

EINFLUSS DER WERKSTOFFZUSAMMENSETZUNG
AUF DIE LUFTSCHALLEMISSION
BEIM TRENNSCHLEIFEN VON BETON

VON DER NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT
DER
GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER
ZUR ERLANGUNG DES GRADES
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN
DR. RER. NAT.

GENEHMIGTE DISSERTATION VON

DIPL.-GEOW. LARS ROBBEN

GEBOREN AM 2.5.1974 IN HASELÜNNE

HANNOVER, IM AUGUST 2009

Referent: Prof. Dr. Josef-Christian Buhl
Institut für Mineralogie
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Korreferent: Prof. Dr. Sameh Rahman
Institut für Mineralogie
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Drittprüfer: Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Tag der Promotion: 6.8.2009

And did those feet in ancient time,
Walk upon Englands mountains green
And was the holy Lamb of God,
On Englands pleasant pastures seen!

And did the Countenance Divine,
Shine forth upon our clouded hills?
And was Jerusalem builded here,
Among these dark Satanic Mills?

Bring me my Bow of burning gold;
Bring me my Arrows of desire:
Bring me my Spear: O clouds unfold:
Bring me my Chariot of fire!

I will not cease from Mental Fight,
Nor shall my Sword sleep in my hand:
Till we have built Jerusalem,
In Englands green & pleasant Land.

William Blake (1757-1827)

DANKSAGUNGEN

Die Erstellung dieser Arbeit ohne die zahlreichen UnterstützerInnen nicht möglich gewesen, daher möchte ich im folgenden Personen meinen besonderen Dank aussprechen:

- Meinen Eltern dafür, dass sie mir meine (nichtlineare) universitäre Ausbildung ermöglicht haben und für alles andere.
- Meiner Partnerin HP Roswitha Stoltz und unserem Sohn Henrik für das geduldige Ertragen langweiliger Vorträge und vor allem anderen dafür, dass ich mein Leben mit ihnen teilen darf.

Auf der “akademischen” Seite gilt mein besonderer Dank:

Prof. Dr. J.-C. Buhl für die Themenstellung dieser Arbeit und Übernahme des Referats, die stets offene Tür und die Möglichkeit sich auch in anderen Forschungsfeldern zu betätigen.

Prof. Dr. S. Rahman für die Übernahme des Korreferates und die vielen ertragreichen Diskussionen, die das Gelingen dieser Arbeit erst ermöglicht haben.

Sowie allen anderen MitarbeiterInnen des Instituts für Mineralogie, insbesondere T.M. Gesing und C.H. Rüscher.

Prof. Dr. B. Denkena, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW), danke ich für die Übernahme des Drittprüfers. Ihm und den Mitarbeitern des IFW gebührt mein besondere Dank für die stete Hilfsbereitschaft und die sehr gute Zusammenarbeit. Hierbei sei besonders Dipl.-Wirtsch.-Ing. Benjamin Konopatzki und seinen wissenschaftlichen Hilfskräften gedankt.

Ein dickes “Danke schön” geht an meinen Leistungs-Hiwi Robert Knobel, der bei der Durchführung der Messungen und der Handhabung der nicht unerheblichen Datenmengen eine unersetzliche Hilfe war.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projektes “Charakterisierung der Bearbeitbarkeit sprödharter Verbundwerkstoffe”

KURZZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Messung und Analyse der Luftschallemission beim Trennschleifen mineralischer Verbundwerkstoffe mit Diamantwerkzeugen. Dazu werden Betonprobekörper unterschiedlicher Bearbeitbarkeitsklassen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Verteilung der Gesteinskörnungen nach Härte und Korngrößen mineralogisch charakterisiert. Anschließend werden die Prozessgeräusche von Trennschleifversuchen mit zwei unterschiedlichen Werkzeugen an diesen Betonproben aufgenommen und deren Signalpegel und spektrale Besonderheiten analysiert. Hierbei werden auch die Betriebsparameter variiert. Es wird gezeigt, dass die Luftschallemission beim Trennschleifen dazu geeignet ist, kritische Prozesszustände zu detektieren und somit als Eingangssignal für eine Prozesssteuerung bei der Bearbeitung des sprödharten Verbundwerkstoffes Beton einsetzbar ist.

Stichworte: Trennschleifen, Prozessüberwachung, Luftschall, Beton

ABSTRACT

This work presents measurements and examinations of the airborne sound emission in cut-off grinding with diamond tipped tools of mineral composite materials. For that purpose concrete samples of different machinability categories have been characterized with regard to mineralogical composition, distribution, hardness and grain sizes of the mineral aggregates bounded in the cement matrix. During the following cut-off grinding tests the airborne sound emission of the machining process was recorded and analyzed in terms of total signal levels and spectral specifics. The machining parameters in the experiments have been varied. It is found that the airborne sound emission in cut-off grinding of concrete is capable to give information about critical machining conditions and thus can be used as an input signal for machine control systems used for the machining of the brittle-hard composite material concrete.

Keywords: Cut-off grinding, process monitoring, airborne sound, concrete

INHALT

1. Einleitung und Problemstellung – Trennschleifen mit Diamantwerkzeugen	1
2. Stand der Forschung	6
2.1 Einfluss der Eigenschaften des Werkstoffes auf den Fertigungsprozess und die Prozesssignale	6
2.2 Prozesssignale zur Prozessüberwachung	8
2.3 Schwingungsverhalten und Luftschallemission kreisförmiger Werkzeuge beim Trennschleifen	10
2.3.1 Schallentstehungsprozesse beim Trennschleifen	12
2.3.2 Eigenfrequenzen einer Trennschleifscheibe	13
3. Experimentelles	17
3.1 Luftschall Messtechnik	17
3.1.1 Signalfilterung im Frequenzraum	20
3.2 Versuchsstand – Maschine und Werkzeug	22
3.3 Mineralogische Methoden zur Werkstoffanalytik	24
4. Ergebnisse und Diskussion	26
4.1 Charakterisierung der Werkstoffe	26
4.1.1 Mineralogische Analyse der Gesteinskörnungen	27
4.1.2 Verteilung der Gesteinskörnung im Betongefüge	31
4.2 Vorversuche - Werkzeug mit zwei Schneidsegmenten	34
4.2.1 Signalpegelmittelwerte	34
4.2.2 Frequenzanalyse	37
4.2.3 Einschätzung der Ergebnisse der Versuche mit dem Werkzeug mit reduzierter Segmentanzahl	39
4.3 Versuche mit vollbesetztem Werkzeug - Signalpegelmittelwerte	40
4.3.1 Einfluss der Normfestigkeit des Zementes	40
4.3.2 Signalpegelmittelwerte in Abhängigkeit von Werkstoff und Betriebsparametern	42

4.4	Versuche mit vollbesetztem Werkzeug – Frequenzanalyse	47
4.4.1	Luftschallemission bei normalen Betriebsparametern	47
4.4.2	Identifizierung der Schallentstehungsmechanismen in den Spektren	48
4.4.3	Frequenzcharakteristika bei Ablenkung der Trennscheibe durch nicht angepasste Betriebsparameter	52
4.4.4	Bremsscheibeneffekt – nicht angepasste Vorschubgeschwindigkeit	54
5.	Zusammenfassung	58
6.	Literaturverzeichnis	61
	Verzeichnis der Abbildungen:	65
	Verzeichnis der Tabellen:	68
	Lebenslauf	69
	Publikationsliste	70

1.

EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

—

TRENNSCHLEIFEN MIT DIAMANTWERKZEUGEN

Das Trennschleifen mit Diamant-Trennschleifscheiben wird im Maschinenbau der spanenden Bearbeitung zugeordnet. Unter Spanen wird Fertigen durch Stofftrennen verstanden, das heißt, von einem Werkstück werden ein (Drehen), mehrere (Fräsen) oder viele (Schleifen) Stoffteile in Form von Spänen getrennt. Ist die Anzahl der Schneiden, ihre Form und Lage zum Werkstück bekannt und beschreibbar, wird der Trennvorgang als Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden bezeichnet [1].

Das hier betrachtete Trennschleifen mit Diamantwerkzeugen ist dem Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden zuzuordnen, wobei sich nur statistische Aussagen über die Spanbildung treffen lassen [1, 2]. Das Trennschleifen kann als statistisches Mittel zahlreicher Einzelritzvorgänge aufgefasst werden.

Für die wirtschaftliche Effizienz von Fertigungsverfahren sind die Werkzeugstandzeiten bzw. Standmengen von entscheidender Bedeutung. Hiermit wird die Zeit bzw. die Menge an Material bezeichnet,

die bearbeiteten kann, bis das Werkzeug versagt. Das Werkzeugversagen wird beim Trennschleifen durch den Verschleiß des Werkzeuges verursacht. Bei dem zweikomponentigen Aufbau der Schneidsegmente aus metallischer Bindungsmatrix, in der die Diamanten eingebettet sind (Abbildung 1, links), ist zwischen Bindungs- und Diamantverschleiß zu unterscheiden. In Abbildung 1 (rechts) sind auf der Segmentoberfläche deutlich die Bindungsrücken erkennbar, wo die Diamanten das Bindungsmaterial vor dem Kontakt mit dem Werkstoff schützen und so den Bindungsverschleiß verringern. An den Bindungsrücken ist so auch die Schnittrichtung auf der Segmentoberfläche erkennbar.

Bei der Werkzeugauswahl für die Bearbeitung eines bestimmten Werkstoffes ist der unterschiedliche Verschleiß von Bindung und Diamanten besonders zu berücksichtigen. Ist die Bindung zu weich für den Werkstoff, verschleißt sie zu stark und die Diamanten brechen heraus bevor sie dem Verschleiß unterworfen worden sind. Ist die Bindung zu hart, verschleifen die Diamanten und können nicht rechtzeitig herausbrechen, das Werkzeug ist stumpf [3].

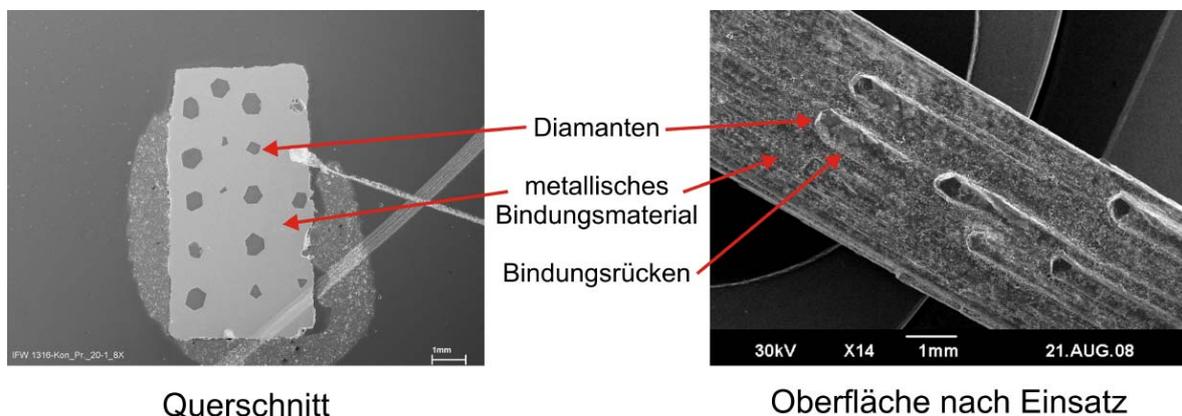


Abbildung 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Diamantsegmente. Links: Querschnitt. Rechts: Oberfläche nach Einsatz; deutlich erkennbar sind die Bindungsrücken.

Daher stellen Werkstoffe mit einem heterogenen Aufbau eine besondere Herausforderung an die Werkzeugauswahl dar und die Erarbeitung eines Klassifizierungssystems zur Feststellung der Bearbeitbarkeit von unterschiedlichen Werkstoffen beim Trennschleifen an Hand ihrer Eigenschaften ist eine zentrale Fragestellung in den Ingenieurwissenschaften. Ein solches System würde bei der Bearbeitung neuer Werkstoffe teure Vorversuche ersparen [4].

Ein noch umfassenderer Ansatz ergibt sich wenn neben den Werkstückeigenschaften weitere Einflussfaktoren beim Trennschleifen von Beton betrachtet werden. Eyuboglu et al. [5] haben die wesentlichen Einflussfaktoren beim Trennschleifen von Gesteinen tabellarisch zusammengefasst (Tabelle 1). Während des Trennvorganges sind die Werkstückeigenschaften die variablen Parameter während Werkzeugeigenschaften und die technischen Gegebenheiten konstant bleiben.

Eyuboglu et al. [5] haben in ihrer Arbeit das Trennen verschiedener Andesite und den Einfluss der Werkstoffeigenschaften auf die Verschleißraten untersucht. In der vorliegenden Arbeit wird das Trennschleifen von Beton betrachtet wobei das Problem hinzu kommt, dass dieser als Werkstoff im Vergleich zu den Natursteinen je nach zugesetzter Gesteinskörnung besonders heterogen ist

Tabelle 1: Einflussfaktoren beim Trennschleifen von Gestein mit Kreissägeblättern (modifiziert nach [5])

Einflussfaktoren beim Trennschleifen von Gestein mit Kreissägeblättern		
Variable Parameter	Feste Parameter	
Werkstückeigenschaften	Werkzeugeigenschaften	Technische Gegebenheiten
Physikalisch – mechanische Eigenschaften	Durchmesser	Kräfte
Chemische Eigenschaften	Aufbau	Wassermenge
Mineralogisch - petrologische Eigenschaften	Metallurgische Struktur der Matrix	Schnittgeschwindigkeit
Kornformen / Hohlräume	Toleranzen	Maschinenleistung
Werkstücktextur	Diamanttyp	Schnitttiefe
Werkstückstruktur	Verschleißeigenschaften	Verstellwege
Verwitterungsgrad	Umfangsgeschwindigkeit	Maschinenvibrationen

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht sind die Werkstoffeigenschaften bei der Bearbeitung von Natursteinen und Beton immer variable Größen, die Werkzeugeigenschaften hingegen sind immer feste Größen, denn ein Werkzeugaustausch im laufenden Schnittprozess ist unmöglich. Während in [5] und Tabelle 1 die technischen Gegebenheiten als feste Parameter

eingestellt werden, wohl um das Untersuchungssystem nicht weiter zu komplizieren, bietet die Variation dieser technischen Parameter eine Möglichkeit zur Einflussnahme auf die Verschleißraten und somit die Werkzeugstandzeiten, insbesondere lässt sich über die Maschinensteuerung z.B. die Vorschubgeschwindigkeit auch im laufenden Fertigungsprozess regeln. Eine notwendige Voraussetzung hierfür ist ein Kenntnis der lokalen Werkstoffeigenschaften die in situ und in Echtzeit im Schnittprozess ermittelt werden müssen, um eine schnelle Anpassung der Maschinensteuerung an die Werkstoffeigenschaften zu ermöglichen (Abbildung 2).

Ersoy und Atici [6] haben den Zusammenhang zwischen Betriebsparametern und der Sägeleistung beim Trennen unterschiedlicher Natursteine untersucht und kommen zudem Schluss, dass es keinen einzelnen Indexwert zur Charakterisierung der Werkstoffe im Hinblick auf ihre Bearbeitbarkeit geben kann. Dies ist ein weiteres wichtiges Argument für grundlegende Untersuchungen zur Nutzung der Prozesssignale zum Aufbau einer Prozessregelung gerade für Betonwerkstoffe.

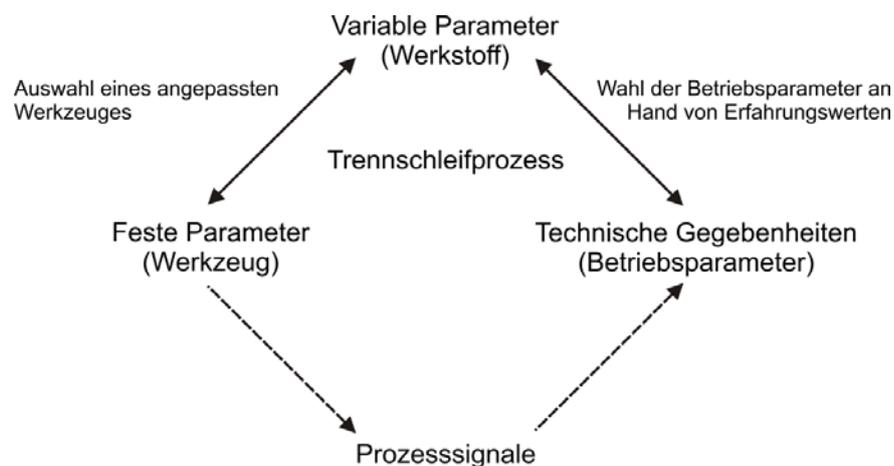


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Einflussnahme auf den Werkzeugverschleiß durch Prozessregelung

Auch in anderen Fertigungsverfahren, in denen kreisförmige Werkzeuge benutzt werden, wie dem Sägen von Holz, können Prozesssteuerungen, die aktiv in die Betriebsparameter eingreifen, zur Erhöhung der Werkzeugstandmengen oder Verringerungen des Schnittabfalls führen.

Chen et al. [7] beschreiben eine Prozesssteuerung für das Kreissägen von Holz, bei dem Werkzeugvibrationen zu einer Verbreiterung des Schnittfuge führen. Durch aktive Steuerung können die

Werkzeugvibrationen minimiert werden und der Fertigungsprozess wird insgesamt deutlich effizienter. Eine befriedigende Problemlösung erfordert somit eine Methode, die die folgenden Eigenschaften aufweist:

- Erfassung von Informationen über Werkstoffeigenschaften, die den Werkzeugverschleiß maßgeblich bestimmen
- Funktion in situ und Datenbereitstellung in Echtzeit, um eine Rückkopplung mit der Maschinensteuerung zu ermöglichen, die schnell genug ist, um bei schnellen Änderungen der Werkstoffstruktur reagieren zu können.
- Zur wirtschaftlichen Nachrüstung im industriellen Einsatz sollte die Methode einfach in bestehende Anlagen zu integrieren sein.

Wie im Laufe der vorliegenden Arbeit gezeigt wird, erfüllt der im Trennschleifprozess emittierte Luftschall genau diese Bedingungen. Im folgenden Kapitel werden die gängigen Verfahren und Prozesssignale, die sich im industriellen Arbeitsalltag bewährt haben, kurz dargestellt. Im Anschluss daran werden Untersuchungen vorgestellt, die belegen, dass die Werkstoffhärte das entscheidende Kriterium für den Werkzeugverschleiß ist. Eine Darstellung der Forschungen zum Schwingungsverhalten kreisförmiger Werkzeuge, das bei dem hier betrachteten Fertigungsverfahren ganz hauptsächlich für die Luftschallemission verantwortlich ist, rundet das einführende Kapitel „Stand der Forschung“ ab.

2.

STAND DER FORSCHUNG

2.1 Einfluss der Eigenschaften des Werkstoffes auf den Fertigungsprozess und die Prozesssignale

In der Einleitung wurde bereits der Einfluss der Werkstoffeigenschaft „Härte“ angesprochen. Im Folgenden wird auf die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen eingegangen, die diesen Einfluss näher beschreiben. Als erstes werden Ergebnisse von Einzelkornritzversuchen an natürlichen Gesteinen dargestellt, danach folgt der Übergang zum Trennschleifen mit Diamantwerkzeugen. Wo es sinnvoll erscheint, wird auf verwandte Fertigungsverfahren eingegangen.

Einzelkornritzversuche werden mit Diamantnadeln durchgeführt, die unter definierten Bedingungen über die zu prüfende Oberfläche geführt werden. Diese Versuche spiegeln das Verhalten des Einzeldiamanten beim Trennschleifen wieder, das selbst als ein statistisches Mittel vieler Einzelkornritzungen aufgefasst werden kann. Meding [8] hat die Körperschall Signale („Acoustic Emission“) beim Einzelkornritzen von Granit untersucht

und konnte dabei den Hauptbestandteilen von Granit charakteristische Frequenzspektren zuordnen und an Hand dieser Spektren bei Proben eine quantitative Phasenzusammensetzung durchzuführen. Hangen [9] hat Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Nano-Härtemessungen und Nano-Ritztests bei den Mineralen der Mohsschen Härteskala durchgeführt. Er kommt zu dem Schluss, dass im Hinblick auf die Mohsschen Minerale Nano-Ritztests aussagekräftiger sind als die Bestimmung der Nano-Härtemessungen, da Ritztest deutliche Unterschiede aufweisen auch wenn Nano-Härtemessungen nur in ähnlicher Größenordnung sind.

Im Falle einzeln eingreifender Werkzeugbestandteile (Diamanten) zeigt sich also, dass der Werkstoff über entstehende Signale charakterisierbar ist. Ebenso zeigt sich dabei die Zuverlässigkeit der Mohsschen Härte als Merkmal zur Charakterisierung der Mineralphasen, auch schon wegen der Analogie zu den Einzelkornritzversuchen.

Eine Möglichkeit, die Bearbeitbarkeit eines natürlichen Gesteins abzuschätzen, ist die Ermittlung des Quarzgehaltes. In [10] stellen die Autoren Sägeversuche an Graniten vor und stellen die Sägbarkeit dem Quarzgehalt und dem Kennwert „Rock Hardness“ gegenüber, der die Summe der Produkte aus den Anteilen der Einzelminerale und der zugehörigen Vickers Härte ist. Sie konstatieren eine bessere Korrelation zwischen „Rock Hardness“ und Sägbarkeit als es bei der alleinigen Betrachtung des Quarzgehaltes der Fall ist.

Der Einsatz von Diamantwerkzeugen zur Bearbeitung des Werkstoffes Beton stellt auf Grund der Heterogenität dieses sprödharten Verbundmaterials besondere Ansprüche an das Fertigungsverfahren. Bis heute wurden nur wenig Arbeiten zur Bearbeitung von Beton veröffentlicht. So beschreiben die Autoren in [11] den Einfluss der Gesteinskörnungen auf das Trennen mit Diamantwerkzeugen und kommen zu dem Schluss, dass die Eigenschaften der zugesetzten Gesteinskörnung ganz wesentlich den Trennschleifprozess beeinflussen. Gleichzeitig konstatieren die Autoren aber auch, dass die Entwicklung allgemeingültiger Aussagen sehr schwierig ist. Auch Bartels [12] betont die Bedeutung der zugesetzten Gesteinskörnung für die Bearbeitbarkeit von Beton.

2.2 Prozesssignale zur Prozessüberwachung

Zur Überwachung des hier betrachteten Trennschleifprozesses können die folgenden Prozessgrößen zum Einsatz kommen [13]:

- Schleifkräfte
- Schleifleistung
- Schleiftemperatur
- Werkzeugtopographie
- Schwingungen

Die wichtigsten Eigenschaften der gängigen Methoden sind in Tabelle 2 aufgeführt, auf die Methoden, die auf Schwingungen basieren, wird im Folgenden genauer eingegangen.

Tabelle 2: Einige Eigenschaften gängiger Messmethoden zur Prozessüberwachung beim Schleifen (nach [13]).

Verfahren	Messgröße	Messaufwand	Genauigkeit	Echtzeit
Schleifkräfte	Wirkende Kräfte	Hoch	auch von anderen Faktoren abhängig	+
Schleifleistung	Maschinenleistung an der Spindel	gering	gering	-
Schleiftemperatur	Temperatur in der Kontaktzone Werkzeug - Werkstück	hoch	gering - genaue Messung der Temperatur ist nicht möglich	-
Werkzeugtopographie	Oberflächenstruktur	Verfahrensabhängig	Verfahrensabhängig	Online Messungen sind bei einigen Verfahren möglich

Das gängige Verfahren zur Ermittlung von Schwingungsprozessen in der Fertigungstechnik ist die Messung des Körperschalles (Acoustic Emission: AE). Bei dieser Methode werden piezoelektrische Schwingungsaufnehmer an Maschine, Werkzeug oder Werkstück angebracht und zeichnen den sich in der Struktur ausbreitenden Körperschall auf. Da

Veränderungen im laufenden Prozess, z.B. durch Abnutzung des Werkzeuges oder Schäden (Lager, Aufhängungen und dergleichen), zu einer Veränderung der Maschinenschwingungen führen, ist der Körperschall zur Überwachung des Fertigungsprozesses geeignet.

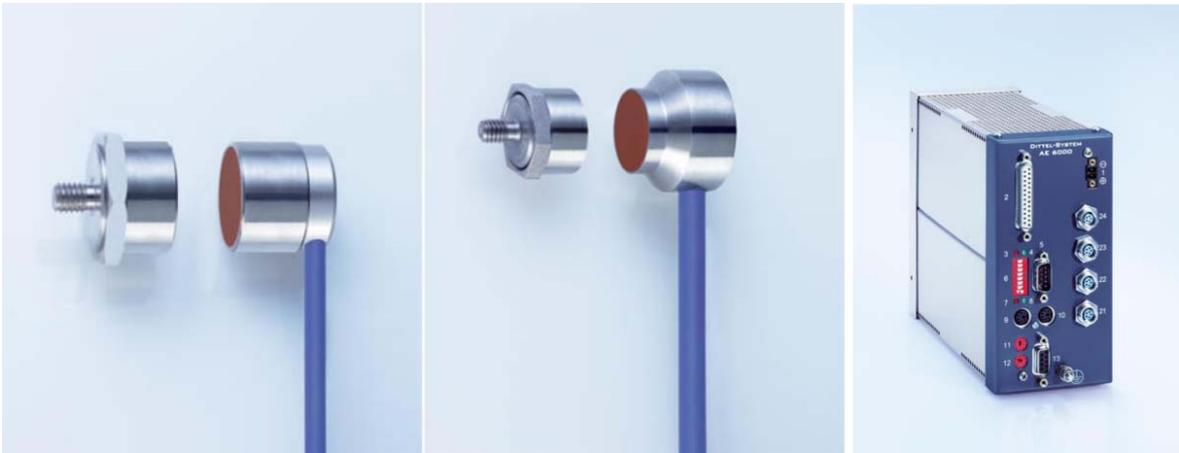


Abbildung 3: AE-Sensoren (links) und Prozessüberwachungsmodul AE6000 (rechts) der Firma Dittel (Bilder: FA Dittel)

Abbildung 3 zeigt typische AE-Sensoren mit zugehöriger Prozessüberwachungselektronik der Firma Dittel. In der Regel arbeitet die Signalaufnahme bei der Aufzeichnung des Körperschalles mit Sampling Raten im Bereich von bis zu 1 MHz, wodurch sich das Frequenzspektrum in den Bereich des Ultraschalles erstreckt. Durch Anbringung des Sensors in der Nähe der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück können Änderungen in den Prozessabläufen gut erfasst werden. Zur Auswertung des Signals wird in der Regel nicht das gesamte Signal oder eine spektrale Darstellung des Signals herangezogen, sondern der Signalpegelmittelwert. Dieser zeigt sich besonders bei Schleifprozessen als aussagekräftige Kenngröße für die Prozessstabilität [14].

Während sich die Prozessüberwachung mit der AE-Technik bereits auch im industriellen Umfeld fest etabliert hat, konnte sich die Prozessüberwachung mit Luftschall auf Grund prinzipieller Probleme, die im Folgenden diskutiert werden, noch nicht durchsetzen. Auch hier ist der oben beschriebene Mechanismus von unterschiedlicher Schwingungsanregung je nach Prozesszustand wirksam. Allerdings werden die Schwingungssignale nicht direkt auf den Maschinenstrukturen aufgenommen, sondern nur der Teil, der von den Maschinenkomponenten in die Luft abgestrahlt wird. Nach allgemeiner Einschätzung ist ihr Nutzen insbesondere durch die Beeinflussung durch Störgeräusche und die frequenzabhängige

Übertragungsfunktion stark eingeschränkt [15]. Vorteilhaft ist jedoch, dass die Sensoren nicht direkt auf den Maschinenstrukturen aufgebracht werden müssen, sondern berührungslos in der Nähe der Maschine angebracht werden können. Auch sind die reinen Kosten für die Hardware deutlich geringer als für eine AE-Sensorik (Abbildung 4).



Abbildung 4: Mikrofon Sennheiser ME36 (links) und digitale Mehrspur-aufzeichnungselektronik (RME Fireface 800; oben: Vorderseite, unten: Rückseite)(Bilder: Fa. Sennheiser, Fa. RME-Audio)

Einige Review-Artikel zum Einsatz verschiedener Methoden zur Werkzeugzustandsüberwachung (Tool Condition Monitoring – TCM) berichten, dass aus den eben genannten Gründen der Luftschall nur selten zur Prozessüberwachung und TCM eingesetzt wird [16, 17], auch wenn es Beispiele gibt, in denen das Luftschallsignal ebenso gut wie andere Methoden den technischen Prozess überwachen kann [18]. Auch beim Fräsen von Holz wird der erfolgreiche Einsatz von Luftschallmessungen berichtet: Die Intensität des Luftschalles ist proportional zur Oberflächenrauigkeit und kann dazu dienen die optimale Vorschubgeschwindigkeit zu ermitteln [19].

2.3 Schwingungsverhalten und Luftschallemission kreisförmiger Werkzeuge beim Trennschleifen

Eine kennzeichnende Eigenschaft des Trennschleifens von Beton ist die sehr hohe Schallabstrahlung durch die Trennscheibe während des Schnittes. Die meisten Untersuchungen die bis heute durchgeführt wurden, konzentrierten sich auf die Reduzierung der Gesamtlärmbelastung am Arbeitsplatz. Hierbei wurden insbesondere Modifikationen der Trennscheibe untersucht, wie zum Beispiel sog. Sandwich-Blätter oder aufgebrachte Klebefolien [20]. Verwandte Fertigungsprozesse wie das Kreissägen von Holz oder Metall zeigen ähnlich hohe Schallemissionen

wie das Trennschleifen von Beton [21, 22]. Auch wenn der wesentliche Unterschied zwischen einem Kreissägeblatt und einer Trennschleifscheibe die Form der Schneiden ist und Trennschleifscheiben in der Regel genutete Stammblätter aufweisen, emittieren Sägeblätter im Allgemeinen ein deutlich höheres Leerlaufgeräusch als Schleifscheiben [23, 24]. Das Leerlaufgeräusch von Trennscheiben ist daher im Vergleich zum Schnittgeräusch deutlich geringer, kann bei Kreissägeblättern aber deutlich höher sein und hängt stark von der Form der Schneiden ab [25].

Ganz entscheidend für das Schallemissionsverhalten solcher kreisförmiger Werkzeuge ist die Reaktion des Werkzeuges auf axiale Krafteinwirkungen. Abbildung 5 stellt die auftretenden Kräfte am Werkzeug dar. Im Kontaktberührungspunkt zwischen Werkzeug und Werkstoff werden in der Blattebene die Normalkraft F_N und die Tangentialkraft F_T definiert. Beide hängen von den Betriebsparametern und vor allem vom Werkstoff ab und können so Aussagen über den Prozess liefern. Die Axialkraft F_A ist eine resultierende Kraft aus den Kräften, die rechts und links vom Werkzeug in Richtung der Achse, auf das Werkzeug einwirken. Im Idealfall ist diese Kraft gleich null und es ergeben sich keine axialen Krafteinwirkungen. Eine resultierende Axialkraft kann ihre Ursache zum einen in Formfehlern des Werkzeuges haben, zum anderen in ungleichen Werkstoffverhältnissen auf beiden Seiten des Werkzeuges.

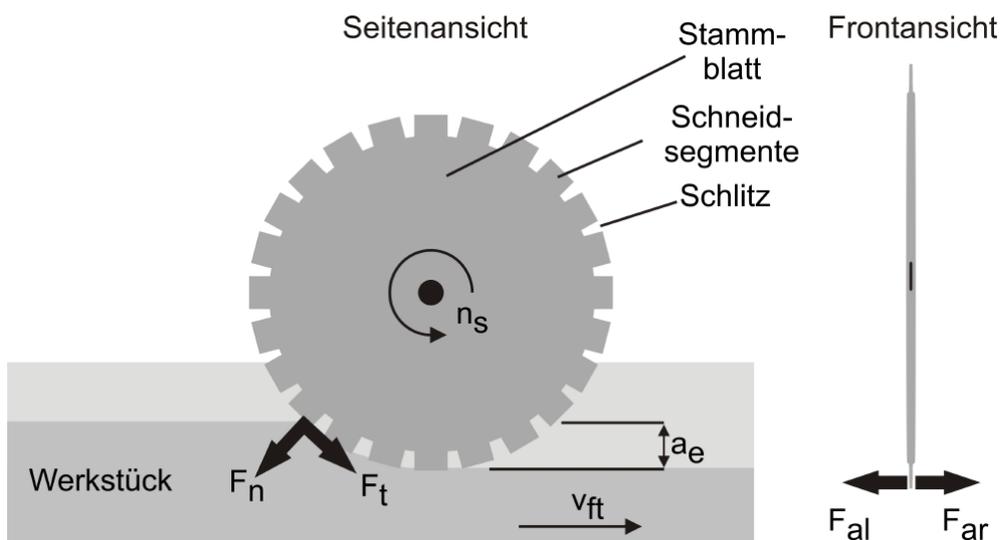


Abbildung 5: Kräfte am Trennschleifblatt: F_n – Normalkraft, F_t – Tangentialkraft, F_{al} – axial wirkende Kraft links, F_{ar} – axial wirkende Kraft rechts (Institut für Mineralogie)

Die Reaktion des Werkzeuges ist nicht nur von der Höhe der einwirkenden Kraft abhängig sondern auch von der Drehgeschwindigkeit und den Eigenfrequenzen des Werkzeuges. Hutton e.a. [26] haben diesen Zusammenhang genauer untersucht und dabei festgestellt, dass das Werkzeug auf seitliche Kräfte mit einer Auslenkbewegung reagiert und diese für bestimmte kritische Drehgeschwindigkeiten besonders groß wird. Beim Kreissägen von Holz tritt dieser Zusammenhang als sogenannter „Waschbrett – Effekt“ auf, der in erster Linie von der Drehgeschwindigkeit des Werkzeuges abhängt [27]. Die folgenden Unterkapitel stellen die Schallentstehungsmechanismen und das Schwingungsverhalten auf Grund der Eigenfrequenzen genauer dar.

2.3.1 Schallentstehungsprozesse beim Trennschleifen

Das Prozessgeräusch beim Trennschleifen von Beton wird im Wesentlichen von der Schallabstrahlung des Werkzeuges bestimmt. Grundsätzlich werden in der Literatur fünf Schallentstehungsmechanismen unterschieden [28, 29]:

1. Stoßeinwirkungen: Die periodische Einwirkung der Diamanten des Werkzeuges auf das Werkstück führt zu starker impulsartiger Krafteinwirkung und damit zu Emission hochfrequenten Schalls.
2. Aerodynamische Wechselwirkung zwischen Werkzeug und umgebender Luft. Diese Ursache spielt nur im Leerlauf des Blattes eine Rolle.
3. Anregung der Blatteigenfrequenzen durch die einwirkenden Kräfte im Schnitt.
4. Formfehler des Blattes oder Gleichlauferfehler der Achse: Radiale und axiale Formfehler werden mit der Drehfrequenz f_n angeregt:

$$f_n = n \cdot \frac{n_s}{60} \quad (1)$$

(n : Umdrehungen pro Minute, n : 1, 2,

5. Einfluss der Segmentierung des Schneidbelages:

$$f_{ze} = n \cdot \frac{n_s}{60} \cdot z_s \quad (2)$$

(f_{ze} : Segmenteingriffsfrequenz; z_s : Segmentanzahl)

Die axialen Werkzeuganregungen stellen den Hauptanteil der Luftschallemission beim Trennschleifen dar [28-30]. In [28] schätzt Scherger ab, dass der Anteil der axialen Anregungen an der Gesamtschallemission 5 bis 10 mal größer ist, als der Anteil der radialen Anregungen. Hierbei spielt auch eine große Rolle, dass das Werkzeug in radialer Richtung deutlich steifer ist, als in axialer Richtung. Dieser Effekt wird durch die Rotation des Werkzeuges noch verstärkt.

Insgesamt lässt sich nach diesen Ausführungen erwarten, dass die Schwingungsanregung des Werkzeuges von der Werkstoffzusammensetzung in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstoff abhängt. Der Gesamtschallpegel sollte beim Trennen härterer Werkstoffbestandteile, auf Grund der höheren Prozesskräfte höher sein, als beim Trennen weicherer Bestandteile [31].

2.3.2 Eigenfrequenzen einer Trennschleifscheibe

Die Berechnung von Eigenfrequenzen unterschiedlicher Körper ist ein häufiges Problem in den Ingenieurwissenschaften. In der Regel muss die Anregung von Maschinenstrukturen oder Werkzeugen mit der Eigenfrequenz vermieden werden, da dies zu destruktiven Schwingungszuständen führen kann [32]. Auch sind Anregungen von Blechen, Maschinenabdeckungen und so weiter zu vermeiden, da dies zu unerwünschten Vibrationen und damit zum Lösen von Verbindungsstellen, Schrauben und Materialermüdung führen kann.

Für einfache geometrische Körper, wie Platten unterschiedlicher Kantenlänge und Dicke, können Eigenfrequenzen recht bequem berechnet werden. Komplizierter wird die Berechnung schon durch unterschiedliche Aufhängungen des Körpers.

Leissa [33] hat eine Sammlung von Formeln zur Berechnung unterschiedlichster geometrischer Körper in verschiedenen Aufhängungen zusammengestellt. Für eine Scheibe, die in der Mitte befestigt und am Rand frei ist, können die Eigenfrequenzen durch Formel 3 angenähert werden.

$$\frac{\ln(2) \cdot J_0(\lambda) - Y_0(\lambda)}{\ln(2) \cdot J_1(\lambda) - Y_1(\lambda)} = \frac{2(1-\nu)}{\lambda} \frac{I_0(\lambda)}{I_1(\lambda)} \quad (3)$$

(*J*: Massenträgheitsmoment; *Y*: Auslenkung; *ν*: Poisson Verhältnis (hier: 0,3))

λ wird in Formel 4 definiert:

$$\lambda = k \cdot a = \sqrt[4]{\frac{\rho \cdot \omega^2}{D}}; D = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \right] \quad (4)$$

(ω : Kreisfrequenz; *h*: Plattendicke; ρ : Dichte *E*: Elastizitätsmodul (hier Stahl: $2.1 \cdot 10^{11}$ N/m²);)

Werden die ersten 10 Nullstellen von Formel 3 genommen (Tabelle 2.12 in [33]) können die Eigenfrequenzen mit Formel 5 berechnet werden.

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \left[\frac{Eh^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}}; i = 0, 1, 2, 3, \dots; j = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

(*i, j*: Nummer der Knotendurchmesser / Kreise; γ : Masse je Volumeneinheit)

Die sich hieraus ergebenden Werte für die Eigenfrequenzen sind in Tabelle 3 angegeben. Bei der Bewertung dieses Ergebnisses ist zu bedenken, dass die Werte von real gemessenen Eigenfrequenzen unter Umständen deutlich abweichen können, da die mathematische Berechnung im Hinblick auf die reale Situation sehr idealisiert sein kann.

Für das hier betrachtete Werkzeug wird die Situation deutlich komplizierter, da das Werkzeug rotiert und sich dadurch in radialer Richtung versteift. Im Schnitt kommen noch Krafteinwirkungen auf den Blattrand hinzu. Für eine genaue Berechnung wäre auch noch zu berücksichtigen, dass das Werkzeug nicht homogen aufgebaut ist, sondern die Schneidsegmente aus einem anderem Material bestehen und aufgeschweißt sind, was für Materialinhomogenitäten sorgt. Zudem ist die Geometrie des Werkzeugs durch die Kreisgeometrie nur angenähert.

Matsushisa [30] hat die Eigenfrequenzen einer Trennschleifscheibe berechnet indem er folgende Vereinfachungen eingeführt hat: Die

Scheibenrotation wurde vernachlässigt und die auf den Blattrand wirkenden Kräfte wurden nur in radialer Richtung betrachtet, wobei die Kräfte durch ein Masse – Feder System mit extern periodisch wirkender Kraft angenähert wurden. Die Berechnungen ergeben eine Verschiebung der Eigenfrequenzen zu höheren Werten mit steigender, auf den Blattrand wirkender Kraft. Eine gleichartige Verschiebung der Eigenfrequenzen ergibt sich durch eine höhere Einzelschnitttiefe.

Tabelle 3: Berechnete Eigenfrequenzen f_{ij} einer mittig fixierten Scheibe (λ_{ij}^2 nach [33])

λ_{ij}^2	f_{ij} [Hz]
3.752	65.38
20.91	364.38
61.2	1066.49
120.6	2101.61
199.9	3483.52
298.2	5196.52
416.6	7259.80
555.1	9673.34

Das Problem der Reaktion der Eigenfrequenzen kreisrunder Strukturen auf unterschiedliche Krafteinwirkungen wird in vielen Arbeiten beschrieben, von denen einige im Folgenden erwähnt werden sollen.

Der Einfluss von unterschiedlichen Materialien auf die Eigenfrequenzen von elliptischen Platten wird in [34] beschrieben. Die Autoren untersuchen den Einfluss von Variation der Poisson Zahl und des Elastizitätsmoduls auf die Eigenfrequenzen und stellen systematische Variationen dar. Eine Möglichkeit die Eigenfrequenzen gezielt über die Plattendicke oder das Elastizitätsmodul zu modifizieren wird in [35] gegeben. Diese Erkenntnisse sind sinnvoll für die Auslegung neuer Werkzeuge, wenn an die Eigenfrequenzen bestimmte Anforderungen gestellt werden. Im Zusammenhang mit den hier gemachten Untersuchungen sind diese Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen den Materialeigenschaften des Werkzeuges und den Eigenfrequenzen als Ursache für Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen zu betrachten.

In [36] wird das Schwingungsverhalten des Systems Scheibe – Welle untersucht und verschiedene Einflüsse auf die Eigenfrequenzen der Scheibe dargestellt. Diese Einflüsse müssen auch bei der Betrachtung des Trennschleifverfahrens berücksichtigt werden. So legen die Autoren

in [37] dar, dass die Position des Blattes bezüglich der Welle (in welchem Rotationswinkel das Blatt auf der Welle befestigt wird) eine entscheidende Bedeutung für den Schnittverlauf besitzt.

Dies ist insofern problematisch, als dass bei Gesteinsbearbeitungsmaschinen nur selten Schnellspannvorrichtungen oder dergleichen zum Einsatz kommen, die eine reproduzierbare Scheibenposition auf der Welle gewährleisten können. Bei der Bewertung von Luftschalldaten muss also die Befestigung der Scheibe und der Einfluss der Scheiben – Wellen Interaktion als Fehlerquelle in Betracht gezogen werden.

Grundsätzlich stellt sich also die Berechnung des realen Schwingungsverhaltens des Systems Scheibe-Welle als sehr schwierig dar und kann nur durch Simulationstechniken wie die Finite-Elemente-Methode mit einiger Genauigkeit angenähert werden. Da dies den Rahmen dieser Arbeit überschreitet, soll hier die Betrachtung anderer technischer Systeme wenigstens zu qualitativen Aussagen über das Schwingungsverhalten einer Trennschleifscheibe im Schnittprozess führen.

Als ähnliche technische Systeme sind andere Kreisförmige technische Strukturen zu betrachten. Hierbei zeigen sich für bestimmte Prozesssituationen beim Trennschleifen Bremsscheiben-Systeme als sinnvolles Analogon. In die Erforschung der Entstehungsmechanismen von Quietschgeräuschen bei Bremsscheiben wird von Automobilherstellern eine nicht unerhebliche Summe investiert, da diese Geräusche häufige Garantieforderungen nach sich ziehen (z.B. [38, 39]).

Für die Entstehung dieser Geräusche gibt es verschiedene Theorien. Zu nennen wären hier zum einen die Entstehung durch sog. Stick-Slip-Reibung, die Theorie der geometrischen Instabilität und Kombinationen beider Theorien (nach [38]). Berechnungen, deren Ergebnisse in [39] gezeigt werden, legen einen Zusammenhang zwischen den Quietschgeräuschen und Doublet-Schwingungsmoden der Scheibe nahe, wobei es zur Aufspaltung der Doublet-Moden kommt, die umso größer wird, je größer die wirkenden Friktionskräfte sind. Gleichzeitig ergeben die Rechnungen, dass die Winkellänge des Bremsklotzes ein entscheidender Faktor für die Entstehung der ungewünschten Bremsscheibengeräusche ist.

3.

EXPERIMENTELLES

3.1 Luftschall Messtechnik

Die Aufnahme des Luftschalls erfolgt über 4 Mikrophone, die über einen Mehrkanal – Analog – Digitalwandler (A/D-Wandler; RME Fireface 800) mit einem Computer verbunden sind, der die Steuerung des Wandlers und die Aufzeichnung der Messdaten übernimmt. Die Messkette ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt.

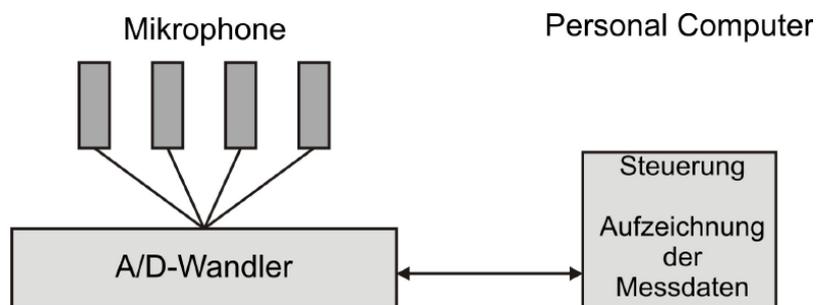


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Messkette

Die von den Mikrophenen gegebenen Spannungssignale können vom A/D-Wandler mit einer Sampling Rate bis zu 192000 Hz und 24 Bit digitalisiert werden. Die Mikrophone vom Typ Sennheiser ME36 sind eine Kombination aus Druckgradientenempfänger und Interferenzrichtrohr.

Bis 1000 Hz überwiegt die typische Charakteristik des Druckgradientenempfängers, darüber zeigt sich die zunehmende Richtwirkung des Interferenzrichtrohrs (Abbildung 7).

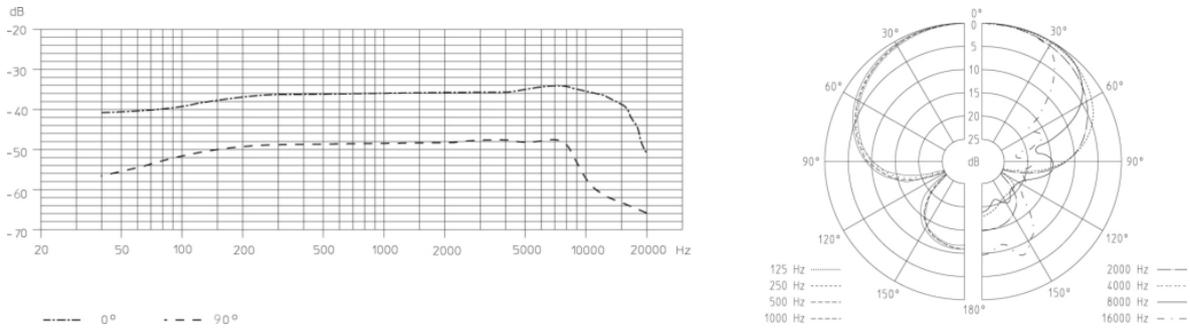


Abbildung 7: Links: Frequenzgang, rechts: Richtcharakteristik des ME36 Mikrophons (FA. Sennheiser)

In Abbildung 7 sind Frequenzgang (links) und Richtcharakteristik (rechts) dargestellt, wobei die Gradzahlen die Schalleinfallrichtung und die dB-Werte in der Mitte des Polardiagramms die Schalldämpfung angeben, wenn dieser nicht aus der Haupteinfallrichtung (0°) auf das Mikrofon trifft. Am Versuchsstand werden die Mikrophone so angebracht, dass ihr Dämpfungsminimum in Richtung der Trennschleifscheibe zeigt. Dies gewährleistet einen gleichmäßigen Frequenzgang von ca. 40 bis 15000 Hz. Drei der Mikrophone befinden sich innerhalb der Maschinenumhausung, eines zeichnet außerhalb Störgeräusche aus der Werkhalle auf (Abbildung 8).

Platzierung der Mikrophone

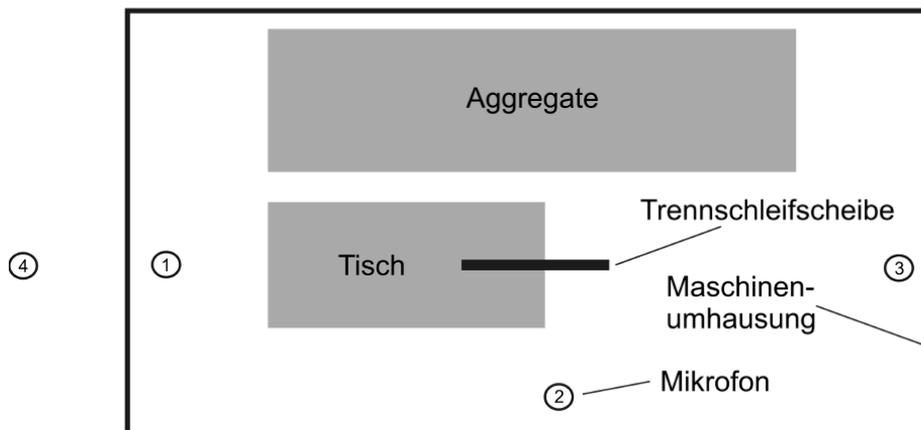


Abbildung 8: Mikrophananordnung am Versuchsstand

Abgestimmt auf den Frequenzgang der Mikrophone erfolgt die Aufzeichnung der Messdaten mit 24000 Hz und 16 Bit.

Die Auswertung der Luftschalldaten erfolgt zum einen im Hinblick auf die im Prozess erzeugten Gesamtsignalpegel, zum anderen wird eine detaillierte Frequenzanalyse mittels Short Time Fast Fourier Transformations (ST-FFT) durchgeführt. Bei der Bewertung der Signalpegel können durch die Mittellung über verschiedene Zeiträume unterschiedliche Einflussgrößen betrachtet werden. Die dabei zu betrachtenden Einflussgrößen fasst Tabelle 4 zusammen. Der Luftschallsignalpegel LS_{RMS} (RMS: Root Mean Square – Quadratischer Mittelwert) wird dabei mit folgender Formel berechnet:

$$LS_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \tag{6}$$

Wobei n die Anzahl der Samples ist, über die die Mittelwertbildung erfolgt.

Tabelle 4: Einflussgrößen die durch unterschiedliche Mittelwertbildung des Signalpegels betrachtet werden können.

LS_{RMS} Mittelung über	Einfluss des Fertigungsprozesses	Aussage hinsichtlich des Werkstoffes
Trennfuge	-	Vergleich verschiedener Werkstoffe
Einzelschnitt	Lineare Abnahme mit $a_{e,ges}$	Abweichungen von der Linearität zeigen Werkstoffeinfluss
Zeitabschnitte innerhalb eines Einzelschnittes	Variationen beim Ein- und Ausfahren aus der Trennfuge	Abweichungen vom Mittelwert des Einzelschnittes zeigen Werkstoffeinfluss

Zur Korrelation zwischen Luftschalldaten und Trennfugenzusammensetzung werden innerhalb der Einzelschnitte sinnvolle Mittelungszeiträume ausgewählt und alle Teilschnitte dieser Mittelwertbildung unterzogen. So werden Daten für den Signalpegel aller Einzelschnitte erhalten, die in einem Grafikprogramm zu einer zweidimensionalen Darstellung umgerechnet werden, bei der die x-Achse der Vorschubrichtung entspricht, die y-Achse der Schnitttiefe und die Signalpegel in diesem Gitter farbkodiert werden. Durch Anwendung eines Bandpassfilters können auch die Signalpegel in einzelnen Frequenzbereichen so dargestellt werden. Diese Farbdarstellungen

werden über Abbildungen der Schnittfugen gelegt und können so direkten Aufschluss über Zusammenhänge zwischen Werkstoffzusammensetzung und Signalcharakteristika geben.

3.1.1 Signalfilterung im Frequenzraum

Das Gesamtsignal $S_s(t)$ enthält sowohl die Geräusche, die das Werkzeug im Trennprozess abstrahlt ($S_p(t)$) als auch die gesamten Nebengeräusche der Maschine ($S_n(t)$) (Formel 7).

$$S_s(t) = S_p(t) + S_n(t) \quad (7)$$

Der Maschinenleerlauf wird vor dem Schnitt aufgezeichnet und bei der Frequenzanalyse als Störsignal $S_n(t)$ aufgefasst und vom Gesamtsignal abgezogen, so dass idealerweise das reine Prozesssignal $S_p(t)$ zur weiteren Analyse vorliegt. Dieser Vorgang wird im Weiteren erläutert. Die mathematischen Grundlagen sind von Rahman [40] für die videographische Methode entwickelt worden.

Das Leerlaufgeräusch $S_n(t)$ der Maschine ist ein dynamisches Geräusch, zeigt also eine deutliche Zeitabhängigkeit, daher wird ein mittleres Rauschprofil im Frequenzraum $\langle S_{ng}(f_i) \rangle$ berechnet. Dazu wird für 2048 Samples des Störsignals die Fouriertransformation $S_n(f_i)$ berechnet und alle n Transformationen gemittelt:

$$\langle S_{ng}(f_i) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_n(f_i) \quad (8)$$

Dies ermöglicht die Berechnung des Signal – Rausch – Verhältnisses im Frequenzraum (SNR) gemäß:

$$\text{SNR} = \frac{S_s(f_i)}{S_{ng}(f_i)} \quad (9)$$

Die Filterung des Gesamtsignales $S_s(f_i)$ geschieht mittels einer Faltung mit der modifizierten Wiener – Formel [41], wobei r der Reduktionsfaktor, der einen Wert zwischen 1 und 10 annehmen kann, ist:

$$S'_s(f_i) = S_s(f_i) \cdot \left(\frac{\text{SNR}}{\text{SNR} + 1} \right)^r \quad (10)$$

Diese Methode der Filterung im Frequenzraum hat sich bei der Entfernung hochdynamischer Störsignale (wie zum Beispiel Musik) bewährt. Beispiele sind bei Rahman [42] aufgeführt.

3.2 Versuchsstand – Maschine und Werkzeuge

Die Untersuchungen werden auf einer Carl Meyer Gesteinssäge (Typ 416S) durchgeführt. Die Kreissäge stellt mit einer Spindelleistung von 22 kW und ihren Achsverfahrensgeschwindigkeiten praxisnahe Leistungswerte für das Trennschleifen mit Diamantwerkzeugen zur Verfügung. Abbildung 9 zeigt die Versuchsmaschine und Leistungsdaten. Der auskragende Support realisiert sowohl die Höhenverstellung (z-Achse) als auch die axiale Verstellung (x-Achse), während der Maschinentisch mit dem Werkstück (Betonblock) die Vorschubbewegung (y-Achse) ausübt. Die Betonblöcke der Abmaße 600 x 310 x 110 mm (LxBxH) sind auf einer massiven Aufspannvorrichtung mittels einer Metalleiste seitlich fixiert.

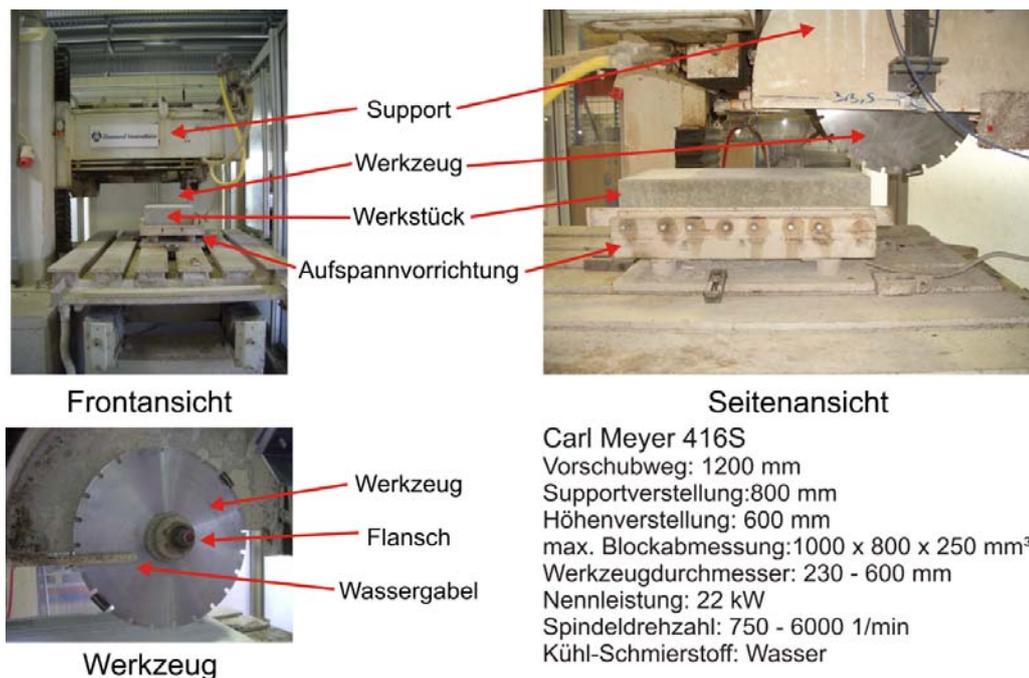


Abbildung 9: Versuchstand Carl Meyer 416S

Für die Untersuchungen kommen zwei Trennschleifscheiben zum Einsatz. Das erste ist lediglich mit zwei gegenüber liegenden Schneidsegmenten bestückt, wodurch ungewollte Störeinflüsse auf die Prozesssignale durch gleichzeitigen Eingriff mehrerer Segmente vermieden werden. Für die Untersuchungen des Trennschleifprozesses unter Realbedingungen wird ein vollsegmentiertes Werkzeug verwendet. Beide Werkzeuge verfügen über identische Stahlkerne und

Segmentzusammensetzungen. Lediglich die Segmentabmessungen weichen geringfügig voneinander ab (Spezifikationen vgl. Abbildung 10).



Durchmesser: 400 mm
Stammblattdicke: 2,8 mm
Stahlkern: 75Cr1

Segmente: ARIX FX60L
Anzahl: 2
Höhe der Segmente: 7 mm
Breite der Segmente: 3,8 mm
Länge der Segmente: 40 mm



Segmente: ARIX FX60R
Anzahl: 27
Höhe der Segmente: 13 mm
Breite der Segmente: 3,2 mm
Länge der Segmente: 40 mm

Abbildung 10: Spezifikationen der verwendeten Werkzeuge (links: Zweisegmentiges Werkzeug für die Vorversuche; rechts: Vollbesetztes Standardblatt)

3.3 Mineralogische Methoden zur Werkstoffanalytik

Die Analyse der verwendeten Betonwerkstoffe zielt auf die Härte der Gesteinskörnungen ab. Die petrographische Beschreibung folgt der DIN Norm 932-3 [43]. Der Hersteller der Betonprobekörper stellte Proben der drei zugesetzten Gesteinskörnungen zur Verfügung. Unter Zuhilfenahme von Gutachten der Werke, die die Gesteinskörnungen herstellen, wurde dann die Beschreibung der petrographischen Zusammensetzung der Gesteinskörnungen durchgeführt. Für das Ziel dieser Arbeit ist letztlich nicht eine statistisch repräsentative Aussage über die zugesetzte Gesteinskörnung von Bedeutung, sondern das tatsächliche Vorkommen einzelner Bestandteile auf der Trennfuge.

Die Bestimmung der Mohsschen Härte erfolgte mit den in Abbildung 11 (links) gezeigten Prüfstiften, an deren Spitze die Vergleichsminerale angebracht sind.



Abbildung 11: Prüfstifte zur Ermittlung der Mohsschen Härte (links) und in Kunstharz eingebettete Proben der Gesteinskörnungen (Beispiel)

Die Härtemessungen selbst wurden an den in Abbildung 11 (rechts) beispielhaft gezeigten in Kunstharz eingebetteten und polierten Körnern durchgeführt. Zur Einbettung wurden repräsentative Körner der in den drei Gesteinskörnungen vorkommenden Gesteinsarten ausgewählt.

Zur Absicherung der Ergebnisse der vereinfachten petrographischen Beschreibung nach DIN [43] wurden repräsentative Körner der vorkommenden petrographischen Fraktionen mittels

Röntgenpulverdiffraktometrie untersucht. Hierzu wurden die zu vermessenden Proben fein zermahlen und als Pulverpresslinge für die Messung vorbereitet. Die Messung wurde an einem Bruker AXS D4 Advance Diffraktometer in Bragg-Brentano Geometrie durchgeführt. Das Gerät verfügt über einen Festblendensatz mit einer Soller- und einer 0,6 mm Divergenzblende auf der Primärseite, auf der Sekundärseite ist es mit einer 0,6 mm Divergenzblende, Soller-Blende, Nickelfilter und 0,1 mm Schlitzblende versehen. Die Messungen erfolgten von 5 bis $80^\circ 2\Theta$ mit einer Schrittweite von $0,02^\circ$ und 4 Sekunden Messdauer je Schritt. Die Auswertung der Daten erfolgte über einen Abgleich mit der PDF-Datenbank und anschließender Rietveld Verfeinerung mit der Software Diffrac Plus TOPAS V3 (Bruker AXS).

Da das Interesse bei der Werkstoffanalyse auf der tatsächlichen Verteilung der Gesteinskörnungen in der Trennfuge liegt, wurden die Trennfugen nach den Versuchen auskartiert. Ziel war es, für die gewählte Einzelschnittzustellung eine Aussage über Korngrößen und Härten zu erzielen. Hierzu wurden die Trennfugenoberflächen fotografiert und die Fotografie anschließend mit einem Vektorgrafikprogramm manuell, durch Nachzeichnen der Kornumrisse, digitalisiert. Diese Kornumrisse wurden entsprechend ihrer Petrographie eingefärbt, so dass am Ende eine petrographische Karte der Trennfugenoberfläche, und somit direkte Informationen zur Härteverteilung in der Trennfuge, zur Verfügung stand. Eine weitergehende Auswertung hinsichtlich der Korngrößenverteilung kann an Hand der digitalisierten Daten mit der Bildverarbeitungssoftware ImageJ [44] durchgeführt werden.

4.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Charakterisierung der Werkstoffe

Wie bereits erläutert, hängt die Bearbeitbarkeit des Betons maßgebend von den Eigenschaften der im Beton enthaltenen Gesteinskörnungen ab. Um ein möglichst weites Feld an Betonproben mit unterschiedlichen Eigenschaften zu untersuchen, wurden ausgehend von der empirischen Klassifizierung [45] der Bearbeitbarkeit anhand der Gesteinskörnungen Tabelle 5 drei unterschiedliche Zusammensetzungen gewählt.

Tabelle 5: Bearbeitbarkeitsklassen von Beton (nach [45])

	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D	Klasse E
Zerspanbarkeit	sehr leicht	einfach, abrasiv	schwer, abrasiv	sehr schwer	extrem schwer
typische Gesteinskörnung	Karbonate	Sandstein mit Karbonaten und Glimmer	Einkristall- Quarze, Quarzite und Glimmer	Gangquarz, Quarzit	Flint, Radiolarit

Die im Forschungsprojekt verwendeten Betonproben sind den Bearbeitbarkeitsklassen A, C und E zugeordnet, wobei bei den Betonen der Klasse E auch der Zement variiert wurde, so dass ein Probekörper mit höherer Normfestigkeit zur Verfügung steht. Die wesentlichen Bestandteile von Beton sind Zement, gewaschener Sand und die zugesetzte Gesteinskörnung. Tabelle 6 zeigt die verwendeten Materialien.

Für die Flintkörnung ist kein Korngrößenbereich angegeben, in den Betonproben 3 und 4 kommen alle Korngrößen zwischen 3 und 60 mm Durchmesser vor. Die Zemente sind Produkte der Firma Holcim, für welche entsprechende Informationen des Herstellers vorliegen.

Tabelle 6: Zusammensetzung der Betonproben (nach [46])

Betonprobe	Gesteinskörnung	Zement (Druckfestigkeit in Mpa)	Sand
1	Leinekies 2-8 mm 8-16 mm	Holcim-Pur 3/ CEM 32,5 R	0-3 mm
2	Rheinkies 2-8mm 8-16 mm		
3	Flintkörnung (siehe S.35, heterogen: 3- >60 mm)		
4		Holcim-Pur 4-NA CEM I 42,5 R-NA	

4.1.1 Mineralogische Analyse der Gesteinskörnungen

Die mineralogischen Untersuchungen der Probekörper konzentrieren sich auf die verwendeten Gesteinskörnungen und ihre hinsichtlich der Bearbeitbarkeit wichtigen Eigenschaften. Dies ist insbesondere die Härte, welche den entscheidenden Einfluss auf die Wechselwirkung zwischen Werkzeug und Werkstück ausübt. Die drei verschiedenen Gesteinskörnungen (vgl. Tabelle 6) wurden hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Werkstoffeigenschaften untersucht. Die Nomenklatur der petrographischen Beschreibung erfolgt in Anlehnung an DIN EN 932-3 [43]. Bei der Gesteinskörnung Leinekies handelt es sich um einen Kalksteinkies. Die Zuschlagskörner sind im wesentlichen Kalksteine (CaCO_3 , Calcit) sowie einige Sandsteinkörner (SiO_2 , Quarz, vgl. Abbildung

12 oben). Geologisch gesehen ist die Zusammensetzung der Gesteinskörnung typisch für sedimentäre Gesteine der germanischen Trias.

Die Gesteinskörnung Rheinkies besteht aus Körnern magmatischer Herkunft, wobei es sich im Wesentlichen um granitische Gerölle handelt. In Röntgenbeugungsuntersuchungen zeigen sich bei den untersuchten Körnern Quarz, Feldspäte und vereinzelt Calcit (Abbildung 12 mitte).

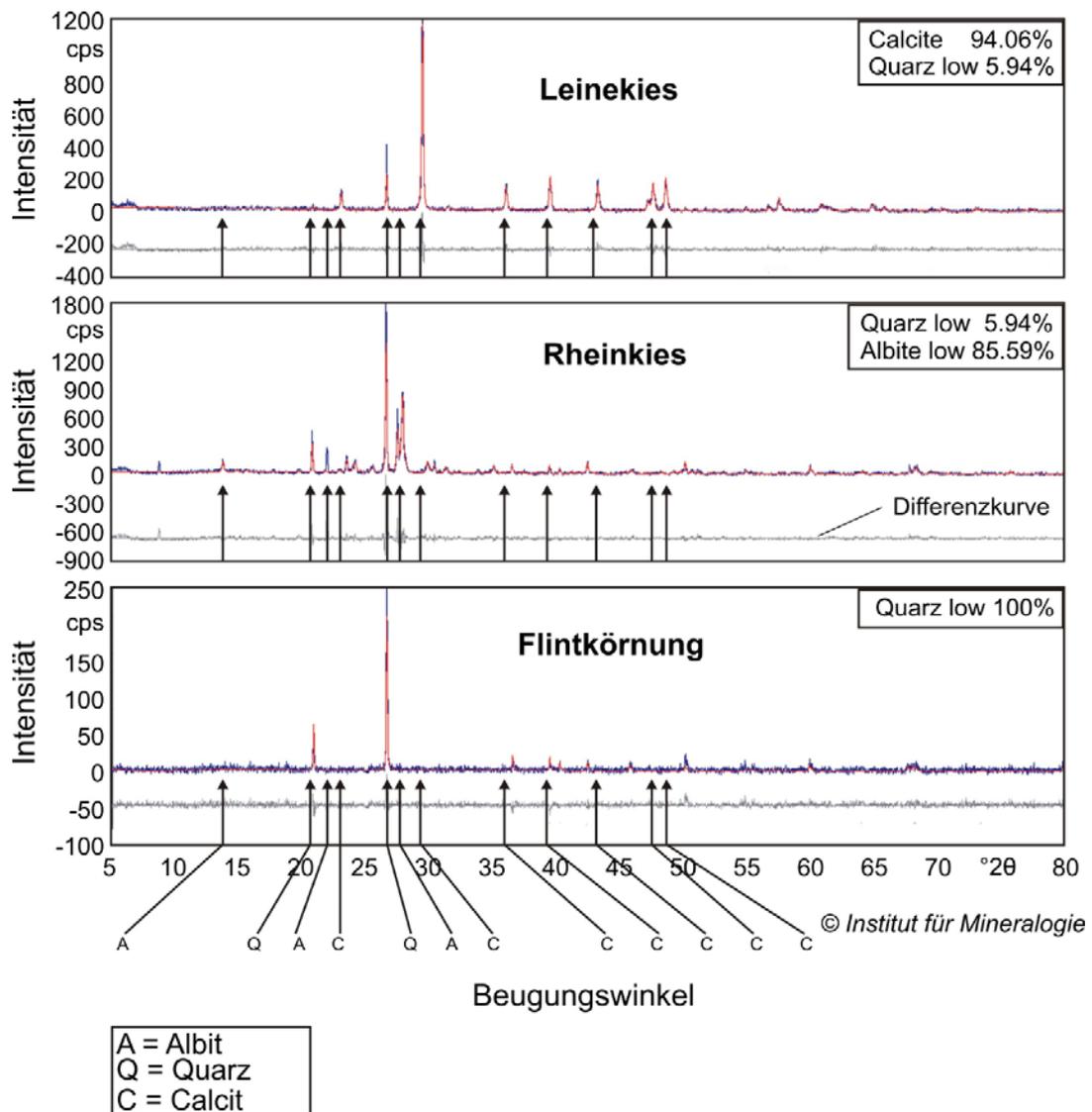


Abbildung 12: Beispielhafte Röntgenbeugungsuntersuchungen an Proben der drei Gesteinskörnungen

Die dritte Gesteinskörnung (Flintkörnung) ist gekennzeichnet durch magmatische und metamorphe Gerölle wie Flint, Granit und Porphyre mit klastischen Anteilen wie Orthoquarzite (Sandsteine aus

zementierten Quarzkörnern). Die Röntgenbeugungsuntersuchungen zeigen als wesentliche Phasen Quarze, Feldspäte und Glimmer (Abbildung 12 unten). In einigen Proben konnten auch metamorphe Minerale wie Cordierit (ein Mg-, Fe-, Al-haltiges Ringsilikat) nachgewiesen werden. Die Gesteine der Leinekieskörnung sind durchgängig als weich zu bezeichnen und weisen homogene Mohshärten von 4 auf (vgl. Tabelle 7). Die Mohshärte der untersuchten Proben der Rheinkieskörnung liegt bei 7. Einzelne Körner zeigen allerdings eine inhomogene Härte im Korn und zum Teil um bis zu zwei Stufen verringerte Mohshärten. Dies ist auf calcitische Kluftfüllungen zurückzuführen, die in solchen Gesteinen häufig anzutreffen sind.

Tabelle 7: Ergebnisse der Bestimmung der Mohshärte

Gesteinskörnung	HM minimal	HM mittel	HM maximal
Leinekies	4	4	4
Rheinkies	5 (vereinzelt)	7	8 (vereinzelt)
Flintkörnung	Nicht bestimmbar (loser Verbund im Korn)	Nicht bestimmbar, da stark schwankend	8,5

Die Ritzuntersuchungen zeigen für die Flintkörnung ein äußerst heterogenes Bild. Zum einen kommen Zuschlagskörner mit sehr hohen Härtewerten wie der Flint vor, bei dem die gemessenen Härten mit 8,5 deutlich über den Literaturwerten (HM = 7) liegen. Zum anderen finden sich hier Körner wie die Orthoquarzite und verwitterte Granite, die keinen festen Kornverbund mehr besitzen. Auch treten hier korninterne Härteunterschiede von bis zu 2 Mohshärten deutlich häufiger auf als bei der Körnung Rheinkies. Die Ritzhärte der die Zuschlagskörner umgebenden Bindephase aus feinkörnigem Sand und Zement liegt für beide verwendeten Zementarten unter HM = 2. Hierbei ist kein Einfluss der unterschiedlichen Druckfestigkeit auf die Ritzhärte festzustellen. Abbildung 13 zeigt die Ritzungen auf zwei Körnern, einmal ein Kalksteinkorn aus der Körnung Leinekies (geringste Mohshärte) und zum anderen ein Flintkorn (höchste Mohshärte) aus der Flintkörnung. Die Unterschiede in der Härte sind deutlich zu erkennen.

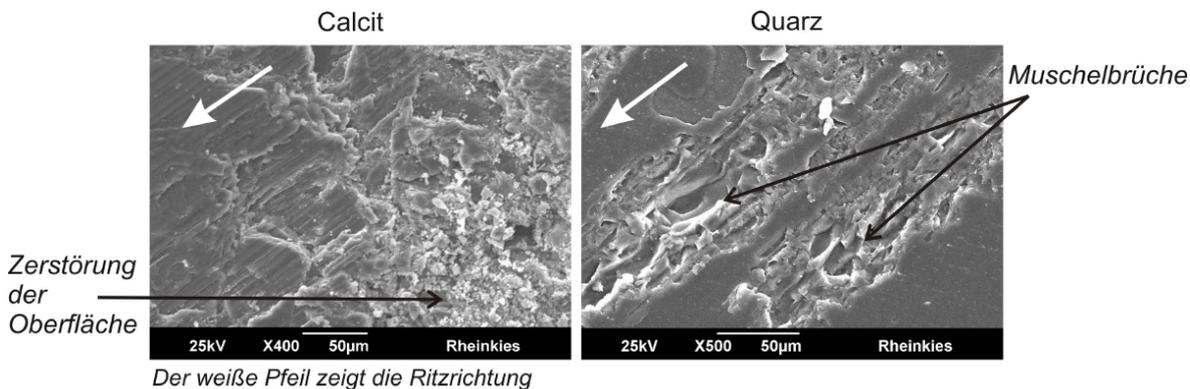


Abbildung 13: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Ritzversuche

Die Probe aus dem Leinekies zeigt breite Ritzspuren bei allen verwendeten Vergleichsmineralen ($HM \leq 4$), währenddessen bei der Probe aus der Flintkörnung nur für $HM = 9$ eine deutliche Ritzspur zu erkennen ist (Mohshärte 8,5). Diese ist zudem nur halb so breit wie die äquivalente Spur in der Leinekies-Probe. Der Zusammenhang zwischen Mineralbestand und Werkstoffeigenschaft wird in den REM-Aufnahmen und der Elementanalytik besonders deutlich. Abbildung 14 zeigt die REM/EDX-Aufnahmen eines typischen Gesteinskorns der Körnung Rheinkies. Im Bild links ist ein Ritzversuch über die Phasengrenze hinweg zwischen Quarz und Calcit in einem Zuschlagskorn des Rheinkies dargestellt (mit Ritzspur, Testmineral mit $HM 5$). Die Phasengrenze ist in der REM-Aufnahme gut zu erkennen, das EDX-Mapping (Abbildung 14, rechts) zeigt die Verteilung der Elemente Silizium (rot) und Calcium (grün). Deutlich ist der Unterschied in der Mohshärte in Abhängigkeit von der Mineralphase zu erkennen.

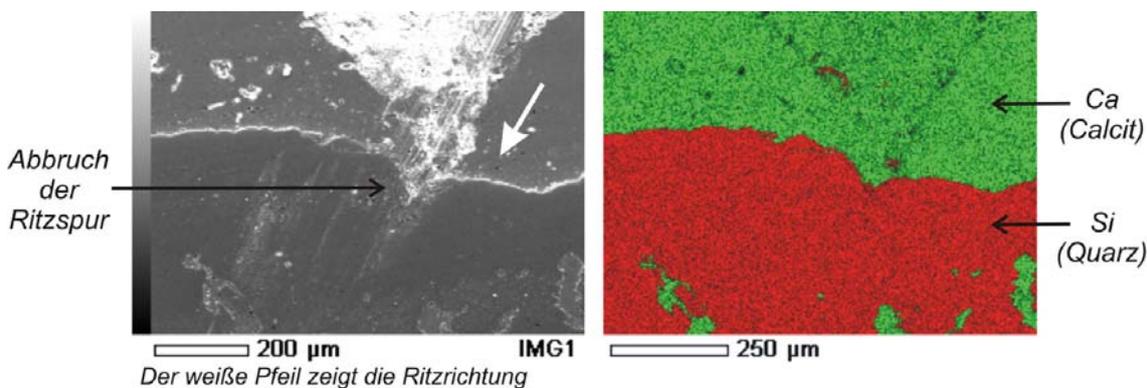


Abbildung 14: links: REM-Aufnahme; rechts: EDX-Mapping

4.1.2 Verteilung der Gesteinskörnung im Betongefüge

Für die Beurteilung des Trennschleifprozesses hinsichtlich der Bearbeitbarkeit ist die Konzentration der Gesteinskörnung in der Trennfläche von besonderer Bedeutung. Die in Tabelle 6 aufgeführten Daten der Ausgangsmaterialien bezüglich der eingesetzten Korngrößen weisen auf eine heterogene Korngrößenverteilung der Flintkörnung hin.

Aus den Trennfugen, die nach den Schnittversuchen zur Verfügung standen, wurden für die drei eingesetzten Gesteinskörnungen repräsentative Trennfugen ausgewählt. Ausschnitte aus diesen repräsentativen Betonschnittfugen sind in der nachstehenden Abbildung 15 dargestellt. Die Betone mit den Körnungen Leinekies und Rheinkies zeigen eine gleichmäßige Verteilung der Körner im Beton sowie eine homogene Größenverteilung gemäß den Daten in Tabelle 6. Beton mit der Gesteinskörnung Flintkörnung zeigt deutlich eine heterogene Verteilung der Gesteinskörnung im Beton als auch der Korngrößen selbst.



Abbildung 15: Repräsentative Ausschnitte von Trennfugenflächen der drei Gesteinskörnungen (Größe der Ausschnitte 10 x 10 cm)

Das Ergebnis einer Bestimmung des Flächenanteils der Gesteinskörnungen auf den repräsentativen Fugenflächen ist in Abbildung 16 als Histogramm und kumulierte Häufigkeit aufgeführt.

Verteilung der Korngrößen auf repräsentativen Schnittfugen

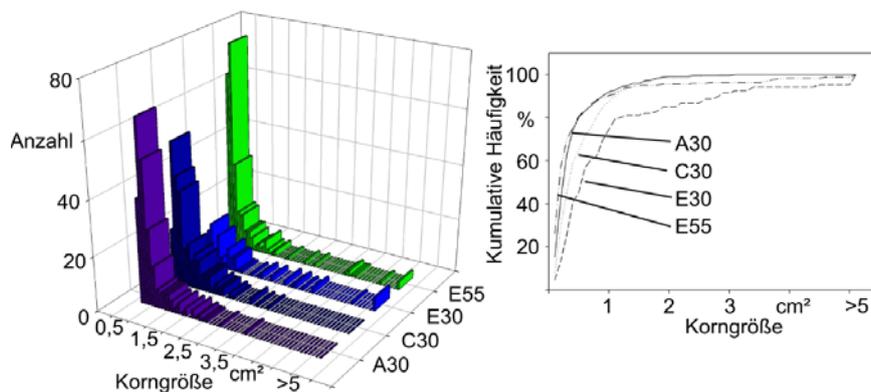


Abbildung 16: Korngrößenverteilungen auf beispielhaften Trennfugen der vier Betonsorten

Hierbei zeigt sich, dass die homogenen Werkstoffe A30 und C30 eine gleichartige Verteilung der Korngrößen aufweisen. Im Gegensatz dazu ist gerade am unstetigen Verlauf der kumulierten Häufigkeit im Falle des Betons E30 die hohe Heterogenität in der Größenverteilung der einzelnen Zuschlagskörner zu erkennen. Insbesondere tauchen bei den heterogenen Werkstoffen auch Körner mit einer Größe von über 5 cm^2 auf. Für die ausgewählte Fuge von E55 sind die Effekte schwächer ausgeprägt. In Abbildung 17 werden die Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen mit den Schnittfugenflächen beispielhaft für zwei Schnittversuche mit den Betonen A30 und E30 korreliert.

Hier fließen die Ergebnisse der einzelnen mineralogischen Analyseverfahren zusammen und ermöglichen es so, einen Bezug zwischen der Bearbeitbarkeit des Werkstoffes und den Prozesssignalen herzustellen. Deutlich erkennbar sind die bereits angesprochenen Unterschiede in der Verteilung der Korngrößen und der mineralogischen Zusammensetzung zwischen den Betonen A30 und E30.

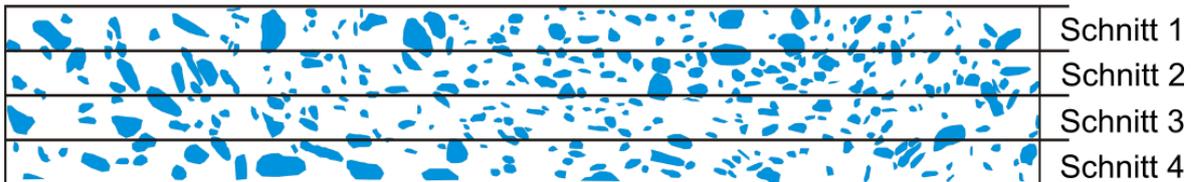
Der Werkstoff A30 ist ein homogener Werkstoff im Hinblick auf die mineralogische Zusammensetzung (und damit auch auf die Härte) und die Verteilung der Korngrößen auf der Trennfuge. Analoges gilt für den Werkstoff C30. In der „Kartierungs“-Darstellung ist für den Beton E30 mit der zugesetzten Flintkörnung ganz deutlich die Heterogenität dieser Gesteinskörnung erkennbar.

Trennfuge

Werkstück: A30



Zusammensetzung der Gesteinskörnung

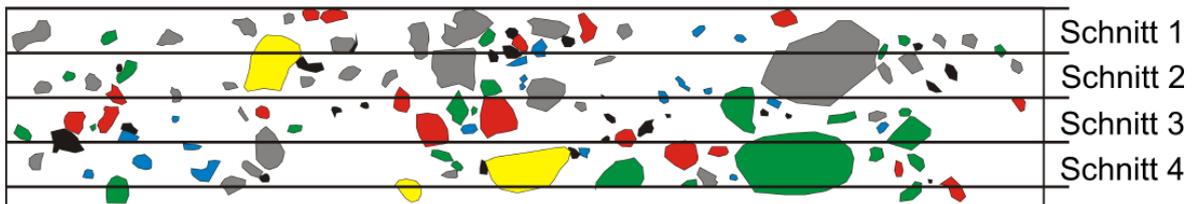


Trennfuge

Werkstück: E30



Zusammensetzung der Gesteinskörnung



Poren
 Flint, HM=8
 Granit, HM=6
 Quarzit, HM=N/A
 Kalkstein., HM=4
 Porphy, HM=5

Einzelschnitttiefe: 25 mm
 Vorschubgeschwindigkeit: 2 m/min

Schnittgeschwindigkeit: 40 m/s
 Schnittrichtung: links nach rechts

Abbildung 17: Zwei Schnittfugenoberflächen in photographischer Darstellung und in Form einer Kartierung mit petrographischer Beschreibung und Mohshärte.

4.2 Vorversuche - Werkzeug mit zwei Schneidsegmenten

Mit dem in Abbildung 10 (links) gezeigten Werkzeug mit nur zwei Diamantschneidsegmenten wurden Vorversuche durchgeführt, die darauf abzielten, die Signale, die bei dem Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug entstehen, einzelnen Mineralphasen auf der Trennfuge zuzuordnen. Die impulsartige Werkzeuganregung, mit zwischen den Segmentkontakten frei ausgeführten Schwingungen, machte diese Zuordnung nicht möglich, dennoch konnten Erkenntnisse über das Werkzeugschwingungsverhalten aus den Signalpegeln und Frequenzuntersuchungen gewonnen werden.

4.2.1 Signalpegelmittelwerte

In Abbildung 18 ist der Verlauf der Signalpegelmittelwerte in Abhängigkeit von der Gesamtschnitttiefe und Schnittgeschwindigkeit dargestellt. Zur besseren Übersicht sind die Datenpunkte durch Linien verbunden worden. Die Einzelschnittzustellung beträgt 5 mm und es sind Messungen ab $a_{e,ges} = 55$ mm berücksichtigt, da bei geringeren Gesamtschnitttiefen die Blattführung unzureichend ist.

Insgesamt zeigt sich eine starke Streuung der Messwerte an Stelle der zu erwartenden linearen Abnahme mit zunehmender Gesamtschnitttiefe. In Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit ist zu sehen, dass die Messungen mit $v_c = 40$ m/s die geringste Streuung aufweisen. Die Werkstoffe lassen sich bei den Versuchen mit diesem Werkzeug nicht an Hand ihrer Gesamtpegelwerte unterscheiden (Abbildung 19).

Auf Grund der Beobachtungen wurde für eine detailliertere Untersuchung der Schnittversuch mit dem Werkstoff E55 und $v_c = 40$ m/s ausgewählt, da auf der Trennfuge sowohl ein sehr leicht (verwitterter Granit) als auch ein sehr schwer zu bearbeitendes Zuschlagskorn (Flint) zu finden war.

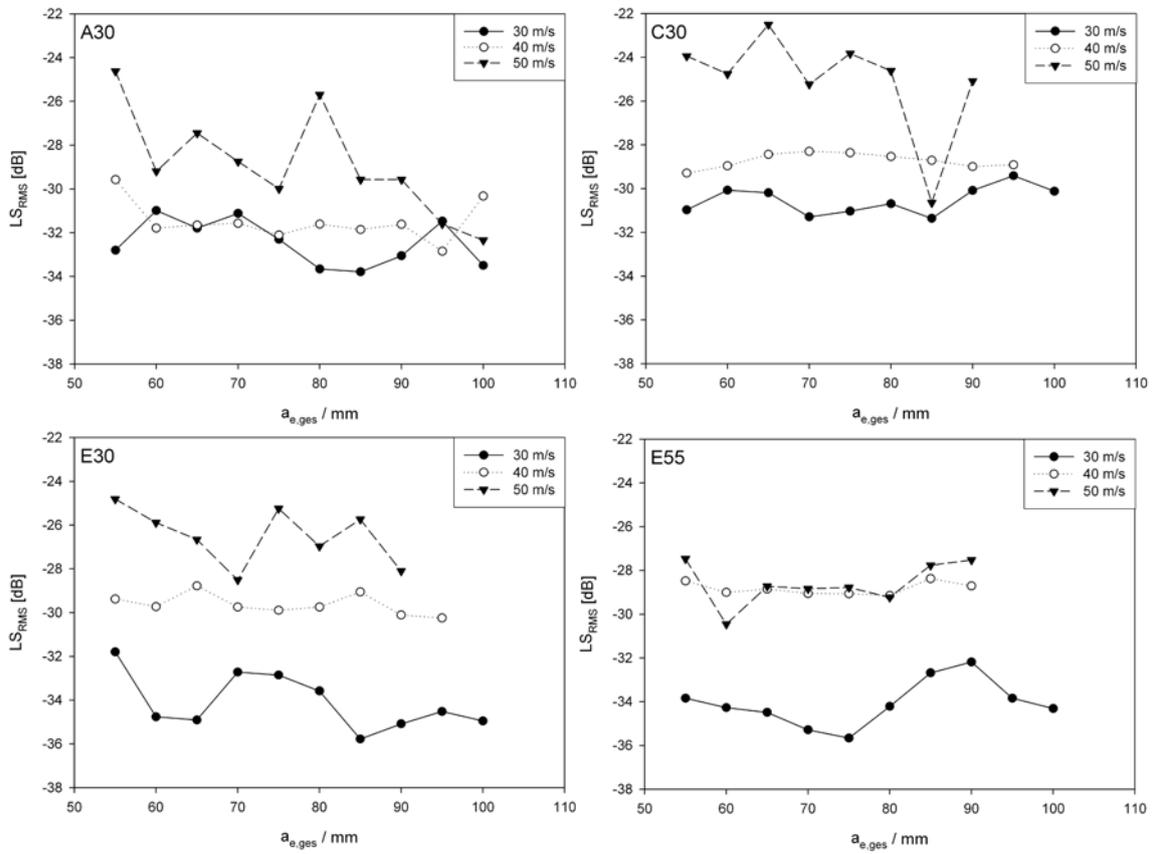


Abbildung 18: Signalpegelmittelwerte bei Versuchen mit dem Werkzeug mit reduzierter Segmentanzahl

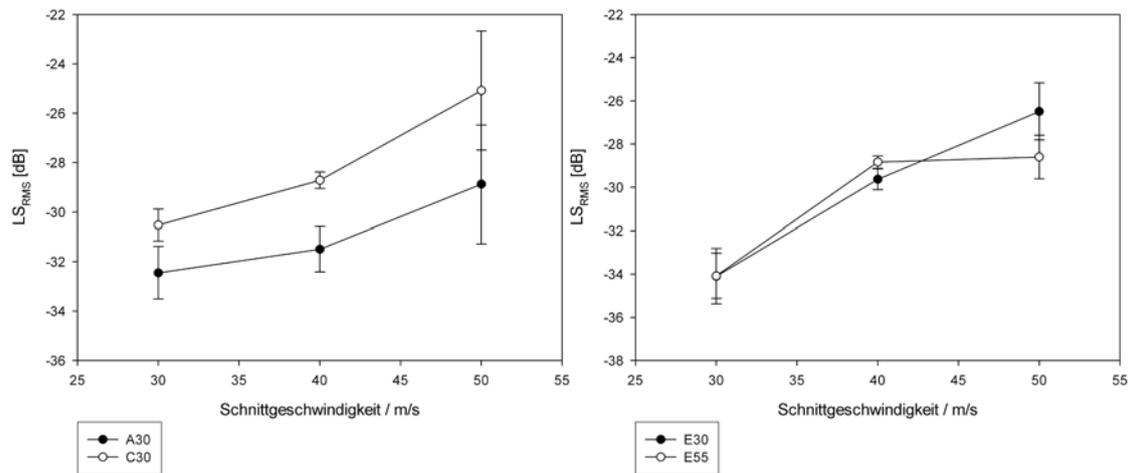


Abbildung 19: Mittelwerte und Standardabweichungen der in Abbildung 18 gezeigten Daten

Abbildung 20 zeigt den Signalpegel in Abhängigkeit von der Position der Trennscheibe auf der Trennfläche. Um Prozessunterschiede bei einzelnen Zustellungen zu bestimmen, wird für jede Zustellung ein Mittelwert berechnet und von diesem ausgehend die Abweichung des LS_{RMS} je 0,04 s bestimmt und in der Dezibelskala aufgetragen.

Die Anstiege des Signalpegels lassen sich in Abbildung 20 mit zwei Vorgängen korrelieren. Zum Einen sind dies Gesteinskörner, die partiell angeschnitten werden und zum Anderen große Gesteinskörner, die vollständig durchtrennt werden. Im ersten Fall verursacht der partielle Anschnitt eines Gesteinskorns eine ungleiche Normalkraftverteilung über der Segmentbreite, was eine Auslenkung in axialer Richtung bewirkt. Dies führt zu seitlichem Streifen des Segments an der Fugenwand und axialen Schwingungsanregungen. Im anderen Fall ist dieser Einfluss vermindert, führt aber auf Grund der hohen Härte des Flints zu einer Erhöhung der Prozesskräfte und damit zur Verstärkung der axialen Schwingungen.

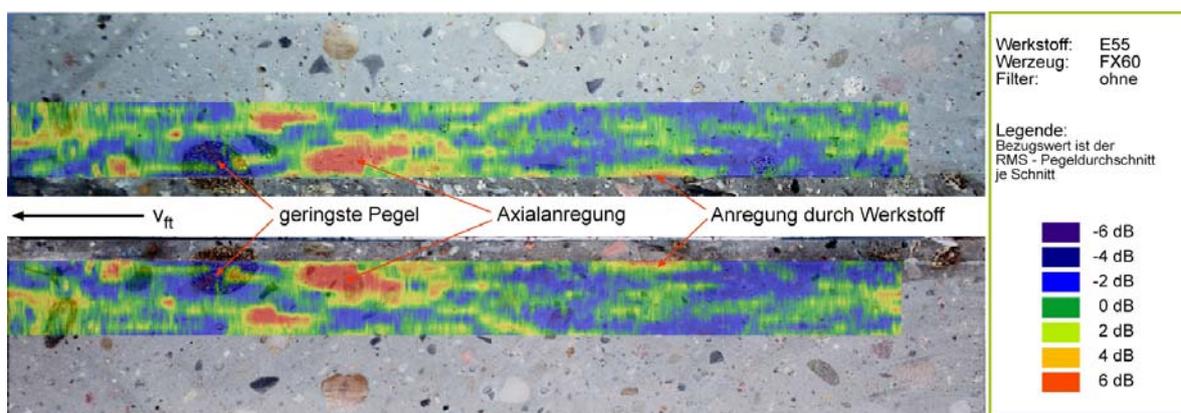


Abbildung 20: Farbkodierte Darstellung der Abweichung des LSRMS vom Mittelwert je Einzelzustellung in dB über der Photographie der Trennfuge. (Werkstoff: E55; $v_c = 40$ m/s; $a_c = 5$ mm).

Der Bereich der geringsten Pegel in Abbildung 20 ist mit dem verwitterten Granitkorn verknüpft. Zur weiteren Untersuchung bezüglich auftretender Frequenzen wurde nur diese Trennfuge herangezogen, da hier alle Anregungsmechanismen zu finden sind: Radiale Schwingungsanregung des Werkzeuges (Flint), axiale Anregung durch partiellen Anschnitt und Gesteinskörnungen, die sehr geringe Schleifkräfte verursachen.

4.2.2 Frequenzanalyse

Zur weiteren Untersuchung der verschiedenen Anregungsformen werden einzelne Eingriffe aus den drei in Abbildung 20 gekennzeichneten Bereichen extrahiert. Anschließend wird eine spektrale Darstellung mittels Fast Fourier Transformation (FFT) durchgeführt, um die spektrale Energieverteilung zu bestimmen. In den dargestellten Spektren (Abbildung 21) sind deutliche Unterschiede erkennbar.

Bereich 1 (Abbildung 21, oben) ist durch große Frequenzanteile bis $f = 1000$ Hz und um $f = 6000$ Hz gekennzeichnet. Die beiden Eingriffe aus Bereich 2 (Abbildung 21, mitte), der hauptsächlich durch Axialanregung gekennzeichnet ist, werden im Bereich unter $f = 1000$ Hz durch eine einzelne starke Frequenz dominiert. Die letzten untersuchten Eingriffe (Anregung durch den Werkstoff, Bereich 3 in Abbildung 21 (unten)) werden lediglich durch eine scharfe Bande bei $f = 640$ Hz gekennzeichnet und zeigen darüber hinaus kaum spektrale Charakteristika.

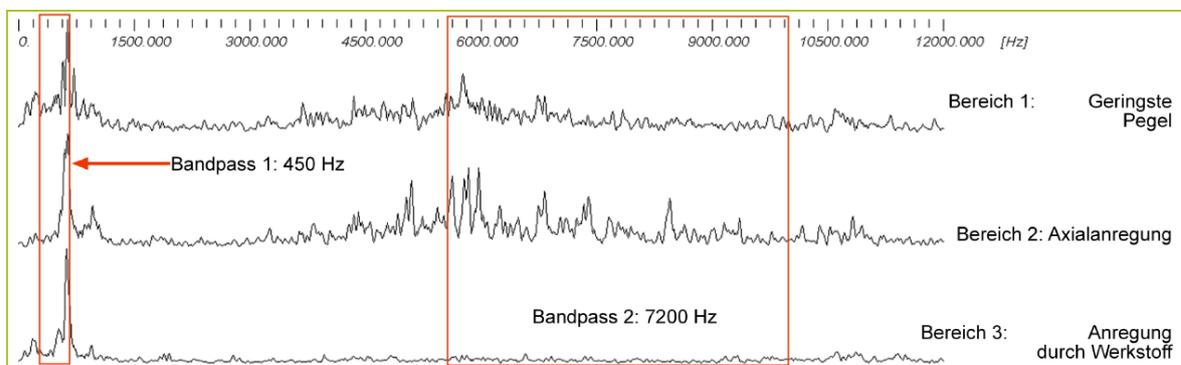


Abbildung 21: Frequenzanalyse der einzelnen Bereiche aus Abbildung 20: Bereich 1: Verwitterter Granit; Bereich 2: Axiale Anregung durch partiellen Anschnitt der Gesteinskörnung; Bereich 3: Radiale Werkzeuganregung durch mittig getrennten Flint.

Um diese Erkenntnisse mit den Schnitffugen abzugleichen, werden die Rohsignale mittels zwei verschiedener Bandpässe gefiltert (vgl. Abbildung 21) und die Abweichung vom errechneten Mittelwert bestimmt.

Dabei umfasst der Bandpassfilter 1 einen Frequenzbereich $f_{B1} = 450 - 750$ Hz (Dominanz der Werkstoffanregung, Bereich 3) und Bandpassfilter 2 $f_{B2} = 5.100 - 10.000$ Hz (Dominanz der Axialanregung, Bereich 2). Abbildung 22 zeigt die errechneten Ergebnisse für den hochfrequenten, Abbildung 23 für den niederfrequenten Signalanteil.

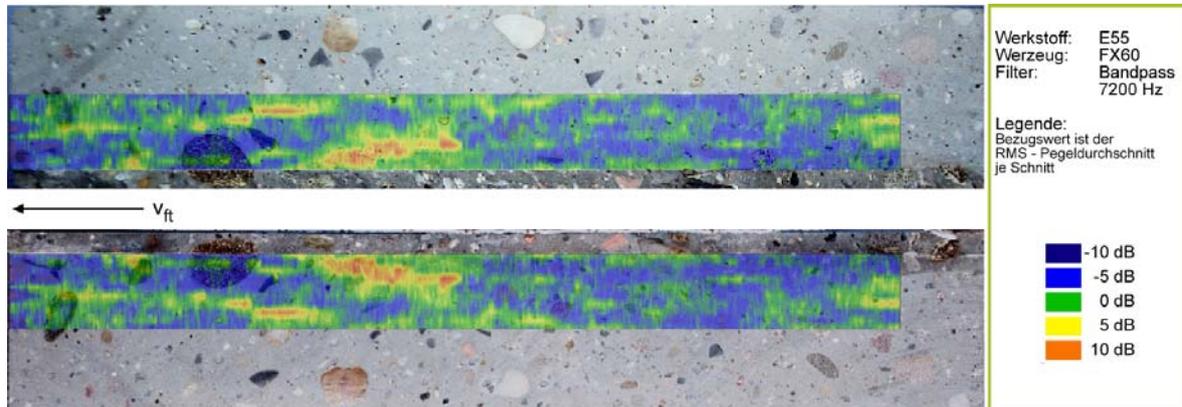


Abbildung 22: Darstellung des Signalpegels LS_{RMS} im Frequenzbereich 5100-10000 Hz.

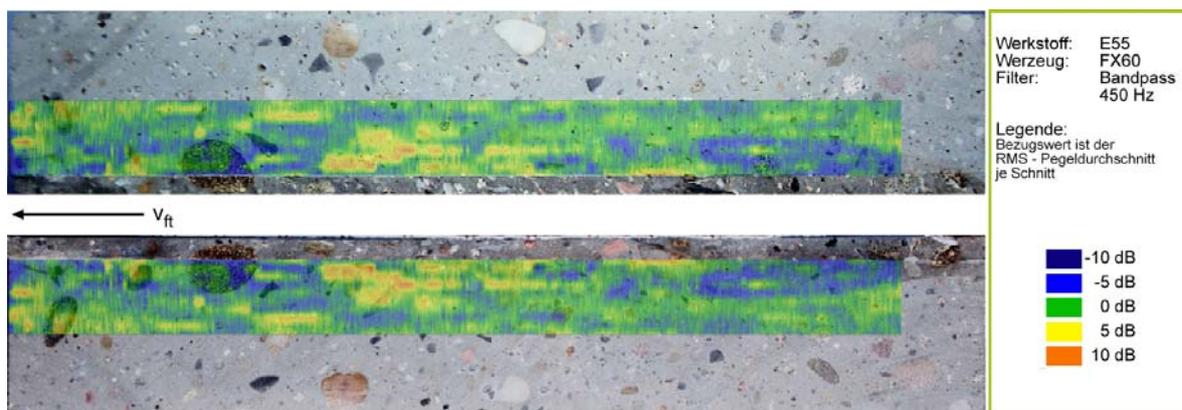


Abbildung 23: Darstellung des Signalpegels LS_{RMS} im Frequenzbereich 450-750 Hz.

Diese Übersichten der beiden Frequenzbänder decken sich mit dem Abgleich der Fugenwände. Insbesondere im Bereich der Axialanregung durch ein partiell angeschnittenes großes Gesteinskorn (Bereich 2) sind hohe Pegel bei der 5,1 – 10 kHz Filterung erkennbar. Während der mittig getrennte Flintstein (Bereich 3) bei dieser Filterung nur geringe Erhöhungen über den Mittelwert aufzeigt, sind die Signalpegel im Frequenzband um 450 – 750 Hz in diesem Bereich deutlich erhöht.

4.2.3 *Einschätzung der Ergebnisse der Versuche mit dem Werkzeug mit reduzierter Segmentanzahl*

Die Versuche mit dem Werkzeug mit reduzierter Segmentanzahl wurden durchgeführt, da es mit diesem Werkzeug möglich ist, den Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück genau zu erfassen. Allerdings zeigen die Ergebnisse der Vorversuche, dass die massive Reduzierung der Segmente zu keinem konstanten Werkzeugverhalten sondern zu starken Impulsanregungen führt, sobald das Werkzeug Kontakt mit dem Werkstück hat und anschließend wieder frei schwingen kann. Dies führt zu der oben beschriebenen starken Streuung der Signalpegelmittelwerte und der starken Anfälligkeit für axiale Anregungen. Auch eine eindeutige Abhängigkeit der Signalpegelmittelwerte vom Werkstoff kann nicht beobachtet werden.

4.3 Versuche mit vollbesetztem Werkzeug - Signalpegelmittelwerte

4.3.1 Einfluss der Normfestigkeit des Zementes

Zur Untersuchung grundlegender Einflussparameter auf das Luftschallsignal wurden Schnittversuche an Probekörpern durchgeführt, denen keine Gesteinskörnung zugesetzt war. Die Probekörper lagen in den Normdruckfestigkeiten 30 und 55 N/mm² vor. Eine Übersicht über die Versuche, die Betriebsparameter und die Ergebnisse der linearen Regression gibt die nachstehende Tabelle 8, die Messdaten und Ausgleichsgeraden dazu sind in Abbildung 24 dargestellt.

Tabelle 8: Übersicht über die Schnittversuche

Probekörper	v_c [m/s]	v_{ft} [m/min]	a_e [mm]	Steigung der Ausgleichsgeraden [dB/mm]	Achsenabschnitt [dB]
C30	40	1	5	-0.047 ± 0.002	-22.7 ± 0.1
			5	-0.055 ± 0.003	-22.3 ± 0.2
			10	-0.063 ± 0.004	-19.6 ± 0.2
			10	-0.062 ± 0.002	-19.7 ± 0.1
C55			5	-0.072 ± 0.002	-22.9 ± 0.1
			5	-0.072 ± 0.002	-22.7 ± 0.1
			10	-0.076 ± 0.002	-20.3 ± 0.2
			10	-0.073 ± 0.002	-20.5 ± 0.2

Die Messdaten zeigen eine lineare Abnahme der Luftschallpegel mit der Gesamtschnitttiefe. Die Pegel sind initial deutlich höher als bei Versuchen mit den Betonproben, allerdings fallen die Werte mit zunehmender Gesamtschnitttiefe deutlich stärker ab. Der Grund hierfür ist in der mangelnden Stabilisierung des Blattes durch den Probekörper zu finden. Der Zement ohne Zuschlag ist nicht hart genug um leichte Blattschwingungen effektiv dämpfen zu können, so dass sich das Blatt angenähert in einem Zustand der freien Schwingung befindet.

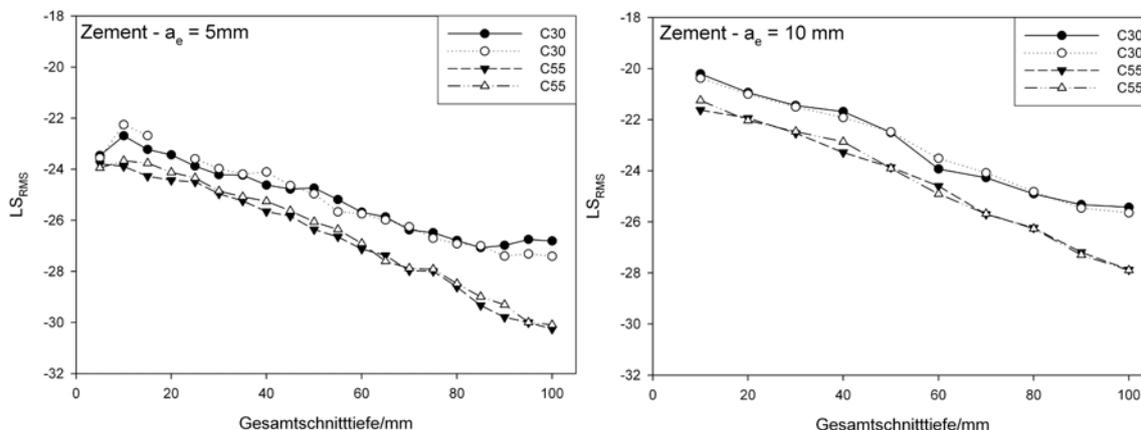


Abbildung 24: Signalpegelmittelwerte in Abhängigkeit von der Gesamtzustellung bei $a_e = 5$ (links) und 10 mm (rechts); Kreise: Normfestigkeit 30 N/mm², Dreiecke: Normfestigkeit 55 N/mm²

Beide Zementarten zeigen ein analoges Verhalten, die Erhöhung der Normdruckfestigkeit bewirkt lediglich eine geringe Abnahme des Luftschallpegels um ca. 1 dB. Die Erhöhung der Einzelschnitttiefe von 5 auf 10 mm sorgt insgesamt für eine Erhöhung der Signalpegel, bei ansonsten gleichem Verhalten in der Abhängigkeit von der Gesamtschnitttiefe.

In Abbildung 25 sind die Signalpegelmittelwerte für die Versuche mit einer Einzelschnitttiefe bis 100 mm zusammengefasst. Analog zu den bisherigen Ausführungen ergibt sich für beide Zemente ein gleiches Bild, mit einer etwas besseren Dämpfung durch die höhere Normdruckfestigkeit bei C55. Anzumerken bleibt bei dieser Abbildung, dass der Versuch mit $a_e = 25$ mm nur den ersten Teilschnitt beinhaltet, dieser Datenpunkt also heraussticht, weil die nötige Blattstabilisierung durch die Trennfuge fehlt. Insgesamt ergibt sich, dass die Erhöhung der Einzelschnitttiefe zu einer Erhöhung der Pegel bis zu einem gewissen Sättigungsbetrag führt.

Die Normdruckfestigkeit hat einen nur geringen Einfluss auf die Signalpegel, der deutlich kleiner ist als der typischerweise zu beobachtende Einfluss der Gesamtschnitttiefe. Dies bestätigt die untergeordnete Rolle des Bindematerials des Werkstoffes Beton bei der Bearbeitung mit Diamantwerkzeugen.

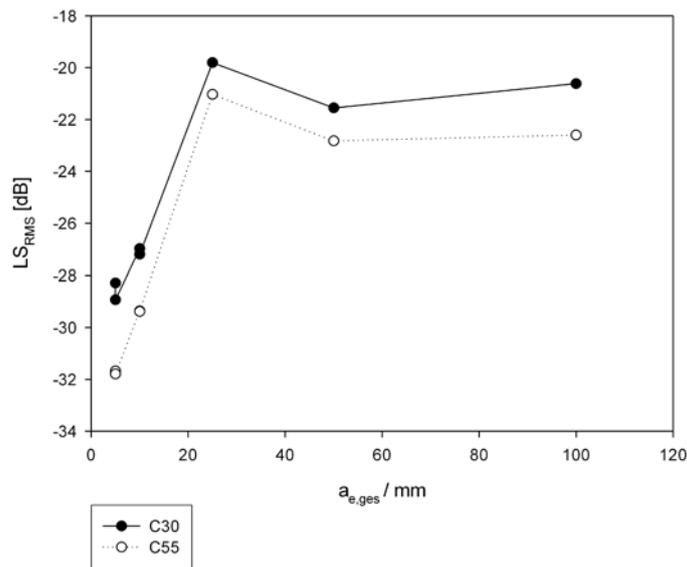


Abbildung 25: LS_{RMS} – Werte in Abhängigkeit von der Gesamtschnitttiefe für die reinen Zementproben

4.3.2 *Signalpegelmittelwerte in Abhängigkeit von Werkstoff und Betriebsparametern*

Mit dem vollbesetzten Werkzeug wurden Versuche mit unterschiedlichen Einzelschnitttiefen und Vorschubgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Übersicht der einzelnen Versuche zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Übersicht über die Versuche mit vollbesetztem Werkzeug

Versuch	Schnittgeschwindigkeit v_c [m/s]	Drehfrequenz [Hz]	Einzel-schnitttiefe a_e [mm]	Vorschubgeschwindigkeit v_{ft} [m/min]
1	40	30	5	1
2			25	0.5
3				1
4				1.5
5				2

Die Signalpegelmittelwerte der Einzelschnitte aus Versuch 1 ($v_{ft} = 1 \text{ m/min}$, $a_e = 5 \text{ mm}$; vgl. Tabelle 9) sind in Abbildung 26 gezeigt. Auf der linken Seite von Abbildung 26 sind die Luftschallsignalpegel beim Trennen der homogenen Werkstoffe A30 und C30, rechts die Pegel der heterogenen E – Werkstoffe in Abhängigkeit von der Gesamtschnitttiefe dargestellt. Auf Grund der geringen Eindringtiefe und der dadurch geringen Blattführung in der Fuge werden die ersten drei Einzelschnitte in Abbildung 26 nicht betrachtet.

Im Fall der homogenen Werkstoffe nimmt der Signalpegel mit zunehmender Gesamtschnitttiefe linear ab, die Ausgleichsgeraden für A30 und C30 weisen im Rahmen der Fehler eine identische Steigung auf, sie unterscheiden sich lediglich im Achsenabschnitt (Tabelle 10), auch ist die Anpassung der Geraden an die Datenpunkte sehr gut, die Streuung ist gering.

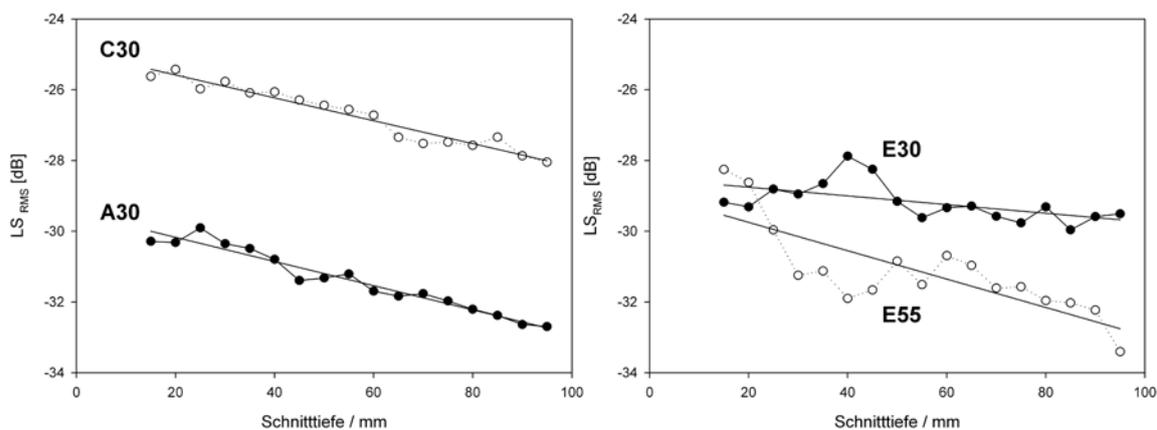


Abbildung 26: LS_{RMS} in dB in Abhängigkeit von der Gesamtschnitttiefe $a_{e,ges}$ mit linearen Ausgleichsgeraden bei Versuch 1 mit $a_e = 5 \text{ mm}$ und $v_{ft} = 1 \text{ m/min}$ (Tabelle 9)

Auch bei den heterogenen Werkstoffen E30 und E55 (Abbildung 26, rechts) ist eine Abnahme des Signalpegels mit der Gesamtschnitttiefe zu beobachten, allerdings fallen hier die Steigungen der beiden Ausgleichsgeraden deutlich unterschiedlich aus. Währenddessen die Achsenabschnitte im Rahmen des Fehler identisch sind.

Tabelle 10: Steigungen und Achsenabschnitte der Ausgleichsgeraden von Versuch 1 (Tabelle 9)

Werkstoff	Steigung [db/mm]	Achsenabschnitt [db]
A30	-0.034 ± 0.002	-29.5 ± 0.1
C30	-0.032 ± 0.002	-24.9 ± 0.1
E30	-0.012 ± 0.005	-28.5 ± 0.3
E55	-0.040 ± 0.008	-28.9 ± 0.5

Für die Beziehung zwischen Werkstoffzusammensetzung und Gesamtsignalpegel des Luftschalls ergeben sich für die Werkstoffe der Bearbeitungsklasse E Abweichungen von der zu erwartenden linearen Abnahme der Signalpegel mit der Gesamtschnitttiefe. Ursache ist deren heterogene Zusammensetzung hinsichtlich Korngröße und Härte.

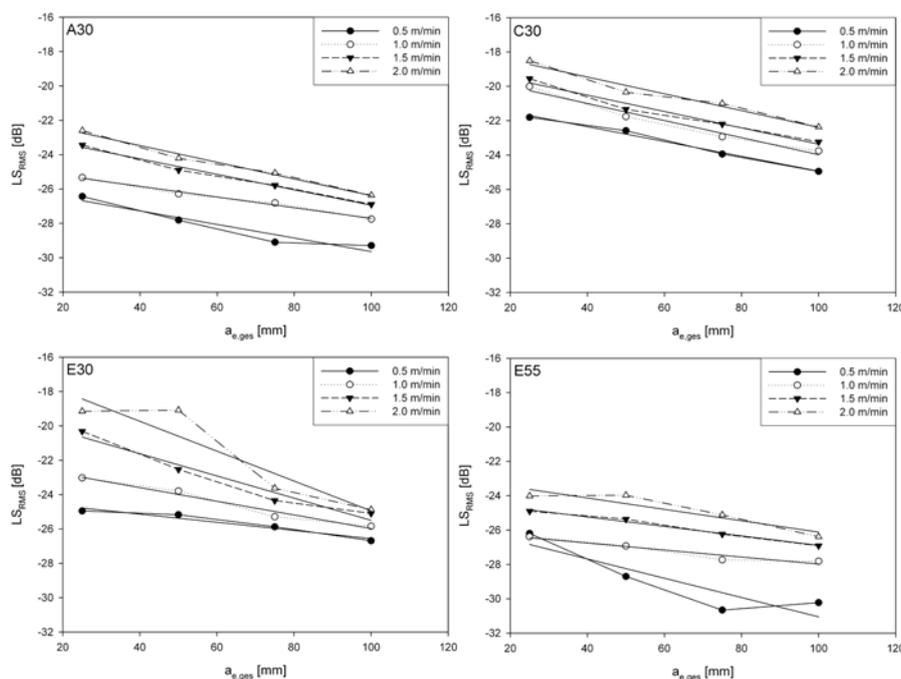


Abbildung 27: LS_{RMS} in Abhängigkeit von der Gesamtschnitttiefe $a_{e,ges}$ für die Versuche 2 bis 5 ($a_e = 25$ mm; Tabelle 9)

In den Versuchen 2 bis 5 (Tabelle 9) wurde die Einzelschnittzustellung ($a_e = 25$ mm) und Schnittgeschwindigkeit ($v_c = 40$ m/s) konstant gehalten und die Vorschubgeschwindigkeit zwischen 0,5 und 2 m/min in 0,5 m/min Schritten variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 27 mit den angepassten

Ausgleichsgraden dargestellt. Die Steigungen und Achsenabschnitte der Ausgleichsgeraden sind in Tabelle 11 gezeigt. Auch hier zeigen sich die Unterschiede in den Luftschallsignalpegeln zwischen homogenen und heterogenen Werkstoffen, die sich auch im Versuch 1 zeigten. Insgesamt ist bei diesen Versuchen die Streuung der Messdaten um die Ausgleichsgraden geringer, was auf die bessere Stabilisierung der Trennscheibe durch die höhere Zustellung zurückzuführen ist, sowie die höhere Mittelung über eine größere Werkstofffläche.

Tabelle 11: Steigungen und Achsenabschnitte der Ausgleichsgeraden der Versuche 2 bis 5 (Tabelle 9)

Werkstoff	Vorschub- geschwindigkeit v_{ft} [m/min]	Steigung [db/mm]	Achsenabschnitt [db]
A30	0.5	-0.039 ± 0.008	-25.7 ± 0.5
	1.0	-0.031 ± 0.003	-24.6 ± 0.2
	1.5	-0.045 ± 0.003	-22.4 ± 0.2
	2.0	-0.049 ± 0.004	-21.5 ± 0.3
C30	0.5	-0.043 ± 0.003	-20.6 ± 0.2
	1.0	-0.050 ± 0.006	-19.0 ± 0.4
	1.5	-0.047 ± 0.006	-18.6 ± 0.4
	2.0	-0.049 ± 0.006	-17.5 ± 0.4
E30	0.5	-0.023 ± 0.004	-24.2 ± 0.3
	1.0	-0.039 ± 0.005	-22.0 ± 0.3
	1.5	-0.064 ± 0.010	-19.0 ± 0.6
	2.0	-0.086 ± 0.023	-16.2 ± 1.6
E55	0.5	-0.056 ± 0.019	-25.4 ± 1.3
	1.0	-0.020 ± 0.004	-25.9 ± 0.3
	1.5	-0.028 ± 0.002	-24.1 ± 0.1
	2.0	-0.033 ± 0.009	-22.8 ± 0.6

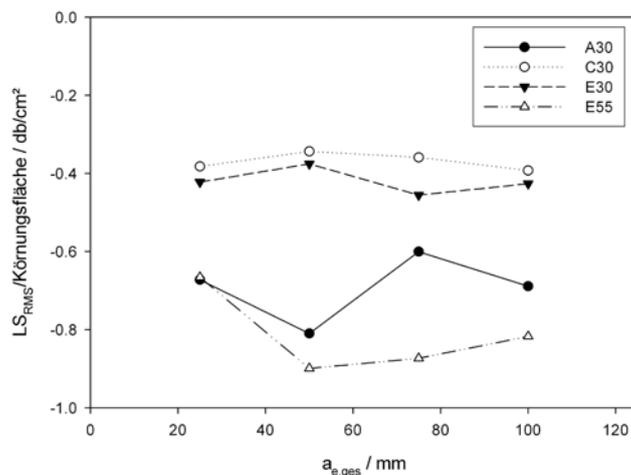


Abbildung 28: Körnungsflächenkoeffizient für die Versuche mit 2 m/min Vorschub

Mit Hilfe der ermittelten Ausgleichgraden können die Luftschallpegel für eine theoretische Zustellung von 0 mm berechnet werden, um die lineare Abnahme der Pegel mit der Gesamtschnitttiefe zu korrigieren. Abweichungen sollten dann nur noch von der Körnungsfläche, bzw. der Härte abhängig sein. Teilt man nun den so korrigierten Signalpegel durch die Körnungsfläche in der Einzelzustellung, sollten zumindestens für die homogenen Betonsorten A und C konstante Werte erhalten werden.

Abbildung 28 zeigt diesen Körnungsflächenkoeffizienten für die jeweiligen Zustellungen. Auffallend ist, dass insbesondere der Beton A deutliche Schwankungen aufweist, die nicht in der Härte der Gesteinskörnung begründet sein können. Beton C30 entspricht den Erwartungen einer Konstanz des Koeffizienten bei konstanter Werkstoffhärte. Für die Variationen dieses Koeffizienten können also nicht nur Körnungsfläche und Härte verantwortlich sein, sondern es ist zu berücksichtigen, dass auch maschinenseitige Einflüsse diesen Koeffizienten beeinflussen können. Da diese an der Versuchsmaschine nicht zu beziffern sind, muss hier eine Beschränkung auf qualitative Ergebnisse erfolgen.

4.4 Versuche mit vollbesetztem Werkzeug - Frequenzanalyse

4.4.1 Luftschallemission bei normalen Betriebsparametern

Insbesondere im Hinblick auf den Einsatz des Luftschalles zur Prozessüberwachung in industriellen Arbeitsbereichen ist eine Abschätzung des Verhältnisses von Prozess- und Hintergrundgeräuschen notwendig. Beim Trennschleifen zeigt sich, dass der hohe Geräuschpegel des Prozesses für die Verwendung als Prozesssignal von Vorteil ist.

Für diese Abschätzung wird die Aufnahme eines Trennschnittes mit der oben beschriebenen Methode im Frequenzraum gefiltert. Als Quelle für das sogenannte Rauschprofil dient das Leerlaufgeräusch der Maschine vor dem Erstkontakt von Werkzeug und Werkstück. Der direkte Vergleich von gefiltertem und ungefiltertem Signal zeigt lediglich geringe Unterschiede im Bereich von 700 bis 900 Hz und 1600 bis 2400 Hz (Abbildung 29).

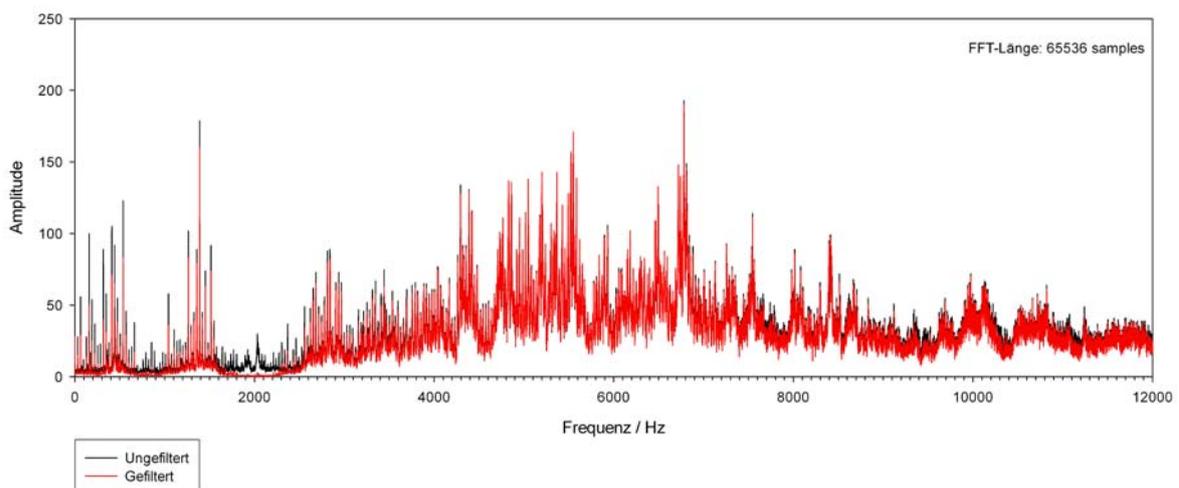


Abbildung 29: Vergleich von gefiltertem und ungefiltertem Signal eines Schnittversuches

Bei der Betrachtung der Signalpegel zeigt sich eine Abnahme der Pegel von ungefähr 1 dB durch die Filterung. Wie bereits erwähnt wurde bleibt also festzuhalten, dass der insgesamt hohe Lärmpegel, den der Trennschleifprozess aufweist, sich positiv auf die Störanfälligkeit durch

Umgebungsgeräusche auswirkt. Selbst bei der Betrachtung im Frequenzraum sind lediglich zwei definierte Bereiche mit direkter Einflussnahme der Maschinengeräusche zu beobachten. Weiterhin zeigt sich, dass während aller durchgeführten Versuche keines der von Mikrophon 4 aufgezeichneten Störgeräusche von Mikrophon 2 aufgezeichnet wurde (siehe Abbildung 8).

4.4.2 *Identifizierung der Schallentstehungsmechanismen in den Spektren*

Bei der Darlegung des Standes der Forschung wurden in Kapitel 2.3.1 fünf wesentliche Mechanismen der Schallentstehung bei Trennschleifscheiben aufgeführt, die in der Literatur unterscheiden werden [28, 29]. Hier nochmals zusammenfassend formuliert sind diese:

1. Impulsanregung
2. Aerodynamische Schallentstehung
3. Anregung von Eigenfrequenzen
4. Axiale und radiale Formfehler der Trennschleifscheibe
5. Segmentierung des Blattes

Zwar werden diese Mechanismen in der Literatur aufgeführt, doch konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit trotz intensiver Literaturrecherche keine Arbeit gefunden werden, in der eine Zuordnung der Schallentstehungsmechanismen zu bestimmten spektralen Charakteristika im Luftschall erfolgt.

Ein erster Schritt dazu soll daher nun hier vorgenommen werden und über den Vergleich des Schnittspektrums mit dem Spektrum des Leerlaufes der Scheibe in der Luft erfolgen (Abbildung 30).

Das Spektrum des Leerlaufes zeigt neben dem breiten Maximum im Bereich von 2000 bis ca. 2500 Hz, welches durch die Maschine verursacht wird, mehrere diskrete Frequenzen im Bereich über 6000 Hz. Diese diskreten Frequenzen sind der aerodynamischen Schallentstehung zuzurechnen und treten in keinem der Schnittspektren signifikant in Erscheinung. Der Grund hierfür ist vor allem, dass sich das Anströmverhalten der Luft an das

Werkzeug, welches für die Entstehung dieser Frequenzen verantwortlich ist, ändert wenn das Werkzeug teilweise durch den Werkstoff in der Trennfuge verdeckt ist.

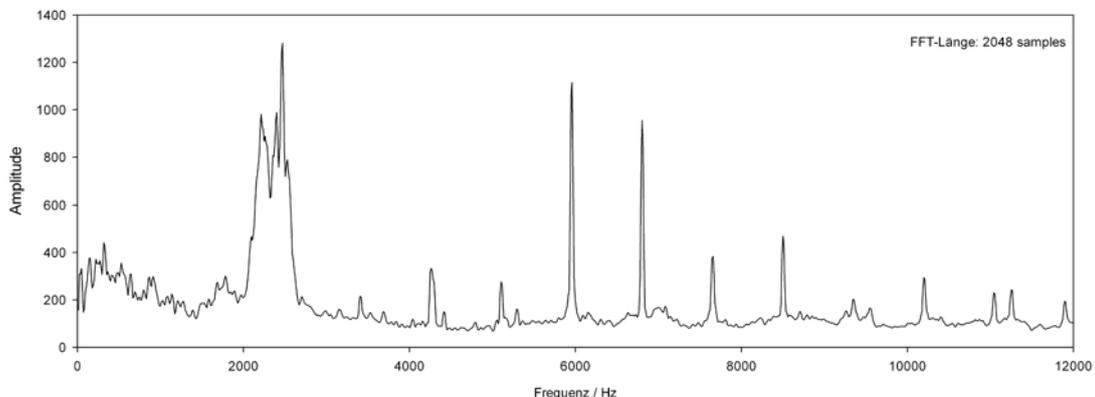


Abbildung 30: Spektrum der Schallemission bei Leerlauf des Werkzeuges in der Luft

Ein Vergleich der Spektren von Rücklauf und Schnitt zeigt Abbildung 31. Es wird ersichtlich, dass die wesentlichen spektralen Charakteristika die gleichen sind: Im hochfrequenten Bereich sind die Positionen der Maxima in beiden Spektren identisch, auch im niederfrequenten Bereich bis 400 Hz ist der augenfälligste Unterschied das Fehlen der Grunddrehfrequenz von 32 Hz im Spektrum des Rücklaufes.

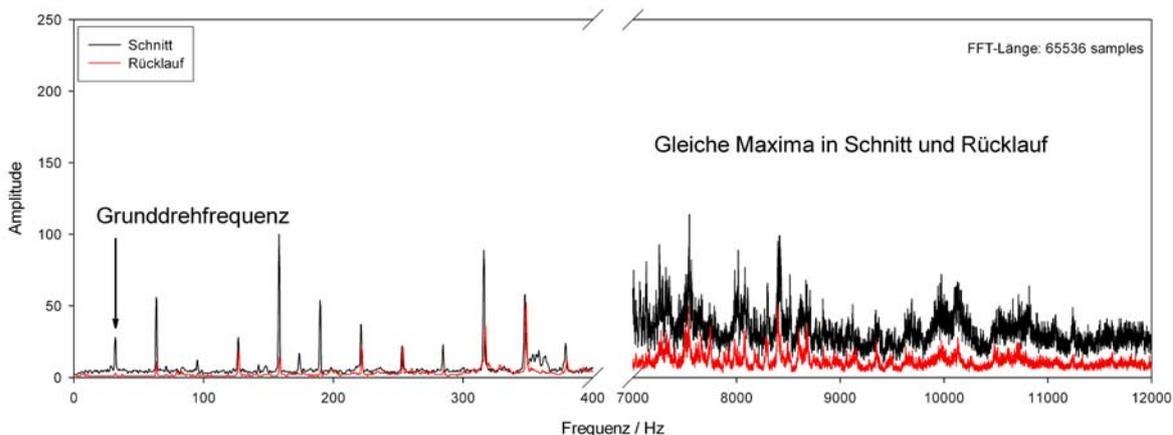


Abbildung 31: Vergleich der Schallspektren im Schnitt und im Rücklauf

Dies bedeutet, dass im Rücklauf keine axialen und radialen Formfehler ursächlich für die Schallentstehung verantwortlich sind, sondern lediglich stochastisch angeregte Eigenfrequenzen. Der Signalpegel ist im Rücklauf (-27,6 dB) natürlich geringer als im Schnitt (-21,3 dB), wodurch sich auch geringere Amplitudenwerte für den Rücklauf in der spektralen

Darstellung ergeben Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Identifizierbare Schallentstehungsmechanismen in den Spektren

Anregungsmechanismus	Schnitt	Rücklauf
Impulsanregung	+	-
Aerodynamische Geräusche	-	-
Eigenfrequenzen	+	+
Axiale Formfehler	+	-
Radiale Formfehler	+	-
Segmentierung des Blattes	+	-

Der Vergleich der gemittelten Schallspektren zweier Schnittversuche mit gleichen Betriebsparametern ($v_{jt}=2$ m/min, $a_e=25$ mm, $v_c=1900$ U/min) und unterschiedlichen Werkstoffen (A30 und E55) zeigt Abbildung 32. Der Gesamtsignalpegel ist für den Beton E55 3 dB höher als für Beton A30 (-24.2 dB). Bezüglich der auftretenden Frequenzen lässt sich feststellen, dass das Spektrum des Schnittes von A30 die Drehfrequenzen und ihre Vielfachen deutlich klarer heraustreten lässt. Es gibt deutliche Unterschiede im Hinblick auf die Lagen der Eigenfrequenzen im hochfrequenten Bereich und die Emission ist hier für den Beton E55 deutlich ausgeprägter. Im niederfrequenten Bereich sind die Frequenzlagen bis ca. 150 Hz für beide Spektren identisch, während bei Beton E55 sich die Frequenzen oberhalb von 150 Hz zu höheren Werten hin verschieben. Dies spricht deutlich für höhere, auf den Blattrand wirkende, Kräfte bei der Bearbeitung von Beton E55 mit der härteren Gesteinskörnung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Schallspektren der Schnittversuche lassen sich wie folgt zusammenfassen: Als erster Punkt ist festzuhalten, dass die Beeinflussung des Prozesssignals durch Maschinen- und Umgebungsgeräusche eine deutlich untergeordnete Rolle spielt und bei Kenntnis der besonders beeinflussbaren Frequenzbereiche vernachlässigt werden kann. Der Vergleich zwischen Schnittspektrum und Spektrum des Rücklaufes des Blattes in der Fuge machte es hier möglich die Frequenzbereiche der einzelnen Anregungen in den Luftschallspektren zu identifizieren. Im Schnitt besteht das Spektrum aus statistisch angeregten

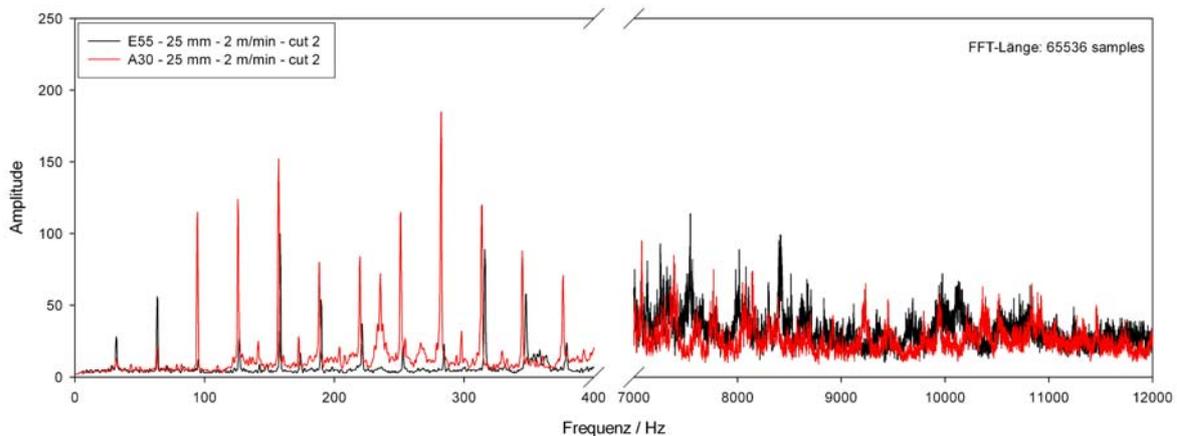


Abbildung 32: Vergleich der Schallspektren der Schnitte zweier unterschiedlicher Betonsorten (rot: A30; schwarz: E55)

Eigenfrequenzen, die von Vielfachen der Drehfrequenz überlagert sind. Die statistisch angeregten Eigenfrequenzen sind in den Spektren als breite Maxima besonders im hochfrequenten Bereich zu erkennen.

Der Vergleich der Schnittversuche mit Betonsorten mit unterschiedlich harter Gesteinskörnung zeigt sowohl einen Anstieg im Gesamtsignalpegel als auch eine Verschiebung der Frequenzlagen für Frequenzen oberhalb von 150 Hz zu höheren Werten. Dies entspricht den Beobachtungen und Berechnungen, die Matshushisa [30] gemacht hat: Krafteinwirkungen auf den Blattrand verursachen eine Verschiebung der Eigenfrequenzen zu höheren Werten hin.

Die Grunddrehfrequenz von 32 Hz zeigt in den betrachteten Versuchen keine Änderung ihrer Lage, somit sind die Schnittversuche sowohl maschinenseitig konstant verlaufen als auch von der Auslegung der Schnittparameter im optimalen Bereich der Betriebsparameter.

Für die Beurteilung der Werkstoffhärte und der Bearbeitbarkeit der Betone ist der Gesamtsignalpegel ein hinreichendes Maß. Um die Frequenzverschiebung als Maß nutzen zu können muss eine absolute Normierung der Verschiebung auf die Härte des Werkstoffs gegeben sein. Um dies zu erreichen ist die Kenntnis der sich aus den Eigenschaften des Werkzeuges ergebenden Frequenzlage erforderlich. Zudem ist für die Beobachtung der Verschiebung eine hohe Frequenzauflösung der FFT notwendig, was die Zeitauflösung entsprechend reduziert, eine Umsetzung in eine industrielle Anwendung muss dies berücksichtigen.

4.4.3 Frequenzcharakteristika bei Ablenkung der Trennscheibe durch nicht angepasste Betriebsparameter

Betriebsparameter, die nicht an den Werkstoff (an die Härte der Gesteinskörnung) angepasst sind, können zur Zerstörung des Werkzeuges führen. In dieser Hinsicht ist die Bearbeitung des heterogenen Verbundwerkstoffes Beton besonders anspruchsvoll.



Abbildung 33: Trennfugenoberfläche eines Schnittversuches mit Beton E55 ($a_e = 100\text{ mm}$, $v_{ft} = 1,5\text{ m/min}$). Die Trennscheibe wurde in diesem Versuch zerstört. Der Flint (mitte ganz oben) führte zur Ablenkung des Werkzeuges und so zu Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstoff. Die dunkle Verfärbung rechts vom Flint entstand durch diesen Kontakt.

In Abbildung 33 ist die Oberfläche einer Trennfuge dargestellt, die mit einer Zustellung von maximalen 100 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von 1,5 m/min geschnitten wurde. Der Kontakt zwischen Flintkorn und Werkzeug führte auf Grund der hohen Zustellung zur axialen Ablenkung des Werkzeuges. Die axiale Ablenkung führte zu einem länger andauernden Kontakt zwischen Werkzeug und Fugenwand, wodurch das Stammblatt thermisch überlastet wurde. Die dunkle Verfärbung rechts von Flint hat ihren Ursprung in dieser thermischen Belastung.

Das gemittelte Schallspektrum dieses Schnittversuches ist in Abbildung 34 zusammen mit dem schon weiter oben betrachteten Spektrum

eines Schnittversuches mit Beton E55 (vgl. Abbildung 31) dargestellt. Die Amplitude ist für den Versuch mit 100 mm Zustellung deutlich höher, besonders auffallend sind hingegen 3 Frequenzen, die im Vergleichsspektrum überhaupt nicht erscheinen. Diese Frequenzen (850, 1700 und 2550 Hz) haben ihren Ursprung in der Segmentierung des Schneidbelages und können mit Formel 2 und der Drehfrequenz von 32 Hz und $n=1, 2, 3$ berechnet werden.

Im Tieffrequenzbereich kann für Frequenzen größer als 250 Hz eine Aufspaltung der Frequenzen beobachtet werden, was ein Hinweis auf starke Kräfte ist, die auf den Blattrand wirken. Die Grunddrehfrequenz ist in beiden Versuchen identisch und unterscheidet sich nur in der Signalamplitude.

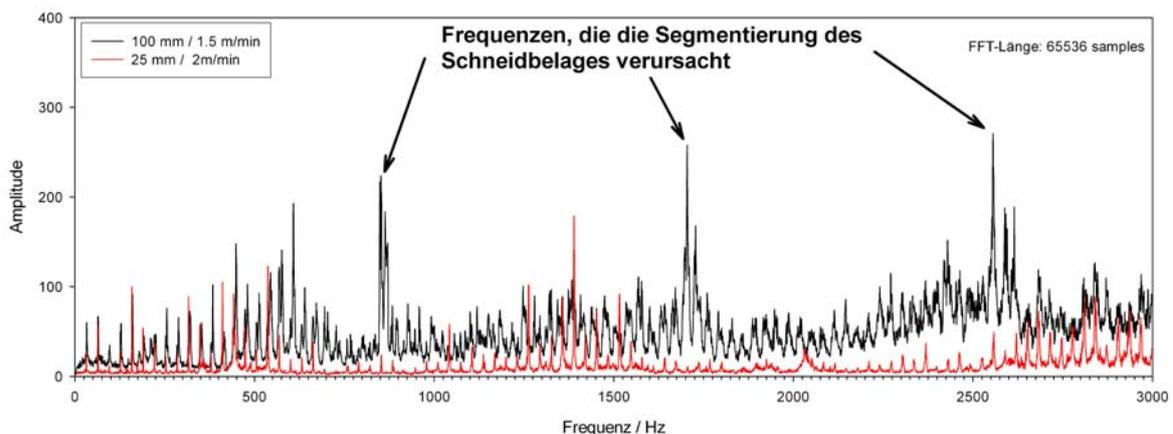


Abbildung 34: Vergleich der Schallspektren von Versuchen mit 100 und 25 mm Zustellung. Der Werkstoff ist in beiden Versuchen E55.

4.4.4 Bremscheibeneffekt – nicht angepasste Vorschubgeschwindigkeit

In Abbildung 35 ist die Luftschallaufzeichnung (Schnitt Nr. 2 – vgl. Abbildung 17, unten) eines Schnittversuches mit dem Werkstoff E30 dargestellt. Sowohl in der Photographie als auch in der Kartierung sind die beiden besonders großen Zuschlagskörner zu erkennen (Durchmesser ca. 7 cm).

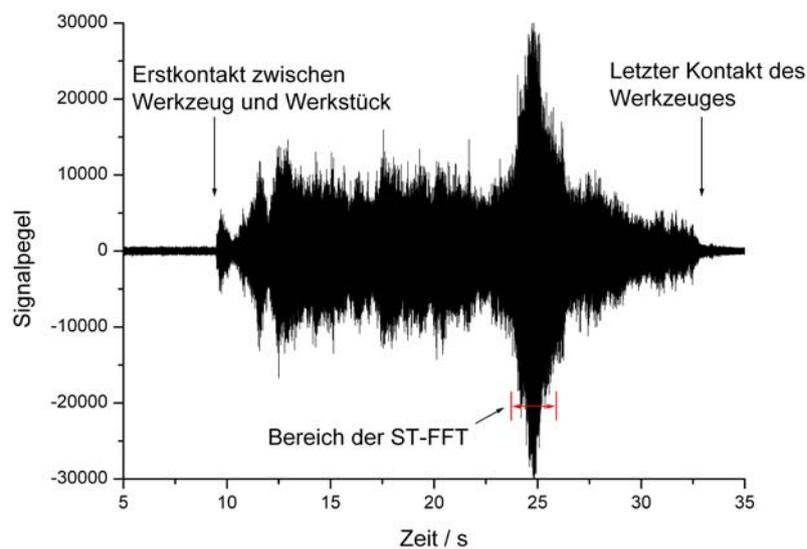


Abbildung 35: Komprimierte Darstellung im Realraum der Luftschalldaten des Versuches mit Werkstoff E30 ($v_{ft}=2$ m/min, $a_c=25$ mm) für $a_{c,gs}=50$ mm. Gekennzeichnet sind erster und letzter Kontakt des Werkzeuges mit dem Werkstoff, sowie der Bereich, der im folgenden einer genauen Betrachtung im Frequenzraum unterzogen wird.

Die hohen Signalpegel (-3 dB) im Bereich 24-26 s hängen augenscheinlich mit dieser Körnung zusammen. In den Schnitten 3 und 4 gibt es keine ähnlichen Auffälligkeiten. Im Vergleich mit dem Versuch, bei dem das Blatt zerstört wurde, zeigen sich hier doppelt so hohe Gesamtsignalpegel ohne eine fatale Werkzeugbelastung.

Der Übergang in die Frequenzdarstellung der Schalldaten aus Abbildung 35 zeigt Abbildung 36. Neben den bereits besprochenen charakteristischen Elementen enthält das Gesamtspektrum fünf herausstechende Frequenzen, die bislang nicht in Erscheinung getreten

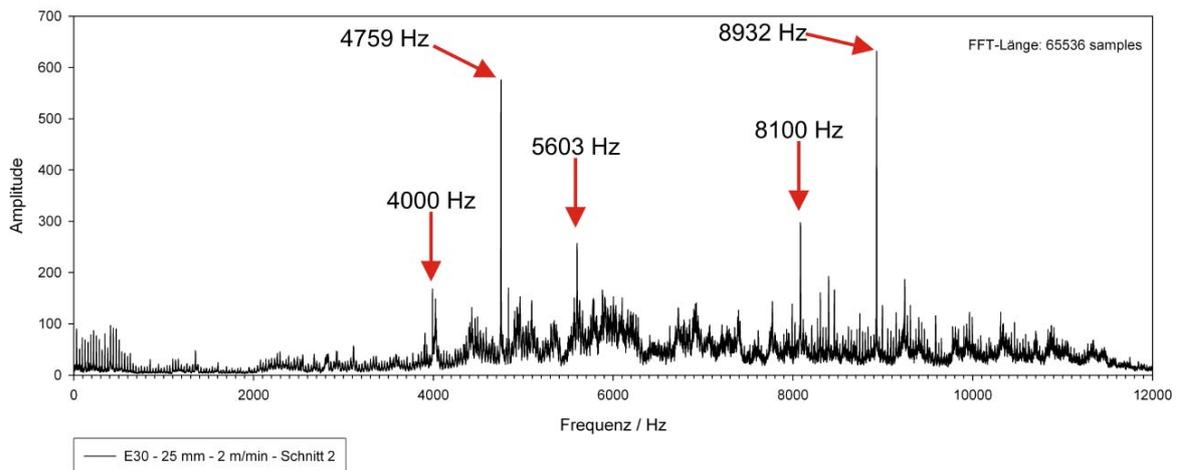


Abbildung 36: Darstellung der gesamten Daten aus Abbildung 35 im Frequenzraum (gemittelte FFT-Spektren mit einer Länge von 65536 Samples)

sind: 4000, 4759, 5603, 8100 und 8932 Hz. Keine dieser Frequenzen steht in einem Zusammenhang mit den Frequenzen die von der Segmentierung des Schneidbelages hervorgerufen werden und nur eine (5603 Hz) ist ein Vielfaches der Drehfrequenz (175 mal 32 Hz). Für die genauere Untersuchung der Luftschalldaten wurde der in Abbildung 35 markierte Bereich gefiltert. Als Rauschprofil diente hierbei das Signal vor dem Erstkontakt Werkzeug-Werkstück (Reduktionsfaktor: 10), die Filterung wurde nur durchgeführt, um die neuen Signalcharakteristika deutlicher in den berechneten Kurzzeit-FFT Spektren (Abbildung 37) hervorzuheben.

Bevor das Werkzeug das harte Zuschlagskorn erreicht, zeigt das gefilterte Spektrum keine Frequenzen. mit dem Begin des Kontaktes (Abbildung 37, ganz oben), beginnen zwei Frequenzen (8100 und 8932 Hz) zusammen an Intensität zu gewinnen. Ab dem vierten Teilspektrum kommen 3 Frequenzen bei 4000, 4759 und 5603 Hz hinzu, wobei die mittlere Frequenz diejenige mit der höchsten Signalamplitude ist. Eine Betrachtung der Frequenzlagen der schwächeren Frequenzen zeigt, dass es sich nicht um Seitenbänder oder Modulationen der signalstärksten Frequenzen handeln kann. Nach dem erfolgten Anstieg fallen alle Frequenzen im gleichen Maße wieder zurück, wie sie aufgetreten sind.

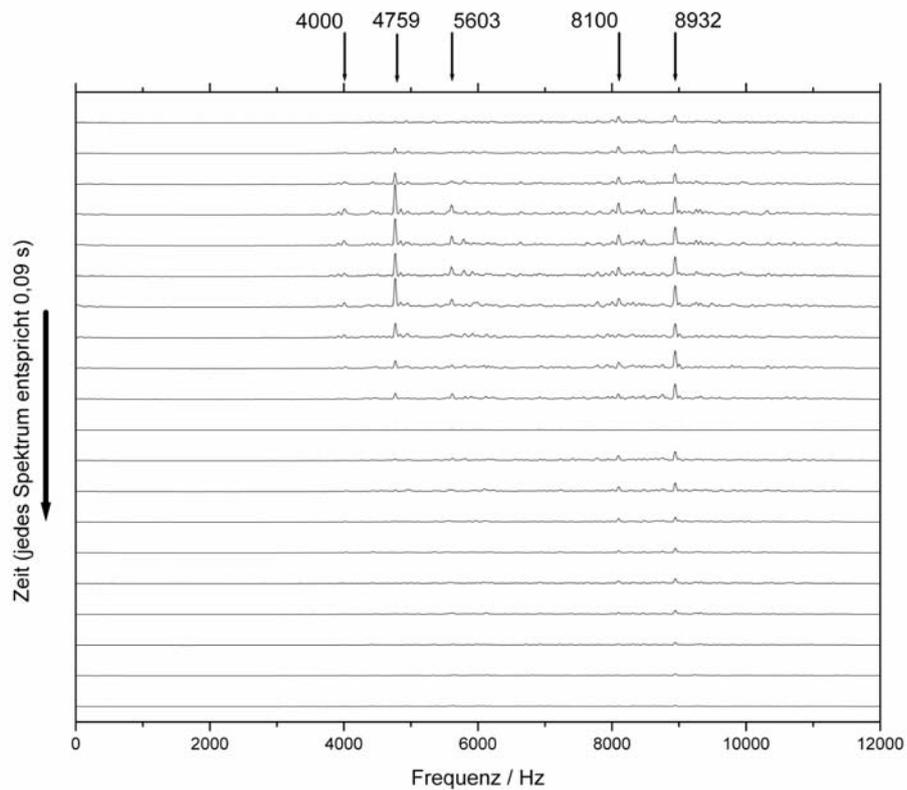


Abbildung 37: Kurzzzeit FFT-Spektren des in Abbildung 35 markierten Bereiches (FFT-Länge: 2048 Sample)

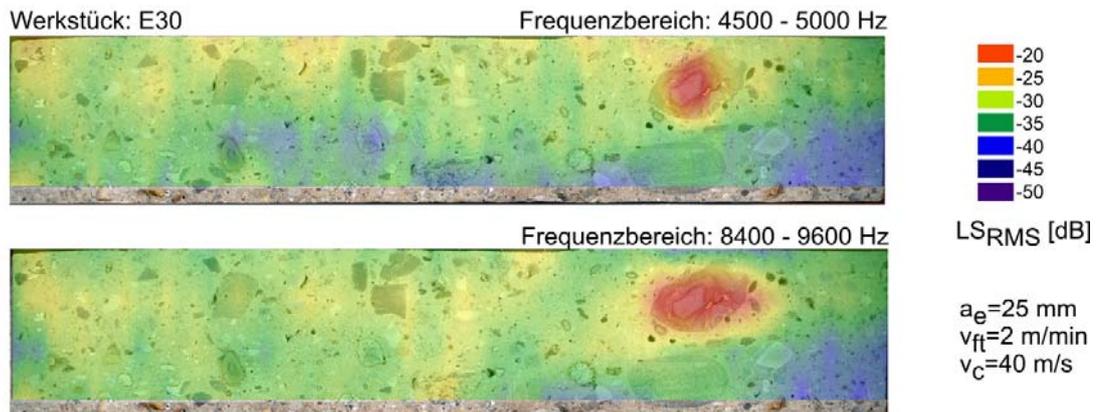


Abbildung 38: Korrelation zwischen den LS_{RMS} Pegeln in den Frequenzbändern 4,5 - 5,0 kHz (oben) und 8,4 - 9,6 kHz (unten) und der Trennfugenoberfläche. Der Zusammenhang zwischen den diskreten Frequenzen und dem großen Flintkorn ist deutlich erkennbar.

Diese Frequenzen, die keinen direkten Zusammenhang zu den oben beschriebenen Schallentstehungsmechanismen beim Trennschleifen haben, werden gemeinsam durch einen bestimmten Mechanismus hervorgebracht. Wie Abbildung 38 zeigt, ist ein großer Flintzuschlag mit einem Durchmesser von 7,5 cm für das Auftreten dieser Frequenzen verantwortlich. Ein Zuschlagskorn ähnlicher Größe in den Teilschnitten drei und vier verursacht auf Grund der deutlich geringeren Härte kein auffälliges Schallspektrum. Ursächlich für das Entstehen der Frequenzen muss also die Größe und Härte des Flints sein und dies in Kombination mit nicht an den Werkstoff angepassten Maschinenparametern, da solche Frequenzmuster in keinem anderen Versuch beobachtet wurden.

Zur Interpretation der Entstehung dieser diskreten Frequenzen können Modellvorstellungen herangezogen werden, die für Bremsscheibensysteme beschrieben wurden ([38, 39], siehe Kapitel 2.3.2). Auch bei diesen Systemen zeigen sich spektrale Doubletmoden verantwortlich für die entstehenden Quietschgeräusche. Eine plausible Erklärung für die in der vorliegenden Arbeit gemachten Beobachtungen ist, dass das Flintkorn als Bremsklotz für die Scheibe gewirkt hat, da die Vorschubgeschwindigkeit zu hoch war. Dies führte dazu, dass das Sägeblatt nicht genug Material abtragen konnte und so hohe Friktions- und Reibungskräfte auf den Blattrand wirkten, die letztlich eine völlige Veränderung der Schwingungsdynamik des Werkzeuges verursachten und so für das Auftreten dieser diskreten Frequenzen verantwortlich sind.

Diese Veränderung der Schwingungsdynamik des Werkzeuges führt dazu, dass die bisher betrachteten Anregungsmechanismen nicht mehr zum Tragen kommen können. Eine Berechnung der nun auftretenden Eigenfrequenzen kann nur erfolgreich sein, wenn diese veränderte Dynamik durch Einbeziehung der auftretenden Kräfte und Werkzeugeigenschaften berücksichtigt wird. Dies scheint nur möglich zu sein, wenn das Gesamtsystem aus Werkzeug und Werkstoff, wie bei den Bremsscheibensystemen im Kapitel „Stand der Forschung“ beschrieben, mit Hilfe von mathematischen Modellierungstechniken, z.B. der Finite-Elemente-Methode, simuliert wird.

5.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Luftschallemission beim Trennschleifen von Beton untersucht. Hierzu wurden an Betonprobekörper der Bearbeitungsklassen A, C und E Trennschleifversuche durchgeführt. Bei Beton E wurde zusätzlich auch die Normdruckfestigkeit des Zements variiert.

Zunächst wurden die Betonprobekörper hinsichtlich ihrer mineralogisch-petrographischen Zusammensetzung charakterisiert. Hierbei wurde insbesondere Augenmerk auf die Gesteinskörnung gelegt, die die entscheidende Einflussgröße für Werkzeugbeanspruchung und Werkzeugstandzeiten ist. Wesentlicher Teil der Charakterisierung der Werkstoffe war die Beschreibung der Korngrößenverteilung sowie der Härteverteilung der jeweils zugesetzten Gesteinskörnungen. Die Betonprobekörper konnten an Hand dieser Untersuchungen in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Homogene Betonproben: A30 und C30 mit einem schmalen Korngrößenspektrum, homogener Härte der Gesteinskörnung, wobei der Beton C30 eine höhere Härte als Beton A30 aufwies.

- Heterogene Betonproben: E30 und E55 (mit höherer Normdruckfestigkeit des Zementes) mit einem breiten Korngrößenspektrum, deutlich inhomogener Verteilung der Korngrößen auf den Schnittfugen und einem breiten Spektrum an Mohshärten.

Wichtige Vorversuche zur Aufnahme und Analyse des Luftschalles wurden mit einem Werkzeug mit reduzierter Segmentanzahl (zwei gegenüberliegende Schneidsegmente) ausgeführt. Sie zeigten zum Einen die Dominanz des Werkzeuges bei der Luftschallemission als auch Einflüsse des Werkstoffes. Hierbei waren insbesondere Asymmetrien der Kornverteilung auf der Trennfuge an Hand der Luftschallsignale zu differenzieren. Insgesamt ließen sich allerdings bei diesen Vorversuchen keine deutlichen Zusammenhänge zwischen Betriebsparametern, Werkstoff und Prozesssignalen feststellen. Der Grund hierfür ist die reduzierte Schneidsegmentanzahl, die es dem Stamblatt erlaubt, zwischen zwei Segmenteingriffen quasi frei zu schwingen, was die gesamte Schallabstrahlung deutlich modifiziert.

Alle nachfolgenden Trennschleifversuche wurden daher mit dem vollbesetzten Werkzeug durchgeführt und hinsichtlich der Signalpegel und der auftretenden Frequenzen im Prozesssignal untersucht. Die Streuung der Signalpegel bei zunehmender Gesamtschnitttiefe spiegelt dabei den Grad der Inhomogenität der Probe wieder. Versuche, einen Koeffizienten aus Luftschallsignalpegel und Körnungsfläche als Maß für die Werkstoffhärte zu erarbeiten, sind erfolglos geblieben, da das Luftschallsignal auch durch andere Faktoren beeinflusst wird, die im Rahmen des Versuchsaufbaus nicht zu kontrollieren waren. Hier sind insbesondere maschinenseitigen Faktoren wie die Befestigung des Werkzeuges auf der Welle zu nennen.

Die alleinige Betrachtung des Signalpegels ist zur Bewertung des Trennschleifprozesses nicht ausreichend, dies ist deutlich erkennbar an den Versuchen mit Beton E30, wo die Signalpegel bei dem Schnittversuch mit fataler Werkzeugbelastung deutlich niedriger sind als bei dem Versuch in dem ein sehr großes Flintkorn das Blatt stark belastete.

Daher müssen Betrachtungen des Signals im Frequenzraum durchgeführt werden. Als erstes wurde hier dargelegt, welche Schallentstehungsmechanismen für welche spektralen Charakteristika

verantwortlich zeichnen. Unterschiedliche Krafteinwirkungen auf den Blattrand, durch unterschiedlich harte Werkstoffe, sorgen für Verschiebungen der Frequenzen und zwar für härtere Werkstoffe zu höheren Frequenzen. Eine absolute Normierung der Frequenzverschiebung in Bezug auf die Härte war, auch wegen der bereits angesprochenen maschinenseitigen Einflussgrößen, nicht möglich.

Die Untersuchung der Signale im Frequenzraum war mit Hinblick auf die Etablierung einer Prozesssteuerung sehr erfolgreich. Es konnten die spektralen Charakteristika von Prozesszuständen, die in der Lage sind, die Werkzeugstandzeiten drastisch zu reduzieren, identifiziert werden. Hier sind vor allem zu nennen: Die Detektion von Werkzeugdeflektionen über Segmenteingriffsfrequenzen und das Auftreten von drastischen Veränderungen des Schwingungsverhaltens des Werkzeuges durch nicht an den Werkstoff angepasste Betriebsparameter.

Gerade die im letzten Absatz genannten Ergebnisse zeigen die Tauglichkeit des Luftschallsignals für eine effiziente Prozesssteuerung beim Trennschleifen von Beton. Hierbei kommt eine Besonderheit dieses Fertigungsverfahrens zum Tragen, die sonst im Allgemeinen als Nachteil gilt: Die insgesamt hohen und belastenden Schallpegel sorgen für eine gute Detektierbarkeit des Prozesssignals und Störeinflussmöglichkeiten durch externe Geräusche oder Maschineneinflüsse sind gering.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass hier erstmals das Trennschleifen von Beton und die Auswirkungen der Werkstoffzusammensetzung auf das Prozesssignal „Luftschall“ in hinreichender Tiefe bezüglich der Signalpegel und der auftretenden Frequenzen untersucht wurde. Es konnte die Tauglichkeit des Luftschalles zur Prozesssteuerung und zur Bewertung der Bearbeitbarkeit des Werkstoffes gezeigt werden. Bis zum industriellen Einsatz einer auf dem Luftschallemissionen basierenden Prozesssteuerung müssen aber noch weitere Erkenntnisse bezüglich der maschinenseitigen Einflussgrößen erlangt werden. Auch sind Untersuchungen mit anderen Werkzeugen durchzuführen, da insbesondere im mobilen Einsatz von Fugenschneidern verstärkt Lärmreduzierende Werkzeuge eingesetzt werden.

6.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Tönshof, H. K., Denkena, B. Spanen - Grundlagen. 2. Auflage, Berlin, 2004.
2. Clausen, R., Meding, M.: Untersuchungen zum Spanbildungsprozeß bei Gestein. Industriediamanten Rundschau. 1994 (4) 224-227.
3. Di Ilio, A., Togna, A.: A theoretical wear model for diamond tools in stone cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 43 (2003) 1171-1177.
4. Wright, D. N., Cassapi, V. B.: Factors influencing stone sawability. Industrial Diamond Review. 2 (1985) 84-87.
5. Eyuboglu, A. S., Ozcelik, Y., Kulasksiz, S., Engin, I. C.: Statistical and microscopic investigation of disc segment wear related to sawing Ankara andesites. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 40 (2003) 405-411.
6. Ersoy, A., Atici, U.: Performance characteristics of circular diamond saws in cutting different types of rocks. Diamond and related materials. 13 (2004) 22-37.
7. Chen, Y., Wang, X. G., Sun, C., Devine, F., De Silva, C. W.: Active Vibration Control with State Feedback in Woodcutting. Journal of Vibration and Control. 9 (2003) 645-664.
8. Meding, M.: Analysis of acoustic emission from single-grit scoring. Industrial Diamond Review. 55, Nr.564 (1995) 20-22.
9. Hangen, U. D.: A comparison of Nano-Hardness and Scratch-Resistance on Mohs Minerals. Zeitschrift für Metallkunde. 92 (2001) 1074-1077.
10. Sánchez Delgado, N., Rodríguez-Rey, A., Suárez del Río, L. M., Díez Sarriá, I., Calleja, L., Ruiz de Argandona, V. G.: The influence of

- rock microhardness on the sawability of Pink Porrino granite (spain). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 42 (2005) 161-166.
11. Ratterman, E., Pung, R. C., Okoloi, E. A.: Aggregate related productivity studies of highway sawing and grinding. *Superabrasives '85 Proceedings*. 1985 pp. 10.1-10.12.
 12. Bartels, W.: Einfluss der Zuschlagsstoffe beim Trennen von Beton. *Industrie Diamanten Rundschau*. 1 (1987) 38-43.
 13. Tawakoli, Taghi. Entwicklungen in der Überwachung der Schleifprozesse und die Bewertung der Resultate. *Industrie Diamanten Rundschau*. 42/4 (2008) 36-45.
 14. Tönshoff, H. K., Jung, M., Männel, S., Rietz, W.: Using acoustic emission signals for monitoring of production processes. *Ultrasonics*. 37 (2000) 681-686.
 15. Heyns, P S.: Tool condition monitoring using vibration measurements - a review. *Insight*. 49/8 (2007) 447-450.
 16. Jantunen, E.: A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. *International Journal of Machine Tool and Manufacture*. 42 (2002) 997-1010.
 17. Rehorn, A.G., Jiang, J., Orban, P.E.: State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 26 (2005) 693-710.
 18. Jantunen, E.: The application of various indirect monitoring methods to tool condition monitoring in drilling. *Condition Monitoring and Diagnostics Engineering Management*. (2001) 781-791.
 19. Iskra, P., Tanaka, C.: The influence of wood fiber direction, feed rate, and cutting width on sound intensity during routing. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 63 (2005) 167-172.
 20. Scherger, A. Geräuscheminderung beim Trennen von Gestein. *VDI-Z*. 122/3 (1980) 97-99.
 21. Westphal, R.: Untersuchungen zur Geräuschenstehung und Geräuscheminderung an Kreissägeblättern für die Leichtmetallbearbeitung. *Dissertation Uni Hannover*, 1979.
 22. Friebe, E. V.: Steifheit und Schwingungsverhalten von Kreissägeblättern für die Holzbearbeitung. *Dissertation Uni Braunschweig*, 1973:
 23. Bies, D. A. circular saw aerodynamic noise. *Journal of Sound and Vibration*. 154 (1992) 495-513.

24. Yanagimoto, K., Mote jr., C. D., Ichimiya, R.: Vortex shedding noise control in idling circular saws using air ejection at the teeth. *Journal of Sound and Vibration*. 172 (1994) 277-282.
25. Dugdale, D. S.: Discrete frequency noise from free running circular saws. *Journal of Sound and Vibration*. 10 (1969) 296-304.
26. Hutton, S. G., Chonan, S., Lehmann, B. F.: Dynamic response of a guided circular saw. *Journal of Sound and Vibration*. 112 (1987) 527-539.
27. Tian, J. F., Hutton, S. G.: Cutting induced vibration in circular saws. *Journal of Sound and Vibration*. 242 (2001) 907-922.
28. Scherger, A. Schwingungs- und Geräuschuntersuchungen an Trennscheiben mit metallischem Kern. Dissertation Uni Hannover, 1981.
29. Wang, C. Y., Hu, Y. N., Wang, Z. W., Ding, H.N.: Noise and Vibration of Diamond Sawblade for Concrete Dry Cutting. *Key Engineering Materials*. 291-292 (2005) 103-108.
30. Matsuhisa, H., Sato, S.: Noise from Circular Stone-Sawing Blades and Theoretical Analysis of their Flexural Vibration. *Noise Control Engineering Journal*. 27/3 (1986) 95-102.
31. Bienert, P. Kreissägen von Beton mit Diamantwerkzeugen. Dissertation Uni Hannover, 1978.
32. Denkena, B., Bockhorst, J., de Leon, L.: Werkzeug und Prozessauslegung für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Granit. In: B. Denkena (Hrsg.). *Berichte aus dem IFW*. 09 (2008) 43-52.
33. Leissa, Arthur W. *Vibration of Plates*. Washington, 1969.
34. Chankraverty, S., Jindal, R., Agarwal, V. K.: Effect of non-homogeneity on natural frequencies of vibration of elliptic plates. *Meccanica*. 42 (2007) 585-599.
35. Duan, W. H., Wang, C. M., Wang, C. Y.: Modification of fundamental vibration modes of circular plates with free edges. *Journal of Sound and Vibration*. 317 (2008) 709-715.
36. Yang, C.-H., Huang, S.-H.: Coupling Vibrations in Rotating Shaft-Disk-Blades System. *Transactions of the ASME*. 129 (2007) 48-57.
37. Pelshenke, C., Frerck, K.-H., Bockhorst, J., Rahlves, M., Fahlbusch, T.: Schnittverlauf beim Trennschleifen von Naturstein. In: B. Denkena (Hrsg.). *Berichte aus dem IFW*. 09 (2008) 19-34.
38. Júnior, M. T., Gerges, S.N.Y., Jordan, R.: Analysis of brake squeal noise using the finite element method: A parametric study. *Applied Acoustics*. 69 (2008) 147-162.

39. Kang, J., Krousgrill, C.M., Sadeghi, F.: Dynamic instability of a thin circular plate with friction interface and its application to disc brake squeal. *Journal of Sound and Vibration*. 316 (2008) 164-179.
40. Rahman, S.: The videographic method. *Acta Crystallographica*. 49 (1993) 56-68.
41. Wiener, Norbert. *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationery Time Series*. Cambridge, 1957.
42. Rahman, S. Stimmanalyse und Filterung von Geräuschen. [Online] 2006. [Zitat vom: 1. 9 2008.] www.srahman.de.
43. DIN EN 932-3: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3.: Deutsches Institut für Normung, 2003.
44. ImageJ - Image Processing and Analysis in Java. [Online] <http://rsbweb.nih.gov/ij/index.html>.
45. Handbuch Betonbohren und -sägen. Fachverband Betonbohren und -sägen, 1999.
46. Reimschen, O. persönliche Mitteilung. Betonwerk Groß Hehlen. 2006.

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN:

Abbildung 1:	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Diamantsegmente. Links: Querschnitt. Rechts: Oberfläche nach Einsatz; deutlich erkennbar sind die Bindungsrücken.	2
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Einflussnahme auf den Werkzeugverschleiß durch Prozessregelung.....	4
Abbildung 3:	AE-Sensoren (links) und Prozessüberwachungsmodul AE6000 (rechts) der Firma Dittel (Bilder: FA Dittel)	9
Abbildung 4:	Mikrofon Sennheiser ME36 (links) und digitale Mehrspuraufzeichnungselektronik (RME Fireface 800; oben: Vorderseite, unten: Rückseite)(Bilder: Fa. Sennheiser, Fa. RME-Audio).....	10
Abbildung 5:	Kräfte am Trennschleifblatt: F_n – Normalkraft, F_t – Tangentialkraft, F_{al} – axial wirkende Kraft links, F_{ar} – axial wirkende Kraft rechts (Institut für Mineralogie).....	11
Abbildung 6:	Schematische Darstellung der Messkette	17
Abbildung 7:	Links: Frequenzgang, rechts: Richtcharakteristik des ME36 Mikrophons (FA. Sennheiser).....	18
Abbildung 8:	Mikrophananordnung am Versuchsstand	18
Abbildung 9:	Versuchsstand Carl Meyer 416S	22
Abbildung 10:	Spezifikationen der verwendeten Werkzeuge (links: Zweisegmentiges Werkzeug für die Vorversuche; rechts: Vollbesetztes Standardblatt)	23
Abbildung 11:	Prüfstifte zur Ermittlung der Mohsschen Härte (links) und in Kunstharz eingebettete Proben der Gesteinskörnungen (Beispiel).....	24
Abbildung 12:	Beispielhafte Röntgenbeugungsuntersuchungen an Proben der drei Gesteinskörnungen.....	28
Abbildung 13:	Lichtmikroskopische Aufnahmen der Ritzversuche.....	30
Abbildung 14:	links: REM-Aufnahme; rechts: EDX-Mapping	30
Abbildung 15:	Repräsentative Ausschnitte von Trennfugenflächen der drei Gesteinskörnungen (Größe der Ausschnitte 10 x 10 cm).....	31
Abbildung 16:	Korngrößenverteilungen auf beispielhaften Trennfugen der vier Betonsorten.....	32
Abbildung 17:	Zwei Schnittfugenoberflächen in photographischer Darstellung und in Form einer Kartierung mit petrographischer Beschreibung und Mohshärte.	33
Abbildung 18:	Signalpegelmittelwerte bei Versuchen mit dem Werkzeug mit reduzierter Segmentanzahl	35

Abbildung 19:	Mittelwerte und Standardabweichungen der in Abbildung 18 gezeigten Daten.....	35
Abbildung 20:	Farbkodierte Darstellung der Abweichung des LS_{RMS} vom Mittelwert je Einzelzustellung in dB über der Photographie der Trennfuge. (Werkstoff: E55; $v_c=40$ m/s; $a_c=5$ mm).....	36
Abbildung 21:	Frequenzanalyse der einzelnen Bereiche aus Abbildung 20: Bereich 1: Verwitterter Granit; Bereich 2: Axiale Anregung durch partiellen Anschnitt der Gesteinskörnung; Bereich 3: Radiale Werkzeuganregung durch mittig getrennten Flint.....	37
Abbildung 22:	Darstellung des Signalpegels LS_{RMS} im Frequenzbereich 5100-10000 Hz.	38
Abbildung 23:	Darstellung des Signalpegels LS_{RMS} im Frequenzbereich 450-750 Hz...	38
Abbildung 24:	Signalpegelmittelwerte in Abhängigkeit von der Gesamtzustellung bei $a_c=5$ (links) und 10 mm (rechts); Kreise: Normfestigkeit 30 N/mm ² , Dreiecke: Normfestigkeit 55 N/mm ²	41
Abbildung 25:	LS_{RMS} – Werte in Abhängigkeit von der Gesamtschnitttiefe für die reinen Zementproben.....	42
Abbildung 26:	LS_{RMS} in dB in Abhängigkeit von der Gesamtschnitttiefe $a_{c,ges}$ mit linearen Ausgleichsgraden bei Versuch 1 mit $a_c = 5$ mm und $v_{ft} = 1$ m/min (Tabelle 9).....	43
Abbildung 27:	LS_{RMS} in Abhängigkeit von der Gesamtschnitttiefe $a_{c,ges}$ für die Versuche 2 bis 5 ($a_c = 25$ mm; Tabelle 9).....	44
Abbildung 28:	Körnungsflächenkoeffizient für die Versuche mit 2 m/min Vorschub.	46
Abbildung 29:	Vergleich von gefiltertem und ungefiltertem Signal eines Schnittversuches	47
Abbildung 30:	Spektrum der Schallemission bei Leerlauf des Werkzeuges in der Luft	49
Abbildung 31:	Vergleich der Schallspektren im Schnitt und im Rücklauf.....	49
Abbildung 32:	Vergleich der Schallspektren der Schnitte zweier unterschiedlicher Betonsorten (rot: A30; schwarz: E55).....	51
Abbildung 33:	Trennfugenoberfläche eines Schnittversuches mit Beton E55 ($a_c=100$ mm, $v_{ft}=1,5$ m/min). Die Trennscheibe wurde in diesem Versuch zerstört. Der Flint (mitte ganz oben) führte zur Ablenkung des Werkzeuges und so zu Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstoff. Die dunkle Verfärbung rechts vom Flint entstand durch diesen Kontakt.	52
Abbildung 34:	Vergleich der Schallspektren von Versuchen mit 100 und 25 mm Zustellung. Der Werkstoff ist in beiden Versuchen E55.....	53
Abbildung 35:	Komprimierte Darstellung im Realraum der Luftschalldaten des Versuches mit Werkstoff E30 ($v_{ft}=2$ m/min, $a_c=25$ mm) für $a_{c,ges}=50$ mm. Gekennzeichnet sind erster und letzter Kontakt des Werkzeuges mit dem Werkstoff, sowie der Bereich, der im folgenden einer genauen Betrachtung im Frequenzraum unterzogen wird.	54

Abbildung 36:	Darstellung der gesamten Daten aus Abbildung 35 im Frequenzraum (gemittelte FFT-Spektren mit einer Länge von 65536 Samples).....	55
Abbildung 37:	Kurzzeit FFT-Spektren des in Abbildung 35 markierten Bereiches (FFT-Länge: 2048 Sample)	56
Abbildung 38:	Korrelation zwischen den LS_{RMS} Pegeln in den Frequenzbändern 4,5 – 5,0 kHz (oben) und 8,4 - 9,6 kHz (unten) und der Trennfugenoberfläche. Der Zusammenhang zwischen den diskreten Frequenzen und dem großen Flitkorn ist deutlich erkennbar.....	56

VERZEICHNIS DER TABELLEN:

Tabelle 1:	Einflussfaktoren beim Trennschleifen von Gestein mit Kreissägeblättern (modifiziert nach [5]).....	3
Tabelle 2:	Einige Eigenschaften gängiger Messmethoden zur Prozessüberwachung beim Schleifen (nach [13]).....	8
Tabelle 3:	Berechnete Eigenfrequenzen f_{ij} einer mittig fixierten Scheibe (λ_{ij}^2 nach [33]).....	15
Tabelle 4:	Einflussgrößen die durch unterschiedliche Mittelwertbildung des Signalpegels betrachtet werden können.	19
Tabelle 5:	Bearbeitbarkeitsklassen von Beton (nach [45])	26
Tabelle 6:	Zusammensetzung der Betonproben (nach [46])	27
Tabelle 7:	Ergebnisse der Bestimmung der Mohshärte	29
Tabelle 8:	Übersicht über die Schnittversuche	40
Tabelle 9:	Übersicht über die Versuche mit vollbesetztem Werkzeug	42
Tabelle 10:	Steigungen und Achsenabschnitte der Ausgleichsgeraden von Versuch 1 (Tabelle 9).....	44
Tabelle 11:	Steigungen und Achsenabschnitte der Ausgleichsgeraden der Versuche 2 bis 5 (Tabelle 9)	45
Tabelle 12:	Identifizierbare Schallentstehungsmechanismen in den Spektren ...	50

LEBENS LAUF:

- 1993: Abitur am Gymnasium Marianum Meppen
- 1993 – 1994: Ziviler Ersatzdienst (Heilpädagogisches Zentrum des St.-Vitus-Werkes, Meppen)
- 1994 – 1999: Studium an der Rheinischen-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (Physik / Astronomie)
- 1999 – 2006: Studium an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Geowissenschaften)
- Abschluss: Diplom – Geowissenschaftler
- Thema der Diplomarbeit: Synthese und Charakterisierung der Baryt – Celestin Mischkristallreihe
- 2/2000 – 3/2006: wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover, Abteilung Massivumformung
- Seit 4/2006: wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mineralogie, Abteilung Kristallographie
- Seit 6/2008: Leitung der Röntgenlabore
- Seit 7/2008: Strahlenschutzbeauftragter

PUBLIKATIONSLISTE:

C.H. Rüscher, N. Eils, **L. Robben**, H. Schneider: Hydrogen bonding and diffusion in mullite, *Journal of the European Ceramic Society*, 28 (2008) 393-400.

B. Denkena, D. Boehnke, B. Konopatzki, J.-C. Buhl, S. Rahman, **L. Robben**: Sonic analysis in cut-off grinding of concrete. *Production Engineering – Research and Development*. 2 (2008) 209-218.

B. Denkena, D. Boehnke, B. Konopatzki, S. Rahman, J.-Chr. Buhl, **L. Robben**: Schallemissionsanalyse beim Trennschleifen von Beton. *Industrie Diamanten Rundschau (IDR)*, 1/08, 52 – 58.

L. Robben, S. Rahman, J.-C. Buhl, B. Denkena, B. Konopatzki: Airborne sound emission as a process monitoring tool in the cut-off grinding of concrete, *Applied Acoustics*, 2009, doi:10.1016/j.apacoust.2009.07.004

J. Martyncuk, K. Efimov, **L. Robben**, A. Feldhoff: Performance of zinc-doped perovskite-type membranes at intermediate temperatures for long term oxygen permeation and under carbon dioxide atmosphere, *Journal of Membrane Science*, 2009, doi:10.1016/j.memsci.2009.07.035.

KONFERENZBEITRÄGE:

L. Robben, C.H. Rüscher: Raman- and Infrared spectroscopic studies of the barite – celestite solid solution series. *Beih. Z. Eur. J. Min.*, vol. 18, 2006, No. 1 p.

L. Robben, C.H. Rüscher, N. Eils, H. Schneider: Hydrogen incorporation in mullite. *Suppl. Z. Krist.* 2007, no.1, Number 169-04.

B. Denkena, L. de Leon, B. Konopatzki, J.-C. Buhl, S. Rahman, **L. Robben**: Akustische Prozessanalyse bei der Bearbeitung von Beton. 6. IFW Gesteinskolloquium, 12.-13.11.2008. In: Berend Denkena (Hg.), *Berichte aus dem IFW*, Band 09/2008, S. 79-89, 2008.

L. Robben, A.A. Ismail, D.W. Bahnemann: Characterization of highly ordered 2D-hexagonal mesostructured TiO₂ and Pd/TiO₂ nanocomposites by Small Angle X-Ray Scattering (SAXS) and X-Ray Powder Diffraction

(XRD). Z. Krist., Suppl. Issue 29, p. 119, 2009.

L. Robben, S. Rahman, J.-C. Buhl, B. Denkena, B. Konopatzki: Analysis of airborne sound frequencies emitted by a diamond cutting tool in cut-off grinding of concrete; Z. Krist., Suppl. Issue 29, p. 101, 2009.

T. Debnath, C.H. Rüscher, **L. Robben**: Optical properties of tungsten bronze metals: the polaron effect; Z. Krist., Suppl. Issue 29, p. 131, 2009.

J. Martynczuk, K. Efimov, **L. Robben**, A. Feldhoff: Performance of Zinc-doped Perovskite-type Cathodes at Intermediate Temperatures and Under Carbon Dioxide Atmosphere. Solid Oxide Fuel Cells, Eleventh International Symposium (SOFC-XI), 2009.

Erklärung zur Dissertation

Hierdurch erkläre ich, dass die Dissertation “Einfluss der Werkstoffzusammensetzung auf die Luftschallemission beim Trennschleifen von Beton” selbstständig verfasst und alle benutzten Hilfsmittel sowie evtl. zur Hilfeleistung herangezogene Institutionen vollständig angegeben wurden. Die Dissertation wurde nicht schon als Diplom- oder ähnliche Prüfungsarbeit verwendet.

Hannover, den

(Unterschrift)

Name: Dipl.-Geow. Lars Robben