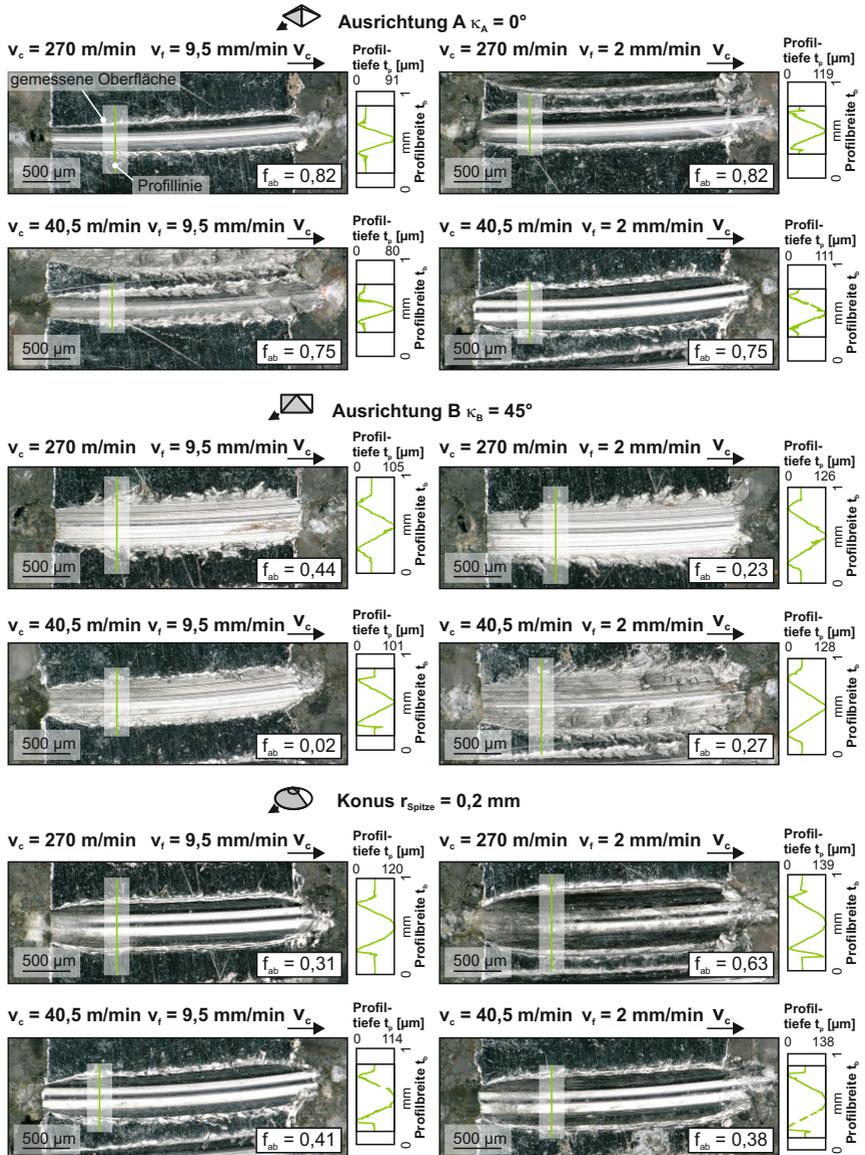


Abbildung 4.27: Stahlbetonproben - Mikroskopische Aufnahmen der Ritzspuren und -profile sowie f_{ab} -Werte in Abhängigkeit der eingesetzten Diamantwerkzeugform und der Bearbeitungsparameter

betonproben vorliegen. Unabhängig von der Bearbeitungsparameterkombination sind die größten f_{ab} -Werte bei den Versuchen mit dem Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A erkennbar. Hier sind die Werte $f_{ab} \geq 0,75$. Dies bedeutet, dass bei diesen Versuchen der größere Teil des Materials abgespannt wird. Bei der Ausrichtung B liegen dagegen f_{ab} -Werte von $f_{ab} \leq 0,44$ vor, weshalb hier davon auszugehen ist, dass im Wesentlichen der Mechanismus der Mikropflügens vorherrscht, bei dem das Material seitlich verdrängt wird. Bei den Versuchen mit dem Diamantwerkzeug mit konischer Grundform liegen die Werte im Bereich von $f_{ab} = 0,31$ bis $0,63$. Das heißt, dass auch hier im Wesentlichen eine elastische und plastische Materialverdrängung vorliegt und nur eingeschränkt eine Spanbildung auftritt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei den Ritzspuren in der Stahlphase der Stahlbetonproben die Bearbeitungsparameter gegenüber der Diamantwerkzeugform einen vernachlässigbaren Einfluss haben. Bei allen Bearbeitungsparametereinstellungen und Diamantwerkzeugen wird der Stahl plastisch verdrängt und hierdurch auf der Austrittsseite der Stahlphase in die Betonphase gedrückt. Hinsichtlich der Materialtrennung weisen die Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung A die höchsten f_{ab} -Werte auf. Bei dem Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B und dem Diamantwerkzeug mit verrundeter Spitze sind dagegen in einem größeren Umfang plastische Materialverdrängungen erkennbar, sodass hier kleinere f_{ab} -Werte vorliegen.

4.5.7 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion

Bei den Untersuchungen zur Analyse des Einflusses der Materialphasen folgt das Diamantwerkzeug einer helixförmigen Eingriffsbahn. Das bedeutet, dass bei zunehmender Gesamtzustellung wiederholt in der gleichen Ritzspur geritzt wird. Dies führt dazu, dass bei den sprödharten Werkstoffen wie z. B. Beton, Zementstein und Basalt eine strukturelle Schwächung durch die Initiierung von Rissen erzeugt wird. Nur bei der ersten Umdrehung des Ritzversuches liegt unbeschädigtes Material vor. Diese Vorgänge können anhand der Prozesskraftverläufe nachvollzogen werden. Sowohl für die pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge in beiden Ausrichtungen als auch die Diamantwerkzeuge mit verrundeter Spitze zeigt sich relativ zu Beginn der Versuche ein Bereich in den Prozesskraftsignalen, in dem kein Kraftanstieg oder sogar abnehmende Prozesskräfte vorliegen. Dieser Effekt geht mit weiter zunehmender Gesamtzustellung verloren, da gleichzeitig die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Probe größer wird, wodurch die Reibung und damit auch die Prozesskräfte ansteigen.

Durch Ritzversuche an den Einzelphasen Basalt und Zementstein wurde die Materialinhomogenität des zweiphasigen Betons C100/115 aufgelöst. Hierbei ergeben sich für die Einzelphasen Zementstein und Basalt sowie den mehrphasigen Werkstoff Beton C100/115 ähnliche Werte der Normal- und Schnittkraft. Das bedeutet, dass bei dem Beton C100/115 keiner der beiden Einzelphasen eine hinsichtlich der Materialtrennung übergeordnete Bedeutung zugeschrieben werden kann. Dabei muss davon ausgegangen werden, dass ähnliche Werkstoffeigenschaften hierfür ursächlich sind.

Zwischen den beiden Betongütern C100/115 und C20/25 bestehen dagegen Unterschiede bzgl. der ermittelten Prozesskräfte. Tendenziell sind diese bei dem Beton C20/25 geringer. Dies erklärt sich durch das offenerporigere Zementsteingefüge des

Betons C20/25 im Vergleich zum Beton C100/115, bei dem ein deutlich feinkörnigeres und dichteres Gefüge vorliegt.

Die Modelle, die den Einfluss der Bearbeitungsparameter Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit auf die Normal- und die Schnittkraft beim Ritzen der Betongüten C100/115, C20/25 sowie der Einzelphasen Zementstein und Basalt zeigen, weisen hinsichtlich der qualitativen Zusammenhänge keine Unterschiede zwischen den drei getesteten Diamantwerkzeugformen auf. Die Diamantwerkzeugform wirkt sich im Wesentlichen auf die Absolutwerte aus. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit und abnehmender Schnittgeschwindigkeit ergibt sich eine größere Zustellung pro Umdrehung und damit eine größere Kontaktfläche zwischen der Versuchsprobe und dem Diamantwerkzeug. In der Folge liegen größere Prozesskräfte vor. Geringere Kräfte liegen bei hohen Schnittgeschwindigkeiten und geringen Vorschubgeschwindigkeiten vor. Im Vergleich zwischen den Diamantwerkzeugformen sind die höchsten Werte der Prozesskräfte sowie die kleinsten Werte des Schnittkraftverhältnisses bei den Diamantwerkzeugen mit konischer Grundform und verrundeter Spitze vorzufinden. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die verrundete Spitze des Diamantwerkzeugs ein hoher Anteil an Reibungsvorgängen und plastischer Materialverdrängung vorliegt. Dabei wird in einem größeren Umfang das vor dem Werkzeug gelöste Material unter diesem hindurchgedrückt. Die kleinsten Prozesskräfte zeigen sich dagegen bei dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B. Zudem ist das Schnittkraftverhältnis bei dieser Ausrichtung größer als bei den anderen beiden Diamantwerkzeugformen. Die geringeren Prozesskräfte erklären sich durch die Keilwirkung des Werkzeugs sowie durch die ausgelöste Rissinitiierung, vgl. Abbildung 4.28. Sowohl an den seitlichen Kanten als auch an der führenden Schneidkante kommt es zu Spannungskonzentrationen [213], die zu einer Rissbildung des spröden Materials führen. Vergleichbar ist dies mit Effekten die bei der Vickershärteprüfung an sprödharten Materialien auftreten. Hier entstehen Risse an den vier Kanten des Indenters. Bei den Ritzversuchen mit den Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung B werden daher wahrscheinlich durch die führende Schneidkante radiale Risse verursacht, während die seitlichen Kanten zu einer lateralen Rissentstehung führen. Zudem wird durch die Keilwirkung das Material aufgespalten, wodurch die Bildung radialer Risse verstärkt wird.

Die höchsten Werte der mechanischen Arbeit können bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen mit verrundeter Spitze ermittelt werden. Dabei ist die Arbeit in Richtung der Normalkraft aufgrund deutlich kleinerer Werte als nachrangig gegenüber der Arbeit in Schnittrichtung einzustufen. Der Unterschied ergibt sich dabei durch die unterschiedlich langen Wegstrecken, sodass sich trotz höherer Absolutwerte der Normalkraft deutlich kleinere mechanische Arbeiten in diese Richtung ergeben.

Die kleinsten Werte der mechanischen Arbeit in Richtung der Schnittkraft über alle Bearbeitungsparametereinstellungen hinweg finden sich bei dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B. Die Maxima der mechanischen Arbeiten in Richtung der Schnittkraft finden sich bei einer geringen Vorschubgeschwindigkeit und einer hohen Schnittgeschwindigkeit. Obwohl bei diesen Bearbeitungsparametereinstellungen die geringsten Prozesskräfte vorliegen, werden durch die längere Versuchsdauer größere Werte der mechanischen Arbeiten verursacht. Dies lässt darauf schließen, dass hier der Anteil der Reibungsvorgängen

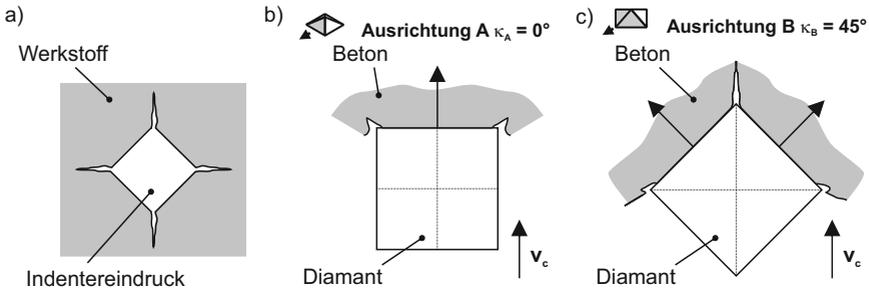


Abbildung 4.28: a) Schematische Abbildung eines Indetereindrucks bei einer Vickershärtemessung bei sprödharten Werkstoffen mit Rissentstehung an den vier Kanten nach [122, 213], b) Ausrichtung A - Rissursprünge an den seitlichen Kanten, c) Ausrichtung B - Rissursprünge an der führenden Schneidkante und an den seitlichen Kanten

ge bei der Materialtrennung größer ist als bei den anderen Einstellungen. Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit und kleiner werdender Schnittgeschwindigkeit werden die Werte der mechanischen Arbeit kleiner. Gleichzeitig nehmen auch die Unterschiede der mechanischen Arbeiten zwischen den drei getesteten Diamantwerkzeugformen ab. Diese Abnahme der Unterschiede der Werte der mechanischen Arbeiten zwischen den Diamantwerkzeugen ist wahrscheinlich durch die Versuchsmethodik und die dabei gewählten Bearbeitungsparameter begründet. So kann davon ausgegangen werden, dass der Umfang der eingebrachten Risse unabhängig von der Diamantwerkform ansteigt, wenn eine hohe Vorschubgeschwindigkeit vorliegt, da hierdurch kurze und damit stoßartige Prozesse erzeugt werden.

Die Versuche an Stahl- und Stahlbetonproben zeigen die spezifischen Herausforderungen bei der trennenden Bearbeitung der unterschiedlichen Werkstoffe. Bei den Versuchen an Stahl entsteht bei fast allen Versuchen eine Aufbauschneidenbildung in unterschiedlichem Umfang. Diese führt zu instabilen Prozessen und erhöhten Prozesskräften. Die Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit der Literatur, in der beschrieben wird, dass die Entstehung einer Aufbauschneide durch eine höhere Schnittgeschwindigkeit abgeschwächt oder verhindert werden kann [45]. Die Gefügeschliffe zeigen dabei, dass ein ausreichend hoher Vorschub realisiert werden muss, um eine Spanbildung erzeugen zu können. Andernfalls werden im größeren Umfang Reibungsvorgänge und plastische Materialverdrängungsprozesse verursacht, die sich in der Ausprägung der beeinflussten Randzone widerspiegeln. Bei allen Diamantwerkzeugformen kann eine im Umfang geschwindigkeitsabhängige Aufbauschneidenbildung festgestellt werden. Bei der gewählten Versuchsmethodik ist somit der Einfluss der Diamantwerkzeugform gegenüber dem Einfluss der Bearbeitungsparameter als nachrangig einzustufen.

Bei den Ritzversuchen an Stahlproben müssen zwei gegenläufige Effekte berücksichtigt werden, die durch die gewählte Kinematik entstehen, bei der mehrere Male hintereinander in der gleichen Ritzspur geritzt wird. Durch die wiederholte plastische Verformung des Stahls wird eine Kaltverfestigung erzielt. Das heißt, dass die Prozesskräfte nicht nur durch die Materialtrennungsmechanismen oder

die steigende Zustellung beeinflusst werden, sondern auch eine werkstoffseitige Beeinflussung vorliegt. Die in den Aufnahmen der Gefügequerschliffe sichtbaren Randzonen unterhalb der Ritzspuren zeigen deformierte Kristalle, die einen Hinweis auf diesen Effekt liefern. Dagegen führen höhere Schnittgeschwindigkeiten zu höheren Prozesstemperaturen, die wiederum die Fließgrenze des Stahls absenken und damit eine plastische Verformung bei kleineren Prozesskräften ermöglichen. Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann jedoch keine Beurteilung erfolgen, wie groß der Einfluss der Kaltverfestigung oder der thermischen Entfestigung auf die Prozesskräfte ist.

Bei den Versuchen an Stahlbeton liegt eine deutlich kürzere Kontaktzeit zwischen den Diamantwerkzeugen und der Stahlbewehrung vor, weshalb keine Aufbauschneidenbildung statt finden kann. Bei diesen Versuchen hat im Gegensatz zu den Versuchen an reinen Stahlproben die Diamantwerkzeugform einen größeren Einfluss auf die Materialtrennung als die Bearbeitungsparameter. Auf Grundlage des f_{ab} -Wertes können dabei Rückschlüsse auf die Wirkmechanismen gezogen werden. Die Werte zeigen, dass durch das pyramidenförmige Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A beim Durchtrennen der Stahlphase der Anteil des abgespannten Materials am größten ist und der Mechanismus des Mikrospanens vorherrscht. Bei dem Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B und beim Diamantwerkzeug mit konischer Grundform und verrundeter Spitze dagegen ist der Anteil des Mechanismus Mikrospanens verringert. Bei diesen Diamantwerkzeugformen ist davon auszugehen, dass die Mechanismen Mikropflügen und Mikrofurchen in unterschiedlichen Anteilen die Materialtrennung dominieren, da geringe f_{ab} -Werte vorliegen.

4.6 Analyse des Verschleißverhaltens

Bei der trennenden Bearbeitung von Beton stellt neben der Werkzeugstandzeit die erzielbare Vorschubgeschwindigkeit bzw. die Bearbeitungszeit ein wichtiges Kriterium dar. Nebenzeiten, die durch einen Werkzeugwechsel oder durch einen Abrichtprozess entstehen würden, sind möglichst zu vermeiden oder gering zu halten. Aus diesem Grund werden diamantimprägnierte Werkzeuge als selbstschärfende Werkzeuge ausgelegt. Dies bedeutet, dass während des Einsatzes ein fortlaufender gewünschter Verschleiß der metallischen Bindungsmatrix als auch der Diamantkörner auftritt, sodass zu jedem Zeitpunkt eine ausreichende Anzahl an schneidfähigen Diamanten auf der Wirkfläche des Werkzeugs vorliegt.

Die Form eines Diamantkorns, d. h. die Abmaße und Winkel, beeinflussen, wie im Stand der Technik Kapitel 2.6.1 gezeigt, die Eingriffsverhältnisse und damit die auftretenden mechanischen und thermischen Belastungen. Dieses Belastungskollektiv wirkt sich wiederum auf den auftretenden Verschleiß aus. Entsprechend ist daher davon auszugehen, dass die drei verschiedenen getesteten Diamantwerkzeugformen in dieser Arbeit aufgrund der unterschiedlichen Eingriffsverhältnisse und damit unterschiedlichen mechanischen Belastungen ein verschiedenartiges Verschleißverhalten aufweisen. Die Verschleißmechanismen und -erscheinungsformen und das auftretende Belastungskollektiv beeinflussen sich dabei wechselseitig [91].

4.6.1 Versuchsumgebung und -methodik

Aus Kernbohrversuchen kann abgeleitet werden, dass einzelne Diamantkörner in Abhängigkeit der Segment- und Diamantspezifikation Standwege von $s > 2000$ m erreichen, bevor diese aus der Bindung herausgelöst werden. Zur Realisierung dieser langen Standwege wird ein Prototypenversuchsstand zur Durchführung von kraftgesteuerten Ritzversuchen auf einer Drehbank eingesetzt. Dabei wird die Mantelfläche eines Betonzylinders geritzt, weshalb die Kinematik einem Außenrund-Längsdrehprozess entspricht.

Bei der Versuchsdurchführung wird auf eine kraftgesteuerte Zustellung der Diamantwerkzeuge zurückgegriffen. Der Einsatz einer solchen kraftgesteuerten Zustellung kann mit verschiedenen Argumenten begründet werden. So besteht eine eingeschränkte erzielbare Formgenauigkeit der Versuchsproben unter den gegebenen Möglichkeiten der verwendeten Betriebsmittel. Bereits geringe Abweichungen bzgl. der Rundheit und/oder der Zylindrizität der eingesetzten Versuchsproben beeinflussen die Zustelltiefe bei einer wegeregelten Prozessführung, siehe Abbildung 4.29. Dagegen folgt das Werkzeug bei einer kraftgesteuerten Zustellung diesen Formfehlern in Abhängigkeit der Dynamik der Zustelleinrichtung. Sowohl beim Diamantkernbohren, als auch beim Seilsägen, werden die Werkzeuge in Abhängigkeit der Bearbeitungskräfte eingesetzt, so ist z. B. beim Kernbohren die erzielbare Vorschubgeschwindigkeit abhängig vom Anpressdruck der Segmente bzw. der aufgebrachten Vorschubkraft. Werden aus der Literatur die üblichen Werte der Vorschubkraft beim Diamantkernbohren [72] und die Anzahl der freigelegten Diamantkörner pro Fläche [103] herangezogen, kann vereinfacht die auf einzelne Diamantkörner wirkende Normalkraft bestimmt werden. Für eine exemplarische Segmentspezifikation mit einer Diamantkorngröße von $d_k = 30/40$ mesh und einer Diamantkonzentration von $c = C20$ ergibt sich eine Anzahl der freigelegten Diamantkörner pro Fläche von ca. $n'_k = 0,30 \text{ Dia/mm}^2$. Bei einer Segmentanzahl von $n_s = 8$ Segmenten mit einer Eingriffs-/Stirnfläche von $A_{seg} = 5 \cdot 20 \text{ mm}^2$ ergibt sich eine Gesamtsegmentfläche von $A_{seg,g} = 800 \text{ mm}^2$. Ausgehend von einer Vorschubkraft von $F_f = 3000 \text{ N}$ ergibt sich somit eine Normalkraft von $F_n \approx 8 \text{ N}$, die auf jedes einzelne Diamantkorn wirkt. Basierend auf diesem Wert wird für die Versuche eine nominelle Normalkraft von $F_n = 10 \text{ N}$ festgelegt.

Zur Umsetzung einer kraftgesteuerten Zustellung wird ein am Institut für Spanende Fertigung (ISF) entwickelter Aufbau eingesetzt, siehe Abbildung 4.30. Dieser

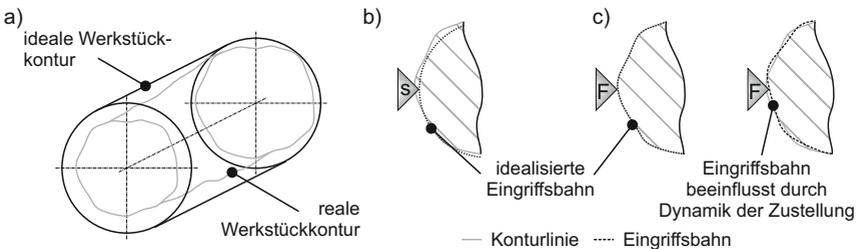


Abbildung 4.29: a) Abweichungen zwischen idealer und realer Werkstückkontur, b) Eingriffsbahn beim wegeregelten Ritzen, c) Eingriffsbahn beim kraftgesteuerten Ritzen

Aufbau besteht aus einer Grundplatte, auf der ein elektrischer Hubmagnet und eine Linear- bzw. Minischlittenführung befestigt sind. Auf der Minischlittenführung sind ein Kraftmesselement und eine Werkzeughalterung angebracht. Das eingesetzte Kraftmesselement Typ 9327C ist ein 3-Komponenten-Kraftmesselement der Fa. Kistler. Während der Versuche wird das Kraftmesselement zusammen mit der Werkzeugaufnahme durch den Hubmagneten gegen die Werkstückoberfläche gedrückt. Die Kraft, mit der der Magnet diesen vorderen Teil des Aufbaus gegen die Probenoberfläche drückt, ist abhängig vom eingestellten Strom und von der Auskraglänge des Magnetankers. Aufgrund dieser Abhängigkeit wurde in Vorversuchen eine geeignete Auskraglänge sowie eine dazugehörige Kraft-Strom-Kennlinie ermittelt.

Die Diamantwerkzeuge werden in der auf dem Kraftmesselement angeschraubten Werkzeughalterung geklemmt. Hierbei werden die Diamantwerkzeuge in eine Hülse eingelegt, die über zwei Schrauben zusammengedrückt wird. Vor der Versuchsdurchführung werden die Diamanten mithilfe eines USB-Mikroskops Typ Digimicroprofi der Fa. dnt direkt im Versuchsaufbau ausgerichtet, siehe Kapitel 4.3. Die Versuche werden auf einer konventionellen Drehbank durchgeführt, in deren Dreibackenfutter die Versuchsprobe in Form eines Betonzylinders mit einem Durchmesser von ca. $d_{\text{Roh}} = 200 \text{ mm}$ im unbearbeiteten Rohzustand, bei einer Länge von ungefähr $L_{\text{Roh}} = 300 \text{ mm}$, eingespannt und über die Pinole ab-

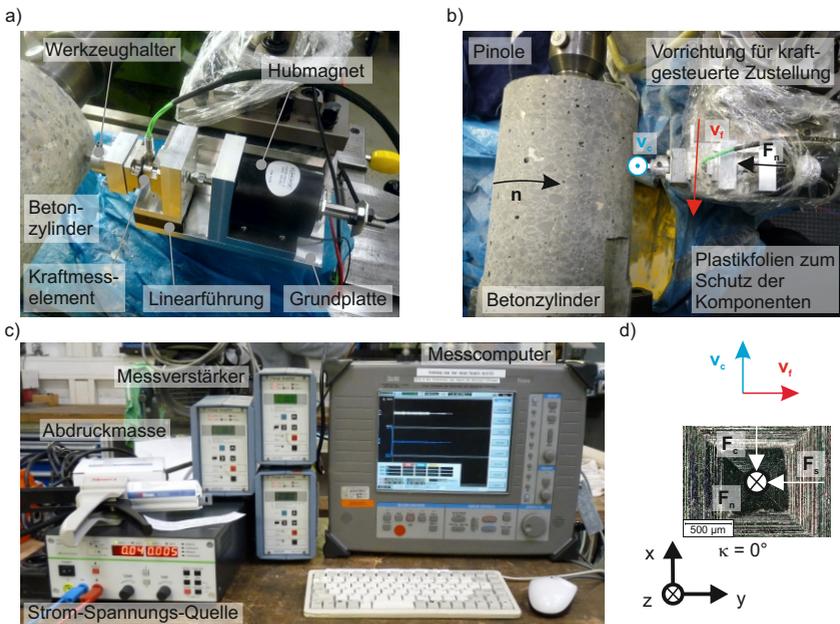


Abbildung 4.30: Darstellung des eingesetzten Aufbaus zur Durchführung kraftgesteuerter Ritzversuche a) Seitliche Ansicht, b) Ansicht von Oben, c) Eingesetzte Messtechnik und Strom-Spannungs-Quelle, d) Prozesskräfte und -geschwindigkeiten am Diamantwerkzeug

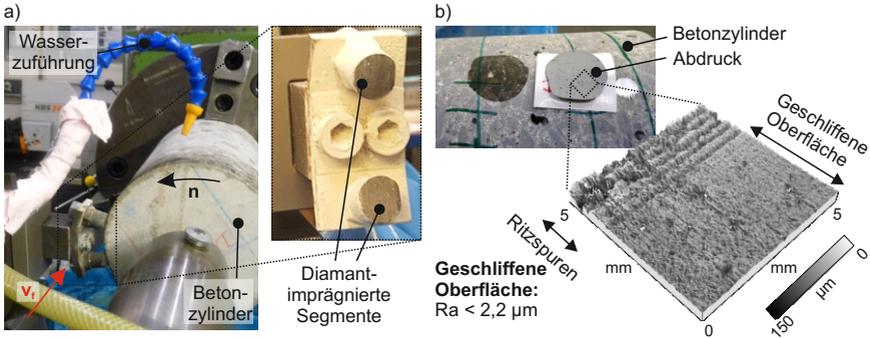


Abbildung 4.31: a) Eingesetztes Schleifwerkzeug für die Außenrundbearbeitung der Betonzylinder, b) Erzeugung eines Abdrucks und erzielte Oberfläche mit Ritzspuren und geschliffenem Ausgangszustand

gestützt wird. Dieser Betonzylinder wird durch eine Kernbohrung gewonnen und weist dadurch eine unzureichende Form- und Oberflächenqualität auf. Vor der Versuchsdurchführung sowie zwischen den Versuchen werden die Betonzylinder bzw. -kern daher mit einem selbstkonstruierten Schleifwerkzeug bearbeitet, das aus einer Halterung mit zwei diamantimprägnierten Schleifsegmenten besteht, siehe Abbildung 4.31 a). Dieses Werkzeug wird im Drehmeißelhalter der Drehmaschine gespannt und ähnlich wie ein Drehwerkzeug eingesetzt. Da die Versuche mit einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 120 \text{ m/min}$ durchgeführt werden sollten, musste in Vorversuchen ein Vorschub ermittelt werden, bei dem keine Überlappung oder Interaktion zweier nebeneinander liegender Ritzspuren auftritt. Für den Vorschub konnte dabei ein Wert von $f = 0,35 \text{ mm/U}$ ermittelt werden. Die Kraft, die entgegen der Vorschubrichtung wirkt, die seitliche Kraft F_s , ist bei dem gewählten Vorschub vernachlässigbar klein bzw. schwankt um das Nullniveau. Dies zeigt sich quantitativ in einem kleinen Wert des Wirkrichtungswinkels η , der die Vorschubgeschwindigkeit v_f und die Schnittgeschwindigkeit v_c ins Verhältnis setzt und nach Formel 4.4 berechnet werden kann.

$$\eta = \arctan\left(\frac{v_f}{v_c}\right) \quad (4.4)$$

Exemplarisch ergibt sich bei einer einzustellenden Drehzahl von $n = 200 \text{ U/min}$ und einem Vorschub von $f = 0,35 \text{ mm/U}$ nach Formel 4.5

$$v_f = f \cdot n \quad (4.5)$$

eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 0,07 \text{ m/min}$. Daraus folgt bei einer Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 120 \text{ m/min}$ ein Wirkrichtungswinkel von $\eta = 0,033^\circ$. Die Vorbereitung der Oberfläche vor und zwischen den Ritzversuchen umfasst einen Schrubb- und einen Schlichtprozess, siehe Abbildung 4.31 a). Beim Schrubb werden die Schleifsegmente ca. $a_e = 0,15 \text{ mm}$ zugestellt. Der Vorschub beträgt $f = 0,35 \text{ mm/U}$. Es erfolgen zwei Überläufe mit den genannten Einstellungen, um die Werkstückoberfläche einzuebnen und die Ritzspuren des vorhergehenden Versuchs zu entfernen. Beim Schlichten werden mindestens zwei Überläufe mit

einer reduzierten Tiefenzustellung von $a_e = 0,05$ mm und einem Vorschub von $f = 0,18$ mm/U durchgeführt. Danach wird das Schlibbild visuell überprüft und bei Bedarf ein weiterer Überlauf durchgeführt. Ein exemplarisches Ergebnis einer geschliffenen Oberfläche ist in Abbildung 4.31 b) dargestellt. Durch diese Außenrundbearbeitung der Betonzylinder erfolgt eine kontinuierliche Verringerung des Werkstückdurchmessers. Aus diesem Grund muss zwischen zwei Versuchen eine Drehzahlanpassung erfolgen, um die gewünschte Schnittgeschwindigkeit erzielen zu können.

Da die verwendeten zylindrischen Betonproben aufgrund der Abmaße und des Gewichts nicht direkt mit der entsprechenden Messtechnik untersucht werden können, wird eine Abdruckmasse der Firma Struers A/S, RepliSet-T3 eingesetzt, um ein Replikat bzw. einen Abdruck der Werkstückoberfläche anzufertigen [6, 7]. Zur Anfertigung des Replikats wird die Abdruckmasse auf die Betonprobe aufgetragen und anschließend ein Abstützpapier auf die zu diesem Zeitpunkt noch zähflüssige Masse gedrückt, (siehe Abbildung 4.31 b)). Nach Ablauf der Topfzeit der Abdruckmasse von ca. $t_{\text{Topfzeit}} = 3$ min kann das Replikat zusammen mit dem Stützpapier von der Oberfläche abgezogen und zu einem späteren Zeitpunkt mikroskopisch untersucht werden. Der Hersteller gibt für die erzeugten Abdrücke einen Detailgrad der Reproduktion von $0,1 \mu\text{m}$ an. Durch das Replikat werden ca. 60 Ritzspuren abgebildet. Bei der Vermessung des Replikats mit dem konfokalen Weißlichtmikroskop μsoft , siehe Kapitel 4.3, wird ein Teilbereich von ca. $l_m = 6,5$ mm Länge und $b_m = 0,8$ mm Breite gemessen. Damit können in der dreidimensionalen Oberflächentopographieaufnahme ca. 18 Ritzspuren detektiert werden.

Wie bei den bereits zuvor dargestellten Ritzversuchen werden die drei in Kapitel 4.1 beschriebenen Diamantwerkzeugformen eingesetzt. Zur qualitativen Beurteilung des Verschleißes werden zu festen Inspektionszeitpunkten bzw. Standwegen s mikroskopische Aufnahmen der Diamantwerkzeuge angefertigt. Die bei den Versuchen gemessenen Prozesskräfte dienen der quantitativen Beurteilung. Des Weiteren werden die angefertigten Abdrücke analysiert, um Erkenntnisse über den Einfluss des Verschleißzustands der eingesetzten Werkzeuge auf die erzeugten Ritzspuren und damit die Materialtrennung zu erlangen. Als praktikabel erweist sich im Rahmen der Versuche ein Untersuchungsintervall, das einem Standweg von $s = 250$ m entspricht. Die Inspektionszeitpunkte entsprechen daher Standwegen von $s = 0, 250, 500, 750$ m usw. Der maximale Standweg wird mit $s_{\text{Ende}} = 2250$ m festgelegt. Neben dem Erreichen dieses Wertes, das das erste Abbruchkriterium der Versuche darstellt, besteht das zweite in dem vollständige Bruch bzw. dem Versagen des Diamantwerkzeugs, in dessen Folge die Werkzeugform signifikant verändert ist. Als konstante Versuchs- bzw. Eingangsparameter werden eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 120$ m/min, eine nominelle Normalkraft von $F_{n, \text{nom.}} = 10$ N und ein Vorschub von $f = 0,35$ mm/U festgelegt. Pro Diamantwerkzeugform werden fünf Standwegversuche durchgeführt. Die Diamantwerkzeuge sind in den nachfolgenden Darstellungen in Abhängigkeit der Ausrichtung fortlaufend nummeriert. Dementsprechend ergeben sich für die pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ die Bezeichnungen A1, A2, A3, A4 und A5 und in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ die Bezeichnungen B1, B2, B3, B4 und B5. Die konischen Diamantwerkzeuge mit verrundeter Spitze werden mit K1, K2, K3, K4 und K5 bezeichnet.

4.6.2 Mikroskopische Ergebnisse

Grundlage für die Beurteilung des Verschleißverhaltens der Diamantwerkzeuge sind mikroskopische Aufnahmen zu den festgelegten Inspektionszeitpunkten bzw. Standwegen. Anhand der Mikroskopaufnahmen können qualitative Veränderungen der Diamantwerkzeuge detektiert werden. Dazu wird das in Kapitel 4.3 beschriebene Digitalmikroskop Typ VHX-5000 der Fa. Keyence eingesetzt, mit dem tiefenscharfe Bilder in 100-facher und 200-facher Vergrößerung angefertigt werden.

In Abbildung 4.32 sind die mikroskopischen Aufnahmen der fünf eingesetzten pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ dargestellt. Mit vier der fünf eingesetzten Diamantwerkzeuge kann der maximale Wert des Standwegs von $s_{\text{Ende}} = 2250$ m erreicht werden. Das fünfte Diamantwerkzeug versagt dagegen bereits nach einem Standweg von $s_{\text{Ende}} \approx 35$ m. Bei den vier Diamantwerkzeugen, die den vorgegebenen maximalen Standweg erreichen, kann ein initialer Verschleiß bereits nach dem Erreichen des ersten Untersuchungsintervalls von $s = 250$ m beobachtet werden. Jeweils zwei Diamantwerkzeuge weisen dabei ähnliche Verschleißerscheinungsformen auf. Bei den Diamantwerkzeugen A1 und A3 zeigt sich eine Verrundung der Pyramidenspitze. Diese nimmt mit steigendem Standweg zu, wobei sich ein größerer Verschleiß in Richtung der Spanfläche zeigt. Besonders ausgeprägt ist dies beim Diamantwerkzeug A3. Beim Diamantwerkzeug A1 dagegen kann neben der Verrundung der Spitze ab einem Standweg von $s = 750$ m ein kleiner Ausbruch im linken Teil der Spanfläche erkannt werden, siehe Detail A in Abbildung 4.32. Diese Bruchstelle vergrößert sich bis zum Erreichen des maximalen Standwegs. Bei den Diamantwerkzeugen A2 und A4 tritt innerhalb des ersten Untersuchungsintervalls von $s = 250$ m ein Bruch der Diamantspitze auf. Im weiteren Verlauf der Versuche wird hierdurch die Ausprägung eines Pyramidenstumpfs verursacht. Der Pyramidenstumpf ist sowohl beim Diamantwerkzeug A2 als auch A4 kontinuierlichen Veränderungen in Form von weiteren Ausbrüchen, aber auch von zeitweiligen lokalen Verrundungen exponierter Stellen unterworfen. Beim Diamantwerkzeug A2 ist ab einem Standweg von $s = 500$ m ein Riss erkennbar, siehe Detail B in Abbildung 4.32, der ausgehend vom Pyramidenstumpf über die Spanfläche verläuft und im Laufe der Versuche Ausgangspunkt für weitere Partikelabbrüche ist. Neben Verschleißerscheinungen an den Diamanten können auch Veränderungen an der umgebenen Metallbindung erkannt werden. Ursächlich sind hierfür zumeist relativ große Luftporen im Beton. Durch die kraftgesteuerte Versuchsführung werden die Diamantwerkzeuge in diese hineingedrückt, sodass eine unmittelbare Berührung zwischen der Metallbindung und dem Beton entsteht.

Beim Einsatz der pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ erreichen nur zwei der fünf Werkzeuge das festgelegte Standwegende von $s_{\text{Ende}} = 2250$ m, siehe Abbildung 4.33. Die anderen drei Diamantwerkzeuge versagen dagegen nach unterschiedlich langen Standwegen. Beim Diamantwerkzeug B3 tritt das Versagen nach einem Standweg von $s_{\text{Ende}} \approx 922$ m auf, beim Diamantwerkzeug B4 nach $s_{\text{Ende}} \approx 308$ m und beim Diamantwerkzeug B5 nach $s_{\text{Ende}} \approx 139$ m. Bei den Diamantwerkzeugen B1 und B2, die den maximalen Wert des Standwegs erreichen, liegen ähnliche Verschleißerscheinungsformen vor. Bereits nach dem ersten Untersuchungsintervall von $s = 250$ m ist ein Verrunden der Pyramidenspitze erkennbar. Zudem liegen kleine Bruchstellen an der Pyramiden-

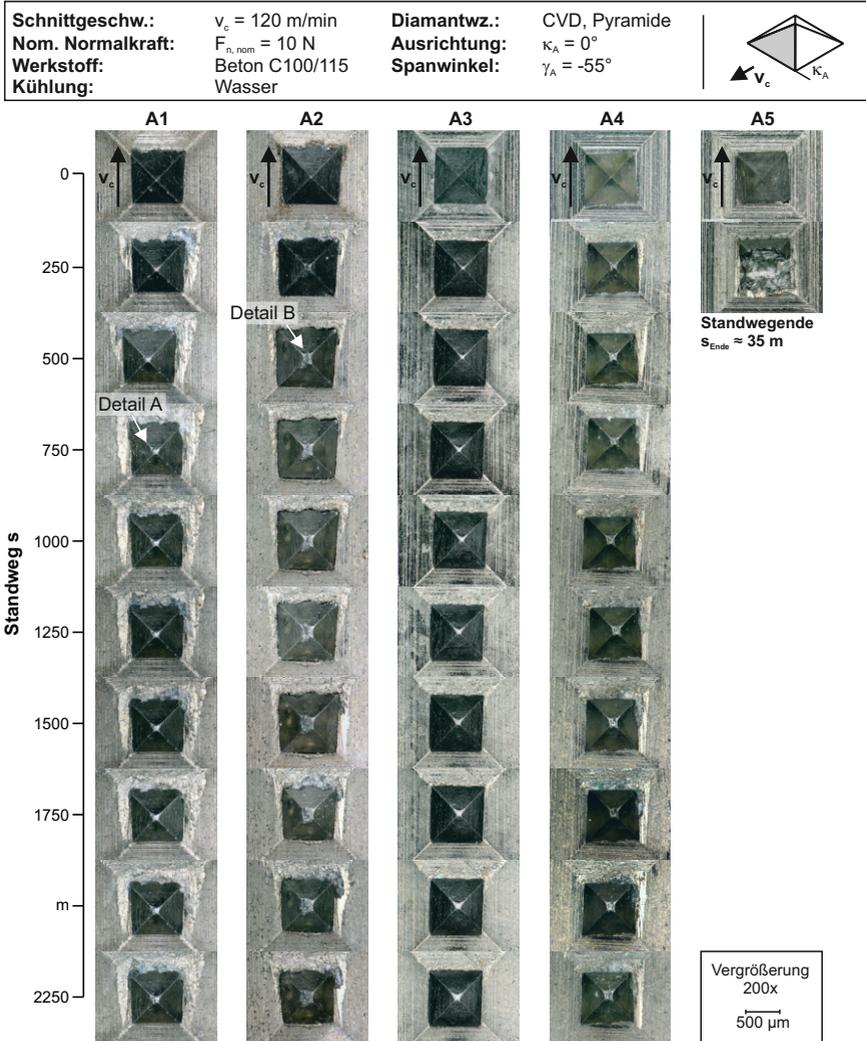


Abbildung 4.32: Mikroskopische Analyse der pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$

spitze vor. Mit größerem Standweg prägt sich diese Verrundung asymmetrisch in Richtung der Spanfläche aus. Dabei treten Verrundungen sowohl an der führenden Schneidkante sowie an den beiden Seitenkanten, die quer zur Schnittrichtung liegen, auf. Neben der Vergrößerung der sich einstellenden Verrundungen an den Kanten werden auch die beobachtbaren Bruchflächen bei beiden Diamantspitzen mit zunehmendem Standweg größer. Dadurch wandelt sich bei B1 das Diamantwerkzeug ab einem Standweg von $s = 1000 \text{ m}$ zu einem Pyramidenstumpf um.

Die Kanten dieses durch Ausbrüche entstandenen Stumpfes verrunden bis zum festgelegten maximalen Standweg von $s_{\text{Ende}} = 2250$ m fortlaufend. Beim Diamantwerkzeug B2 kann nach einem Standweg von $s = 250$ m ein Ausbruch seitlich der Spitze erkannt werden, siehe Detail A in Abbildung 4.33. Nach einem Standweg von $s = 500$ m vergrößert sich der Ausbruch in Richtung der dahinter liegenden Freifläche. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen bricht die Diamantspitze fast vollständig ab. Diese weist dabei mehrere Bruchkanten, aber keinen Stumpf wie beim Diamantwerkzeug B2 auf. Eine deutliche Bruchkante verläuft dabei parallel zur Schnittrichtung, siehe Detail B in Abbildung 4.33. Eine Beschädigung der metallischen Bindung ist bei beiden Diamantwerkzeugen sowohl bei B1 als auch B2 erkennbar. Beim Diamantwerkzeug B1 ist auf der rechten Seite des Diamanten ein Verschleiß der Bindung ab $s = 250$ m erkennbar. Ein deutlicher Verschleiß der Bindung vor und rechts neben dem Diamanten ab einem Standweg von $s = 1500$ m liegt bei dem Diamantwerkzeug B2 vor. Beim Diamantwerkzeug B3 sind bis zum vorzeitigen Werkzeugversagen, das bei einem Standweg von $s \approx 922$ m vorliegt, ähnliche Verschleißerscheinungsformen, wie bei B1 und B2 beobachtbar. Auch hier findet eine Verrundung der Spitze statt. Gleichzeitig liegt auf der rechten Spanfläche ein Ausbruch vor, siehe Detail C in Abbildung 4.33. Die Bruchfläche vergrößert sich mit zunehmendem Standweg. Auffällig ist bei diesem Werkzeug der auftretende Verschleiß der metallischen Bindung. Bei einem Standweg von $s = 250$ m ist rechts neben dem Diamanten ein erster Verschleiß erkennbar. Innerhalb des nächsten Untersuchungsintervalls kommt es zu einem umfänglichen Verschleiß der Bindung vor und auf beiden Seiten neben dem Diamanten. Im nächsten Untersuchungsintervall $s = 500$ bis 750 m treten jedoch keine weiteren sichtbaren Veränderungen auf, bis das Diamantwerkzeug katastrophal versagt. Bei den Diamantwerkzeugen B4 und B5 kann aufgrund der kurzen erzielten Standwege keine Aussage über die auftretenden Verschleißerscheinungsformen gemacht werden. Die Diamantwerkzeuge weisen keine sichtbaren Vorschädigungen in Form von Rissen oder Bruchstellen auf, die das vorzeitige Versagen erklären könnten.

Bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen mit konischer Grundform und verrundeter Spitze erreichen vier der fünf Diamantwerkzeuge den maximalen Standweg von $s_{\text{Ende}} = 2250$ m, siehe Abbildung 4.34. Das fünfte Werkzeug versagt dagegen nach einem Standweg von $s_{\text{Ende}} \approx 490$ m. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, weisen diese Werkzeuge aufgrund ihrer monokristallinen Struktur anisotrope, d. h. richtungsabhängige Eigenschaften auf. Diese Vorzugsrichtung ist jedoch nicht bekannt, weshalb diese als unbekannte zufällige Störgröße bei den Versuchen gelten muss.

Durch die verrundete Diamantspitze kommt es bei der Anfertigung der mikroskopischen Bilder zu einer Spiegelung der Kameraoptik auf der Spitze der Werkzeuge. Auf diesen ist ein weißer Ring mit einem dunklen Kern zu sehen. Der weiße Ring entspricht der Reflektion des Ringlichts des Mikroskops und der dunkle Kern dem Mikroskopobjektiv. Veränderungen an der verrundeten Spitze führen demnach zu einer Veränderung dieses Erscheinungsbilds.

Bei allen konischen Diamantwerkzeugen mit verrundeter Spitze kann festgestellt werden, dass die Ausgangsrauheit der Diamantwerkzeuge auf der Seite der Materialtrennung im Laufe der Versuche verringert wird. Veränderungen der Werkzeugform infolge von Verschleiß ist bei den eingesetzten Diamantwerkzeugen im

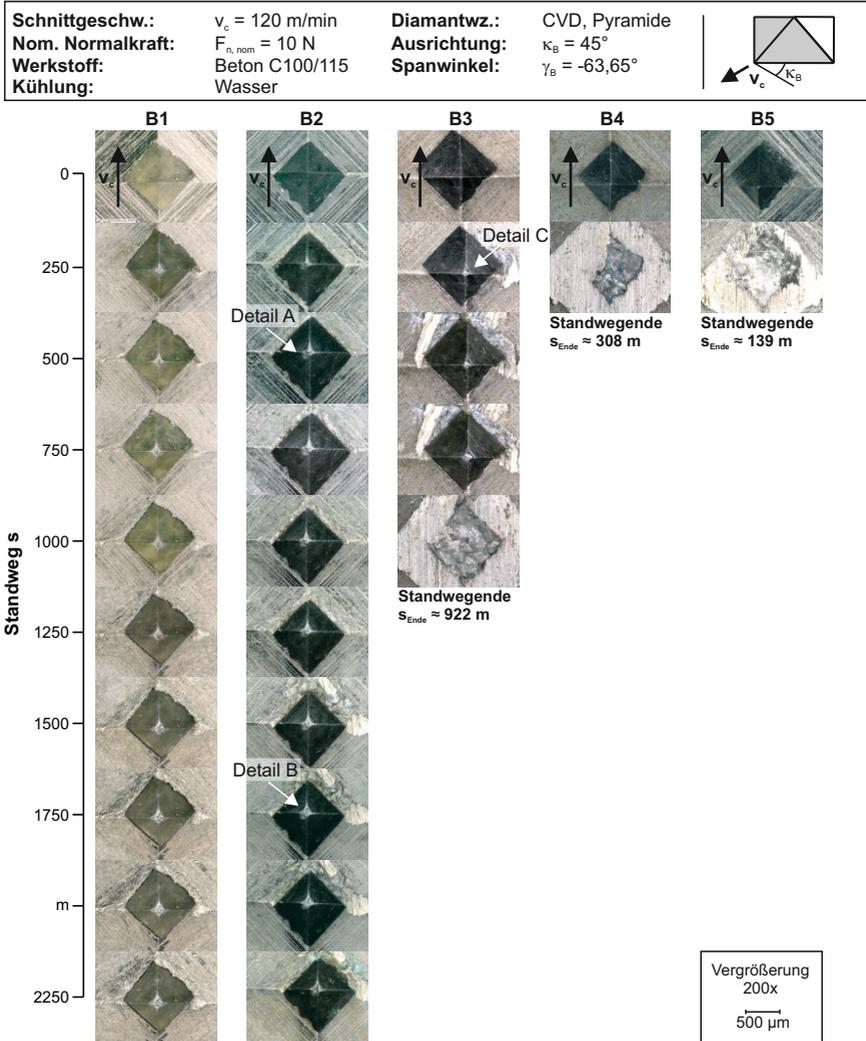


Abbildung 4.33: Mikroskopische Analyse der pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$

Wesentlichen nur bei K1 zu beobachten, siehe Abbildung 4.34. Hier findet ein partieller Bruch der verrundeten Spitze statt. Dieser Bruch kann bereits nach dem ersten Untersuchungsintervall von $s = 250 \text{ m}$ festgestellt werden, siehe Detail A in Abbildung 4.34. Entlang der Bruchstelle verlaufen dabei Riefen, die parallel zur Schnitttrichtung ausgerichtet sind und bis zum Erreichen des maximalen Standwegs sichtbar bleiben. Die Gestalt der Bruchstelle verändert sich mit zunehmendem Standweg. So bildet sich eine konkave Ausformung durch den weiteren

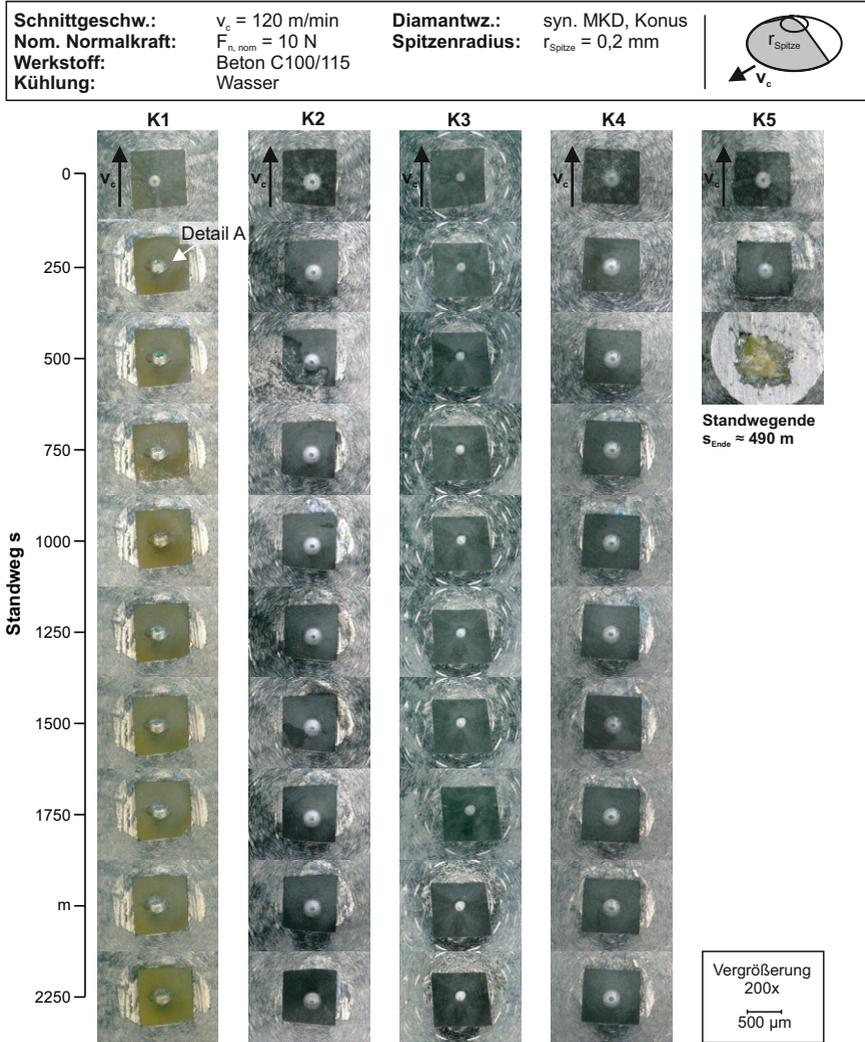


Abbildung 4.34: Mikroskopische Analyse der konischen Diamantwerkzeuge mit dem Spitzenradius $r_{\text{Spitze}} = 0,2$ mm

Verschleiß, wobei der Umfang dieser Ausformung im Laufe der Versuche fortwährend größer wird. Die Bruchfläche bleibt rau, während die exponierten Kanten verrunden. Bei den Diamantwerkzeugen K2, K3 und K4 zeigen sich im Laufe der Versuche keine oder nur minimale Veränderungen. Kleine Riefen, die parallel zur Schnittrichtung verlaufen und sich auf der verrundeten Spitze befinden, können bei den Diamantwerkzeugen K2 und K4 erkannt werden. Eine minimale Anflachung der verrundeten Spitze, die damit entgegen der Schnittrichtung verkippt,

liegt bei K3 vor. Beim Diamantwerkzeug K5, das vorzeitig versagt, können vor dem Bruch keine ausgeprägten Verschleißerscheinungsformen detektiert werden. Wie die mikroskopischen Bilder der eingesetzten Diamantwerkzeuge zeigen, liegt bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen an den exponierten Kanten nach relativ kurzen Standwegen ein Verschleiß in Form einer Verrundung vor. Die Pyramidenspitze verrundet ebenfalls oder bricht, sodass ein Pyramidenstumpf entsteht. Bei den Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung A kann mit vier von fünf Diamantwerkzeugen der vorgegebene maximale Standweg erreicht werden. Bei den Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung B dagegen nur mit zwei Exemplaren. Bei den Diamantwerkzeugen mit konischer Grundform und verrundeter Spitze tritt nur im geringen Ausmaß ein Verschleiß auf. Hier kann mit vier von fünf Diamantwerkzeugen der vorgegebene maximale Standweg erreicht werden. Bei fast allen eingesetzten Diamantwerkzeugen sind Verschleißspuren an der metallischen Bindungsmatrix zu erkennen. Diese entstehen durch ein zu weites Aussteuern des Aufbaus bzw. des Diamantwerkzeugs, das durch Luftporen verursacht wird, die im Beton vorliegen. Bei den Diamantwerkzeugen, die vor dem Erreichen des maximalen Standwegs versagen, können keine Verschleißerscheinungen erkannt werden, die auf ein vorzeitiges Versagen hinweisen. Das Versagen der Diamantwerkzeuge tritt in der Regel innerhalb kürzester Zeit auf, weshalb von einem katastrophalem Versagen gesprochen werden muss.

4.6.3 Prozesskräfte

Während der Durchführung der Ritzversuche werden die Kräfte in den drei Raumrichtungen x , y und z aufgezeichnet, wobei diese, nach Abbildung 4.30 d), der Schnittkraft F_c , der seitlichen Kraft F_s und der Normalkraft F_n entsprechen. Für die Analyse der Prozesskräfte können folgende Annahmen getroffen werden: Die Normalkraft F_n sollte unabhängig vom Standweg nahezu konstant bleiben, da diese eine gesteuerte Eingangsgröße der Versuche darstellt. Der Verschleiß wirkt sich daher im Wesentlichen auf die Schnittkraft F_c und das Schnittkraftverhältnis μ aus. Die seitliche Kraft F_s sollte aufgrund der symmetrischen Formen der Diamantwerkzeuge sowie des geringen Wirkrichtungswinkels η um Null schwanken oder Null sein. Durch den Verschleiß und die damit eintretende Veränderung der Form des Diamantwerkzeugs können sich im Laufe der Versuche jedoch Veränderungen der seitlichen Kraft hinsichtlich der Richtung und des Absolutwerts ergeben.

Zur Beurteilung des Einflusses der Werkzeugform bzw. des Werkzeugverschleißes werden zu den bereits vorgestellten festen Inspektionszeitpunkten des Standwegs die Prozesskräfte analysiert. Zur Quantifizierung der genannten Einflüsse wird dabei ein Datenbereich berücksichtigt, der einer geritzten Länge von $L_{\text{Ritz}} \approx 25$ m entspricht. Für diesen Datenbereich wird jeweils der Mittelwert für die drei aufgezeichneten Prozesskräfte berechnet. Um das Einsatzverhalten des Werkzeugs im Ausgangszustand quantifizieren zu können, wird das Datenintervall des Standwegs von $s = [0, 25]$ m verwendet. Hierbei wird angenommen, dass innerhalb dieses Standwegs kein oder ein vernachlässigbar kleiner Verschleiß des Werkzeugs vorliegt, sodass der Zustand des Werkzeugs mit dem Zustand des unbenutzten Werkzeugs übereinstimmt. Aus diesem Grund ist der erste Datenpunkt in den nachfolgend dargestellten Diagrammen bei einem Standweg von $s = 25$ m angegeben. Für die weiteren Inspektionszeitpunkte wird der Datenbereich kurz vor

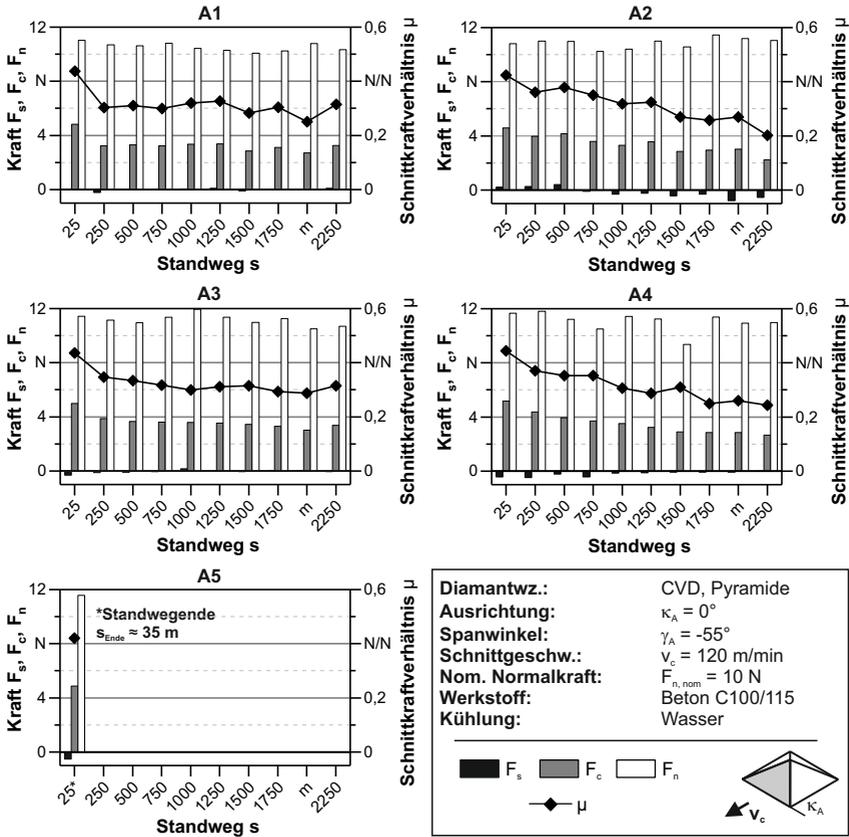


Abbildung 4.35: Gemessene Prozesskräfte über dem Standweg für pyramidenförmige Diamanten in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$

dem Erreichen des jeweiligen Inspektionszeitpunkts ausgewertet. Beispielsweise wird für den Inspektionszeitpunkt von $s = 500$ m der Datenbereich in dem Intervall des Standwegs von $s = [475, 500]$ m berücksichtigt. Analog dazu werden bei einem vorzeitigen Versagen eines Werkzeugs die letzten auswertbaren Daten, die einer Ritzlänge von $L_{Ritz} = 25$ m entsprechen, ausgewertet.

In Abbildung 4.35 sind die bei den Versuchen mit den fünf Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ gemessenen Prozesskräfte sowie das daraus ermittelte Schnittkraftverhältnis dargestellt. Vier der fünf eingesetzten Diamanten haben das festgelegte Standwegende erreicht, siehe Abbildung 4.35. Das fünfte Diamantwerkzeug A5 versagt nach einem Standweg von $s_{Ende} \approx 35$ m, siehe Abbildung 4.35. Die gemessenen Werte der Eingangsgröße Normalkraft $F_{n,nom}$ liegen bei der überwiegenden Mehrheit der Versuche im Bereich zwischen $F_n = 10$ bis 12 N. Die Normalkraft ist die größte der drei gemessenen Prozesskräfte. Bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen A1 bis A4, die bis zum maximalen

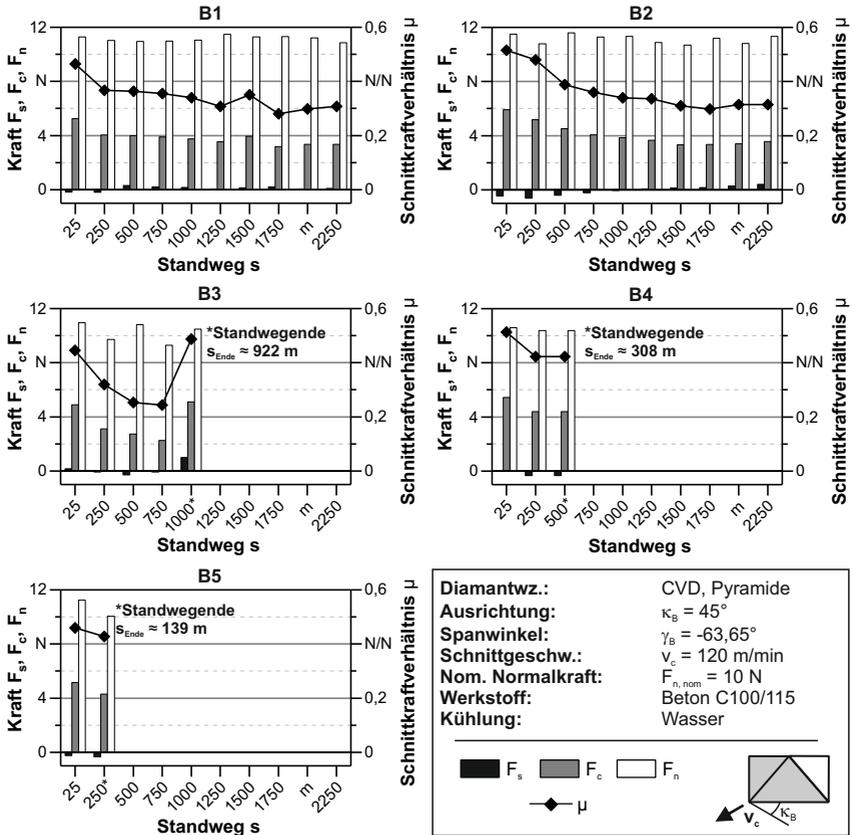


Abbildung 4.36: Gemessene Prozesskräfte über dem Standweg für pyramidenförmige Diamanten in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$

Standweg von $s = 2250$ m eingesetzt werden können, ist erkennbar, dass mit größer werdendem Standweg eine Abnahme der gemessenen Schnittkraft und eine entsprechende Abnahme des Schnittkraftverhältnisses vorliegen. Zu Beginn der Versuchsreihe beträgt die Schnittkraft ca. $F_c = 5$ N und das Schnittkraftverhältnis ca. $\mu = 0,42$ N/N. Bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen A1 und A3 werden die Schnittkraft und das Schnittkraftverhältnis bereits innerhalb des ersten Standwegintervalls deutlich kleiner und nähern sich über dem Standweg asymptotisch Werten von ca. $F_c = 3,5$ N und von ca. $\mu = 0,3$ N/N an. Bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen A2 und A4 ist im Vergleich tendenziell eine lineare Abnahme der Werte der Schnittkraft und des Schnittkraftverhältnisses zu beobachten. Am Ende der Versuchsreihen mit den Diamantwerkzeugen A2 und A4 liegt die Schnittkraft bei ca. $F_c = 2$ bis 3 N und das Schnittkraftverhältnis bei $\mu = 0,2$ bis $0,25$ N/N.

Die auf die Diamantwerkzeuge seitlich wirkende Kraft F_s ist im Vergleich zur

Normal- und Schnittkraft mit Werten im Bereich von $F_s = -1$ bis 1 N deutlich kleiner. Aufgrund der symmetrischen Eingriffsform der Diamantwerkzeuge in Schnittrichtung entspricht dies auch der Erwartung. Nennenswerte Änderungen bzgl. der seitlichen Kraft liegen bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen A2 und A4 vor. Beim Diamantwerkzeug A2 verändert sich die Wirkrichtung der seitlichen Kraft über dem Standweg. Beim Diamantwerkzeug A4 liegen zunächst negative Werte vor, wobei sich diese einem Wert von $F_s \approx 0$ N annähern.

Bei den Untersuchungen mit den Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ erreichen drei der fünf Werkzeuge den maximalen Standweg von $s = 2250$ m nicht, siehe Abbildung 4.36. Diamantwerkzeug B3 versagt nach einem Standweg von $s_{\text{Ende}} \approx 922$ m, Diamantwerkzeug B4 nach $s_{\text{Ende}} \approx 308$ m und Diamantwerkzeug B5 nach $s_{\text{Ende}} \approx 139$ m. Wie bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ sind die gemessenen Normalkräfte bei der Mehrheit der Versuche höher als der nominell eingestellte Wert von $F_{n, \text{nom}} = 10$ N. Auch hier liegen die Werte innerhalb eines Bereichs von $F_n = 10$ bis 12 N. Bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen B1 und B2, bei denen die Diamanten den maximalen Standweg erreichen, ist erkennbar, dass mit größerem Standweg die Schnittkraft und dementsprechend das Schnittkraftverhältnis abnehmen. Ausgehend von einem Wert der Schnittkraft von ca. $F_c = 5$ N und einem Schnittkraftverhältnis von ca. $\mu = 0,5$ N/N nähern sich die Werte asymptotisch über dem Standweg ca. $F_c = 3,5$ N und ca. $\mu = 0,3$ N/N an.

Bei den Versuchen, bei denen die Diamantwerkzeuge den maximalen Standweg nicht erreichen, liegen die Schnittkraft und das Schnittkraftverhältnis zu Beginn in dem gleichen Wertebereich wie bei den Diamantwerkzeugen, die den maximalen Standweg erreichen. Während bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen B4 und B5 das Versagen ohne eine Veränderung in den Kraftsignalen eintritt, kann bei dem Diamantwerkzeug B3 ein deutlicher Anstieg der Schnittkraft vor dem Versagen festgestellt werden. Aufgrund der symmetrischen Eingriffssituation der Diamantwerkzeuge in Schnittrichtung liegen die Werte der seitlichen Kraft bei den Versuchen mit der Ausrichtung B in einem Wertebereich zwischen $F_s = -1$ und 1 N. Bei den Versuchen mit dem Diamantwerkzeug B1 und B2 findet eine Wirkrichtungsänderung der seitlichen Kraft über dem Standweg statt.

In Abbildung 4.37 sind die Ergebnisse für die Versuche mit den konischen Diamanten mit verrundeter Spitze dargestellt. Ein vorzeitiges Versagen von einem der fünf eingesetzten Diamantwerkzeuge liegt nach einem Standweg von $s_{\text{Ende}} = 490$ m vor. Die Normalkraft liegt wie bei den Versuchsreihen mit den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen im Bereich von $F_n = 10$ bis 12 N. Damit ist auch bei diesen Versuchen die gemessene Normalkraft im Durchschnitt höher als die nominell eingestellte Normalkraft. Die Schnittkraft ist bei den Versuchen mit den konischen Diamantwerkzeugen K1 bis K4 nahezu konstant über dem Standweg. Die Absolutwerte sind dabei jedoch für jedes Werkzeug unterschiedlich. Bei K1 und K4 liegen diese bei einem durchschnittlichen Wert von ca. $F_c = 4$ N, bei dem Werkzeug K1 dagegen bei ca. $F_c = 2,5$ N und bei K4 bei ca. $F_c = 5$ N. Die seitliche Kraft liegt bei allen Diamantwerkzeugen im Bereich von $F_s = -0,5$ bis $0,5$ N. Wie bei der Schnittkraft zeigen sich hier keine Veränderungen über dem Standweg.

Die Ergebnisse der Prozesskräfte stehen in enger Übereinstimmung mit den beobachtbaren Verschleißerscheinungen der Diamantwerkzeuge. Bei den pyramiden-

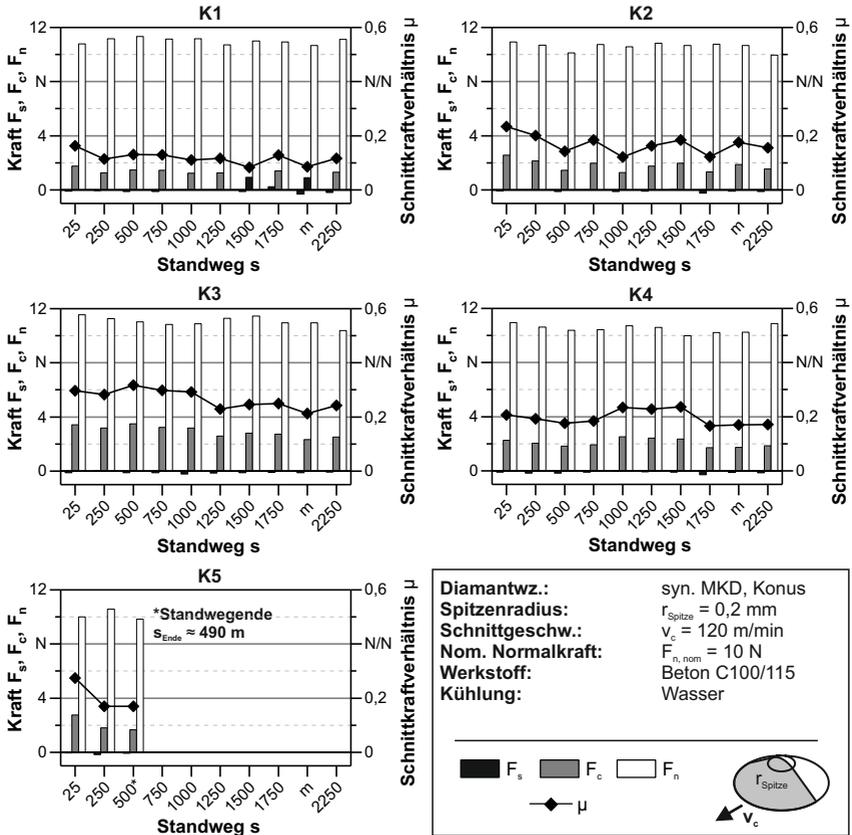


Abbildung 4.37: Gemessene Prozesskräfte über dem Standweg für konische Diamanten mit dem Spitzenradius $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$

förmigen Diamantwerkzeugen finden innerhalb des ersten Standwegintervalls ein Bruch oder eine Verrundung der Spitze statt. Zudem verrunden die Seitenkanten der Pyramide. Diese Formänderung führt zu einer Abnahme der Schnittkraft und des Schnittkraftverhältnisses. Da im weiteren Verlauf der Versuche keine wesentlichen Veränderungen der Diamantwerkzeugform bei den pyramidenförmigen Diamanten auftreten, verändern sich auch die Schnittkräfte nur geringfügig. Bei den konischen Diamantwerkzeugen mit verrundeter Spitze kann dagegen kein oder ein geringer Verschleiß erkannt werden. Da sich demnach die Werkzeugform nicht verändert, bleiben auch die Prozesskräfte konstant.

4.6.4 Ritzspuren und spezifische Energie

Nachfolgend erfolgen die Darstellung und die Analyse der erzeugten Ritzspuren und darauf aufbauend, die der spezifischen Ritzenergie. Es ist davon auszuge-

hen, dass sich durch den Verschleiß und die sich dadurch verändernde Form der Diamantwerkzeuge die Ritzspuren hinsichtlich der Ausprägung, d. h. der Querschnittsfläche und -form über dem Standweg verändern.

Zur Analyse der Ritzspuren werden Replikate bzw. Abdrücke der geritzten Oberflächen angefertigt, vermessen und analysiert. Die Erstellung der Abdrücke der Oberflächentopographien erfolgt entsprechend der Inspektionszeitpunkte der Verschleiß- und Prozesskraftanalyse. Um die Eingriffssituation der Werkzeuge im Ausgangszustand, d. h. mit vernachlässigbaren Verschleiß, zu erfassen, wird jeweils zu Beginn der Versuchsdurchführung ein Abdruck der ersten Umdrehungen, die die Diamanten im Kontakt mit der Versuchsprobe stehen, angefertigt. Dies entspricht einer geritzten Länge von $L_{\text{Ritz}} \leq 25 \text{ m}$. In den nachfolgenden Abbildungen, die u. A. die Oberflächenprofile zeigen, wird der Ausgangszustand daher einem Standweg von $s = 25 \text{ m}$ zugeordnet. Für die Inspektionszeitpunkte $s = 250, 500, 750 \text{ m}$ usw. werden die letzten Umdrehungen vor Erreichen dieser Standwegintervalle herangezogen. Für jede Diamantwerkzeugform sind nachfolgend die Ergebnisse für jeweils ein Werkzeug exemplarisch aufgeführt. Dabei sind Diamantwerkzeuge ausgewählt, die den maximalen Standweg von $s = 2250 \text{ m}$ erreichen. Dargestellt werden die Mikroskopaufnahmen der Diamantwerkzeuge, die gemessenen Oberflächentopographien und die darauf basierenden gemittelten Oberflächenprofile zu drei Inspektionszeitpunkten von $s = 0$ bzw. $s = 25 \text{ m}$, $s = 1000 \text{ m}$ und $s = 2250 \text{ m}$. Die gemittelten Oberflächenprofile erlauben die Messung des Ritzspurquerschnitts, der für die Berechnung der spezifischen Ritzenergie benötigt wird.

In Abbildung 4.38 sind die Ergebnisse für das pyramidenförmige Diamantwerkzeug A3 in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ dargestellt. In den Aufnahmen der Oberflächentopographien und der Oberflächenprofile können die Ritzspuren deutlich erkannt werden. Der Abstand zwischen den Ritzspuren entspricht dem gewählten Vorschub von $f = 0,35 \text{ mm}$. Zur Verdeutlichung der Eingriffspositionen des Diamantwerkzeugs bzw. der Positionen der Ritzspuren sind diese in dem gemittelten Oberflächenprofil grau hinterlegt. Die erzeugten Ritzspuren bzw. Profiliriefen weisen im Ausgangszustand, d. h. $s = 25 \text{ m}$, eine durchschnittliche Tiefe von ca. $h_r = 40 \mu\text{m}$ auf. Der Vergleich zwischen der schematischen Darstellung des Werkzeugquerschnitts mit den erzeugten Ritzspuren zeigt, dass die Ritzspuren teilweise größer sind als der Querschnitt des Werkzeugs, siehe Detail A in Abbildung 4.38. Daneben existieren allerdings auch Ritzspuren, die einen ähnlichen Querschnitt wie das eingesetzte Diamantwerkzeug aufweisen, siehe Detail B. Bei diesem Diamantwerkzeug kann mit zunehmendem Standweg eine Verrundung der Spitze beobachtet werden. Diese Verschleißerscheinung des Diamantwerkzeugs hat jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Ausprägung der erzeugten Ritzspuren. So zeigt sich sowohl bei einem Standweg von $s = 1000 \text{ m}$ als auch $s = 2250 \text{ m}$ weiterhin ein periodisches Oberflächenprofil mit Profiliriefen, die eine Tiefe von ca. $h_r = 40 \mu\text{m}$ aufweisen. Die Varianz hinsichtlich der Tiefe und Ausprägung der vorliegenden Profiliriefen ergibt sich durch die unterschiedlichen Materialphasen Basalt und Zementstein. Dabei sind die im Zementstein vorliegenden Ritzspuren tendenziell tiefer als die Ritzspuren im Basalt. In der Oberflächentopographie für den Standweg von $s = 2250 \text{ m}$ kann im linken Teilbereich eine Vertiefung zwischen zwei Ritzspuren erkannt werden. Hier liegt durch Ausbrüche keine Trennung zweier nebeneinanderliegender Ritzspuren vor.

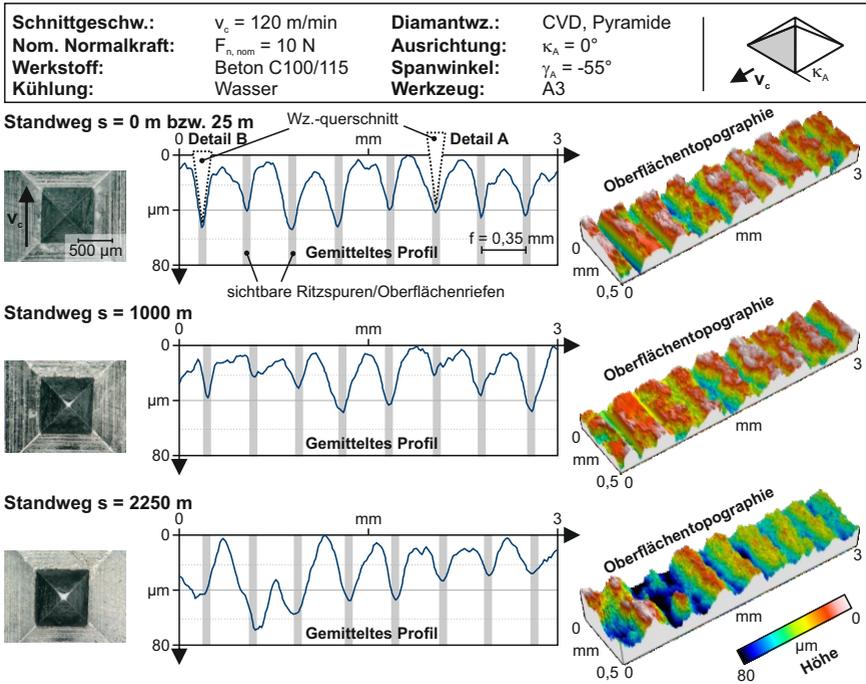


Abbildung 4.38: Darstellung der erzeugten Ritzspuren in Abhängigkeit des Standwegs für das pyramidenförmige Diamantwerkzeug A3 in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$

Abbildung 4.39 zeigt die Ergebnisse für das Diamantwerkzeug B2 in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$. Auch hier lassen sich periodisch wiederkehrend im Abstand des eingestellten Vorschubs von $f = 0,35$ mm Profilriefen erkennen. Die durchschnittliche Tiefe der Ritzspuren im Ausgangszustand liegt bei ca. $h_r = 40$ μm . Die Ritzspurquerschnitte bei $s = 25$ m sind größer als der Querschnitt des eingesetzten Werkzeugs. Wie den exemplarischen mikroskopischen Bildern des Diamantwerkzeugs B2 in der Abbildung 4.39 entnommen werden kann, tritt eine Abstumpfung der Spitze mit ansteigendem Standweg auf. Die Veränderung der Diamantwerkzeugform wirkt sich auf die erzeugten Ritzspuren bzw. Profilriefen aus. So zeigt sich bei den beiden Oberflächentopographien und den korrespondierenden Oberflächenprofilen nach den Standwegen von $s = 1000$ m und $s = 2250$ m eine im Vergleich zum Ausgangszustand verringerte durchschnittliche Tiefe h_r der vorliegenden Ritzspuren bzw. Profilriefen. Nach diesen Standwegen ist die durchschnittliche Tiefe ungefähr $h_r = 20$ μm , dabei wird die Ritzspurtiefe sowohl in der Zementstein- als auch Basaltphase kleiner.

In Abbildung 4.40 sind die Ergebnisse für das konische Diamantwerkzeug K4 mit verrundeter Spitze dargestellt. Bei diesem treten nur geringe Verschleißerscheinungen mit zunehmendem Standweg auf. Im Ausgangszustand nach einem Standweg von $s = 25$ m können entsprechend dem seitlichen Vorschub periodisch wie-

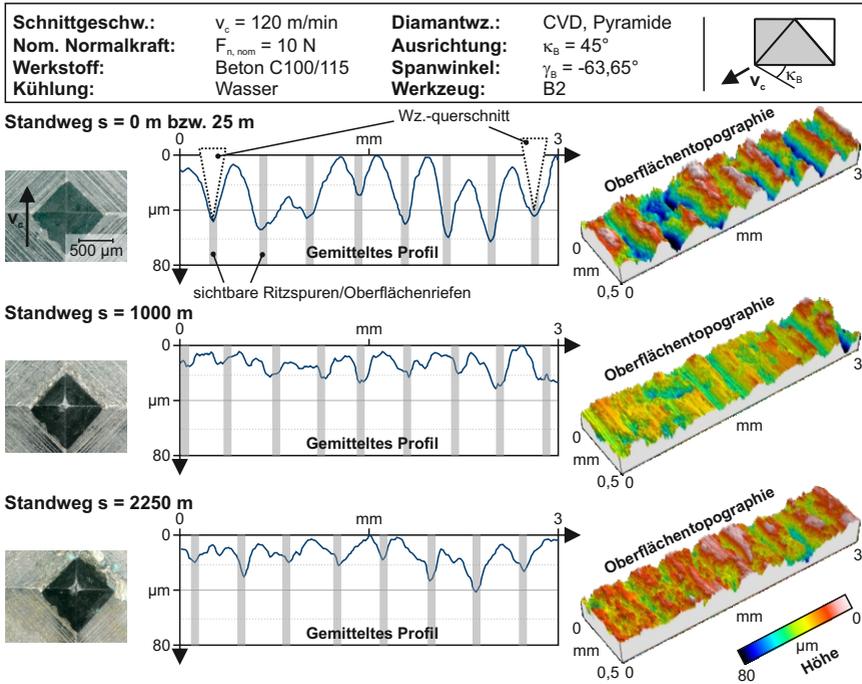


Abbildung 4.39: Darstellung der erzeugten Ritzspuren in Abhängigkeit des Standwegs für das pyramidenförmige Diamantwerkzeug B2 in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$

derkehrende Ritzspuren in der Oberflächentopographieaufnahme und dem Oberflächenprofil erkannt werden. Die durchschnittliche Ritzspurtiefe ist dabei im Vergleich zu den Ritzspurtiefen, die bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen aufgetreten sind, deutlich reduziert und liegt im Bereich von $h_r \leq 20 \mu\text{m}$. Der Vergleich zwischen dem schematischen Werkzeugquerschnitt und dem Oberflächenprofil zeigt, dass die Konturlinie des Profils für einige Ritzspuren nahezu identisch mit der Konturlinie des Werkzeugs ist. Die dreidimensionalen Oberflächentopographien zeigen partiell Ritzspurbereiche deren Grund und Flanken glatt erscheinen. Hier ist von einer Plastifizierung und/oder Verdichtung des an der Oberfläche vorliegenden Materials durch den Werkzeugeingriff auszugehen, während der Anteil des abgetrennten Materials relativ gering ist. Bei einem Standweg von $s = 1000$ m können nur einzelne Ritzspuren in der gemessenen Oberflächentopographieaufnahme wiedererkannt werden. An den weiteren Positionen, an denen eine Ritzspur vorliegen sollte, können jedoch keine Ritzspuren erkannt werden. Bei einem Standweg von $s = 2250$ m sind erneut Ritzspuren in Teilbereichen der gemessenen Oberfläche sichtbar. Wie im Ausgangszustand liegen abschnittsweise Ritzspuren vor, deren Grund und Flanken glatt erscheinen.

Die bei den kraftgesteuerten Ritzversuchen erzeugten Ritzspuren bzw. Profilriefen zeigen erkennbare Unterschiede zwischen den eingesetzten Diamantwerkzeug-

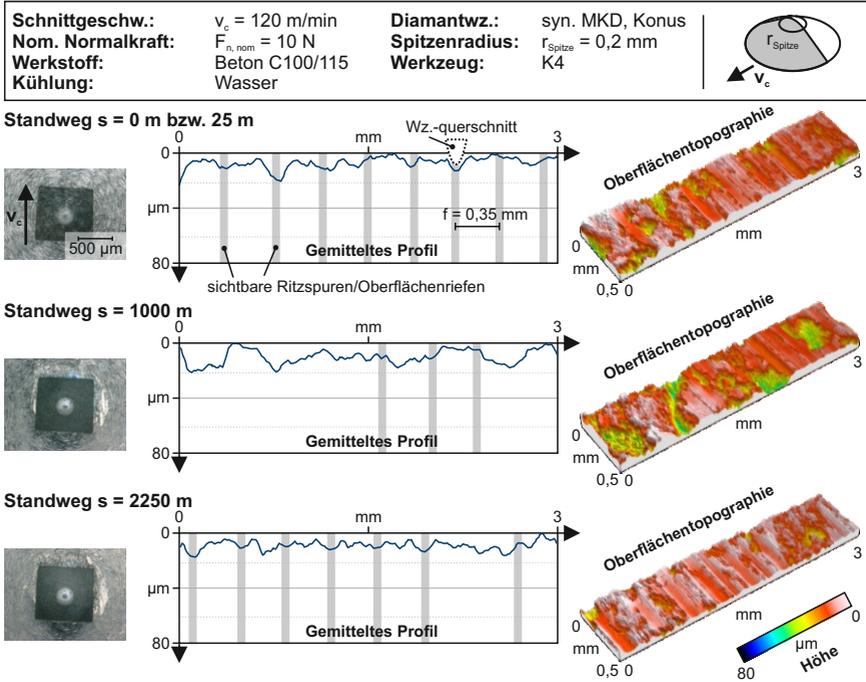


Abbildung 4.40: Darstellung der erzeugten Ritzspuren in Abhängigkeit des Standwegs für das konische Diamantwerkzeug K4 mit dem Spitzenradius $r_{\text{Spitze}} = 0,2$ mm

formen auf. So sind die Ritzspurquerschnitte und Profiltiefen bei den Versuchen mit den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen größer als bei den Versuchen mit den Diamantwerkzeugen mit verrundeter Spitze. Dabei sind bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen, die in zwei unterschiedlichen Ausrichtungen eingesetzt werden, die erzeugten Ritzspurquerschnitte in der Regel größer als die Werkzeugquerschnitte. Dementsprechend ist von einer Rissbildung und dem Ausbruch von Material auszugehen. Allerdings bestehen auch Ritzspuren mit relativ glatt erscheinenden Flankenbereichen, bei denen der Querschnitt des eingesetzten Diamantwerkzeugs mit dem Querschnitt der Ritzspur identisch ist. Dies kann auf die unterschiedlichen Materialphasen zurückgeführt werden. Die Ausbrüche finden dabei vermehrt in der Basaltphase statt, während in der Zementsteinphase Ritzspuren mit glatten Grund- und Flankenbereichen erzeugt werden. Ein unmittelbarer Einfluss des Verschleißes auf die erzeugten Ritzspuren kann bei dem Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ beobachtet werden. Hier nimmt durch die Abstumpfung des Werkzeugs die durchschnittliche Ritzspurtiefe über dem Standweg ab. Bei dem Diamantwerkzeug in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$, bei dem durch den Verschleiß eine Verrundung der Spitze auftritt, kann keine Auswirkung der Formänderung auf die erzeugten Ritzspuren erkannt werden. Die Ritzspuren, die durch das konische Diamantwerkzeug mit verrundeter

Spitze erzeugt werden, sind nur teilweise auf den Oberflächen sichtbar und weisen dabei nur eine geringe Tiefe auf. Hier scheint nur ein geringer Teil des Werkstückmaterials abgetrennt zu werden. Stattdessen wird das Material plastifiziert und verdichtet. Diese Annahme beruht auf der Feststellung, dass das Oberflächenprofil dieser Ritzspuren identisch mit der Kontur des Werkzeugquerschnitts ist und steht in Übereinstimmung mit den gewonnen Erkenntnissen aus Kapitel 4.4. Hier konnte im Rahmen von Hochgeschwindigkeitsvideos gezeigt werden, dass beim Einsatz des Diamantwerkzeugs mit verrundeter Spitze ein Großteil des Materials unter diesem hindurch gedrückt wird, weshalb das Profil der erzeugten Ritzspur dessen Konturlinie entspricht. Neben Ritzspuren mit diesen Ausprägungen existieren jedoch auch Bereiche, in denen keine Ritzspur festgestellt werden kann. In Teilbereichen wird durch den Werkzeugeingriff damit keine Veränderung des Ausgangszustands der Werkstückoberfläche verursacht, oder die Veränderung ist so klein, dass diese mit den gewählten Analysemethoden nicht detektiert werden kann.

Aufgrund der verschleißbedingten Veränderung der Diamantwerkzeugform verändern sich wie dargestellt, neben den mechanischen Belastungen, auch die erzeugten Ritzspuren. Damit ändert sich die umgesetzte Energie beim Eingriff der Diamantwerkzeuge über dem Standweg. Hinsichtlich der Werkzeugoptimierung ist dabei die Veränderung der spezifischen Ritzenergie e_r zu untersuchen, siehe Formel 2.4. Für den Ritzspurquerschnitt A_r wird ein Durchschnittswert aus mindestens fünf einzelnen Ritzspurquerschnitten herangezogen. Hierdurch wird der Einfluss der Inhomogenität des Betons berücksichtigt, da in Abhängigkeit der Materialphase Zementstein oder Basalt unterschiedlich große Ritzspurquerschnitte vorliegen. Für die Schnittkraft F_c wird der Mittelwert der Prozesskraftmessungen des entsprechenden Datenintervalls verwendet, vgl. Kapitel 4.6.3. Neben der spezifischen Ritzenergie ist in den nachfolgenden Abbildungen auch der zugrunde liegende gemittelte Ritzspurquerschnitt dargestellt.

In Abbildung 4.41 sind die Ergebnisse für die pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ dargestellt. Die spezifische Energie weist für die vier Diamantwerkzeuge, mit denen der maximale Standweg erreicht wird, Werte von durchschnittlich ca. $e_r = 1000 \text{ N/mm}^2$ auf. Tendenziell liegt eine Abnahme über dem Standweg vor. Die Ritzspurquerschnitte variieren zwischen maximal $A_r = 7000 \mu\text{m}^2$ und minimal $A_r = 2500 \mu\text{m}^2$. Eine Tendenz für den Ritzspurquerschnitt in Abhängigkeit des Standwegs kann nicht erkannt werden.

Hinsichtlich der spezifischen Energie liegen bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ im Vergleich zu den Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ ähnliche Werte vor. Auch hier kann der durchschnittliche Wert über alle Versuche mit ca. $e_r = 1000 \text{ N/mm}^2$ angegeben werden, siehe Abbildung 4.42. In Abhängigkeit des Standwegs liegt allerdings tendenziell ein Anstieg der spezifischen Energie vor. Demgegenüber werden die Ritzspurquerschnitte über dem Standweg eher kleiner. Allerdings liegt wie bei Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ eine relativ große Streubreite der gemessenen Ritzspurquerschnitte vor. So variieren die Werte zwischen maximal $A_r = 7600 \mu\text{m}^2$ und minimal $A_r = 1800 \mu\text{m}^2$.

Wie zuvor dargestellt, können bei den Versuchen mit den konischen Diamantwerkzeugen in Teilbereichen der Oberflächentopographieaufnahmen keine Ritzspuren erkannt und damit Ritzspurquerschnitte ermittelt werden. Aus diesem

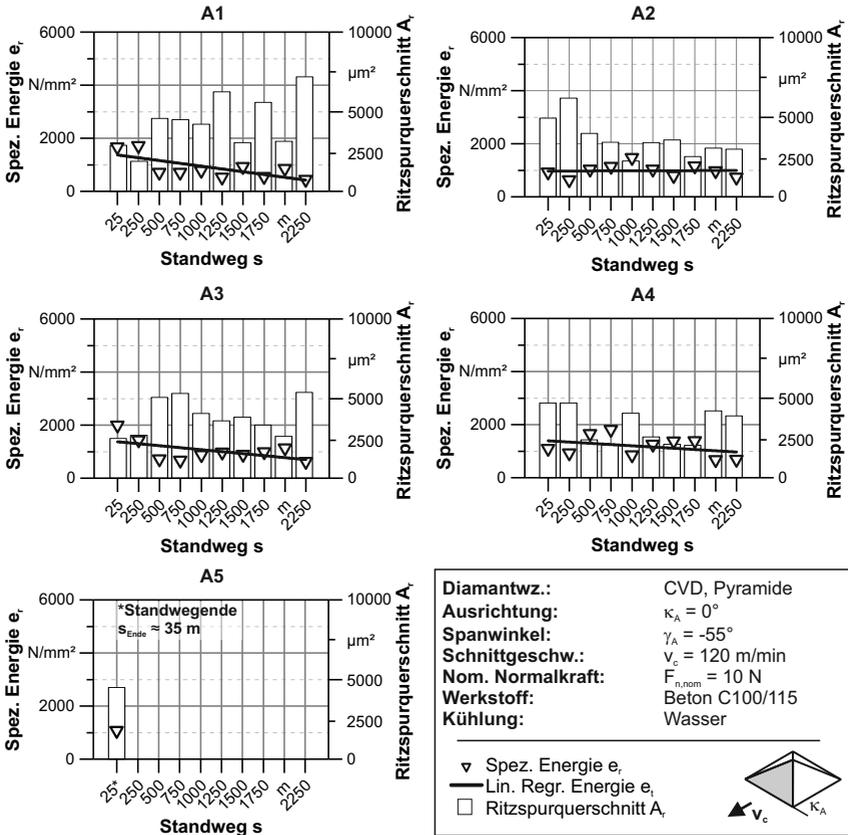


Abbildung 4.41: Ermittelte spezifische Energie e_r und Ritzspurquerschnitt A_r über dem Standweg für pyramidenförmige Diamanten in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$

Grund liegt für diese Diamantwerkzeugform keine ausreichende Datenbasis vor. Nachfolgend werden daher nur exemplarisch Ergebnisse für das Diamantwerkzeug K4 dargestellt, siehe Abbildung 4.43. Für die Standwege von $s = 1000 \text{ m}$, $s = 1500 \text{ m}$, $s = 2000 \text{ m}$ und $s = 2250 \text{ m}$ können keine spezifischen Energiewerte berechnet werden, da keine messbaren Ritzspuren auf der Oberfläche vorliegen. Der durchschnittliche Wert für die messbaren Ritzspurquerschnitte ist $A_r \leq 1200 \mu\text{m}^2$. Aufgrund der teilweise sehr geringen Ritzspurquerschnitte sind die spezifischen Energiewerte deutlich höher als bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen, weshalb eine Anpassung der Diagrammskala erfolgen muss. Der maximale Wert für die spezifische Ritzenergie liegt bei einem Standweg von $s = 1250 \text{ m}$ vor und beträgt ca. $e_r = 9000 \text{ N/mm}^2$.

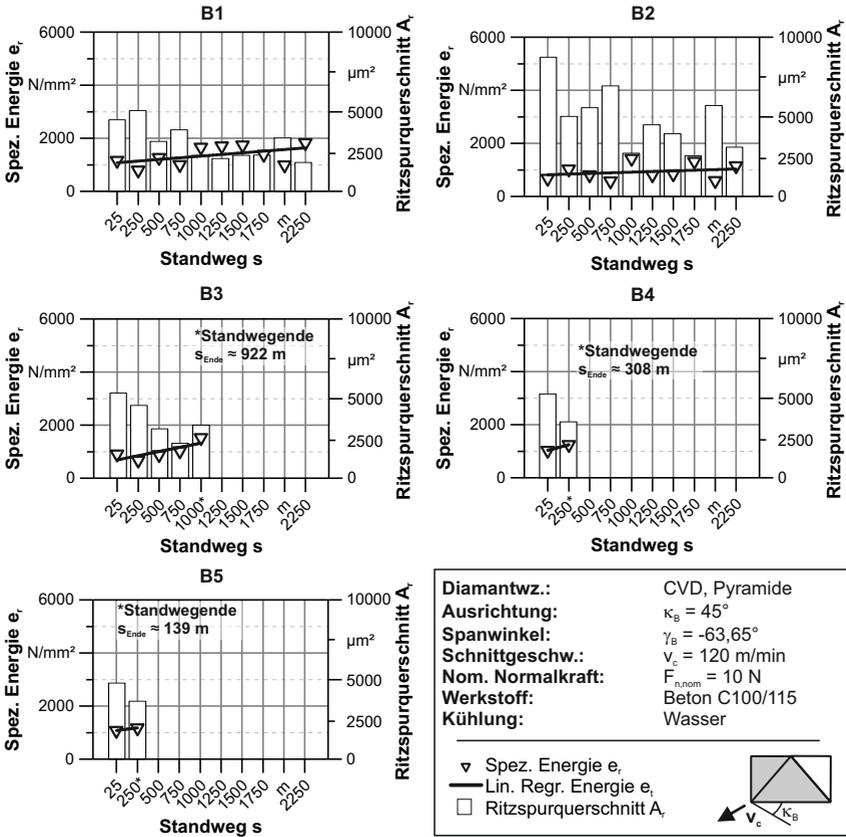


Abbildung 4.42: Ermittelte spezifische Energie e_r und Ritzspurquerschnitt A_r über dem Standweg für pyramidenförmige Diamanten in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$

4.6.5 Zusammenfassung und Ergebnisdiskussion

Zwischen den drei untersuchten Diamantwerkzeugformen bestehen signifikante Unterschiede auf Grundlage der qualitativen wie auch quantitativen Daten. Bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ erreichen vier von fünf Diamantwerkzeugen das Abbruchkriterium des maximalen Standwegs von $s = 2250$ m. Auch bei den konischen Diamantwerkzeugen erreichen vier Werkzeuge den maximalen Standweg. Dahingegen versagen bei der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ drei der fünf Werkzeuge vorzeitig, teilweise nach geringen Standwegen. Während bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in beiden Ausrichtungen Verschleiß an den Werkzeugen in Form verrundeter oder abgestumpfter Spitzen und Seitenkanten erkennbar ist, zeigt sich bei den konischen Diamantwerkzeugen ein vernachlässigbar kleiner Verschleiß. Entsprechend dieser Beobachtungen können Veränderungen in den Prozesskräf-

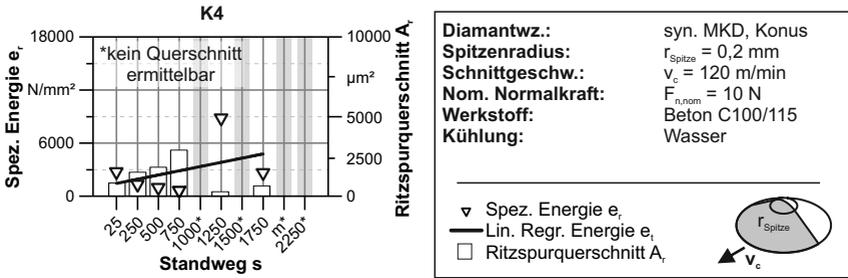


Abbildung 4.43: Ermittelte spezifische Energie e_r und Ritzspurquerschnitt A_r über dem Standweg für das konische Diamantwerkzeug K4 mit dem Spitzenradius $r_{\text{Spitze}} = 0,2 \text{ mm}$

ten erkannt werden. Unabhängig von der Ausrichtung bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen nähert sich das Schnittkraftverhältnis asymptotisch einem Wert von $\mu \approx 0,3 \text{ N/N}$ an. Der Verlauf korrespondiert dabei mit dem beobachtbaren Verschleiß. Hierbei bricht oder verrundet zumeist innerhalb des ersten Standwegintervalls die Pyramidenspitze, wodurch eine Formänderung vorliegt. Danach findet keine weitere wesentliche Veränderung der Form statt. Bei den konischen Diamantwerkzeugen liegt dagegen das Schnittkraftverhältnis bei nahezu konstanten Werten über dem Standweg. Dieses trägt bei den eingesetzten Diamantwerkzeugen im Durchschnitt $\mu \approx 0,2 \text{ N/N}$. Dies erklärt sich dadurch, dass ein vernachlässigbarer Verschleiß der Werkzeuge vorliegt und die Form fast unverändert bleibt.

Obwohl die Auswirkungen der Veränderung der Diamantwerkzeugform durch den Verschleiß in den Prozesskraftmessungen nachvollzogen werden können, zeigen sich bei den erzeugten Ritzspuren keine eindeutigen Einflüsse der verschleißbedingten Änderung der Diamantwerkzeugform. Ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der Ritzspuren besteht zwischen den pyramidenförmigen und den konischen Diamantwerkzeugen mit verrundeter Spitze. Während bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in Abhängigkeit der Materialphase Ritzspuren mit einer durchschnittlichen Tiefe von $h_r \approx 40 \text{ µm}$ vorliegen, sind bei den konischen Diamantwerkzeugen in Teilbereichen keine Ritzspuren auf den Oberflächentopographiefilmern erkennbar. Werden hier Ritzspuren detektiert, so liegen die Ritzspurtiefen bei $h_r \approx 20 \text{ µm}$.

Auf Grundlage der Prozesskraft- und Ritzspurmessungen kann die spezifische Ritzenergie berechnet werden. Diese erlaubt Rückschlüsse über den notwendigen Energieeinsatz pro abgetrenntem Materialvolumen ziehen zu können. Hierbei zeigen sich bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen Tendenzen in Abhängigkeit der Ausrichtung. Für die Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung A mit $\kappa_A = 0^\circ$ liegen abnehmende Werte der spezifischen Energie vor, wohingegen die Werte bei den Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung B mit $\kappa_B = 45^\circ$ zunehmen. Jedoch zeigen die zugrunde liegenden Daten eine nicht zu vernachlässigende Streuung. Für die konischen Diamantwerkzeuge können aufgrund der teilweise nicht zu bestimmenden Ritzspurquerschnitte nur eingeschränkt Werte der spezifischen Energie berechnet werden. Diese Werte sind deutlich größer als

die Werte bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen.

Da laut Hersteller bei den getesteten pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen keine kristallographische Vorzugsrichtung der Härte vorliegt, ist das beobachtbare Verschleißverhalten auf die Form und die dadurch auftretenden mechanischen Belastungen zurückzuführen. Hinsichtlich des Verschleißverhaltens erscheint eine in Schnittrichtung stehende, führende Schneidkante unvorteilhaft zu sein, da die Diamantwerkzeuge in der Ausrichtung B kürzere Standwege erreichen als die Diamantwerkzeuge mit der Ausrichtung A. Es ist zu vermuten, dass bei der Materialtrennung ein Großteil der auftretenden mechanischen Belastungen konzentriert auf die führende Schneidkante wirkt. Hierdurch entstehen Spannungsspitzen, so dass beim Überschreiten einer kritischen Spannung ein Materialbruch eintritt. Im Vergleich dazu wirken bei der Ausrichtung A die Prozesskräfte auf eine größere Fläche, sodass sich kleinere Spannungen ergeben. Bei den Diamantwerkzeugen, die in der Ausrichtung B den maximalen Standweg erreichen, ist ein Verrunden der Spitze bzw. Kanten erkennbar. Durch das Verrunden der Spitze verteilt sich die aufgebrachte Belastung auf eine größere Fläche, wodurch die Spannungsspitzen und die Wahrscheinlichkeit eines Bruchs kleiner werden.

Das beobachtete Verschleißverhalten der konischen Diamantwerkzeuge entspricht den Erfahrungen aus der Praxis. Kernbohrwerkzeuge mit diamantimprägnierten Segmenten, die angeflachte oder verrundete Diamantkörner aufweisen, erreichen in der Anwendung nur geringe Vorschubgeschwindigkeiten. Dieses Verhalten ist bei den Ritzversuchen anhand von geringen Schnittkraftverhältnissen quantifizierbar. Die geringen Schnittkraftverhältnisse bei den Verschleißuntersuchungen bedeuten, dass nur ein kleiner Teil der zugeführten Leistung in die Materialtrennung fließt. Der geringe detektierbare Verschleiß zeigt zudem die Problematik, dass verrundete Diamantkörner mit einer sehr großen Kraft beaufschlagt werden müssen, um das Diamantkorn zu brechen und damit eine Schärfung zu erzielen. Aufgrund der verrundeten Form ist die im Eingriff befindliche Oberfläche relativ groß, weshalb die am Diamantwerkzeug auftretenden Spannungen zu klein sind, um ein Splittern zu verursachen. Dieses Verhalten führt in der Anwendung zur einer verringerten oder vollständig fehlenden Selbstschärfung der Werkzeuge. Hierbei verbleiben die verrundeten Diamantkörner sehr lange in der Bindung, wodurch auch der Bindungsverschleiß verlangsamt wird. In der Anwendung kann sich somit beim Einsatz von Diamantkörnern, die die Form des Diamantwerkzeugs mit verrundeter Spitze aufweisen, kein Selbstschärfungsprozess einstellen. Die pyramidenförmigen Diamantwerkzeuge weisen dagegen deutlich bessere Werte des Schnittkraftverhältnisses auf, zudem zeigen die Oberflächenmessungen ausgeprägte Ritzspuren. Gleichzeitig führt die pyramidenförmige Form zu Spannungsspitzen, die zu einem vorzeitigen Versagen bzw. Splittern der Diamanten führen können. Anzumerken ist, dass bei den Versuchen immer ein katastrophales Werkzeugversagen aufgetreten ist. Ein fortschreitender Verschleiß über mehrere hundert Meter Ritzweg bei einem sukzessiv fortschreitendem Splittern oder Abbrechen von Fragmenten konnte nicht beobachtet werden.

4.7 Zwischenfazit

Einkornritzversuche ermöglichen eine gezielte Analyse verschiedener Aspekte der Materialtrennung. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden verschiedene

Versuchsaufbauten und -methoden eingesetzt, um den Einfluss der Diamantwerkzeugform auf die Aspekte „Materialtrennungsmechanismen“, „Einfluss der Materialphasen“ und „Verschleißverhalten“ qualitativ und quantitativ beschreiben zu können. Dabei liegt ein signifikanter Einfluss der Diamantwerkzeugform vor, wobei diese teilweise gegenläufige Auswirkungen z. B. auf die Energieeffizienz und das Verschleißverhalten hat.

Die Ergebnisse für das Diamantwerkzeug mit verrundeter Spitze bestätigen die ungünstigen Auswirkungen dieser Form, sowohl hinsichtlich der Materialtrennung als auch des Verschleißverhaltens. Dabei werden für diese Diamantwerkzeugform die höchsten Werte der kritischen Spannungstiefe und der mechanischen Arbeiten ermittelt. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei dieser Werkzeugform in einem größeren Umfang Reibungsvorgänge vorliegen, die sich als energetisch ungünstig hinsichtlich der Materialtrennung darstellen. Die verrundete Spitzenform erweist sich sowohl bei der trennenden Bearbeitung der sprödharten Werkstoffe als auch bei zähelastischem Stahl als unvorteilhaft. Bei den Verschleißuntersuchungen führt die relativ große Kontaktfläche dazu, dass die Werkzeuge nur einen geringen Verschleiß aufweisen.

Der Einsatz der pyramidenförmigen Diamantwerkzeugform in der Ausrichtung B erscheint bei der Bearbeitung von Beton als vorteilhaft, wenn hohe Zeitspannolumina bei vorgegebener Antriebsleistung im Vordergrund stehen. Bei dieser Diamantwerkzeugform liegt eine führende Schneidkante vor, sodass eine keilartige Grundform besteht. Beim Einsatz dieser Diamantwerkzeugform an den sprödharten Werkstoffen Beton C20/25, Beton C100/115 sowie deren Einzelphasen Zementstein und Basalt können über alle getesteten Bearbeitungsparameter die geringsten Werte der mechanischen Arbeit ermittelt werden. Durch die führende Schneidkante sowie die seitlichen Kanten, an denen Spannungskonzentrationen vorliegen, werden Risse initiiert, die eine energetisch günstigere Materialtrennung insbesondere beim mehrmaligen Ritzen ermöglichen. Dieses Verhalten wird jedoch nur in der Betonphase erzielt. In der Stahlphase erfolgt beim Einsatz dieser Diamantwerkzeugform in einem größeren Umfang eine plastische Materialverdrängung, die dem Mechanismus des Mikropflügens entspricht. Hierbei wird das Material nicht abgetrennt, sondern seitlich verdrängt. Darüber hinaus ist die hinsichtlich der Materialtrennung als vorteilhaft angesehene Spannungskonzentration an der führenden Schneidkante als Ursache für das Erreichen nur geringer Standwege anzusehen. Aus diesem Grund erscheint bei der trennenden Bearbeitung von Stahlbeton der Einsatz des pyramidenförmigen Diamantwerkzeugs mit der Ausrichtung A vorteilhaft zu sein. Für diese Diamantwerkzeugform können bei den Ritzversuchen an Stahlbeton die höchsten f_{ab} -Werte ermittelt werden. Hohe f_{ab} -Werte weisen dabei auf den Materialtrennungsmechanismus Mikrospanen-Schälspanen hin, bei dem der Großteil des vor dem Diamantwerkzeug befindlichen Materials abgetrennt wird. Zudem kann auf Basis der Verschleißuntersuchungen auf ein günstiges Einsatzverhalten hinsichtlich der erzielbaren Standwege in Kombination mit einer ausreichenden Selbstschärfung geschlossen werden.

5 Einsegment- und Kernbohrversuche an hochfestem Stahlbeton

In den nachfolgenden Kapiteln sind Versuche mit einzelnen diamantimpregnierten Segmenten und Versuche mit Diamantkernbohrern dargestellt. Der wesentliche Vorteil von Einsegmentversuchen gegenüber Diamantkernbohrversuchen ist die Möglichkeit einer detaillierten Analyse des Einsatzverhaltens. Durch den Einsatz eines Segments wird die Anzahl von Einflussgrößen reduziert, wodurch z. B. eine Auflösung der einzelnen Materialphasen von Stahlbeton möglich ist. Diamantkernbohrversuche bieten dagegen anwendungsbezogene Ergebnisse und damit eine übergeordnete Analyse des Prozesses. Nach *Bienert* besteht eine gute Übertragbarkeit zwischen den Ergebnissen und Erkenntnissen von Versuchen mit einzelnen Segmenten und anwendungsbezogenen Versuchen [15].

5.1 Versuchsumgebung und -durchführung

Für die Einsegment- und Kernbohrversuche werden dieselben Segmentspezifikationen verwendet. Jedoch weisen die Segmente unterschiedliche Abmaße auf, siehe Abbildung 5.1. Eingesetzt werden unbeschichtete synthetische Diamanten der Fa. ElementSix in der Qualität Syngrit SDB 1055 in zwei unterschiedlichen Korngrößen $d_k = 20/30$ mesh und $d_k = 40/50$ mesh. Die Diamantkonzentration wird auf drei Stufen $c = C8$ (gering), $c = C20$ (mittel) und $c = C40$ (hoch) variiert. Als Bindungsmaterial wird eine für Diamantkernbohrwerkzeuge entwickelte Metallpulvermischung vom Typ Diabase-V21 der Fa. Dr. Fritsch verwendet, deren Hauptkomponenten Eisen, Kupfer und Cobalt sind [64].

Die Segmente werden am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie (LWT), Prof. Tillmann, Technische Universität Dortmund, hergestellt. Dabei werden zunächst die Diamanten und das Metallpulver in einem Taumelmischer vermengt, um eine gleichmäßige Verteilung der Diamanten zu erzielen. Das Metallpulver-Diamant-Gemisch wird in einer Kaltpresse zu Grünlingen verpresst. Anschließend werden diese in einer Heißpresse Typ CSP100 der Fa. Dr. Fritsch druckgesintert. Die dabei verwendeten Parameter sind in Tabelle 5.1 angegeben.

Die Einsegmentversuche erfolgen an würfelförmigen Betonproben mit einer Kantenlänge von $k_P = 150$ mm aus hochfestem Beton C100/115. Die Spezifikation des hochfesten Betons findet sich in Kapitel 4.2. Die Probenwürfel weisen zwei Betonstahlstäbe (B500B, 1.0439, alte Bezeichnung BSt500) mit einem Durchmesser von

Tabelle 5.1: Programmablauf Heißinterpresse, LWT TU Dortmund

Schritt	Vorgang und Parameter
1.	Heizrampe: Von Raumtemperatur bis $T = 640^\circ\text{C}$ mit $10^\circ\text{C}/\text{min}$
2.	Heizrampe: Von $T = 640^\circ\text{C}$ bis $T = 840^\circ\text{C}$ mit $8^\circ\text{C}/\text{min}$
3.	Halten: $T = 840^\circ\text{C}$ für $t = 3$ min
4.	Abkühlen auf Raumtemperatur
Druck: $p = 52$ bar bei einer von Sinterfläche $A = 12,8\text{ cm}^2$	

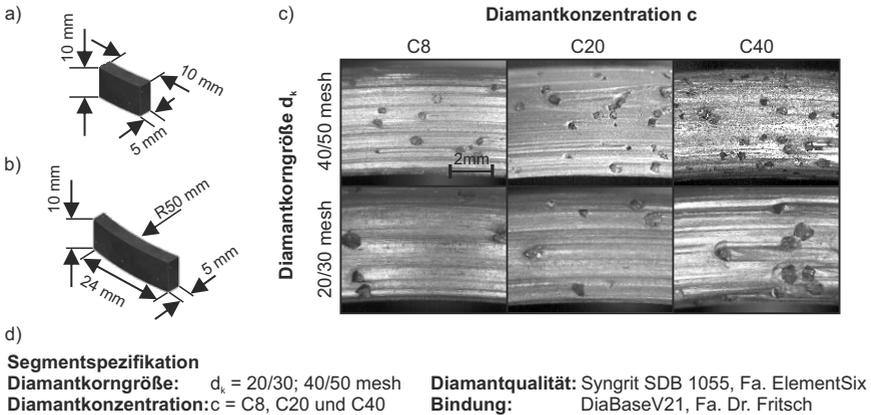


Abbildung 5.1: Formen und Abmaße der Segmente für a) Einsegmentversuche, b) Kernbohrversuche, c) Exemplarische Darstellung der Segmentoberflächen, d) Untersuchte Segmentspezifikationen erweiterte Darstellung nach [94]

$d = 12$ mm auf, siehe Abbildung 5.2 a). Die Betonstahlstäbe sind dabei parallel zur Vorschubrichtung in einem Abstand von ca. $s = 100$ mm in der Versuchsprobe positioniert. Bei den Kernbohrversuchen wird der gleiche hochfeste Beton verwendet, wie bei den Einsegmentversuchen. Dieser ist mit Betonstahlstäben (BSt500, 1.0439) mit einem Durchmesser von $d = 12$ mm bewehrt. Die Abmaße der Stahlbetonproben für die Kernbohrversuche sind: Breite $b_P = 1000$ mm, Tiefe $t_P = 1000$ mm und Höhe $h_P = 300$ mm. Bei diesen Versuchsproben liegen die Betonstahlstäbe senkrecht zur Vorschubbewegung, siehe Abbildung 5.2 b). Dabei sind zwei Betonstahlstäbe über Kreuz eingelegt, wobei sich der obere Stab von der Oberfläche aus gemessen ca. $l_{\text{stahl}} = 30$ mm tief im Beton befindet, während der zweite Stab unmittelbar unter diesem liegt.

In Abbildung 5.2 sind die Aufbauten für die Einsegmentversuche a) und die Kernbohrversuche b) dargestellt. Die Einsegmentversuche erfolgen auf einem 3-Achsen-Bearbeitungszentrum der Fa. Chiron Typ FZ 12 S. Dieses erlaubt eine weggeregelte Versuchsdurchführung. Die Bohrungsmittel liegt bei den Versuchen zwischen den beiden vertikal in der Versuchsprobe angeordneten Betonstahlstäben, sodass über die gesamte Versuchsdauer eine Durchtrennung der Betonstahlstäbe vorliegt. Pro Umdrehung des Werkzeugs werden beide Betonstahlstäbe durchtrennt. Als Kühlschmierstoff kommt eine Emulsion mit dem Schmierstoffkonzentrat Avantin 361 der Fa. Bechem zum Einsatz. Da die Werkzeugmaschine nicht für den Einsatz mit Wasser ausgelegt ist, ist die Zugabe des Schmierstoffs in einer Konzentration von $p = 7$ V% notwendig, um eine Beschädigung der Maschinenkomponenten sowie des Versuchsaufbaus durch Korrosion zu vermeiden. Bei den Einsegmentversuchen wird ein Mehrkomponenten-Dynamometer Typ 9255C der Fa. Kistler verwendet, um die Prozesskräfte in x-, y- und z-Richtung zu erfassen. Dabei entspricht die in z-Richtung gemessene Kraft F_z der Normalkraft F_n . Zur Bestimmung der in Schnittrichtung vorliegenden Kraft F_c ist dagegen aufgrund der stationären Mess-

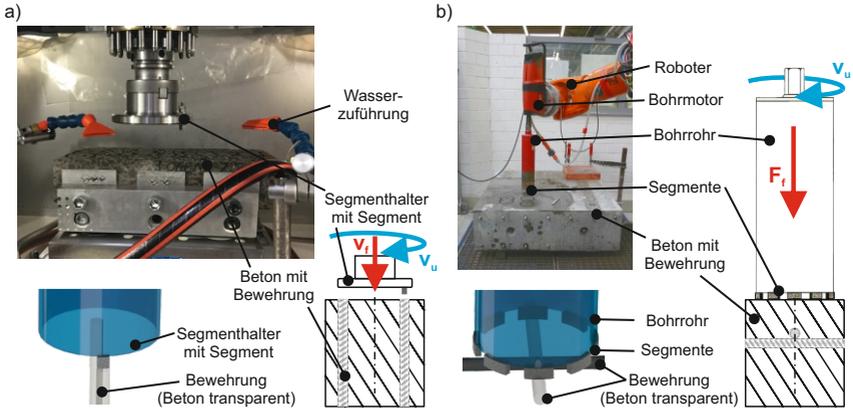


Abbildung 5.2: Exemplarische Darstellung der Aufbauten für a) Einsegmentversuche und b) Kernbohrversuche nach [16]

technik eine Umrechnung der gemessenen Kräfte nach Formel 5.1 notwendig.

$$F_c(t) = F_x(t) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{T}\right) + F_y(t) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T}\right) \quad (5.1)$$

Die Einsegmentversuche werden mit invarianter Segmenttopographie durchgeführt. Das bedeutet, dass der bei den Versuchen entstehende Segmentverschleiß minimal und damit vernachlässigbar ist, da sich die Segmenttopographie in ihrer wesentlichen Topographie nicht verändert [75]. Aus diesem Grund werden in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit nur geringe Bohrtiefen von $l_t \leq 1$ mm eingestellt. Die getesteten Vorschubgeschwindigkeiten werden dabei in Abstimmung mit den Einkornritzversuchen, siehe Kapitel 4.5, sowie den Kernbohrversuchen, siehe Kapitel 5.3, eingestellt. Die Aufnahmen zur Erfassung des Verschleißzustands der Segmente werden mit einem Messmikroskop Typ MF-A1720H der Fa. Mitutoyo angefertigt. Die Ritzspuren werden mit einem konfokalen Weißlichtmikroskop Typ μ surf der Fa. Nanofocus aufgenommen. Detailliertere Informationen zu den beiden Messmitteln finden sich in Kapitel 4.3.

Die Versuche zum Kernbohren werden mithilfe eines 6-Achs-Industrieroboters Typ KR210 der Fa. Kuka durchgeführt. Dieser verfügt über eine Traglast von maximal $m = 210$ kg und ist mit einem Zusatzmodul zur Kraft- und Momentenregelung, „KUKA.ForceTorqueControl“ der Fa. KUKA ausgestattet. An dem Manipulator des Roboters ist ein Bohrmotor der Fa. Hilti, Typ DD200, angebracht. Die Motivation zum Einsatz eines Industrieroboters mit kraft geregelter Steuerung ergibt sich durch die Anforderung einer reproduzierbaren Versuchsdurchführung, da beim manuellen Bohren der Anwender einen wesentlichen Einfluss auf das Prozessergebnis ausübt.

Während der Kernbohrversuche wird die elektrische Leistungsaufnahme des Bohrmotors gemessen. Nach den Versuchen wird an zwei Stellen die Segmenthöhe zweier nebeneinander liegender Segmente mit einer Messuhr gemessen, um einen Verschleiß quantitativ zu erfassen. Zusätzlich wird die digitale USB-Mikroskopkamera

Typ Digimicroprofi der Fa. dnt genutzt, um qualitative Information über den Zustand der Segmente zu erlangen, siehe Kapitel 4.3. Die Kernbohrungen erfolgen bis zu einer Bohrtiefe von $l_t = 120$ mm und sind zentral über der Kreuzung zweier Stahlstäbe positioniert. Hierdurch werden bei einem Kernbohrversuch die beiden übereinander angeordneten Stahlstäbe nacheinander durchtrennt. Innerhalb einer Bohrung können somit Bereiche mit und ohne Stahlbewehrung analysiert werden. Während der Versuche erfolgt eine Spülung des Prozesses mit Wasser. Diese Zuführung erfolgt durch die Spindel des Bohrmotors, sodass das sogenannte „Bohrklein“ (auch „Bohrschlamm“), das das abgetrennte Material des Stahlbetons und Verschleißpartikel der Segmente umfasst, von innen nach außen aus dem Bohrspalt gespült werden.

5.2 Einsegmentversuche

5.2.1 Exemplarische Darstellung des Einflusses der Stahlbewehrung auf die Prozesskräfte

Abbildung 5.3 zeigt exemplarisch den Verlauf der Prozesskräfte bei einem Einsegmentversuch. Dieser beginnt mit dem Anbohrvorgang ①, woran sich ein stationärer Bohrprozess ② anschließt. Die Messdaten der Normalkraft F_n weisen für diesen Bereich eine große Spannweite von ca. $R = 400$ N auf. Diese ergibt sich durch Kraftspitzen, die durch das Durchtrennen der Stahlstäbe entstehen und die bei einer detaillierten Betrachtung der Kraftmessungen in Abbildung 5.3 b) deutlich werden. Entsprechend den zwei verbauten Betonstahlstäben treten pro Umdrehung zwei Signalspitzen in den Messdaten der Prozesskräfte auf. Diese weisen in der Normalkraft eine Höhe von ca. $F_n = 450$ N auf. Dagegen liegt das Niveau der Normalkraft in der Betonphase bei ca. $F_n = 50$ N. Auch in der Schnittkraft liegen deutliche Signalspitzen aufgrund der Betonstahlstäbe vor, siehe ③. Während bei der Durchtrennung der Stahlstäbe die Signalspitzen bei ca. $F_c = 160$ N liegen, ist die durchschnittliche Höhe im Beton ca. $F_c = 15$ N, siehe ④.

5.2.2 Einfluss der Diamantkorngröße und der -konzentration

Zur Erlangung eines detaillierten Prozessverständnisses werden nachfolgend die Ergebnisse von Einsegmentversuchen mit der Diamantkorngröße $d_k = 40/50$ mesh in drei verschiedenen Diamantkonzentrationen dargestellt und der Einfluss der Segmentspezifikation auf den Bearbeitungsprozess analysiert. Anhand dieser Ergebnisse sollen die grundlegenden Zusammenhänge hinsichtlich der Materialtrennung von Stahlbeton durch diamantimprägnierte Segmente ermittelt werden.

In Abbildung 5.4 sind die bei Einsegmentversuchen gemessenen Prozesskräfte beim Durchtrennen der Stahlphase und der Betonphase dargestellt. Bei den Versuchen wird neben der Segmentspezifikation die Vorschubgeschwindigkeit auf zwei Stufen variiert. Die angegebenen Werte entsprechen dem Mittelwert und der Standardabweichung von $n_n = 100$ Umdrehungen eines Versuchs. Dargestellt sind in Abbildung 5.4 a) die Schnittkraft F_c und die Normalkraft F_n sowie in Abbildung 5.4 b) das Schnittkraftverhältnis μ .

Der Vergleich der ermittelten Prozesskräfte zeigt zwischen der Stahlphase und der Betonphase deutliche Unterschiede hinsichtlich der Höhe und der Streuung der

Vorschubgeschw.: $v_f = 0,5 \text{ mm/min}$	Werkzeugdurchmesser: $d = 102 \text{ mm}$	
Umfangsgeschw.: $v_u = 141 \text{ m/min}$	Kühlung: Emulsion	
Diamantqualität: Syngrit SDB 1055	Bindung: DiaBaseV21	
Diamantkonzentr.: $c = C20$	Diamantkorngröße: $d_k = 40/50 \text{ mesh}$	
Werkstoff: Beton C100/115, bewehrt BSt500, $d = 12 \text{ mm}$, 2 Stäbe		

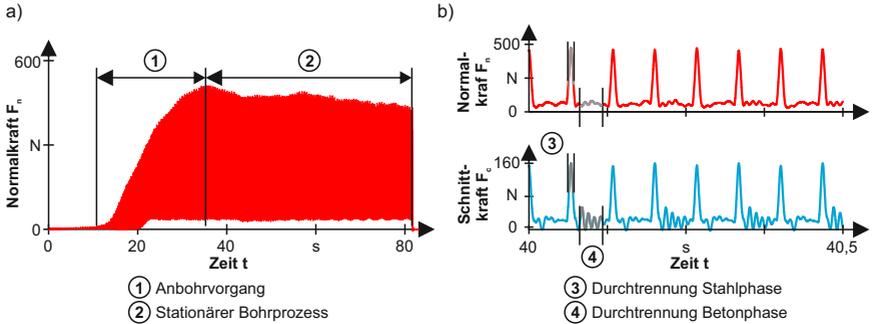


Abbildung 5.3: Exemplarische Darstellung der Prozesskraftverläufe beim Einsegmentversuch an Stahlbeton a) Normalkraft, b) Detailansicht der Normal- und Schnittkraft nach [93]

Vorschubgeschw.: $v_f = \text{var}$	Werkzeugdurchmesser: $d = 102 \text{ mm}$	
Umfangsgeschw.: $v_u = 141 \text{ m/min}$	Kühlung: Emulsion	
Diamantqualität: Syngrit SDB 1055	Bindung: DiaBaseV21	
Diamantkonzentr.: $c = \text{var}$	Diamantkorngröße: $d_k = 40/50 \text{ mesh}$	
Werkstoff: Beton C100/115, bewehrt BSt500, $d = 12$, 2 Stäbe		

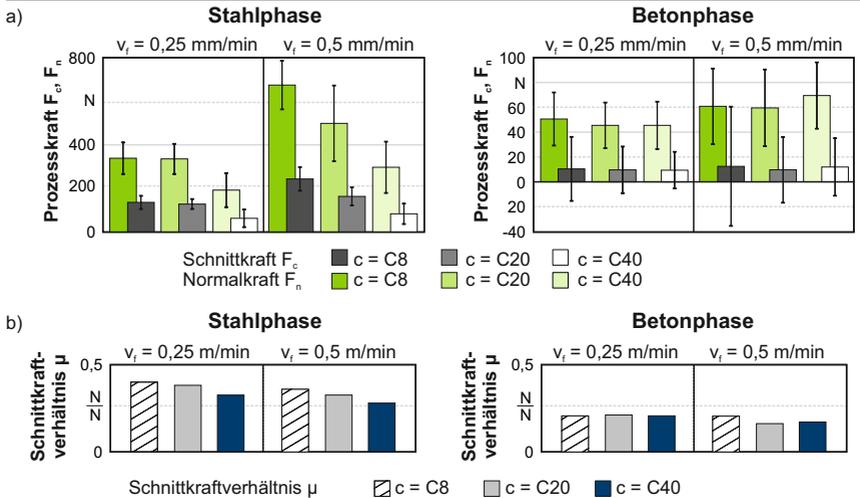


Abbildung 5.4: Prozesskräfte beim Durchtrennen a) der Stahlphase und der Betonphase sowie b) die korrespondierenden Schnittkraftverhältnisse

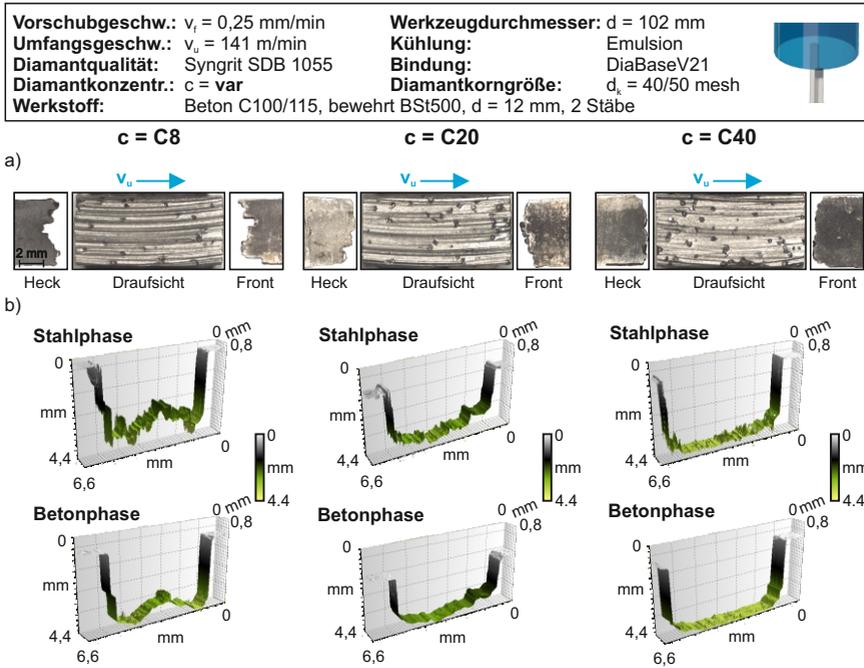


Abbildung 5.5: a) Mikroskopische Aufnahmen der eingesetzten Segmente, b) Dreidimensionale Darstellung der Ritzspuren in der Stahl- und der Betonphase nach [93]

Werte. Unabhängig von der Diamantkonzentration oder der Vorschubgeschwindigkeit sind die Prozesskräfte sowie das Schnittkraftverhältnis in der Stahlphase deutlich höher als in der Betonphase. Dahingegen ist das Verhältnis zwischen der Standardabweichung und den jeweiligen Mittelwerten in der Betonphase deutlich höher als in der Stahlphase.

Sowohl in der Stahlphase als auch in der Betonphase führt eine höhere Vorschubgeschwindigkeit bei gleicher Diamantkonzentration zu einem Anstieg der Prozesskräfte. Dabei ist die Zunahme der Normalkraft im Vergleich zur Schnittkraft größer, weshalb die Schnittkraftverhältnisse bei größerer Vorschubgeschwindigkeit kleiner sind. In der Stahlphase ist tendenziell bei beiden untersuchten Vorschubgeschwindigkeiten eine Abnahme der Prozesskräfte mit zunehmender Diamantkonzentration zu beobachten. In der Betonphase kann dagegen keine signifikante Abhängigkeit der Prozesskräfte von der Diamantkonzentration festgestellt werden, da die Standardabweichungen der Versuche in einem großen Bereich überlappen.

Weitergehende Erkenntnisse hierzu lassen sich durch eine Analyse der Oberflächentopographie der eingesetzten Segmente und der erzeugten Ritzspuren erzielen. In Abbildung 5.5 sind die bei Einsegmentversuchen verwendeten Segmente und die Ritzspuren in der Stahlphase und der Betonphase in Abhängigkeit der

Diamantkonzentration dargestellt. Bei der Diamantkonzentration von $c = C8$ lässt sich in der Draufsicht des Segments eine scheinbar ausreichende Anzahl von Diamantkörnern erkennen. Die Seitenansicht zeigt jedoch, dass die Diamantkörner in unterschiedlichen Höhen liegen, weshalb das Segment deutliche Riefen bzw. Furchen aufweist, siehe „Heck“- und „Front“-Ansicht in Abbildung 5.5. Lokal liegt somit ein höherer Verschleiß der Bindungsmatrix vor. Dieses Erscheinungsbild korrespondiert mit den gemessenen Oberflächen der Ritzspuren. Auch hier liegen sowohl in der Stahlphase als auch in der Betonphase entsprechende Riefen und Spitzen vor. Diese sind dabei in der Stahlphase deutlich ausgeprägter sowohl hinsichtlich der Höhe als auch der Anzahl. Mit steigender Diamantkonzentration verändert sich die Topographie der eingesetzten Segmente, da die Anzahl von Diamantkörnern, die in der gleichen Höhe liegen, ansteigt. Aus diesem Grund weisen die Segmente bei einer Diamantkonzentration von $c = C20$ und $C40$ eine geringere Anzahl an Riefen bzw. Furchen auf, die zudem eine geringere Tiefe besitzen. Entsprechend der Segmenttopographie verändern sich auch die erzeugten Ritzspuren, mit einer dabei insgesamt geringeren Anzahl an Riefen und Spitzen. Hier ist in Abhängigkeit der Materialphase eine unterschiedliche Anzahl erkennbar. So ist diese Anzahl sowie die Ausprägung der Riefen und Spitzen, in der Stahlphase größer als in der Betonphase. Bei der Diamantkonzentration von $c = C40$ weisen die Oberflächen sowohl in der Stahl- als auch der Betonphase über die gesamte Eingriffsbreite des Segments nur eine geringe Anzahl an kleinen Spitzen auf, sodass die Oberfläche eingeebnet erscheint.

5.2.3 Ergebnisdiskussion

Die Untersuchungen auf Ebene von Einsegmentversuchen zeigen, dass die Diamantkonzentration einen wesentlichen Einfluss auf das Einsatzverhalten diamantimpregnierter Werkzeuge hat. Bei den gewählten Einstellungen führt eine höhere Diamantkonzentration zu geringeren Prozesskräften in der Stahlphase. In der Betonphase kann dagegen nur bedingt ein Einfluss der Diamantkonzentration auf die Prozesskräfte erkannt werden. Mit steigender Diamantkonzentration weisen die erzeugten Ritzspuren sowohl in der Stahl- als auch Betonphase weniger Riefen und Spitzen auf.

Die größeren Prozesskräfte sowie Schnittkraftverhältnisse in der Stahlphase im Vergleich zur Betonphase erklären sich durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften. Aufgrund des zähelastischen Verhaltens des Stahls wird beim Korneingriff Material vor und neben dem Schneidkorn elastisch und plastisch verformt bzw. verdrängt und es können Späne erzeugt werden. Dahingegen ist im Beton aufgrund der sprödharten Materialeigenschaften von einer Rissinitiierung und dadurch entstehenden Materialausbrüchen auszugehen, wodurch eine geringere mechanische Belastung in Schnittrichtung der Werkzeuge entsteht. Gleichzeitig entsteht durch diese Form der Materialtrennung, zusammen mit der Inhomogenität des Betons, eine hochfrequente Anregung, die die höhere Streubreite der Kräfte verursacht.

Eine kleinere Diamantkonzentration führt zu einer geringeren Anzahl an Diamanten, die in einer Ebene eines Segmentes vorliegen. Anhand der mikroskopischen Aufnahmen der Segmente kann erkannt werden, dass mit abnehmender Diamantkonzentration die Anzahl auftretender Furchen ansteigt. Gleichzeitig zeigen die dreidimensionalen Oberflächenaufnahmen der Ritzspuren sowohl in der

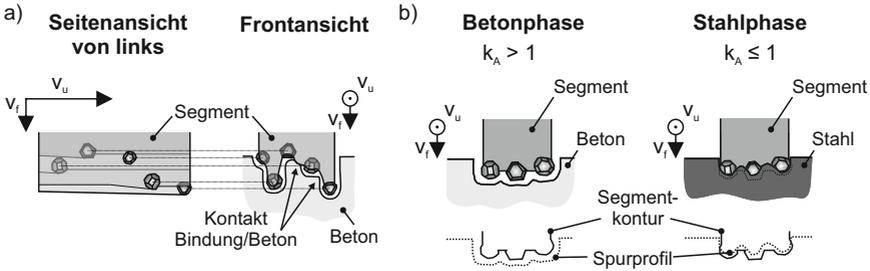


Abbildung 5.6: a) Schematische Darstellung des Segmentverschleißes bei zu geringer Diamantkonzentration, b) Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der notwendigen minimalen Anzahl von freigelegten Diamanten in Abhängigkeit der Materialphase

Beton- als auch in der Stahlphase eine steigende Anzahl an Profilspitzen. Daraus lässt sich schließen, dass bei einer kleinen Diamantkonzentration lokal ein unmittelbarer Kontakt zwischen Bindung und Werkstückmaterial auftritt, siehe Abbildung 5.6 a). Die dabei vorliegende Reibung zwischen der Bindungsmatrix und dem Werkstückmaterial, hier Stahl oder Beton, verursacht zum einen höhere Prozesskräfte und zum anderen einen erhöhten lokalen Verschleiß der Segmente in Form von relativ tiefen Riefen auf der Segmentoberfläche. Wird die Diamantkonzentration gesteigert und liegt über die gesamte Breite des Segments eine ausreichende Anzahl an schneidfähigen, aktiven Diamanten vor, wird der Umfang an Reibungsvorgängen zwischen Bindung und Werkstückmaterial reduziert, wodurch die Prozesskräfte und der Verschleiß sinken.

Die notwendige Anzahl der Diamantkörner ist materialabhängig und kann durch den Flächenabtragsfaktor k_A abgeschätzt werden, siehe Abbildung 5.6 b). In der Stahlphase, in der der Flächenabtragsfaktor $k_A \leq 1$ ist, wird nur ein Teil des verformten Materials abgetragen, während der andere Teil in Form von Graten und Spitzen am Werkstück verbleibt. Diese verursachen lokal einen höheren Verschleiß der Segmente, durch einen unmittelbaren Kontakt mit der Bindungsmatrix. In der Betonphase brechen durch das sprödharte Materialverhalten größere Materialstücke infolge der Rissinitiierung aus. Dabei wird weniger Kraft zur Materialtrennung benötigt als in der Stahlphase. Durch das Ausbrechen von Materialpartikeln ist eine geringere Anzahl an aktiven Diamantkörnern notwendig als in der Stahlphase, da hier der Flächenabtragsfaktor $k_A > 1$ ist [5]. Aus diesem Grund ist eine ausreichende Anzahl aktiver Diamanten über der Segmentbreite und somit eine minimale Diamantkonzentration in Abhängigkeit des zu trennenden Materials erforderlich.

5.3 Kernbohrversuche

5.3.1 Exemplarische Darstellung des Einflusses der Stahlbewehrung auf die Wirkleistung

Im Rahmen der Kernbohrversuche werden die Auswirkungen der sechs in Abbildung 5.1 dargestellten Segmentspezifikationen untersucht. Da bei den für das Kernbohren verwendeten Werkstücken die Betonstahlstäbe senkrecht zur Vorschubrichtung angeordnet sind, liegt nicht während der gesamten Prozessdauer eine Durchtrennung von Betonstahl vor. Zudem kann keine Auflösung zwischen den Einzelphasen Stahl oder Beton erfolgen, sondern nur zwischen bewehrtem Beton und unbewehrtem Beton unterschieden werden.

Abbildung 5.7 zeigt exemplarisch den Verlauf der gemessenen Wirkleistung P bei einem Kernbohrversuch. Im unbelasteten Zustand des Bohrmotors, das heißt vor und nach der Durchführung eines Kernbohrversuches, kann eine Leerlaufleistung von ca. $P_L = 650 \text{ W}$ gemessen werden, die der Bohrmotor zum Antrieb des Getriebes benötigt. Nach dem Anbohren wird zunächst bis zu einer Tiefe von ca. $l_t = 30 \text{ mm}$ unbewehrt Beton gebohrt, siehe Bereich ① in Abbildung 5.7. Danach folgen die beiden über Kreuz gelegten Betonstahlstäbe. Beim Durchtrennen dieser steigt die Wirkleistung an, siehe Bereich ②. Im Verlauf der Wirkleistung ist die Durchtrennung der beiden Betonstahlstäbe deutlich erkennbar, da sich die Querschnittsänderung der runden Stäbe beim Durchtrennen im Signal der Wirkleistung widerspiegelt. Die beiden sichtbaren Maxima korrespondieren demnach mit den breitesten Stellen der beiden Stäbe. Nach dem Durchtrennen der Betonstahlstäbe wird bis zum Erreichen der Bohrtiefe von $l_t = 120 \text{ mm}$ unbewehrter Beton durchtrennt, siehe Bereich ③.

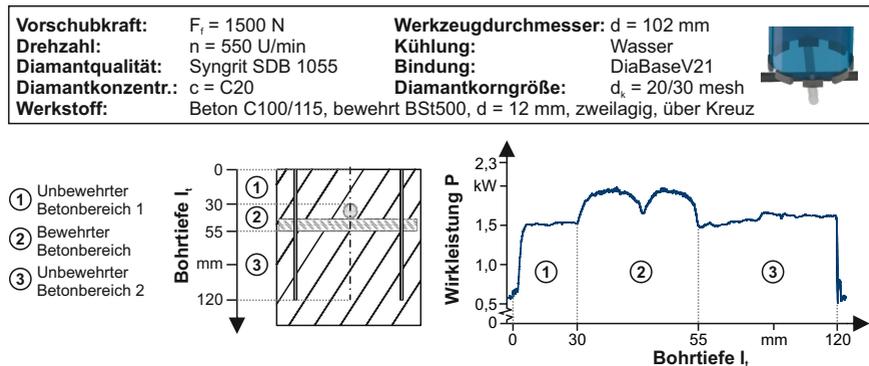


Abbildung 5.7: Exemplarische Darstellung der Wirkleistungsmessung bei einem Kernbohrversuch an hochfestem Stahlbeton nach [94]

5.3.2 Einfluss der Diamantkorngröße und der -konzentration

Zur Analyse des Kernbohrprozesses von hochfestem Stahlbeton werden kraftgeregelte Kernbohrversuche mit einer Vorschubkraft von $F_f = 1500 \text{ N}$ durchge-

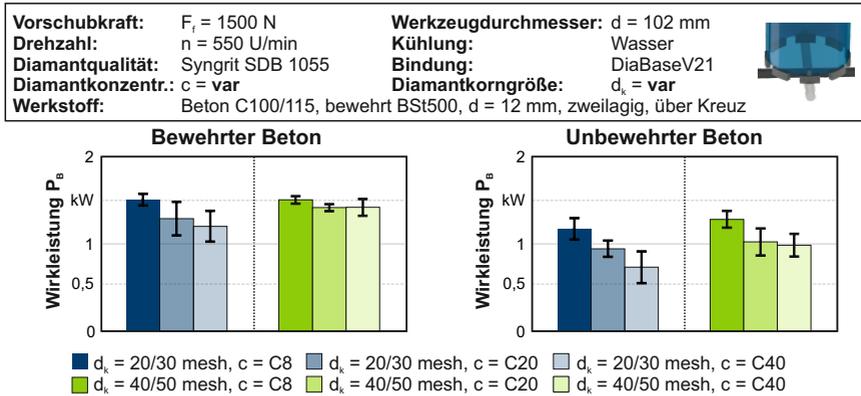


Abbildung 5.8: Ermittelter Einfluss der Diamantkonzentration und -korngröße auf die mittlere Wirkleistung P_B in a) bewehrtem und b) unbewehrtem Beton nach [94]

führt. Untersucht wird der Einfluss der Segmentspezifikation auf die erzielbare Vorschubgeschwindigkeit, die Wirkleistung und auf den Segmentverschleiß. Für die Bewertung der Kernbohrprozesse wird eine Unterscheidung zwischen dem mit den Betonstahlstäben bewehrten Bereich und dem unbewehrten Bereich vorgenommen, wobei nur die in Abbildung 5.3 dargestellten Bereiche ② und ③ ausgewertet werden. Der Bereich ① wird nicht ausgewertet, da dieser den Anbohrvorgang beinhaltet. Dabei werden die Daten aus den ersten vier Kernbohrversuchen, die mit einem Kernbohrwerkzeug durchgeführt werden, herangezogen und für diese der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

Die beim Kernbohren von Beton vom Bohrmotor aufgenommene Wirkleistung P setzt sich vereinfacht aus zwei Anteilen zusammen. Diese umfasst die aufgenommene Wirkleistung im unbelasteten Zustand P_L und die aufgenommene Wirkleistung bei der Materialtrennung bzw. Leistung des Kernbohrprozesses P_B . Da bei der Durchführung der Kernbohrprozesse die aufgenommene Wirkleistung des Bohrmotors P gemessen wurde, ist die gemessene Wirkleistung um die Leerlaufleistung von ca. $P_L = 650 \text{ W}$ zu vermindern, um die für den Bohrprozess notwendige Wirkleistung P_B bestimmen zu können.

Abbildung 5.8 zeigt den Einfluss der Segmentspezifikation auf die zum Bohren des hochfesten Stahlbetons aufgenommene Wirkleistung P_B . Der Vergleich der Wirkleistung bei dem bewehrten Bereich und dem unbewehrten Bereich zeigt, dass unabhängig von der Segmentspezifikation eine höhere Wirkleistung bei der Durchtrennung des bewehrten Betons vorliegt.

Bei der Diamantkorngröße $d_k = 20/30 \text{ mesh}$ ist mit steigender Diamantkonzentration c sowohl im bewehrten als auch unbewehrten Beton eine Abnahme der Wirkleistung beobachtbar. Tendenziell liegt auch bei der Diamantkorngröße $d_k = 40/50 \text{ mesh}$ eine Abnahme der Wirkleistung mit zunehmender Diamantkonzentration vor. Allerdings ist der Unterschied zwischen der mittleren Einstellung der Diamantkonzentration und der hohen Diamantkonzentration im unbewehrten Beton sehr gering. Im bewehrten Beton liegen nahezu identische Werte vor.

In beiden Fällen überlappen die Intervalle der Standardabweichung, sodass kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen besteht. Während bei einer Diamantkonzentration von $c = C8$ hinsichtlich der Wirkleistung kein Unterschied zwischen den beiden Diamantkorngrößen erkannt werden kann, sind mit steigender Diamantkonzentration Unterschiede zwischen den beiden Diamantkorngrößen sichtbar. So liegen sowohl im bewehrten als auch unbewehrten Beton kleinere Wirkleistungen bei der größeren Diamantkorngröße von $d_k = 20/30$ mesh vor.

Abbildung 5.9 a) zeigt die erzielten Vorschubgeschwindigkeiten v_f sowie b) die korrespondierenden bezogenen Zeitspanvolumina Q'_w . Die erzielbare Vorschubgeschwindigkeit v_f ist ein beim Kernbohren von Beton üblicher Kennwert, da mithilfe dieser Größe die Bearbeitungszeit und entsprechend auch die Arbeitskosten berechnet werden können. Die Vorschubgeschwindigkeit beim Diamantkernbohren kann über die Bohrtiefe l_t und die dazu notwendige Zeit t_{Bohr} nach Formel 5.2 bestimmt werden. Da die Versuche mit einem Industrieroboter durchgeführt werden, ist die Bohrtiefe eine in die Steuerung einzugebende Größe. Die notwendige Zeit für die Bohrung kann dagegen auf Grundlage der gemessenen Wirkleistungsdaten ermittelt werden.

$$v_f = \frac{l_t}{t_B} \quad (5.2)$$

Das bezogene Zeitspanvolumen ergibt sich aus dem zerspannten Volumen V_w , in diesem Fall in Form eines Rings, der notwendigen Zeit t_{Bohr} und der Breite der eingesetzten Segmente b_{seg} nach Formel 5.3. Die Angabe des bezogenen Zeitspanvolumens dient der übergeordneten Vergleichbarkeit mit anderen Schleifprozessen. Da für die Bestimmung der Vorschubgeschwindigkeit und des bezogenen Zeitspanvolumens dieselbe Datenbasis genutzt wird, weisen beide Kennwerte qualitativ den gleichen Verlauf auf.

$$Q'_w = \frac{Q_w}{b_{seg}} = \frac{V_w}{t_B} \cdot \frac{1}{b_{seg}} \quad (5.3)$$

Die Ergebnisse für die Bohrversuche in Abbildung 5.9 zeigen, dass die erzielbaren Vorschubgeschwindigkeiten im unbewehrten Beton mindestens um den Faktor 1,5 höher sind als im bewehrten Beton. Bei der Diamantkorngröße $d_k = 20/30$ mesh liegt ein gegenläufiger Einfluss der Diamantkonzentration auf die Vorschubgeschwindigkeit im bewehrten und unbewehrten Beton vor. Während im bewehrten Beton eine höhere Diamantkonzentration zu einem Anstieg der Vorschubgeschwindigkeit führt, tritt im unbewehrten Beton eine Abnahme der erzielbaren Vorschubgeschwindigkeit auf. Für die Diamantkorngröße $d_k = 40/50$ mesh zeigt sich die maximale Vorschubgeschwindigkeit sowohl im bewehrten als auch unbewehrten Beton bei der mittleren Einstellung der Diamantkonzentration von $c = C20$. Die anderen Einstellungen $c = C8$ und $c = C40$ folgen dagegen dem beobachteten Trend, der bei der Diamantkorngröße $d_k = 20/30$ mesh vorliegt. Im bewehrten Beton ist mit einer höheren Diamantkonzentration von $c = C40$ eine höhere Vorschubgeschwindigkeit erreichbar, wohingegen im unbewehrten Beton mit einer kleineren Diamantkonzentration von $c = C8$ eine höhere Vorschubgeschwindigkeit erzielt werden kann.

In Abbildung 5.10 a) sind die Werte des spezifischen Verschleißes dargestellt. Dieser ist ein zur Beschreibung der Standzeit von Diamantkernbohrwerkzeugen

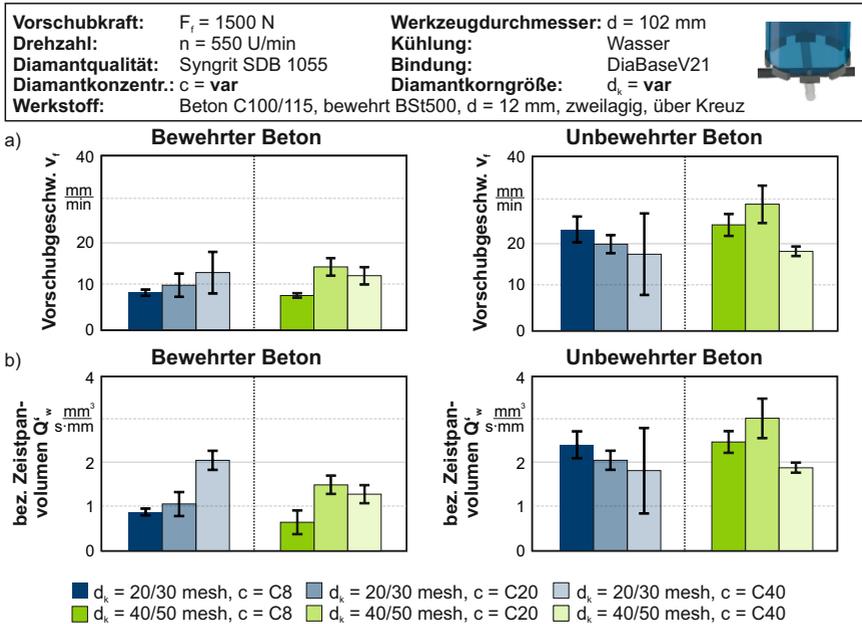


Abbildung 5.9: Erzielte Vorschubgeschwindigkeiten und korrespondierende Zeitspanvolumina beim Kernbohren in a) bewehrtem und b) unbewehrtem Beton nach [94]

üblicher Kennwert [27] und stellt das Verhältnis der Höhenabnahme der Segmente Δh_{seg} zur mit diesen Segmenten erzielten Gesamtböhrtiefe $l_{t,\text{ges}}$ dar. Alternativ ist auch die Angabe des Kehrwerts, die „spezifische Bohrerstandlänge“, möglich [23]. Auf Grundlage des spezifischen Verschleißes kann in Abhängigkeit von der Segmenthöhe die maximal mögliche Böhrtiefe bzw. die Standzeit eines Bohrerwerkzeugs abgeschätzt werden. Bei den nachfolgend gezeigten Ergebnissen wurde der Gesamtverschleiß betrachtet, ohne eine Unterscheidung zwischen bewehrten und unbewehrtem Betonbereich.

Neben dem spezifischen Verschleiß ist in Abbildung 5.10 b) das G-Verhältnis, auch G-Wert, Gütefaktor oder Abtragsquotient [45, 160] dargestellt. Das G-Verhältnis ist ein in der Schleiftechnik üblicher Kennwert zur Beschreibung des Verschleißverhaltens von Schleifscheiben und berechnet sich nach Formel 5.4 aus dem abgetragenen Materialvolumen V_w in Relation zum Schleifscheibenverschleißvolumen V_s . Beispielhaft sei das G-Verhältnis für die Bearbeitung von Werkzeug- und Schnellarbeitsstählen mit Korundschleifscheiben angeführt, das meist $G < 40$ ist [149]. Die Darstellung des G-Verhältnisses dient, wie bei dem bezogenen Zeitspanvolumen, lediglich einer übergeordneten Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Untersuchungen.

$$G = \frac{V_w}{V_s} \tag{5.4}$$

Vorschubkraft:	$F_f = 1500 \text{ N}$	Werkzeugdurchmesser:	$d = 102 \text{ mm}$	
Drehzahl:	$n = 550 \text{ U/min}$	Kühlung:	Wasser	
Diamantqualität:	Syngrit SDB 1055	Bindung:	DiaBaseV21	
Diamantkonzentr.:	$c = \text{var}$	Diamantkorngröße:	$d_k = \text{var}$	
Werkstoff:	Beton C100/115, bewehrt BSt500, $d = 12 \text{ mm}$, zweilagig, über Kreuz			

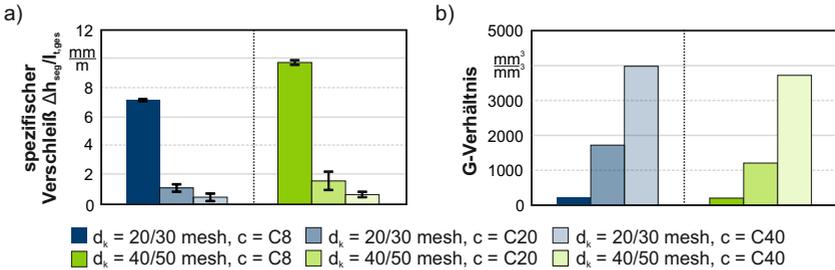


Abbildung 5.10: a) Spezifischer Segmentverschleiß und b) G-Verhältnis beim Kernbohren von Stahlbeton erweiterte Darstellung nach [94]

Beim Diamantkernbohren ergibt sich das Materialvolumen V_w nach Formel 5.5 durch die Fläche des erzeugten Kreisrings A_{Ring} und der Bohrtiefe l_t .

$$V_w = l_t \cdot A_{\text{Ring}} \quad (5.5)$$

Das Schleifscheibenverschleißvolumen V_s kann vereinfacht nach Formel 5.6 aus der Höhenabnahme der Segmente Δh_{seg} und der Grundfläche der Segmente A_{seg} bestimmt werden.

$$V_s = \Delta h_{\text{seg}} \cdot A_{\text{seg}} \quad (5.6)$$

Sowohl für die Diamantkorngröße $d_k = 20/30$ mesh als auch $d_k = 40/50$ mesh ist in Abbildung 5.10 für die geringe Diamantkonzentration von $c = \text{C8}$ ein deutlich höherer Verschleiß im Vergleich zu den Diamantkonzentrationen von $c = \text{C20}$ und C40 zu sehen. Dabei zeigt sich, dass je höher die Diamantkonzentration, desto geringer ist der spezifische Verschleiß. Für die Diamantkorngröße $d_k = 20/30$ mesh ist der spezifische Verschleiß unabhängig von der Diamantkonzentration, kleiner als für die Diamantkorngröße $d_k = 40/50$ mesh.

Eine energetische Beurteilung des Einflusses der Segmentspezifikation kann durch die Berechnung der notwendigen Energie pro Materialeinheit erfolgen. Dieser Kennwert, der als bezogene Energie e_v bezeichnet werden soll, kann nach Formel 5.7 berechnet werden, wobei als Eingangsdaten die Wirkleistung P_B , die Zeit der Bohrung t_B und das abgetrennte Materialvolumen V_w dienen. Der Kennwert ist vergleichbar mit der spezifischen Ritzenergie e_r nach Formel 2.4, die im Rahmen der Analysen der Ritzversuche in Kapitel 4.6.4 ermittelt wurde.

$$e_v = \frac{E}{V_w} = \frac{(P_B \cdot t_B)}{V_w} \quad (5.7)$$

Das Optimum entspricht hierbei einem minimalen Wert, da möglichst wenig Energie pro Volumeneinheit zur Materialtrennung aufgebracht werden soll. Abbil-

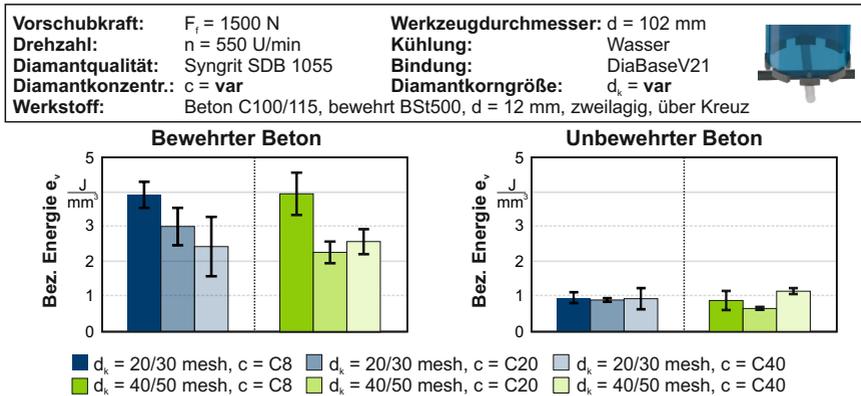


Abbildung 5.11: Einfluss der Diamantkonzentration und -korngröße auf die Energie pro Materialvolumen in a) bewehrtem und b) unbewehrtem Beton

Abbildung 5.11 zeigt, dass sowohl im bewehrten als auch im unbewehrten Beton die minimalen Werte der bezogenen Energie bei der Diamantkorngröße $d_k = 40/50 \text{ mesh}$ und einer Diamantkonzentration von $c = \text{C20}$ gegeben sind. Bei der Diamantkorngröße $d_k = 20/30 \text{ mesh}$ zeigt sich im bewehrten Beton eine Abnahme der bezogenen Energie mit zunehmender Diamantkonzentration. Dahingegen kann im unbewehrten Beton aufgrund identischer Werte für alle Einstellungen der Diamantkonzentration kein Trend erkannt werden.

Durch die kombinierte Darstellung der bezogenen Energie und des spezifischen Segmentverschleißes kann ein Optimum der getesteten Segmentspezifikationen hinsichtlich des Einsatzverhaltens ermittelt werden, siehe Abbildung 5.12. Für beide Kennwerte sollten möglichst kleine Werte vorliegen. Dementsprechend liegt das Optimum im linken unteren Bereich des in Abbildung 5.12 dargestellten Diagramms. Da für den spezifischen Verschleiß keine Unterscheidung zwischen dem bewehrten und unbewehrten Bereich vorgenommen wird, ist auch die bezogene Energie auf die Gesamtbohrung umzurechnen. Das heißt, dass die Werte der bezogenen Energie e_v für den bewehrten und unbewehrten Beton entsprechend der Anteile an der Bohrungslänge berücksichtigt sind, um die bezogene Energie $e_{v, \text{ges}}$ für die gesamte Bohrung bestimmen zu können. Sowohl für die bezogene Energie als auch den spezifischen Verschleiß sind die Standardabweichungen durch Fehlerbalken dargestellt. Auf Grundlage dieser Darstellung kann die getestete Segmentspezifikation mit einer Diamantkorngröße $d_k = 20/30 \text{ mesh}$ und einer Diamantkonzentration von $c = \text{C40}$ als Optimum angesehen werden.

5.3.3 Ergebnisdiskussion

Beim Kernbohren von hochfestem Stahlbeton tritt beim Durchtrennen der Stahlbewehrung ein Anstieg der notwendigen Wirkleistung bei einer gleichzeitig kleineren erzielbaren Vorschubgeschwindigkeit auf. Dies befindet sich in Übereinstimmung mit Ergebnissen von *Bullen* und *Brown*, die Kernbohrversuche an normalfestem Stahlbeton durchgeführt haben [23]. In Abhängigkeit der Diamantkorn-

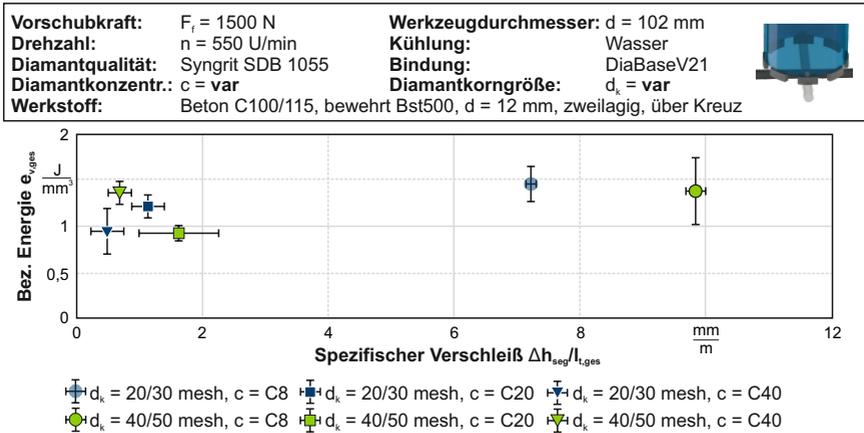


Abbildung 5.12: Darstellung der Energie pro Materialvolumen $e_{v,ges}$ über dem spezifischen Verschleiß $\Delta h_{seg}/l_{t,ges}$ zur Identifikation des Optimums der getesteten Segmentspezifikationen

größe und -konzentration können unterschiedliche Auswirkungen auf die Wirkleistung und Vorschubgeschwindigkeit ermittelt werden. Jedoch zeigt sich bei beiden Diamantkorngrößen, dass bei der gewählten Diamantkonzentration von $c = C8$ ein deutlich höherer Verschleiß im Vergleich zu den anderen beiden Diamantkonzentrationen vorliegt. Aus diesem Grund muss diese Einstellung der Diamantkonzentration für die Bearbeitung von hochfestem Stahlbeton als ungeeignet eingestuft werden. Ausgehend von den Ergebnissen der Einsegmentversuche ist davon auszugehen, dass bei dieser Diamantkonzentration zu wenig Diamantkörner auf der Oberfläche der Segmente vorliegen, sodass ein umfangreicher abrasiver Bindungsverschleiß vorliegt.

Tendenziell zeigt sich eine Abnahme der notwendigen Wirkleistung bei einer höheren Diamantkonzentration sowie einer größeren Diamantkorngröße. Bei der Diamantkorngröße $d_k = 20/30$ mesh steigt im bewehrten Beton die erzielbare Vorschubgeschwindigkeit mit einer höheren Diamantkonzentration an, während im unbewehrten Beton eine Abnahme vorliegt. Durch eine höhere Diamantkonzentration wird bei den durchgeführten Versuchen die Anzahl von schneidfähigen aktiven Diamanten größer, gleichzeitig verringert sich hierdurch der Spanraum. Die Abnahme der Vorschubgeschwindigkeit im unbewehrten Beton wird daher wahrscheinlich auf einen zu geringen Spanraum zurückzuführen sein. Hierdurch ist der Umfang von Reibungsvorgängen zwischen den abgetragenen Materialpartikeln und den Segmenten des Diamantkernbohrwerkzeugs erhöht und die maximal erreichbaren Einzelkornspannungsdicke sind verringert. In bewehrtem Beton ist dagegen eine größere Anzahl von Diamantkörnern notwendig, um über die gesamte Segmentbreite Material abtrennen zu können und damit einen Kontakt zwischen Bindungsmatrix und Stahl zu verhindern. Da hier die Vorschubgeschwindigkeit bzw. das Zeitspanvolumen verringert ist, ist der vorhandene Spanraum ausreichend.

Der Effekt, der durch die verbesserte Materialtrennung bei einer größeren Dia-

mantkonzentration hervorgerufen wird, muss dabei die Auswirkungen des geringeren freien Volumens übertreffen. Diese Annahme wird durch das vorliegende Optimum bei der Diamantkorngröße $d_k = 40/50$ mesh mit einer Diamantkonzentration von $c = C20$ deutlich. Bei einer zu geringen Diamantkonzentration liegen höhere Wirkleistungen und Energiewerte aufgrund der Reibung zwischen der Bindungsmatrix und dem Werkstückmaterial vor. Dies führt gleichzeitig zu einem höheren Verschleiß. Auf der anderen Seite führt eine zu hohe Diamantkonzentration zu einem geringen freien Spanraum, sodass die Reibung zwischen dem abgetrennten Material und den Segmenten zunimmt. Die steigende Diamantkornanzahl reduziert des Weiteren die erzielbare Einzelkornspannungsdicke, wodurch die Einzelkornkräfte absinken. Hierdurch kann das Auftreten von verrundeten und/oder angeflachten Diamanten ansteigen, wodurch die erzielbare Vorschubgeschwindigkeit des Diamantkernbohrwerkzeugs herabgesetzt wird.

5.4 Zwischenfazit

Die Ergebnisse bei den Einsegment- und Diamantkernbohrversuchen zeigen, dass die mechanische Belastung der Werkzeuge beim Durchtrennen der Stahlphase bzw. des bewehrten Bereichs größer ist als die Belastung beim Durchtrennen des unbewehrten Bereichs. Dies steht sowohl in Übereinstimmung mit den in dieser Arbeit ermittelten Untersuchungen zum Einkornritzen an Stahlbeton in Kapitel 4.5.6 als auch mit den Erkenntnissen des Stands der Technik in Kapitel 2.6. Die unterschiedlich hohen Belastungen sind in den verschiedenen Materialeigenschaften und damit auftretenden Materialtrennungsmechanismen begründet. Im Beton ist aufgrund der sprödharten Materialeigenschaften der Ritzspurquerschnitt größer als die Diamantquerschnittsfläche. Dagegen erfolgen im Stahl elastische und plastische Verformungen aufgrund der zähelastischen Materialeigenschaften. In der Folge ist der Ritzspurquerschnitt kleiner als die Diamantquerschnittsfläche. Ausgehend von den bei den Einkornritzversuchen gewonnenen Erkenntnissen, vgl. Kapitel 4.5.6, kann geschlossen werden, dass im Stahl unterschiedliche Mechanismen der Materialtrennung vorliegen. Dabei wird der größere Anteil des Materials mehrere Male plastisch verdrängt, bevor dieses aufgrund einer Materialversprödung von der Oberfläche abbricht. Ein kleinerer Teil wird dagegen direkt durch die Entstehung eines Spans abgetrennt. Daraus lässt sich ableiten, dass bei der Bearbeitung der Stahlphase mehr aktive Diamanten notwendig sind als bei der Bearbeitung der Betonphase. Beim Diamantkernbohren von hochbewehrtem Stahlbeton erscheint daher der Einsatz von diamantimprägnierten Segmenten mit einer erhöhten Diamantkornkonzentration sinnvoll, da hierdurch eine verbesserte Durchtrennung der Stahlphase möglich ist.

Auf Grundlage der Einsegmentversuche können Rückschlüsse zum Verschleißverhalten diamantimprägnierter Werkzeuge gezogen werden. So zeigt sich, dass bei einer unzureichenden Anzahl an Diamanten ein erhöhter abrasiver Bindungsver-schleiß durch einen unmittelbaren Kontakt zwischen der metallischen Bindungsmatrix und dem Stahlbeton entsteht. Diese Erkenntnis lässt sich auf die Diamantkernbohrversuche übertragen. Hier ist der spezifische Verschleiß der Segmentspezifikationen mit der geringsten Diamantkonzentration deutlich größer als bei den Spezifikationen mit einer höheren Diamantkonzentration. Auf der anderen Seite führt ein erhöhter Bindungsver-schleiß dazu, dass fortwährend neue scharfkan-

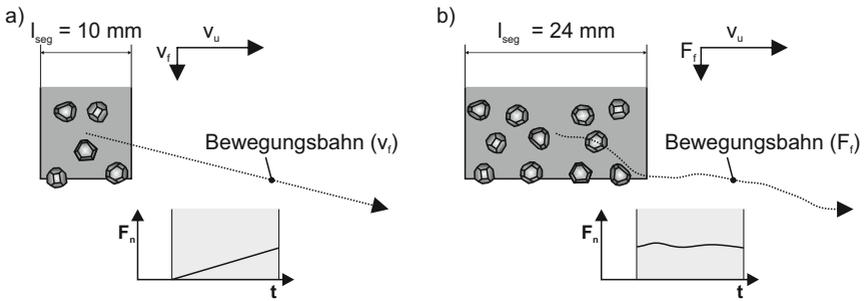


Abbildung 5.13: Schematischer Vergleich zwischen den durchgeführten a) weggeregelten Einsegmentversuchen und den b) kraftgeregelten Diamantkernbohrversuchen

tige Diamantkörner freigelegt werden, weshalb mit einer geringen Diamantkonzentration beim Diamantkernbohren von Beton hohe Vorschubgeschwindigkeiten erzielbar sind.

Einschränkungen hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Einsegmentversuche auf die Diamantkernbohrversuche ergeben sich durch die gewählten Werkzeugabmaße, siehe Abbildung 5.13. Hier ist zu berücksichtigen, dass bei den durchgeführten Einsegmentversuchen die Länge des eingesetzten Segments l_{seg} im Vergleich zu den Segmenten bei den Diamantkernbohrversuchen um mehr als die Hälfte reduziert ist. Dadurch ist die Anzahl der an der Segmentoberfläche vorliegenden Diamanten ebenfalls mehr als halbiert. Hierdurch treten bei den Einsegmentversuchen Verschleißerscheinungen auf, die beim Diamantkernbohren nicht beobachtet werden können. Dies betrifft die Entstehung von mehreren, unterschiedlich tiefen Furchen, die durch den unmittelbaren Kontakt zwischen der Bindungsmatrix und dem Stahlbeton verursacht werden. Die Furchenbildung wird bei den Diamantkernbohrversuchen durch die insgesamt größere Anzahl an Diamantkörnern verhindert.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Einsegment- und Diamantkernbohrversuche ist des Weiteren durch die unterschiedlichen gewählten Vorschubarten eingeschränkt. Dabei beeinflussen die Vorschubarten die auftretenden mechanischen Belastungen und damit auch den Verschleiß der Segmente. Bei den kraftgeregelten Versuchen ist die maximale Normalkraft, die auf das Segment bzw. die einzelnen Diamantkörner wirkt, unabhängig vom aktuellen Zustand des Segments begrenzt. Daraus folgt gleichzeitig, dass die Einzelkornspannungsdicke und die erzielbare Vorschubgeschwindigkeit variabel sind. Die weggeregelte Versuchsmethodik führt bei den Einsegmentversuchen dagegen dazu, dass das Segment in Abhängigkeit des vorgegebenen Vorschubs in die Werkstückoberfläche zugestellt wird. Dies verursacht, z. B. bei einer unzureichenden Anzahl von freigelegten Diamanten, die Entstehung höherer Prozesskräfte, die auf ein einzelnes Segment wirken, als bei den Diamantkernbohrversuchen. Durch die höheren Prozesskräfte kann in der Folge eine Überlastung der Segmente in Form von mechanischen oder thermischen Schädigungen der Diamanten und/oder der Bindung entstehen.

Es kann somit festgestellt werden, dass für die Einsegment- und die Diamantkernbohrversuche eine gute Übertragbarkeit hinsichtlich qualitativer Untersuchungs-

aspekte besteht. So lassen sich die Erkenntnisse zum Einfluss der Diamantkonzentration auf die Materialtrennung in den beiden Materialphasen des Stahlbetons unmittelbar auf die Anwendung bzw. die Entwicklung diamantimprägnierter Werkzeuge übertragen. Dagegen stellt sich die Übertragbarkeit quantitativer Größen als eingeschränkt dar, wobei sich dies im Wesentlichen in der gewählten Versuchsmethodik zu erklären scheint. Aus diesem Grund ist eine Veränderung der Versuchsmethodik vorzusehen, bei der eine Anpassung der gewählten Vorschubart bei den Einsegmentversuchen zu erfolgen hat. Hier ist wie bei den Diamantkernbohrversuchen eine kraftgeregelte Regelung vorzusehen. Darüber hinaus sollte die Segmentform im Einzelsegmentversuch mit der der beim Diamantkernbohren eingesetzten Segmentformen identisch sein, um eine verbesserte Übertragbarkeit der Ergebnisse erzielen zu können.

Für die Anwendung bzw. die Entwicklung von diamantimprägnierten Werkzeugen zeigt sich somit, dass anhand der Versuchsmethodik eine unmittelbare Übertragbarkeit der qualitativen Erkenntnisse hinsichtlich der grundlegenden Vorgänge besteht. So konnte eine unmittelbare Auswirkung der Diamantkonzentration auf die verschiedenen Materialphasen des Stahlbetons festgestellt werden.

Im Rahmen der Prüfung der Übertragbarkeit zwischen den Ergebnissen der Einsegment- und Kernbohrversuche, zeigen sich auch zwischen den Einkornritzversuchen und den Kernbohrversuchen Übereinstimmungen. Als Optimum hinsichtlich der Kennwerte bezogene Energie $e_{v,ges}$ und spezifischer Verschleiß $\Delta h_{seg}/l_{t,ges}$ stellt sich bei den Kernbohrversuchen eine Segmentspezifikation mit einer Diamantkorngröße von $d_k = 20/30$ mesh und einer Diamantkonzentration von $c = C40$ dar. Der Wert der bezogenen Energie $e_{v,ges}$ von $e_{v,ges} \approx 0,8 \text{ J/mm}^3$ steht dabei in guter Übereinstimmung mit den Werten, die bei den kraftgesteuerten Verschleißuntersuchungen der Einkornritzversuche in Kapitel 4.6.4 ermittelt werden können. Bei diesen liegt der Mittelwert der spezifischen Energie e_r über alle Versuche für die pyramidenförmigen Werkzeuge in der Ausrichtung A bei $e_{r,A} \approx 1000 \text{ N/mm}^2 \approx 1 \text{ J/mm}^3$ und in der Ausrichtung B bei $e_{r,A} \approx 1250 \text{ N/mm}^2 \approx 1,25 \text{ J/mm}^3$. Auf der einen Seite scheinen diese geringen Unterschiede erstaunlich, da bei den Ritzversuchen nur das Diamantwerkzeug im Kontakt mit dem Beton steht, während bei den Diamantkernbohrversuchen auch Reibungskräfte und damit Reibungsenergie durch z. B. den Kontakt zwischen dem Bohrschlamm und den Segmenten, den Segmenten und dem Stahlbeton oder dem Bohrrohr und dem Stahlbeton auftritt. Auf der anderen Seite findet beim Diamantkernbohren durch den gleichzeitigen Eingriff einer großen Anzahl von Diamantkörnern eine Interaktion von neben- und/oder hintereinanderliegenden Diamantkörnern statt. Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass dies zu einer energetisch günstigeren Materialtrennung führt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Für die trennende Bearbeitung von Beton und Stahlbeton werden in der Bauindustrie im großen Maßstab diamantimprägnierte Werkzeuge eingesetzt. Durch die Entwicklung von Verfahren, die eine definierte Positionierung der Diamanten innerhalb des Werkzeugvolumens erlauben, bieten sich neue Möglichkeiten hinsichtlich der Optimierung dieser Werkzeuge. Dabei kann durch die definierte Anordnung der Diamantkörner die notwendige Anzahl verringert werden. Hierdurch steigen die Einzelkornbelastungen, sodass die Wichtigkeit der Eigenschaften der einzelnen Diamantkörner, wie z. B. die Diamantkornform, zunimmt.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgten daher auf drei verschiedenen Untersuchungsebenen Analysen zur trennenden Bearbeitung von hochfestem Stahlbeton und seinen Einzelphasen durch diamantimprägnierte Werkzeuge. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Durchführung von Einkornritzversuchen, in dessen Rahmen ein signifikanter Einfluss der Diamantkornform hinsichtlich der Aspekte „Materialtrennungsmechanismen“, „Einfluss der Materialphasen“ und „Verschleißverhalten“ ermittelt werden konnte. Eingesetzt wurden bei diesen Untersuchungen anstatt einzelner Diamantkörner spezielle Diamantwerkzeuge mit definierter Spitzenform. Hierbei wurden pyramidenförmige Diamantwerkzeuge in zwei Ausrichtungen, die zur Nachbildung oktaederförmiger Diamantkörner dienen, sowie konische Diamantwerkzeuge mit verrundeter Spitze eingesetzt, durch die das Einsatzverhalten verrundeter bzw. verschlissener Diamantkörner nachgebildet wird.

Bei den Untersuchungen zu den „Materialtrennungsmechanismen“ konnte eine Abhängigkeit der kritischen Spannungstiefe sowie der Materialtrennungsmechanismen von der Diamantwerkzeugform und dem Beton festgestellt werden. Hierbei zeigte sich anhand von Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen, dass sich die Diamantwerkzeugform insbesondere auf die Bewegungsrichtung des abgetrennten Materials auswirkt.

Für die Analyse des Einflusses unterschiedlicher Materialphasen wurde ein Versuchsaufbau eingesetzt, bei dem das Diamantwerkzeug einer helixförmigen Eingriffsbahn folgt und somit mehrere Male hintereinander bei ansteigender Gesamtzustellung in der gleichen Spur ritzt. Bei diesen Versuchen können unterschiedliche Phasen der Materialtrennung bei Beton und dessen Einzelphasen in Abhängigkeit der Zustelltiefe ermittelt werden. Durch das mehrmalige Ritzen in der gleichen Spur wird durch die Rissinitiierung das Material strukturell geschwächt, sodass zeitweise die Prozesskräfte trotz steigender Gesamtzustellung abhängig von der Diamantwerkzeugform nicht ansteigen oder sogar abfallen. Untersuchungen zum Einfluss der Einzelphasen auf die Bearbeitung des mehrphasigen Betons C100/115 zeigen dagegen keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Prozesskräfte. Für das pyramidenförmige Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B, das eine führende, in Schnittrichtung liegende Schneidkante aufweist, bestehen bei diesen Versuchen die geringsten Prozesskräfte sowie mechanischen Arbeiten. Dies erklärt sich durch die keilartige Form sowie die gesteigerte Rissinitiierung an der führenden Schneidkante. Aus diesem Grund ist diese Diamantform als vorteilhaft für die Bearbeitung mineralischer Werkstoffe anzusehen.

Bei Ritzversuchen an Stahl liegt bei einem Großteil der getesteten Bearbeitungsparametereinstellungen eine Aufbauscheidenbildung vor. Diese führt zu instabilen Prozessen, die sowohl durch hohe Kräfte und ungünstige Materialtrennungs-

mechanismen geprägt sind als auch den Einfluss der Diamantwerkzeugform überdecken. Bei den Versuchen an Stahlbeton tritt keine Aufbauschneidenbildung aufgrund einer kürzeren Kontaktzeit zwischen dem Diamantwerkzeug und der Stahlphase auf. Auf Grundlage des f_{ab} -Wertes, der für die Stahlphase ermittelt wurde, ist für die trennende Bearbeitung von Stahlbeton der Einsatz des pyramidenförmigen Diamantwerkzeugs in der Ausrichtung A als vorteilhaft einzustufen. Der für die Ausrichtung ermittelte höhere f_{ab} -Wert weist dabei darauf hin, dass in einem größeren Umfang das Material abgespannt wird, anstatt plastisch verdrängt zu werden. Die Spanbildung wird dabei durch die quer zur Schnitttrichtung stehende Seitenfläche des pyramidenförmigen Diamantwerkzeugs in der Ausrichtung A begünstigt.

Weitergehende Untersuchungen zum Verschleißverhalten der unterschiedlichen Diamantwerkzeugformen führen zu dem Ergebnis, dass mit dem pyramidenförmigen Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B im Vergleich nur geringe Standwege erzielt werden können. Die hinsichtlich der Materialtrennung als vorteilhaft angesehene Spannungskonzentration an der führenden Schneidkante ist dabei als Ursache für das Erreichen nur geringer Standwege anzusehen. Dagegen wird mit dem Großteil der eingesetzten Diamantwerkzeuge der anderen beiden Spitzenformen das vorgegebene Standzeitende erreicht.

Die konischen Diamantwerkzeuge mit verrundeter Spitze weisen hinsichtlich der untersuchten Aspekte die schlechtesten Eigenschaften auf. Durch die Werkzeugform werden energetisch ungünstige Reibungsvorgänge sowohl bei der Bearbeitung von Beton als auch von Stahl verursacht. Aufgrund der in Relation großen Eingriffsfläche entstehen bei der Bearbeitung von Beton nur geringe Spannungen, weshalb die Materialtrennung durch Rissinitiierung abgeschwächt ist. Gleichzeitig liegt hierdurch nur ein geringer Verschleiß vor, der sich jedoch hinsichtlich der Anwendung diamantimprägnierter Werkzeuge als unvorteilhaft darstellt, da in der Folge der Selbstschärfungsmechanismus gehemmt wird.

Wird davon ausgegangen, dass die Herstellung von diamantimprägnierten Werkzeugen mit definiert gesetzten und ausgerichteten Diamantkörnern möglich ist, kann auf Grundlage der Einkornritzversuche geschlossen werden, dass in Abhängigkeit des Anwendungsfalls der Einsatz unterschiedlicher Diamantkornformen zielführend ist. Unter Vernachlässigung der Standzeit scheint dabei für die Erzielung hoher Vorschubgeschwindigkeiten bei der trennenden Bearbeitung von unbewehrtem Beton der Einsatz von Diamantkörnern vorteilhaft, die wie das pyramidenförmige Diamantwerkzeug in der Ausrichtung B eingesetzt werden. Ist dagegen Stahlbeton zu bearbeiten, sind die Diamantkörner so auszurichten, dass sie zu Kontaktbedingungen wie bei den pyramidenförmigen Diamantwerkzeugen in der Ausrichtung A führen. Der Einsatz dieser Werkzeugform führt dabei nicht nur zu einer verbesserten Materialtrennung in der Stahlphase, sondern erlaubt darüber hinaus die Erzielung längerer Standzeiten.

Die Verringerung der Einflussgrößen bei Einkornritzversuchen ermöglicht die gezielte Analyse einzelner Aspekte. Gleichzeitig ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt, da z. B. der Einfluss der metallischen Bindungsmatrix oder die Interaktion mehrerer neben- oder hintereinander liegender Diamantkörner verloren geht. Um den Einfluss z. B. der Bindung abzubilden, wurden auf einer zweiten Untersuchungsebene bei weggeregelten Versuchen mit einzelnen Segmenten weitergehende Analysen zur Materialtrennung und zum Verschleißverhalten

durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen zeigt sich insbesondere der Einfluss der unterschiedlichen Materialphasen Stahl und Beton. Hierbei kann bei der trennenden Bearbeitung von Beton eine geringere notwendige Diamantkonzentration als bei Stahl ermittelt werden, die sich durch die verschiedenen Materialeigenschaften erklären lassen, die entsprechend zu unterschiedlichen Materialtrennungsmechanismen führen. Dabei darf die Diamantkornkonzentration nicht zu gering gewählt werden, damit eine hinreichende Anzahl an freigelegten Diamantkörnern an der Segmentoberfläche vorliegt. Andernfalls kann ein direkter Kontakt zwischen der metallischen Bindungsmatrix und dem Beton bzw. dem Stahl auftreten. Hierdurch wird ein erhöhter abrasiver Verschleiß der metallischen Bindungsmatrix verursacht, wodurch nur kurze Werkzeugstandzeiten erzielt werden können.

Anwendungsnahe Ergebnisse und Erkenntnisse wurden im Rahmen von Diamantkernbohrversuchen gewonnen, die die dritte Untersuchungsebene der durchgeführten Analysen darstellen. Hierbei wurde das Einsatzverhalten von sechs verschiedenen Segmentspezifikationen bei der Bearbeitung von hochfestem Stahlbeton untersucht und ein Optimum auf Grundlage des Werkzeugverschleißes und der spezifischen Energie ermittelt. Dabei stellt sich eine gute Übertragbarkeit der qualitativen Erkenntnisse der Einsegmentversuche auf die Diamantkernbohrversuche dar. Jedoch besteht auf Grund der unterschiedlichen gewählten Vorschubarten keine Übertragbarkeit der quantitativen Kenngrößen.

Die im Rahmen dieser Arbeiten ermittelten Zusammenhänge, insbesondere auf Ebene von Einkornritz- und Einsegmentversuchen, bieten die Basis zur Erklärung vieler in der Praxis auftretender Probleme, wie z. B. die abnehmende erzielbare Vorschubgeschwindigkeit und die erhöhte Wirkleistung bei der Bearbeitung von Stahlbeton. Gleichzeitig dienen insbesondere die Analysen zum Einfluss der Diamantkornform als Grundlage für die gezielte Optimierung diamantimprägnierter Werkzeuge mit definiert gesetzten Diamantkörnern. Da bei den durchgeführten Analysen auf Ebene der Einkornritzversuche idealisierte Diamantkornformen durch spezielle Diamantwerkzeuge nachgebildet und getestet wurden, ist in weitergehenden Untersuchungen der Einfluss von Diamantformen zu analysieren, die in ihrer Gestalt realen Diamantkörnern entsprechen. Die durchgeführten Verschleißuntersuchungen zeigen, dass die Spitzen sowie die Kanten der Werkzeuge schnell verrunden oder abbrechen. Der entstehende Stumpf stellt somit eine „stabilere“ Form dar. Aus diesem Grund sind Diamantkörner einzusetzen, die die Form eines Kubooktaedern oder eines Oktaederstumpfs aufweisen. Diese müssen dabei definiert in Bezug zur Schnitttrichtung ausgerichtet werden. Auf Ebene von Einsegmentversuchen ist die Umsetzbarkeit und das Einsatzverhalten von diamantimprägnierten Segmenten mit definiert gesetzten und ausgerichteten Diamanten zu untersuchen. Dabei ist eine an den Diamantkernbohrprozess angepasste Vorschubregelung umzusetzen. Die Erstellung dieser Modellsegmente bedarf dabei wahrscheinlich zunächst einer manuellen Setztechnik zur Ermittlung der grundlegenden Zusammenhänge. Des Weiteren könnte jedoch unter Ausnutzung der magnetischen Eigenschaften von Diamantkörnern mit metallischen Einschlüssen oder durch die Ausnutzung elektrostatischer Effekte, ähnlich wie bei Microfinishbändern [1, 146], eine automatisierbare Ausrichtung der Diamantkörner erfolgen.

Literaturverzeichnis

- [1] 3M DEUTSCHLAND GMBH: *Datenblatt 3M 675L Diamond Microfinishing Film*
- [2] ANDERSON, D. ; WARKENTIN, A. ; BAUER, R.: Experimental and numerical investigations of single abrasive-grain cutting. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51 (2011), Nr. 12, S. 898–910
- [3] ANDERSON, D. ; WARKENTIN, A. ; BAUER, R.: Comparison of spherical and truncated cone geometries for single abrasive-grain cutting. In: *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012), Nr. 9, S. 1946–1953
- [4] ANGUS, J. C.: Diamond synthesis by chemical vapor deposition: The early years. In: *12th European Conference on Diamond, Diamond- Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide* 49 (2014), Nr. Supplement C, S. 77–86
- [5] APMANN, H.: *Seilschleifen von metallischen und mineralischen Werkstoffen*. Hannover, Universität Hannover, Dissertation, 2004
- [6] A/S, Struers ; STRUERS A/S (Hrsg.): *RepliSet Broschüre*. pdf-Datei. <https://www.struers.com/-/media/Library/Brochures/German/Repliset.pdf?dmc=1&ts=20190225T1359491266>. Version: 2017. – zuletzt geprüft 15.02.2019
- [7] A/S, Struers ; STRUERS A/S (Hrsg.): *Technisches Datenblatt RepliSet*. pdf-Datei. <http://cdnstruersproduction.azureedge.net/-/media/Struers-media-library/Products/Materialographic-analysis-equipment/RepliSet/RepliSet-Technical-Data-Sheet/Repliset-Tech-German.pdf>. Version: 2017. – zuletzt geprüft 15.02.2019
- [8] AURICH, J. C. ; STEFFES, M.: Single Grain Scratch Tests to Determine Elastic and Plastic Material Behavior in Grinding. In: *Advanced Materials Research* 325 (2011), S. 48–53
- [9] AXINTE, D. ; BUTLER-SMITH, P. ; AKGUN, C. ; KOLLURU, K.: On the influence of single grit micro-geometry on grinding behavior of ductile and brittle materials. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 74 (2013), S. 12–18
- [10] AZARHOUSHANG, B.: Wear of non-segmented and segmented diamond wheels in high-speed deep grinding of carbon fibre-reinforced ceramics. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74 (2014), Nr. 9-12, S. 1293–1302
- [11] BĄCZEK, E. ; KONSTANTY, J. ; ROMAŃSKI, A. ; PODSIADŁO, M. ; CYBOROŃ, J.: Processing and Characterization of Fe-Mn-Cu-Sn-C Alloys Prepared by Ball Milling and Spark Plasma Sintering. In: *Journal of Materials Engineering and Performance* 27 (2018), Nr. 3, S. 1475–1483

- [12] BAILEY, M. ; COLLIN, W.: Untersuchungen über das Sagen und Bohren von Beton mit diamant-titanisierten Metallbindungs-Körnungen. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 12 (1978), Nr. 1, S. 4–11
- [13] BEISS, P.: *Pulvermetallurgische Fertigungstechnik*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978–3–642–32032–3
- [14] BIENERT, P.: Ritzversuche zum Kreissägen von Beton mit Diamantwerkzeugen. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 11 (1977), Nr. 1, S. 17–22
- [15] BIENERT, P.: *Kreissägen von Beton mit Diamantwerkzeugen*. Hannover, Technische Universität Hannover, Dissertation, 1978
- [16] BIERMANN, D. ; KANSTEINER, M.: Herausforderung Stahlbewehrung – Einfluss der Diamantkonzentration. In: *Der Betonbohrer – Fachzeitschrift für Diamanttechnik* (2016), Nr. 39, S. 48–50
- [17] BIERMANN, D. ; KANSTEINER, M. ; JAKIMENKO, D.: Einfluss der Diamantkornform auf die Effizienz der Materialtrennung bei der Bearbeitung von Beton. In: *Diamant Hochleistungswerkzeuge. dihw Magazin* (2018), Nr. 4, S. 22–31
- [18] BOROWIECKA-JAMROZEK, J. ; LACHOCHWSKI, J.: The Effect of the Properties of the Metal Matrix on the Retention of a Diamond Particle. In: *Metalurgija* 56 (2017), Nr. 1/2, S. 83–86
- [19] BOVENKERK, H. P. ; BUNDY, F. P. ; HALL, H. T. ; STRONG, H. M. ; WENTORF JUN., R. H.: Preparation of Diamond. In: *Nature* 184 (1959), S. 1094–1098
- [20] BRINKSMEIER, E. ; GIWERZEW, A.: Chip Formation Mechanisms in Grinding at Low Speeds. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52 (2003), Nr. 1, S. 253–258
- [21] BRINKSMEIER, E. ; GIWERZEW, A.: Hard gear finishing viewed as a process of abrasive wear. In: *15th International Conference on Wear of Materials* 258 (2005), Nr. 1, S. 62–69
- [22] BUHL, S. ; LEINENBACH, C. ; SPOLENAK, R. ; WEGENER, K.: Failure mechanisms and cutting characteristics of brazed single diamond grains. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 66 (2013), Nr. 5, S. 775–786
- [23] BULLEN, G. J. ; BROWN, W.: Verschleissverhalten von Diamant-Bohrkronen beim Einsatz auf Beton mit hochfester Stahlarmierung. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 18 (1984), Nr. 1, S. 10–18
- [24] BUNDY, F. P. ; HALL, H. T. ; STRONG, H. M. ; WENTORF JUN., R. H.: Man-Made Diamonds. In: *Nature* 176 (1955), S. 51–55
- [25] BURNS, R. C. ; DAVIES, G. J.: Growth of Synthetic Diamond. In: FIELD, J. E. (Hrsg.): *The properties of natural and synthetic diamond*. London : Acad. Press, 1992. – ISBN 0–12–255352–7, S. 395–422

- [26] BUSCH, D. M.: *Ritz- und Verschleißuntersuchungen an spröden Werkstoffen mit einzelkornbestückten Hartstoffwerkzeugen*. Hannover, Technische Universität Hannover, Dissertation, 1968
- [27] BUSCH, D. M. ; HILL, B. S.: Concrete Drilling with Diamond Impregnated Bits. In: DE BEERS INDUSTRIAL DIAMOND DIVISION (Hrsg.): *Diamond Information L34 Drilling and sawing concrete with diamond tools*. 1975, S. 1–5
- [28] BUSCH, D. M. ; WALKER, R. D.: Das Sägen von Beton und Stahlbeton mit Diamant-Sägeblättern. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 6 (1972), Nr. 4, S. 177–186
- [29] BUSHMARIN, A.: *Eiche forges ahead with breakthrough diamond technology*. Internetseite. <http://www.pdworld.com/articles/view/eiche-forges-ahead-with-breakthrough-diamond-technology>. Version: 15.4.2015. – zuletzt geprüft 15.02.2019
- [30] CARPINTERI, A. ; DIMASTROGIOVANNI, L. ; PUGNO, N.: Fractal coupled theory of drilling and wear. In: *International Journal of Fracture* 131 (2005), Nr. 2, S. 131–142
- [31] CLARK, I. E. ; KAMPHUIS, B. J.: De Beers Industrial Diamond Division: Cobalite HDR: a new prealloyed matrix powder for diamond construction tools. In: *Industrial Diamond Review* 62 (2002), Nr. 594, S. 177–182
- [32] CLAUSEN, R. ; MEDING, M.: Untersuchungen zum Spanbildungsprozeß beim Gestein. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 28 (1994), Nr. 4, S. 224–227
- [33] DAI, J. ; SU, H. ; HU, H. ; YU, T.i ; ZHOU, W. ; DING, W. ; JI, S. ; ZHENG, Y.: The influence of grain geometry and wear conditions on the material removal mechanism in silicon carbide grinding with single grain. In: *Ceramics International* 43 (2017), Nr. 15, S. 11973–11980
- [34] DENKENA, B. ; BECKER, J. C. ; APMANN, H. ; BOCKHORST, J.: Werkzeugauslegung für die Bearbeitung von Stahlbeton. In: *Entwicklungen in der Naturstein- und Bauwerkstoffbearbeitung, IFW-Steinkolloquium, IFW-Steinkolloquium, 5 Bd. 9*. Hannover : PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2004. – ISBN 3–936888–49–3, S. 181–191
- [35] DENKENA, B. ; BECKER, J. C. ; GIERSE, A.: Examination of basic separation mechanisms for machining concrete and stone. In: *Production Engineering. Research and Development* 11 (2004), Nr. 2, S. 23–28
- [36] DENKENA, B. ; BOCKHORST, J. ; SEIFFERT, F.: Auslegung von Schneidkörpern für das Seilschleifen. Mehrkornritzuntersuchungen als Basis für die Trennmechanismen-basierte Auslegung von Schneidperlen: Layout of cutting segments for the wire sawing process. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009), Nr. 5, S. 340–347

- [37] DENKENA, B. ; GROVE, T. ; ERMISCH, A. ; GÖTTSCHING, T.: Material Removal Simulation of Cut-off grinding Processes for an adapted Tool Design. In: THEISEN, W. (Hrsg.) ; DENKENA, B. (Hrsg.) ; TILLMANN, W. (Hrsg.): *ICSCM, 3rd International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Bochum, 2015. – ISBN 987-3-943063-20-2, S. 146-156
- [38] DENKENA, B. ; KÖHLER, J.: Stahlbetonbearbeitung mit gesetzten Trennschleifwerkzeugen. Ritzuntersuchungen zu Materialtrennmechanismen von Stahl-Beton-Verbunden: Machining of reinforced concrete using grinding wheels with defined grain pattern. In: *wt Werkstattstechnik online* 101 (2011), Nr. 6, S. 398-406
- [39] DENKENA, B. ; KÖHLER, J. ; ERMISCH, A.: Material Removal Simulation of Wire Cutting Processes for an adapted Tool Design. In: TILLMANN, W. (Hrsg.) ; THEISEN, W. (Hrsg.) ; DENKENA, B. (Hrsg.) ; MAIER, H. J. (Hrsg.) ; BACH, F.-W. (Hrsg.): *ICSCM, 2nd International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Dortmund : Verlag Praxiswissen, 2013. – ISBN 978-3-86975-088-0, S. 119-124
- [40] DENKENA, B. ; KÖHLER, J. ; KONOPATZKI, B. ; BUHL, J. C. ; RAHMAN, S. ; ROBBEN, L.: Trennschleifen von Beton und Stahlbeton. Einfluss der Gefügebestandteile auf die Bearbeitungseigenschaften. In: *Diamant Hochleistungswerkzeuge. dihw Magazin* 2 (2010), Nr. 4, S. 42-53
- [41] DENKENA, B. ; KÖHLER, J. ; SEIFFERT, F.: Deterministic Grain Distribution on Cut-Off Grinding Wheels. In: DENKENA, B. (Hrsg.) ; BACH, F.-W. (Hrsg.) ; TILLMANN, W. (Hrsg.) ; THEISEN, W. (Hrsg.): *ICSCM, 1st International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Garbsen : PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2011. – ISBN 978-3-943104-22-6, S. 99-104
- [42] DENKENA, B. ; KÖHLER, J. ; SEIFFERT, F.: Trennschleifen von Beton und Stahlbeton. Auslegung von Seilschleifwerkzeugen. In: *Diamant Hochleistungswerkzeuge. dihw Magazin* 3 (2011), Nr. 2, S. 20-30
- [43] DENKENA, B. ; KÖHLER, J. ; SEIFFERT, F. ; ERMISCH, A.: Trennschleifen von Beton und Stahlbeton. Geometrisch bestimmte Schneidstoffanordnung auf Trennschleifscheiben. In: *Diamant Hochleistungswerkzeuge. dihw Magazin* 3 (2011), Nr. 1, S. 38-43
- [44] DENKENA, B. ; KONOPATZKI, B. ; SEIFFERT, F. ; KNOBEL, R.: Einsatz hochharter Schneidstoffe beim Schleifen. Trennschleifen von Natur- und Kunststein. In: *Diamant Hochleistungswerkzeuge. dihw Magazin* 1 (2009), Nr. 4, S. 32-39
- [45] DENKENA, B. ; TÖNSHOFF, H. K.: *Spanen: Grundlagen*. 3., bearb. u. erw. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. – ISBN 978-3-642-19771-0
- [46] DENKENA, B. ; TÖNSHOFF, H. K. ; BECKER, J. C. ; BOCKHORST, J. ; HILLMANN-APMANN, H.: Materialtrennmechanismen an Stahl- und Betonmaterial. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 37 (2003), Nr. 2, S. 124-131

- [47] DENKENA, B. ; TÖNSHOFF, H. K. ; BECKER, J. C. ; BOCKHORST, J. ; HILLMANN-APMANN, H.: The mechanisms of material separation at steel and concrete material: Die Mechanismen der Werkstofftrennung von Stahl und Beton. In: *Meeting the Challenges of a Changing Market Place, Euro PM, European Powder Metallurgy Conference, 2003*. Bellstone, Shrewsbury : European Powder Metallurgy Association (EPMA), 2003. – ISBN 1-899072-17-9, S. 87–95
- [48] DERJAGUIN, B. V. ; FEDOSEEV, D. B.: The synthesis of diamond at low pressure: Natural diamonds and most man-made ones form at high pressure. It is also possible to synthesize diamond by growing it from existing diamonds in a low-pressure gas rich in carbon. In: *Progress in Surface Science* 45 (1994), Nr. 1, S. 57–64
- [49] DERJAGUIN, B. V. ; FEDOSEEV, D. V.: Physico-chemical synthesis of diamond in metastable range. In: *Carbon* 11 (1973), Nr. 4, S. 299–308
- [50] D’HAENENS-JOHANSSON, U. F. S. ; KATRUSHA, A. ; MOE, K. S. ; JOHNSON, P. ; WANG, W.: Large colorless HPHT synthetic diamonds from New Diamond technology peer reviewed article. In: *Gems and Gemology* 51 (2015), Nr. 3
- [51] DHOKEY, N. B. ; UTPAT, K. ; GOSAVI, A. ; DHOKA, P.: Hot-press sintering temperature response of diamond cutting tools and its correlation with wear mechanism. In: *Special Section: Recent Advances of Functionally Graded Hard Materials* 36 (2013), S. 289–293
- [52] DIN 12504-1: *DIN EN 12504-1 - Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 1: Bohrkernproben - Herstellung, Untersuchung und Prüfung der Druckfestigkeit*. 2009
- [53] DIN 488-1: *Betonstahl - Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung*. 2009-08-00
- [54] DIN 58744-1: *Optikfertigung – Diamantbesetzte Bohrschleifkörper – Teil 1: Mit Anschlussgewinde*. 2017
- [55] DIN 8580: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. 2003
- [56] DIN 8589-2: *Fertigungsverfahren Spanen - Teil 2*. 2003
- [57] DIN EN 12930-3: *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. 2017
- [58] DIN EN 206: *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013*. 2014
- [59] DIN EN 206-1: *Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Juli 2001
- [60] DIN ISO 6106: *Schleifmittel - Überprüfung der Korngrößen von Diamant oder kubischem Bornitrid*. 2015

- [61] DIN8589-11: *Fertigungsverfahren Spanen - Teil 11*. 2003
- [62] DOMBOVARI, Z. ; IGLESIAS, A. ; ZATARAIN, M. ; INSUPERGER, T.: Prediction of multiple dominant chatter frequencies in milling processes. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51 (2011), Nr. 6, S. 457–464
- [63] DONALDSON, K. Y. ; HASSELMAN, D. P. H.: Comparative single-point diamond scratching behavior of a cordierite glass and glass-ceramic. In: *Journal of the American Ceramic Society* 69 (1986), Nr. 12, S. c. 296–c. 298
- [64] DR. FRITSCH GMBH & CO. KG: *Sintering data sheet Diabase-V21*. pdf-Datei. http://www.dr-fritsch.de/tl_files/metallpulver/diabase_diamix/englisch/diabase-v21.pdf. – zuletzt geprüft 15.02.2019
- [65] DR. FRITSCH GMBH & CO. KG: *Produktionsablauf "Bohrkronne"*. Internetseite. <http://dr-fritsch.de/index.php/bohrkronen.html>. Version: 2018. – zuletzt geprüft 15.02.2019
- [66] DRESSELHAUS, M. S. ; DRESSELHAUS, G. ; EKLUND, P. C.: *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes: Their Properties and Applications*. 1. Aufl. s.l. : Elsevier, 1996. – ISBN 978-0-12-221820-0
- [67] DWAN, J. D.: Production of diamond impregnated cutting tools. In: *Powder Metallurgy* 41 (1998), Nr. 2, S. 84–86
- [68] EGAN, D. ; ENGELS, J. A.: Der Einsatz von beschichtetem Diamantkorn in imprägnierten Werkzeugen - Teil 1. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 39 (2005), Nr. 2, S. 184–187
- [69] EGAN, D. ; MELODY, S. ; BROSNAN, E.: A Study of the Use of Encapsulated Diamond in the Cutting of Concrete. In: DENKENA, B. (Hrsg.) ; BACH, F.-W. (Hrsg.) ; TILLMANN, W. (Hrsg.) ; THEISEN, W. (Hrsg.): *ICSCM, 1st International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Garbsen : PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2011. – ISBN 978-3-943104-22-6, S. 157–161
- [70] ENGELS, A.: The role of particles per carat in diamond tool behaviour. In: *Industrial Diamond Review* 63 (2003), Nr. 2, S. 39–45
- [71] ERTINGSHAUSEN, W.: *Zerspanung von Granit mit Diamant-Trennschleifscheiben*. Hannover, Universität Hannover, Dissertation, 1985
- [72] FACHVERBAND BETONBOHREN UND SÄGEN E.V.: *Handbuch Betonbohren und -sägen*. [Bergisch Gladbach] : Fachverb. Betonbohren und -sägen Deutschland, 1999. – ISBN 3-00-005845-1
- [73] FELDHOFF, M.: *Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duromere*. Dortmund, Technische Universität Dortmund, Dissertation, 2012

- [74] FERRO, S.: Synthesis of diamond. In: *Journal of Materials Chemistry* 12 (2002), Nr. 10, S. 2843–2855
- [75] FRANCA, L. F. P. ; MOSTOFI, M. ; RICHARD, T.: Interface laws for impregnated diamond tools for a given state of wear. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 73 (2015), Nr. 0, S. 184–193
- [76] GALLAGHER, J. ; SCANLON, P. ; NAILER, S.: Characterisation techniques for the study of high-strength, coarse diamond. In: *Industrial Diamond Review* 66 (2006), Nr. 3, S. 58+60–65
- [77] GIWERZEW, A.: *Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen*. Bd. 19: *Spanbildungsmechanismen und tribologisches Prozeßverhalten bei Schleifen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten*. Aachen : Shaker, 2003. – ISBN 3–8322–1685–5
- [78] GLATZEL, T.: *Trennschleifen von Granit mit dünnen Werkzeugen*. Hannover, Universität Hannover, Dissertation, 2004
- [79] GRIMM, R.: *Die Geschichte des Baustoffes Beton*. <http://www.baustoffwissen.de/wissen-baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe/beton/baustoff-beton-geschichte/>. Version: 02.04.2014. – zuletzt geprüft 15.02.2019
- [80] GRÜBL, P. ; WEIGLER, H. ; KARL, S.: *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Aufl. Berlin : Ernst&Sohn, 2001 (Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau). – ISBN 978–3433013403
- [81] HACKELSBERGER, C.: *Bauwelt-Fundamente Materialfragen, Umgang mit Baustoffen*. Bd. 79: *Beton: Stein der Weisen? Nachdenken über einen Baustoff*. Braunschweig and Basel : Vieweg and Birkhäuser Verlag, 2014. – ISBN 978–3–0356–0228–9
- [82] HAGEMANN, J.: Beton aussparen oder kernbohren? Ist die Aussparung vor dem Betonieren billiger und zweckgemäßer als das Diamant - Kernbohren vor dem Technischen Ausbau? In: *Bauwirtschaft* (1972), Nr. 46
- [83] HARRIS, J. W.: Diamond Geology. In: FIELD, J. E. (Hrsg.): *The properties of natural and synthetic diamond*. London : Acad. Press, 1992. – ISBN 0–12–255352–7, S. 345–394
- [84] HAUFE, S. G. ; LEUTERT, D. ; MAVROMATI, F. ; REDLICH, D. ; STALLMANN, M.: *Presseinformation Nr. 22/2010 - Emissionshandel: 9,4 Prozent weniger CO₂ - Emissionen im Jahr 2009*. pdf-Datei. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/press/pd10-022_emissionshandel_9_4_prozent_weniger_co2-emissionen_im_jahr_2009.pdf. Version: 01.04.2010. – zuletzt geprüft 15.02.2019
- [85] HENRIQUES, B. ; FERREIRA, P. ; BUCIUMEANU, M. ; FREDER, M. ; CABRAL, A. ; SILVA, F. S. ; MIRANDA, G.: Copper-nickel-based diamond cutting tools: Stone cutting evaluation. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92 (2017), Nr. 1, S. 1339–1348

- [86] HERBRANDT, S.: *Statistische Modellierung eines Bohrprozesses*. Dortmund, Technische Universität Dortmund, Dissertation, 2018
- [87] HERBRANDT, S. ; LIGGES, U. ; FERREIRA, M. P. ; KANSTEINER, M. ; BIERMANN, D. ; TILLMANN, W. ; WEIHS, C.: Model based optimization of a statistical simulation model for single diamond grinding. In: *Computational Statistics* (2016), S. 1–17
- [88] HIMSTEDT, W.: Praktische Erfahrungen beim Diamant-Kernbohren im Hochbau. In: DE BEERS INDUSTRIAL DIAMOND DIVISION (Hrsg.): *Diamant-Information M25 Diamantwerkzeuge im Hoch- und Tiefbau*. 1973, S. 31–37
- [89] HORNBOGEN, E. ; EGGELER, G. ; WERNER, Ewald: *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*. 11., aktualisierte Aufl. 2017. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2017. – ISBN 9783642538674
- [90] HSIEH, Y.-Z. ; LIN, S.-T.: Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices. In: *Taiwan Diamond 2000 72* (2001), Nr. 2, S. 121–125
- [91] HÜTT, R.: *Untersuchung der Zerspanung von Steinen mit Diamantspitzen*. Hannover, Technische Universität Hannover, Dissertation, 1972
- [92] KANSTEINER, M. ; BIERMANN, D.: Ritzversuche auf mehrphasigen Werkstoffen mit unterschiedlicher Kornausrichtung. In: *Diamond Business* 52 (2015), Nr. 1, S. 50–60
- [93] KANSTEINER, M. ; BIERMANN, D.: Single Segment Tests For The Analysis Of The Core Drilling Process Of Concrete Materials. In: THEISEN, W. (Hrsg.) ; DENKENA, B. (Hrsg.) ; TILLMANN, W. (Hrsg.): *ICSCM, 3rd International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Bochum, 2015. – ISBN 987–3–943063–20–2, S. 113–123
- [94] KANSTEINER, M. ; BIERMANN, D.: Untersuchungen zum Diamantkernbohren von hochfestem Stahlbeton. In: *Diamant Hochleistungswerkzeuge. dihw Magazin* 8 (2016), Nr. 2, S. 28–33
- [95] KANSTEINER, M. ; KIPP, M. ; HERBRANDT, S. ; FERREIRA, M. P. ; BIERMANN, D.: Process Forces and Groove Development in Single Grain Scratch Tests of Concrete and Reinforced Concrete. In: *Applied Mechanics and Materials* 794 (2015), S. 207–214
- [96] KATO, K. ; HOKKIRIGAWA, K. ; KAYABA, T. ; ENDO, Y.: Three Dimensional Shape Effect on Abrasive Wear. In: *Journal of Tribology* 108 (1986), Nr. 3, S. 346
- [97] KIPP, M. ; KANSTEINER, M. ; BIERMANN, D.: Scratch Tests with Single Diamond Tools on Reinforced Concrete and its Components for the Analysis of the Material Separation. In: THEISEN, W. (Hrsg.) ; DENKENA, B. (Hrsg.) ; TILLMANN, W. (Hrsg.): *ICSCM, 3rd International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Bochum, 2015. – ISBN 987–3–943063–20–2, S. 33–43

-
- [98] KIRCHNER, H. P. ; CONWAY JR., J. C.: Mechanisms of material removal and damage penetration during single point grinding of ceramics. In: *American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division (Publication) PED* 17 (1985)
- [99] KLOCKE, F.: *Fertigungsverfahren 2.* 4., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. – ISBN 3-540-23496-9
- [100] KLOCKE, F. ; WIRTZ, C. ; MUELLER, S. ; MATTFELD, P.: Analysis of the Material Behavior of Cemented Carbides (WC-Co) in Grinding by Single Grain Cutting Tests. In: *6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014* 46 (2016), S. 209–213
- [101] KÖHLER, J. ; ERMISCH, A. ; DENKENA, B.: Tool concepts for wire cutting of reinforced concrete. In: DENKENA, B. (Hrsg.) ; BACH, F.-W. (Hrsg.) ; TILLMANN, W. (Hrsg.) ; THEISEN, W. (Hrsg.): *ICSCM, 1st International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Garbsen : PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2011. – ISBN 978-3-943104-22-6, S. 11–16
- [102] KÖNIG, G. ; NGUYEN, V.-T. ; ZINK, M.: *Hochleistungsbeton: Bemessung, Herstellung und Anwendung ; [mit 86 Tabellen]*. Berlin : Ernst&Sohn, 2001. – ISBN 3-433-01738-7
- [103] KONSTANTY, J.: *Powder metallurgy diamond tools*. Amsterdam : Elsevier, 2005 (Metal powders technology series). – ISBN 1-85617-440-9
- [104] KONSTANTY, J.: Production parameters and materials selection of powder metallurgy diamond tools. In: *Powder Metallurgy* 49 (2006), Nr. 4, S. 299–306
- [105] KONSTANTY, J.: Powder Metallurgy Diamond Tools – A Review of Manufacturing Routes. In: *Materials Science Forum* 534-536 (2007), S. 1121–1124
- [106] KONSTANTY, J.: New Nanocrystalline Matrix Materials for Sintered Diamond Tools. In: *Materials Sciences and Applications* 03 (2012), Nr. 11, S. 779–783
- [107] KONSTANTY, J.: Sintered diamond tools: Trends, challenges and prospects. In: *Powder Metallurgy* 56 (2013), Nr. 3, S. 184–188
- [108] KONSTANTY, J. ; XU, X. P.: Production of Diamond Sawblades for Stone Sawing Applications. In: XIPENG, X. (Hrsg.): *Key Engineering Materials* Bd. 250. 2003, S. 1–12
- [109] KOTTE, G.: Wie kommen die runden Löcher in den Käse Beton? Einfaches Bohren statt kompliziertem Schalen oder hartem Schlagen. In: *Baumarkt* (1984), Nr. 9, S. 426–433
- [110] KRAUSE, A.: *Die Bibliothek der Technik*. Bd. Bd. 338: *Diamantwerkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide: Herstellungsprozesse, Eigenschaften und Anwendungsgebiete*. Landsberg/Lech : Verlag Moderne Industrie, 2011. – ISBN 978-3-86236-021-5

- [111] KRONHOLZ, C.: *Diamantschleifsegmente zur trockenen Bearbeitung mineralischer Materialien*. Dortmund, Technische Universität Dortmund, Dissertation, 2010
- [112] LAMMER, A.: Designing Tool Parameters for Optimum Drilling Performance in Reinforced Concrete. In: DIAMOND AT WORK (Hrsg.): *2nd International Industrial Diamond Conference (Diamond at Work 2)*. Italien, 2007
- [113] LAWN, B. R. ; EVANS, A. G.: A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields. In: *Journal of Materials Science* 12 (1977), Nr. 11, S. 2195–2199
- [114] LEY, L.: Diamantsynthese aus der Gasphase. Werkstoff mit Zukunft. In: *Physik in unserer Zeit* 32 (2001), Nr. 5, S. 212–219
- [115] LIAO, Y. S. ; LUO, S. Y.: Effects of matrix characteristics on diamond composites. In: *Journal of Materials Science* 28 (1993), Nr. 5, S. 1245–1251
- [116] LIEBOLDT, M.: Carbonbeton im Ingenieurbau. In: RKW RATIONALISIERUNGS- UND INNOVATIONSZENTRUM DER DEUTSCHEN WIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Hightech-Materialien am Bau - Innovationen und Trends bei neuen Baustoffen*. BAU 17, Baumesse München, 2017
- [117] LIST, E. ; FRENZEL, J. ; VOLLSTAEDT, H.: A new system for single particle strength testing of grinding powders: Ein neues Prüfsystem für die Festigkeitsprüfung einzelner Schleifpulverpartikel. In: *Industrial Diamond Review* 66 (2006), Nr. 1, S. 42–47
- [118] LIST, E. ; VOLLSTAEDT, H. ; FRENZEL, J.: Counting particles per carat by means of two-dimensional image analysis. In: *Zhengzhou Fifth International Conference superhard materials and products: Proceedings*. Henan : Ocean Press Pub., 2008. – ISBN 9787502770907
- [119] LIU, B. C. ; ZHANG, Z. P. ; SUN, Y. H.: Development of Impact Strength Tester for Diamond Grit. In: XIPENG, X. (Hrsg.): *Key Engineering Materials* Bd. 250. 2003, S. 287–292
- [120] LÖNS, H. H.: *Grundlagenuntersuchungen zum Gattersägen mit Diamantwerkzeugen*. Hannover, Technische Universität Hannover, Dissertation, 19710
- [121] MARSHALL, D. B. ; EVANS, A. G. ; YAKUB, B. T. K. ; TIEN, J. W. ; KINO, G. S.: The Nature of Machining Damage in Brittle Materials. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 385 (1983), Nr. 1789, S. 461–475
- [122] MARSHALL, D. B. ; LAWN, B. R. ; EVANS, A. G.: Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Lateral Crack System. In: *Journal of the American Ceramic Society* 65 (1982), Nr. 11, S. 561–566

- [123] MARTIN, K.: Der Werkstoffabtragvorgang beim Feinbearbeitungsverfahren Honen. In: *Maschinenmarkt, Würzburg* 82 (1976), Nr. Heft 60, S. 1074–1078 (5 Seiten, 9 Bilder, 1 Tabelle, 12 Quellen)
- [124] MARTIN, K. ; YEGENOGLU, K.: *HSG-Technologie: Handbuch zur praktischen Anwendung*. Stetten a.k.M.-Frohnstetten : Firma Guehring Automation GmbH, 1992
- [125] MARX, C.: *Untersuchung des Gesteinsbohrens mit Diamantkronen*. Clausthal, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 1973
- [126] MATSUO, T. ; TOYOURA, S. ; OSHIMA, E. ; OHBUCHI, Y.: Effect of Grain Shape on Cutting Force in Superabrasive Single-Grit Tests. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 38 (1989), Nr. 1, S. 323–326
- [127] MEDING, M.: *Beschreibung des Prozeßgeschehens bei der Zerspanung von Gestein und von dessen bruchmechanischem Verhalten unter besonderer Berücksichtigung der Schallemissionsanalyse*. Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 1993
- [128] MEDING, M.: Beschreibung von Graniten mit Hilfe von Schallemissions-Charakteristika. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 30 (1996), Nr. 1, S. 43–47
- [129] MILLER, D. ; BALL, A.: Rock drilling with impregnated diamond microbits—An experimental study. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 27 (1990), Nr. 5, S. 363–371
- [130] MILLER, D. ; BALL, A.: The wear of diamonds in impregnated diamond bit drilling. In: *Wear* 141 (1991), Nr. 2, S. 311–320
- [131] MOSELEY, S.: System Development of Tools and Core Bits for Improved Drilling Performance in Reinforced Concrete. In: *DIAMOND AT WORK* (Hrsg.): *2nd International Industrial Diamond Conference (Diamond at Work 2)*. Italien, 2007
- [132] NAILER, S. ; GALLAGHER, J. ; LEAHY, W.: Die Eigenschaften natürlicher und synthetischer Diamantschleifkörnungen. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 41 (2007), Nr. 4, S. 54–63
- [133] NAILER, S. ; KLEIN, T. ; MÜLLER, M. ; GRASBERGER, S.: Characterisation of Single-crystal Diamond Grit for Construction Applications. In: THEISEN, W. (Hrsg.) ; DENKENA, B. (Hrsg.) ; TILLMANN, W. (Hrsg.): *ICSCM, 3rd International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Bochum, 2015. – ISBN 987–3–943063–20–2, S. 189–198
- [134] NEBEL, J.: *Detonationsspritzen von Diamant-Bronze-Verbundschichten für die Gesteinsbearbeitung*. Dortmund, Technische Universität Dortmund, Dissertation, 2012

- [135] NEROTH, G.: Beton. In: NEROTH, G. (Hrsg.) ; WENDEHORST, R. (Hrsg.): *Wendehorst Baustoffkunde*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (Praxis). – ISBN 978-3-8351-0225-5, S. 247–382
- [136] NEROTH, G.: Eisen und Stahl. In: NEROTH, G. (Hrsg.) ; WENDEHORST, R. (Hrsg.): *Wendehorst Baustoffkunde*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (Praxis). – ISBN 978-3-8351-0225-5, S. 637–702
- [137] NEROTH, G.: Grundlagen. In: NEROTH, G. (Hrsg.) ; WENDEHORST, R. (Hrsg.): *Wendehorst Baustoffkunde*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (Praxis). – ISBN 978-3-8351-0225-5, S. 1–99
- [138] NEROTH, G.: Mineralische Bindemittel. In: NEROTH, G. (Hrsg.) ; WENDEHORST, R. (Hrsg.): *Wendehorst Baustoffkunde*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (Praxis). – ISBN 978-3-8351-0225-5, S. 187–246
- [139] NEROTH, G. (Hrsg.) ; WENDEHORST, R. (Hrsg.): *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz ; mit 363 Tabellen*. 27., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (Praxis). – ISBN 978-3-8351-0225-5
- [140] NEUHAUS, A.: Über die Synthese des Diamanten. In: *Angewandte Chemie* 66 (1954), Nr. 17-18, S. 525–536
- [141] NN ; ALLGEMEINE BAUZEITUNG (Hrsg.): *Roll-out des werkzeuglosen Bohrkroneanschlusses gestartet: Neuentwicklung vom VD-MA und dem Fachverband Betonbohren und -sägen*. Internetseite. <https://allgemeinebauzeitung.de/abz/neuentwicklung-vom-vdma-und-dem-fachverband-betonbohren-und-saegen-roll-out-des-werkzeuglosen-bohrkronenanschlusses-gestartet-27731.html>. Version: 13.06.2018. – zuletzt geprüft 15.02.2019
- [142] NN ; FACHVERBAND BETONBOHREN UND SÄGEN E.V. (Hrsg.): *Der Betonbohrer - Fachzeitschrift für Diamanttechnik*. www.derbetonbohrer.de. Version: 22.11.2018
- [143] NOVIKOV, N. V. ; BOGATYREVA, G. P. ; IL'NITSKAYA, G. D. ; BOGDANOV, R. K. ; NEVSTRUEV, G. F. ; ZAKORA, A. P. ; ISONKIN, A. M. ; TKACH, V. N. ; ZAITSEVA, I. N.: Improving wear resistance of drilling tools fitted with synthetic diamond. In: *Journal of Superhard Materials* 31 (2009), Nr. 1, S. 62–69
- [144] OHBUCHI, Y. ; MATSUO, T.: Force and Chip Formation in Single-Grit Orthogonal Cutting with Shaped CBN and Diamond Grains. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 40 (1991), Nr. 1, S. 327–330
- [145] OLIVEIRA, H. C. P. d. ; COELHO, A. ; AMARAL, P. M. ; FERNANDES, J. C. ; ROSA, L. G.: Comparison between Cobalt and Niobium as a Matrix Component for Diamond Impregnated Tools Used for Stone Cutting. In: *Key Engineering Materials* 548 (2013), S. 98–105

- [146] OMAR, M.: Finishbänder-Technologie und Einsatzmöglichkeiten. In: *Honen in Forschung und industrieller Anwendung, Qualität in der Fertigung, Fachtagung, 3.* Essen : Vulkan-Verlag, 1995 (Schriftenreihe des IWF). – ISBN 3-8027-8625-4, S. 14–10
- [147] PALYANOV, Y. N. ; KUPRIYANOV, I. N. ; KHOKHRYAKOV, A. F. ; BORZDOV, Y. M.: High-pressure crystallization and properties of diamond from magnesium-based catalysts. In: *CrystEngComm* 19 (2017), Nr. 31, S. 4459–4475
- [148] PALYANOV, Y. N. ; KUPRIYANOV, I. N. ; KHOKHRYAKOV, A. F. ; RALCHENKO, V. G.: Crystal Growth of Diamond. In: RUDOLPH, P. (Hrsg.) ; NISHINAGA, Tatsu (Hrsg.): *Handbook of crystal growth.* Amsterdam : Elsevier, 2015. – ISBN 978-0-444-63303-3, S. 672–713
- [149] PAUCKSCH, E. ; HOLSTEN, S. ; LINSS, M. ; TIKAL, F.: *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien ; mit 45 Tabellen.* 12., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2008 (Studium). – ISBN 978-3-8348-0279-8
- [150] PETIT, F. ; OTT, C. ; CAMBIER, F.: Multiple scratch tests and surface-related fatigue properties of monolithic ceramics and soda lime glass. In: *Journal of the European Ceramic Society* 29 (2009), Nr. 8, S. 1299–1307
- [151] POLVOROSA, N. G. ; PENA, G. ; LUNO-BILBAO, C. ; ITURRIZA, I.: Effect of the Processing Conditions on the Diamond Stability During the Production of Diamond Impregnated Tools. In: EUROPEAN POWDER METALLURGY ASSOCIATION (Hrsg.): *Euro PM2018 Congress & Exhibition.* Shrewsbury, United Kingdom : European Powder Metallurgy Association (EPMA), 2018. – ISBN 978-1-899072-50-7
- [152] RASIM, M.: *Modellierung der Wärmeentstehung im Schleifprozess in Abhängigkeit von der Schleifscheibentopographie.* Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 2015
- [153] RASIM, M. ; KLOCKE, F. ; WEISS, M.: Identifikation der Spanbildungsphasen beim Schleifen: Identification of Chip Formation Phases in Grinding. In: *Innovation of Sustainable Production for Green Mobility. Energy-Efficient Technologies in Production, ICMC, International Chemnitz Manufacturing Colloquium, 2014* Bd. 80. Auerbach : Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2014. – ISBN 978-3-95735-004-6, S. 813–831
- [154] RASIM, M. ; MATTFELD, P. ; KLOCKE, F.: Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding. In: *Journal of Materials Processing Technology* 226 (2015), S. 60–68
- [155] RAUTERT, C.: *Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe.* Dortmund, Technische Universität Dortmund, Dissertation, 2016
- [156] RICHTER, T.: *Schriftenreihe Spezialbetone.* Bd. Bd. 3: *Hochfester Beton - Hochleistungsbeton.* Düsseldorf : Verlag Bau und Technik, 1999. – ISBN 3-7640-0387-1

- [157] RICHTER, T.: *Zement-Merkblatt Betontechnik B16: Hochfester Beton / Hochleistungsbeton*. pdf-Datei. <https://www.vdz-online.de/publikationen/zement-merkblaetter/>. Version: 2002. – zuletzt geprüft 15.06.2018, zur Zeit in der Überarbeitung
- [158] ROMAŃSKI, A.: Sintering of Cobalt - (3-25 wt.%) Iron Materials. In: *Materials Science Forum* 534-536 (2007), S. 1129–1132
- [159] RUIZ ROMERA, D. ; REGNARD, S. ; DA SILVA, N.: Direct Hot Pressed Diamond-metal Matrix Composites with Optimized Metallic Bond Hardness. In: TILLMANN, W. (Hrsg.) ; THEISEN, W. (Hrsg.) ; DENKENA, B. (Hrsg.) ; MAIER, H. J. (Hrsg.) ; BACH, F.-W. (Hrsg.): *ICSCM, 2nd International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Dortmund : Verlag Praxiswissen, 2013. – ISBN 978–3–86975–088–0, S. 85–90
- [160] SALJÉ, Ernst: *Begriffe der Schleif- und Konditioniertechnik*. Essen : Vulkan-Verlag, 1991. – ISBN 3–8027–2644–8
- [161] SAPPOK, R.: Diamantsynthese. In: *Chemie in unserer Zeit* 4 (1970), Nr. 5, S. 145–151
- [162] SCHATT, W. ; WIETERS, K.-P. ; KIEBACK, B.: *Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe*. 1. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2007 (VDI-Buch). – ISBN 978–3–540–68112–0
- [163] SCHEERER, S.: Was ist Textilbeton? In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015), Nr. S1, S. 4–7
- [164] SCHEERER, S. ; CURBACH, M.: Leicht Bauen mit Beton - Forschung im DFG-Schwerpunktprogramm 1542. In: *Nachhaltig Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion. Beton Graz '14. 2. Grazer Betonkolloquium, 25./26. September 2014*. Graz : Verlag der TU Graz, 2014 (Grazer Betonkolloquium, 20140925-20140926, Graz, AT, Eventnr.: 2). – ISBN 978–3–85125–360–3, S. 37–48
- [165] SCHLADITZ, F.: Carbonbeton - Forschung und Praxis. In: ACATECH - DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): *Vortrag zum Thementzwerktreffen Materialwissenschaft & Werkstofftechnik der acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften*. Berlin, 2016
- [166] SCHULZE, R.: *Trennschleifen von Hartgestein*. Hannover, Universität Hannover, Dissertation, 1980
- [167] SCHWANDER, M. ; PARTES, K.: A review of diamond synthesis by CVD processes. In: *Diamond and Related Materials* 20 (2011), Nr. 9, S. 1287–1301
- [168] SCHWARZ, U.: Diamant: Naturgewachsener Edelstein und maßgeschneideretes Material. In: *Chemie in unserer Zeit* 34 (2000), Nr. 4, S. 212–222

- [169] SHIH, A. J. ; DENKENA, B. ; GROVE, Thilo ; CURRY, David ; HOCHENG, Hong ; TSAI, H.-Y. ; OHMORI, Hitoshi ; KATAHIRA, K. ; PEI, Z. J.: Fixed abrasive machining of non-metallic materials. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 67 (2018), Nr. 2, S. 767–790
- [170] SOBOTKA, A.: *Edition Wissenschaft Apprimus*. Bd. 2015,22: *Fertigung asphärischer monokristalliner Diamantwerkzeuge: Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2015*. 1. Aufl. Aachen : Apprimus-Verl., 2015. – ISBN 9783863593254
- [171] SOMMER, K. ; HEINZ, R. ; SCHÖFER, J.: *Verschleiß metallischer Werkstoffe: Erscheinungsformen sicher beurteilen*. 2., korr. und erg. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978–3–8348–2463–9
- [172] SPRIANO, S. ; CHEN, Q. ; SETTINERI, L. ; BUGLIOSI, S.: Low content and free cobalt matrixes for diamond tools. In: *Wear* 259 (2005), Nr. 7-12, S. 1190–1196
- [173] STANGENBERG, J.: *Gattersägen von Naturstein: Prozeßerfassung und Simulation*. Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2001
- [174] STEFFES, M. ; AURICH, J. C.: Einfluss der Kornform auf das plastische Materialverhalten beim Einkornritzen. In: *Diamond Business* (2012), Nr. 3, S. 44–50
- [175] SUNG, J. C.: Diamond Tools with Diamond Grits Set in a Predetermined Pattern. In: *Materials Science Forum* 534-536 (2007), S. 1101–1104
- [176] SUNG, J. C. ; HU, S. C. ; LIN, I. C. ; TSAI, C. C.: The Revolution of Diamond Synthesis Technology. In: *Materials Science Forum* 534-536 (2007), S. 1141–1144
- [177] SUNG, J. C. ; SUNG, M. ; SUNG, E.: Diamond growth on an array of seeds: The revolution of diamond production. In: *Thin Solid Films* 498 (2006), Nr. 1, S. 212–219
- [178] TANOVIC, L. J. ; BOJANIC, P. ; PUZOVIC, R. ; KLIMENKO, S.: Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Marble Grinding. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 131 (2009), Nr. 6, S. 064507
- [179] TILLMANN, W. ; FERREIRA, M. ; STEFFEN, A. ; RÜSTER, K. ; MÖLLER, J. ; BIEDER, S. ; PAULUS, M. ; TOLAN, M.: Carbon reactivity of binder metals in diamond–metal composites – characterization by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. In: *12th European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, Nitrides & Silicon Carbide* 38 (2013), S. 118–123
- [180] TILLMANN, W. ; GATHEN, M. ; KRONHOLZ, C.: Ein neues Werkstoffkonzept zur trockenen Bearbeitung mineralischer Materialien. In: *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, WTK, Werkstofftechnisches Kolloquium*, 9 Bd. 24. Chemnitz : TU Chemnitz, 2006. – ISBN 978–3–00–019101–5, S. 173–178

- [181] TILLMANN, W. ; GATHEN, M. ; VOGLI, E. ; KRONHOLZ, C.: New materials and methods becken for diamond tools. In: *Metal Powder Report* 62 (2007), Nr. 7, S. 43–48
- [182] TILLMANN, W. ; NEBEL, J.: Fundamentals, potential, and future prospective of spraying processes for the manufacturing of metal-bonded diamond grinding tools. In: DENKENA, B. (Hrsg.) ; BACH, F.-W. (Hrsg.) ; TILLMANN, W. (Hrsg.) ; THEISEN, W. (Hrsg.): *ICSCM, 1st International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Garbsen : PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2011. – ISBN 978-3-943104-22-6, S. 177–183
- [183] TILLMANN, W. ; SCHAACK, C. ; NEBEL, J.: Production of versatile abrasive and wear resistant Ni-diamond composite layers by HVOF spraying. In: TILLMANN, W. (Hrsg.) ; THEISEN, W. (Hrsg.) ; DENKENA, B. (Hrsg.) ; MAIER, H. J. (Hrsg.) ; BACH, F.-W. (Hrsg.): *ICSCM, 2nd International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Dortmund : Verlag Praxiswissen, 2013. – ISBN 978-3-86975-088-0, S. 61–66
- [184] TILLMANN, W. ; TOLAN, M. ; FERREIRA, M. P. ; STEFFEN, A.: Graphitization effects on diamonds sintered in two componental metal matrix systems. In: TILLMANN, W. (Hrsg.) ; THEISEN, W. (Hrsg.) ; DENKENA, B. (Hrsg.) ; MAIER, H. J. (Hrsg.) ; BACH, F.-W. (Hrsg.): *ICSCM, 2nd International Conference on Stone and Concrete Machining, Proceedings*. Dortmund : Verlag Praxiswissen, 2013. – ISBN 978-3-86975-088-0, S. 143–148
- [185] TÖNSHOFF, H. K. ; ASCHE, J.: Verschleißverhalten von Diamantwerkzeugen in der Natursteinbearbeitung. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 30 (1996), Nr. 2, S. 107–114
- [186] TÖNSHOFF, H. K. ; WOBKER, H. G. ; PRZYWARA, R.: Das Arbeitsverhalten von Werkzeugen zum Trennschleifen von Gestein. In: *Industrie Diamanten Rundschau* 27 (1993), Nr. 3, S. 198–205
- [187] UHLMANN, E. ; HOCHSCHILD, L.: Tool optimization for high speed grinding. In: *Production Engineering* 7 (2013), Nr. 2, S. 185–193
- [188] VARGAS, G. E.: *Analyse und Simulation des Prozesses Honräumen von gehärteten Innenprofilen mit Diamantwerkzeugen*. Zürich, Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Dissertation, 2010
- [189] VERBAND DEUTSCHER INGENIEURE: *Abrichten von Schleifkörpern - Profilieren und Schärfen*. Düsseldorf, 2007
- [190] VERBAND DEUTSCHER INGENIEURE: *CVD-Diamantwerkzeuge - Systematik, Herstellung und Charakterisierung*. Düsseldorf, 2012
- [191] VERBAND DEUTSCHER INGENIEURE: *Kohlenstoffschichten - Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften*. Düsseldorf, 2012
- [192] VOLLSTAEDT, H. ; LIST, E.: Controlling the stability of the properties of superabrasive powders. In: *Zhengzhou Fifth International Conference superhard materials and products: Proceedings*. Henan : Ocean Press Pub., 2008. – ISBN 9787502770907

- [193] WALLMANN, C. ; GLATZEL, U.: Herstellung und Eigenschaften von laserbeschichteten Diamanttrennschleifscheiben (Teil 1). In: *Diamant Hochleistungswerkzeuge. dihw Magazin* 38 (2004), Nr. 3, S. 283–292
- [194] WALLMANN, C. ; GLATZEL, U.: Herstellung und Eigenschaften von laserbeschichteten Diamanttrennschleifscheiben (Teil 2). In: *Industrie Diamanten Rundschau* 38 (2004), Nr. 4, S. 392–402
- [195] WANG, C. Y. ; CLAUSEN, R.: Marble cutting with single point cutting tool and diamond segments. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42 (2002), Nr. 9, S. 1045–1054
- [196] WANG, C. Y. ; CLAUSEN, R.: Computer simulation of stone frame sawing process using diamond blades. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (2003), Nr. 6, S. 559–572
- [197] WANG, Y. H. ; ZHAO, Y. C. ; WANG, M. Z. ; ZANG, J. B.: Structure and Properties of Diamond Grits Coated with Corundum Micron Powders. In: XIPENG, X. (Hrsg.): *Key Engineering Materials* Bd. 250. 2003, S. 94–98
- [198] WEBB, S. W.: Diamond retention in sintered cobalt bonds for stone cutting and drilling. In: *Diamond and Related Materials* 8 (1999), Nr. 11, S. 2043–2052
- [199] WEBER, G.: DiaSet – now fully automatic setting of diamond arrays. In: *DIAMOND TOOLING JOURNAL* (2010), Nr. 1, S. 38–40
- [200] WEGENER, K. ; PINTO, F. W. ; KUSTER, F. ; VARGAS, G. E. ; TRANSCHHEL, R.: Simulation zur Optimierung von Schleifwerkzeugen mit definierter Kornanordnung. In: *Diamond Business* (2010), Nr. 2, S. 28–33
- [201] WIEDERKEHR, P. ; SIEBRECHT, T. ; BAUMANN, J. ; BIERMANN, D.: Point-based tool representations for modeling complex tool shapes and runout for the simulation of process forces and chatter vibrations. In: *Advances in Manufacturing* 6 (2018), Nr. 3, S. 301–307
- [202] WIETEK, B.: *Faserbeton: Im Bauwesen*. 2. Aufl. 2017. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. – ISBN 978–3–658–19079–8
- [203] WILKS, J. ; WILKS, E.: *Properties and applications of diamond*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1991. – ISBN 0–7506–1067–0
- [204] WIRTZ, C. ; VITS, F. J. ; MATTFELD, P. ; KLOCKE, F.: Schleifen von WC-Co-Hartmetallen. Methodik zur systematischen Analyse des Zerspanverhaltens: Grinding of Cemented Carbides (WC-Co). In: *wt Werkstatttechnik online* 106 (2016), Nr. 6, S. 374–379
- [205] WRIGHT, D. N. ; WILSON, S. M. ; BROWN, W. F. ; OVENS, U.: Segment wear on diamond impregnated mining bits. In: *Industrial Diamond Review* 50 (1990), Nr. 540, S. 248–252

- [206] XU, X. P. ; LI, Y.: Improvement of the Performance of Diamond Segments for Rock Sawing, Part 2: Factors Influencing the Use of Coated Diamonds. In: XIPENG, X. (Hrsg.): *Key Engineering Materials* Bd. 250. 2003, S. 54–59
- [207] XU, X. P. ; YU, Y. Q.: Sawing performance of diamond with alloy coatings. In: *Surface and Coatings Technology* 198 (2005), Nr. 1–3, S. 459–463
- [208] ZANG, J. B. ; WANG, Y. H. ; WANG, H. X. ; ZHANG, X. M.: Study of Force and Fracture of Impacted Diamond Grits. In: XIPENG, X. (Hrsg.): *Key Engineering Materials* Bd. 250. 2003, S. 68–72
- [209] ZANG, J. B. ; WANG, Y. H. ; ZHANG, X. H. ; WANG, M. Z. ; ZHENG, Y. Z.: Study of the Properties and Application of Ti-Coated Diamond by Measuring Resistance. In: XIPENG, X. (Hrsg.): *Key Engineering Materials* Bd. 250. 2003, S. 78–82
- [210] ZONG, W. J. ; CHENG, K. ; LI, D. ; SUN, T. ; LIANG, Y. C.: The ultimate sharpness of single-crystal diamond cutting tools—Part I: Theoretical analyses and predictions. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (2007), Nr. 5, S. 852–863
- [211] ZONG, W. J. ; LI, D. ; SUN, T. ; CHENG, K. ; LIANG, Y. C.: The ultimate sharpness of single-crystal diamond cutting tools—Part II: A novel efficient lapping process. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (2007), Nr. 5, S. 864–871
- [212] ZUM GAHR, K.-H.: Furchungsverschleiss duktiler Metalle: Abrasive wear of ductile metals. In: *Zeitschrift für Metallkunde* 73 (1982), Nr. 5, S. 267–English
- [213] ZUM GAHR, K.-H.: *Microstructure and wear of materials*. Amsterdam : Elsevier, 1987 (Tribology series). – ISBN 0–444–42754–6
- [214] ZUM GAHR, K.-H.: Verschleiß von Metallen, Keramiken und Polymeren im Vergleich. In: ZUM GAHR, K.-H. (Hrsg.): *Reibung und Verschleiß bei metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen*. Oberursel : DGM-Informationsgesellschaft Verlag, 1990. – ISBN 9783883551593, S. 77–96
- [215] ZUM GAHR, K.-H. ; MEWES, D.: Werkstoffabtrag beim Furchungsverschleiss: Abrasion of materials by grooving wear. In: *Metall. Wirtschaft, Wissenschaft, Technik* 37 (1983), Nr. 12, S. 1212–1217

Studentische Arbeiten

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen wurden die nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten thematisch ausgelegt und betreut. Ausgewählte Ergebnisse dieser Arbeiten finden inhaltliche Anwendung. Allen Bearbeitern/innen gilt an dieser Stelle ein besonderer Dank.

Projektarbeit von A. Bur, TU Dortmund, November 2018

Thema: *„Analyse des Verschleißverhaltens von Diamantwerkzeugen unterschiedlicher Spitzenform bei Ritzversuchen an Hochleistungsbeton“*

Projektarbeit von S. Bylitzka und S.-P. Christiansen, TU Dortmund, Februar 2018

Thema: *„Grundlagenuntersuchung zum Zerspanungsprozess von Basaltgestein durch Einzelkornritzversuche bei Verwendung von Diamanten definierter Spitzenform“*

Projektarbeit von Y. Düring und C. Feise, TU Dortmund, Februar 2016

Thema: *„Untersuchung des Diamantkernbohrprozesses durch Versuche mit einzelnen diamantimprägnierten metallisch gebundenen Schleifsegmenten an hochhartem Beton und Stahlbeton“*

Projektarbeit von Y. Guo und H. Oh, TU Dortmund, Oktober 2018

Thema: *„Analyse der Einflussfaktoren Diamantgröße und -konzentration beim Kernbohren von Stahlbeton anhand der Prozesskennzahlen Vorschubgeschwindigkeit, Verschleiß und Wirkleistung“*

Masterarbeit von D. Jakimenko, TU Dortmund, Februar 2019

Thema: *„Analysen zum Einfluss der Diamantkornform auf die Trennmechanismen bei duktilen und spröden Werkstoffen“*

Projektarbeit von D. Jakimenko, TU Dortmund, August 2018

Thema: *„Analyse des Materialabtragprozesses beim Ritzen von Beton mit einzelnen Diamanten unterschiedlicher Form“*

Bachelorarbeit von K. Kamplade, TU Dortmund, Dezember 2015

Thema: *„Beurteilung der Zerspanbarkeit von hochfestem Beton durch Versuche mit metallisch gebundenen Diamantwerkzeugen“*

Projektarbeit von K. Köhne, TU Dortmund, Oktober 2015

Thema: *„Analyse der Materialtrennung mineralischer und mineralisch metallischer Werkstoffe durch Ritzversuche“*

Projektarbeit von S. Kubasinski und L. Bögge, TU Dortmund, August 2017

Thema: *„Analyse der Prozesskräfte bei Einkornritzversuchen mit konisch geschliffenen verrundeten Diamantspitzen an Betonen mit unterschiedlicher Druckfestigkeit“*

Projektarbeit von E. Yilmazcan, TU Dortmund, Januar 2017

Thema: *„Scratch tests on concrete with pyramid-shaped diamond tools“*

Erschienenene Bände in der Schriftenreihe des ISF

- Band H3 Surmann, T.: *Simulation der Dynamik von Dreh- und Fräsprozessen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8794-2
- Band H2 Zabel, A.: *Prozesssimulation in der Zerspanung – Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8752-2
- Band H1 Mehnen, J.: *Mehrkriterielle Optimierverfahren für produktionstechnische Prozesse*. Habilitationsschrift, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 3-8027-8760-9
- Band 101 Fuß, M.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von tiefen nicht kreisförmigen Bohrungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3-8027-8917-5
- Band 100 Metzger, M.: *Innenkonturieren und Walzen tiefgebohrter Grundbohrungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3-8027-8916-8
- Band 99 Aßmuth, R.: *Schneidkantenpräparation durch Druckluft-Nassstrahlspanen mit Industrierobotern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3-8027-8915-1
- Band 98 Wolf, M.: *Abstimmung der Präparationsprozesse in der Herstellungskette von PVD-beschichteten Vollhartmetall-Wendelbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3-8027-8913-7
- Band 97 Freiburg, D.: *Hochvorschubfräsen zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen für die Blechmassivumformung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3-8027-8912-0
- Band 96 Tiffe, M.: *Charakterisierung grundlegender Mechanismen für die Simulation der Spanbildung mithilfe der FEM*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8911-3
- Band 95 Schumann, S.: *Mehrskalige Modellierung und Simulation des Hochleistungs-Innenrundschälenschleifens*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3-8027-8914-4
- Band 94 Böhmer, J. C.: *Untersuchung und Simulation des Randschichtverhaltens inhomogener Spritzstrukturen beim Honen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8799-7

- Band 93 Hense, R.: *Simulation und Optimierung der Fräsbearbeitung von Turbinenschaufeln*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8798-0
- Band 92 Krebs, E.: *Simulationsgestützte Mikrofräsbearbeitung gehärteter Werkzeugstähle zur Herstellung filigraner Formelemente und funktionaler Oberflächenstrukturen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN
- Band 91 Habermeier, J.: *Technologische Untersuchungen der Bearbeitung nickelreduzierter Stahlgusslegierungen für Turbinengehäuse*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8796-6
- Band 90 Liu, Y.: *Technologische Untersuchungen zum flexiblen Einsatz des Fließbohrens*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8795-9
- Band 89 Özkaya, E.: *FEM-based software system for the efficient 3D tapping simulation and tool optimization using CFD simulation*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8793-5
- Band 88 Abrahams, A.: *Untersuchungen zum Führungsleistenverschleiß und zur Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren austenitischer Stähle*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8792-8
- Band 87 Kirschner, M.: *Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmessern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8791-1
- Band 86 Goeke, S.: *Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Microfinishen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8790-4
- Band 85 Iovkov, I.: *Technologische Analyse des Tiefbohrens mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mitlenverlaufs*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8787-4
- Band 84 Rautert, C.: *Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8789-8
- Band 83 Hartmann, H.: *Analyse der Außenlängsdreh- und Einlippentiefbohrbearbeitung hochfester bainitischer und vergüteter Stähle*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8788-1
- Band 82 Rausch, S.: *Modellgestützte Endbearbeitung hartstoffbeschichteter Tiefziehwerkzeuge*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8785-0

- Band 81 Beer, N.: *Systematische Untersuchung von Vollhartmetall-Wendelbohrern zum Bearbeiten von Inconel 718*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8784-3
- Band 80 Odendahl, S.: *Entwicklung eines multiskaligen Simulationssystems zur Analyse und Optimierung von Zerspanprozessen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8786-7
- Band 79 Steiner, M.: *Grundlagenuntersuchungen zur Mikrofräsbearbeitung des austenitischen Edeltstahls X5CrNi18-10*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8783-6
- Band 78 Bleckmann, T.: *Simulationsbasierte Auslegung von Fräsprozessen für die Großserienfertigung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8781-2
- Band 77 Heymann, T.: *Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8778-2
- Band 76 Ungemach, E.: *Simulationsbasierte Adaption von NC-Fräsprogrammen zur Vermeidung von Ratterschwingungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8780-5
- Band 75 Upmeier, T.: *Einlippentiefbohren teilkristalliner thermoplastischer Kunststoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8782-9
- Band 74 Peuker, A.: *Werkzeugentwicklung für die Transplantation thermisch gespritzter mikrostrukturierter Funktionsschichten auf Druckgusswerkstücke*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8779-9
- Band 73 Schlenker, J.: *Spanende Mikrobearbeitung von Titan und Titanlegierungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8777-5
- Band 72 Zhang, L. J.: *Untersuchungen zum Drehen und Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2014, ISBN 978-3-8027-8776-8
- Band 71 Wagner, T.: *Planning and Multi-Objective Optimization of Manufacturing Processes by Means of Empirical Surrogate Models*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8775-1
- Band 70 Sacharow, A.: *Kompensation von Formabweichungen durch adaptive Freiformdeformation der CAD/CAM-Daten*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8774-4

- Band 69 Baschin, A.: *Analyse und Simulation der Prozessdynamik und -stabilität beim NC-Mikrofräsen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8773-7
- Band 68 Feldhoff, M.: *Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duromere*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8771-3
- Band 67 Machai, C.: *Grundlagenuntersuchung zur Zerspanung von β -Titanlegierungen unterschiedlicher Mikrostruktur*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8772-0
- Band 66 Heilmann, M.: *Tiefbohren mit kleinen Durchmessern durch mechanische und thermische Verfahren – Prozessgestaltung und Verfahrenskombination*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8770-6
- Band 65 Scheidler, A. V.: *Simulation des NC-Formschleifprozesses mit unterschiedlichen CBN-Schleifscheibenformen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8768-3
- Band 64 Pantke, K.: *Entwicklung und Einsatz eines temperatursensorischen Beschichtungssystems für Zerspanwerkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8769-0
- Band 63 Terwey, I.: *Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8766-9
- Band 62 Würz, E.: *Schleifbearbeitung von Keramik-Hartmetall-Verbunden*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8767-6
- Band 61 Engbert, T.: *Fließbohrbearbeitung und Innengewindefertigung an Leichtbaustrukturen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8764-5
- Band 60 Felderhoff, J. F.: *Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8765-2
- Band 59 Kessler, N.: *Thermische Mittenverlaufsbeeinflussung beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8763-8
- Band 58 Paffrath, K.-U.: *Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8762-1

- Band 57 Faraz, A.: *Experimental Study On Delamination, Mechanical Loads and Tool Wear in Drilling of Woven Composite Laminates*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8761-4
- Band 56 Hossam, M.: *Chatter Occurrence at Different Natural Frequencies of Milling Machine Axes*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8759-1
- Band 55 Kersting, P.: *Simulation und Analyse regenerativer Werkstück-schwingungen bei der NC-Fräsbearbeitung von Freiformflächen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8757-7
- Band 54 Marschalkowski, K.: *Beitrag zur Prozessentwicklung für das Hochleistungsinnenrund-Schäl Schleifen mit galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheiben*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8758-4
- Band 53 Weckerle, T.: *Konzeption und Entwicklung einer standardisier-ten Datenübertragung von Schleifoperationen für Werkzeugschleif-maschinen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8756-0
- Band 52 Kahleyß, F.: *Grundlagenuntersuchungen und simulationsbasier-te Optimierung zur fünfachsigen Mikrofräsbearbeitung von NiTi-Formgedächtnislegierungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8753-9
- Band 51 Mohn, T.: *Schleifen thermisch gespritzter Verschleißschutzschich-ten auf Bearbeitungszentren – Prozessgestaltung und Simulation*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Es-sen, 2010, ISBN 978-3-8027-8751-5
- Band 49 Rautenberg, J.: *Simultane fünfachsige Fräsbearbeitung von Alu-miniumstrukturbauteilen*. Dissertation Technische Universität Dort-mund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8754-6
- Band 48 Enk, D.: *Untersuchungen zum dynamischen Stabilitätsverhalten von Fräs Werkzeugen zur HSC-Bearbeitung*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8748-5
- Band 47 Kersting, M.: *Entwicklung und Anwendung eines adaptiven Schwin-gungsdämpfers für das Einlippentiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8749-2
- Band 46 Bergmann, S.: *Beitrag zur Zerspanung intermetallischer γ -Titanaluminide durch Bohren, Gewindebohren und Fräsen*. Disser-tation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8746-1

- Band 45 Kahnis, P.: *Analyse von Größeneinflüssen bei einer Herabskalierung des Fräsprozesses in den Mikrobereich*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8745-4
- Band 44 Noyen, M.: *Analyse der mechanischen Belastungsverteilung in der Kontaktzone beim Längs-Umfangs-Planschleifen*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8744-7
- Band 43 Jansen, T.: *Entwicklung einer Simulation für den NC-Formschleifprozess mit Torusschleifscheiben*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8743-0
- Band 42 Hammer, N.: *Spanende Bearbeitung endlos stahlverstärkter Aluminiummatrixstrangpressprofile*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8742-3
- Band 41 Kress, J.: *Auswahl und Einsatz von polykristallinem kubischem Bornitrid beim Drehen, Fräsen und Reiben*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8741-6
- Band 40 Wittkop, S.: *Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8740-9
- Band 39 Webber, O.: *Untersuchungen zur bohrtiefenabhängigen Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8739-3
- Band 38 Zhang, L.: *Accuracy Enhancement of a Hexapod Machine Tool*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8738-6
- Band 37 Petzoldt, V.: *Formgedächtnistechnik – Tiefbohren und Mikrofräsen von NiTi*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8737-4, 978-3-8027-8737-9
- Band 36 Kötter, D.: *Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8736-6, 978-3-8027-8736-2
- Band 35 Hesterberg, S.: *Trockenbearbeitung nichtrostender Stähle - Prozessgestaltung für das Drehen und Bohren mit Wendeschneidplatten*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8735-8, 978-3-8027-8735-5
- Band 34 Damm, P.: *Rechnergestützte Optimierung des 5-Achsen-Simultanfräsens von Freiformflächen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8734-X, 978-3-8027-8734-8

- Band 33 Surmann, T.: *Geometrisch-physikalische Simulation der Prozessdynamik für das fünfachsiges Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8733-1, 978-3-8027-8733-1
- Band 32 Stautner, M.: *Simulation und Optimierung der mehrachsigen Fräsbearbeitung*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8732-3, 978-3-8027-8732-4
- Band 31 Peters, C.: *Herstellung und Einsatzverhalten von Keramik-Hartmetall-Verbundbohrwerkzeugen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8731-5, ISBN 978-3-8027-8731-7
- Band 30 Hagedorn, M.: *Herstellung von Verbundbauteilen durch Einwalzen - Verfahrensentwicklung und experimentelle Grundlagen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8730-7, ISBN 978-3-8027-8730-0
- Band 29 Kalveram, M.: *Analyse und Vorhersage der Prozessdynamik und Prozessstabilität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 3-8027-8729-3, 978-3-8027-8729-4
- Band 28 Koehler, W.: *Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8728-5
- Band 27 Loichinger, A.: *Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung rotierender Werkzeuge*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9
- Band 26 Du, S.: *Simulation and Tool Path Optimization for the Hexapod Milling Machine*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9
- Band 25 Schulte, M.: *Profilschleifen von Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffen mit konventionellen Schleifmitteln*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8725-0
- Band 24 Lange, M.: *Prozessgestaltung bei der spanenden Bearbeitung von kurzfaserverstärkten Magnesiumlegierungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8724-2
- Band 23 Guntermann, G.: *Aspekte des Hochgeschwindigkeits-Hartfräsens im Werkzeug- und Formenbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8723-4
- Band 22 Johlen, G.: *Prozessoptimierung für die Hartfeinbearbeitung durch die Kombination von Hartdrehen und Schleifen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8722-6

- Band 21 Schwietering, C.: *Technologische Aspekte der mikromechanischen Fräsbearbeitung mit Schaftwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8721-8
- Band 20 Zabel, A.: *Simulationsgestützte Vorhersage des Verschleißverhaltens von Fräswerkzeugen beim Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8720-x
- Band 19 Opalla, D.: *Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8716-1
- Band 18 Löbbe, H.: *Tiefbohren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8718-8
- Band 17 Finke, M.: *Untersuchungen zur Auslegung und Optimierung des Innenrund-Längsschleifens von Futterteilen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8717-X
- Band 16 Liedschulte, M.: *Untersuchungen zum Bohren von Magnesiummatrix-Verbundwerkstoffen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8719-6
- Band 15 Buschka, M.: *Formgedächtnistechnik - Prozessgestaltung beim Drehen und Bohren von NiTi-Formgedächtnislegierungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2002, ISBN 3-8027-8715-3
- Band 14 Meng, J.: *Freiformflächenmanipulation für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8714-5
- Band 13 Bruchhaus, T.: *Tribologische Untersuchungen zur Optimierung von BTA-Tiefbohrwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8713-7
- Band 12 Mehnen, J.: *Evolutionäre Flächenrekonstruktion*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8712-9
- Band 11 Schulte, K.: *Stahlbearbeitung mit Wendeschneidplatten-Bohrern bei reduziertem Kühlschmierstoffeinsatz*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8710-2
- Band 10 Schroer, M.: *Reiben von Vergütungsstahl mit Einschnneiden-Reibahlen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8711-0
- Band 9 Schneider, M.: *Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8708-0
- Band 8 Albersmann, F.: *Simulationsgestützte Prozessoptimierungen für die HSC-Fräsbearbeitung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8709-9

- Band 7 Mumm, A.: *Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spanenden Fertigung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8705-6
- Band 6 Gillmeister, F.: *Passive und aktive sekundäre Maßnahmen zur Reduzierung der Hand-Arm-Schwingungsbelastung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8706-4
- Band 5 Thamke, D.: *Technologische und ökonomische Aspekte der Trocken- und Minimalmengenbearbeitung am Beispiel des Einlippentiefbohrers*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN: 3-8027-8707-2
- Band 4 Enselmann, A.: *HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8703-X
- Band 3 Willsch, Ch.: *Außenrund-Einsteichschleifen von Cermet*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1998, ISBN 3-8027-8702-1
- Band 2 Friedhoff, J.: *Aufbereitung von 3D-Digitalisierdaten für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1997, ISBN 3-8027-8701-3
- Band 1 Adams, F.-J.: *Einsatzverhalten von symmetrischen, hartmetallbestückten Kurzlochbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1996, ISBN 3-8027-8700-5