

Untersuchungen zur mechanischen Dekontamination von Betoninnenkanten

Zur Erlangung des akademischen Grads eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

DISSERTATION
von
Eric Rentschler, M.Eng.

Tag der mündlichen Prüfung: 08.05.2025
Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen

Kurzfassung

Dekontaminationsarbeiten sind für den Rückbau kerntechnischer Anlagen unerlässlich, da nur so eine Trennung und anschließende Klassifizierung der Reststoffe möglich ist und somit eine Kontaminationsfreiheit sichergestellt werden kann. Neben den rein metallischen Bauteilen besteht ein wesentlicher Teil der zu dekontaminierenden Gebäudestruktur aus Stahlbeton. Diese trägt den Hauptteil ihrer Kontamination an der Oberfläche oder wenige Millimeter tief eingedrungen. Der Abtrag bei ebenmäßigen, großen Flächen erfolgt nach aktuellem Stand der Technik maschinell, komplexere Stör- und Engstellen werden teilautomatisiert durch Personal vor Ort bearbeitet. Die technische Problematik an diesen Rückbaumaßnahmen stellen die unterschiedlichen geometrischen Bauwerksstrukturen dar, da neben den zahlreichen Innenkanten und -ecken auch statisch und bautechnisch relevante Geometrien wie Rücksprünge, Unterzüge, Vertiefungen und Durchführungen zu dekontaminieren sind. Bei der Dekontamination von Geometrien wie Innenkanten geraten großflächige Maschinenentwicklungen an ihre Grenzen, was durch teilautomatisierte Handwerkzeuge kompensiert werden muss. Die Werkzeuganforderungen für die Aufgabe der Innenkantendekontamination sind hoch, momentan werden hierfür universelle Werkzeuge und Arbeitsgeräte aus dem konventionellen Rückbaubereich verwendet, die nicht speziell für diesen Anwendungsfall entwickelt wurden.

Für die Problematik der Innenkantendekontamination wurden in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekt mehrere Demonstratorwerkzeuge und ein zugehöriger Versuchsstand entwickelt, um neuartige Ansätze zur mechanischen Dekontamination von Innenkanten zu untersuchen. Der Fokus lag hierbei auf dem Abtrag durch Diamantscheiben, die in unterschiedlichen Konstellationen angetrieben und zum Abtrag von Beton eingesetzt wurden. Durch die Untersuchung zur mechanischen Dekontamination von Betoninnenkanten soll die Handhabbarkeit des Werkzeugs erhöht werden, die Emissionen für den Nutzer verringert und eine möglichst große Abtragsleistung erreicht werden. Es

soll zum einen ein exakterer Abtrag der Kontamination ermöglicht werden, um eine leichtere Separation von Abfällen aus dem kerntechnischen Bereich zu erreichen. Zum anderen sollen durch die Untersuchungen Möglichkeiten aufgezeigt werden, den Zeitbedarf für die Dekontamination von Innenkanten und anderen Störstellen zu verringern. Ein weiterer Untersuchungspunkt dieser Arbeit ist die Oberflächenqualität der bearbeiteten Stelle im Hinblick auf die Freimessbarkeit, da eine Freigabe von dekontaminierten Oberflächen nach der Strahlenschutzverordnung nur nach erfolgter Freimeßung erfolgen kann (StrlSchV 2018).

Es erfolgt eine experimentelle Untersuchung zur mechanischen Dekontamination von Betoninnenkanten durch die inneren Einflussfaktoren:

- Eindringtiefe (Zustellung) - Zeitbedarf (Vorschub)
 - Bearbeitungsrichtung (Laufrichtung) - Antriebsrichtung (Laufrichtung)
 - Typ des Demonstrators

Die äußereren Anforderungsfaktoren wurden am Versuchsstand durch ein Versuchsprogramm untersucht und bestanden aus:

- Kraftbedarf für den Nutzer
 - Lärmentwicklung (Schallpegel)
 - Staubmengenentwicklung
 - Staubkorngrößenmessung
 - Auftretende Vibrationen
 - Abtragsleistung
 - Werkzeuggewicht
 - Oberflächenqualitätsbestimmung

Diese Faktoren wurden ermittelt und anschließend experimentell an den verschiedenen Betonfestigkeiten C25/30 und C30/37 in der Innenkante als auch der horizontalen Ebene untersucht und ausgewertet.

Die Demonstratoren wurden auf Grundlage der Ergebnisse in den verschiedenen Ausgangskategorien unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren bewertet. Die Kategorien der einzelnen Faktoren wurden gewichtet und zu einem Gesamtergebnis zusammengefasst. Die Arbeit trägt zu einem besseren Verständnis der Dekontamination von Innenkanten und Störstellen bei.

Abstract

Decontamination is essential for dismantling nuclear facilities, as this is the only way to separate and subsequently classify the deconstruction materials and therefore ensure that they are free of contamination. In addition to the metallic components, a significant part of the building structure to be decontaminated consists of reinforced concrete, which bears the bulk of its contamination on the surface or a few millimeters below. According to the current state of the art, the removal of even, large areas is carried out mechanically, while more complex bottlenecks are processed semi-automatically by personnel on site. The technical problems associated with these deconstruction measures are the different geometric structures of the building, since in addition to the numerous inner edges and corners, statically and structurally relevant geometries such as recesses, beams, and penetrations also have to be decontaminated. This is where large-scale machine and tool developments reach their limits, which has to be compensated for by semi-automated hand tools. The tool requirements for the application of inner edge decontamination are high, at the moment universal tools and equipment from the conventional dismantling sector are used for this purpose, which have not been specially developed for this application.

For this purpose of decontaminating inner edges, several demonstrator tools and an associated test rig were developed in a research project funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) to research new approaches for mechanical decontamination of complexe structures. The focus was on the removal by diamond discs, which were driven in different constellations and used for the removal of concrete.

The investigation of the mechanical decontamination of concrete inner edges is intended to increase the manageability of the tool, reduce emissions for the user and achieve the highest possible removal rate. This research should identify ways to reduce the time required for decontamination of inner edges and other trouble spots. Another research focus of this work is the surface quality of the processed area with regard to clearance measurability, since, according to the Radiation Protection Ordinance (Strahlenschutzverordnung), decontaminated surfaces can only be released after clearance measurement has been carried out.

The experimental research was carried out on the mechanical decontamination of inner edges on concrete structures through internal influencing factors

- Penetration depth (infeed)
- Time requirement (feed rate)
- Process direction (running direction)
- Drive direction (rotation direction)
- Type of demonstrator

The external requirement factors were investigated on the test bench by means of a test programme and consisted of:

- Occurring forces for the user
- Occurring vibrations
- Noise development (sound level)
- Removal rate
- Dust quantity
- Tool weight
- Dust particle size
- Surface quality

These factors were determined and then experimentally investigated and evaluated on the different concrete strengths C25/30 and C30/37 in the inner edge as well as the horizontal level.

The demonstrators were evaluated on the basis of the results in the different initial categories, taking into account the influencing factors. The categories of the individual factors were weighted and combined into an overall result. The overall goal is to improve decontamination of inner edges and other imperfections.



Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) im Fachgebiet „Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke (RKKB)“ am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Bedanken möchte ich mich bei meinem Hauptreferenten, Doktorvater und Chef, Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes, für das Vertrauen und den Freiraum zur Forschung. Ebenfalls danken möchte ich Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen für die Übernahme des Korreferats, sowie den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission Prof. Dirk E. Hebel sowie Prof. Dr.-Ing. Kunibert Lennerts.

Für die fachliche, menschliche und praktische Unterstützung bedanke ich mich bei meinen Kollegen vom TMB, namentlich: Nadine, Tania, Jonas, Sven, Remo, Carla, Alex, Junaid, Sia, Madeleine, Lisa, Michael, Jürgen und allen anderen Mitarbeitern des TMB.

Ein spezieller Dank geht an meine Eltern, an meine Freunde für die teils nötige Ablenkung, an meine Großeltern für die Freude am technischen Arbeiten und meiner Frau Laura, die mich bei meinem Vorhaben unterstützte und mir den Rücken freihält.

Eric Rentschler

Prologverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract.....	III
Vorwort.....	VI
Prologverzeichnis.....	VII
Inhaltsverzeichnis.....	VIII
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XVIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XXI
Symbolverzeichnis.....	XXII

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	- 1 -
1.1 Ausgangssituation und Problematik.....	- 1 -
1.2 Zielsetzung und Methodik der Arbeit	- 3 -
1.3 Aufbau der Arbeit.....	- 4 -
2 Grundlagen	- 6 -
2.1 Rückbau von Kernkraftwerken.....	- 6 -
2.1.1 Ausgangslage in Deutschland	- 6 -
2.1.2 Aufbau eines Kernkraftwerks.....	- 7 -
2.1.3 Gebäudestruktur Beton	- 10 -
2.1.4 Kontamination und Dekontamination.....	- 14 -
2.1.5 Freigabe und Freimessen.....	- 19 -
2.2 Stand der Dekontaminationstechnik	- 22 -
2.2.1 Verfahrensarten zur Dekontamination.....	- 22 -
2.2.2 Aktuelle Dekontaminationspraxis.....	- 24 -
2.2.3 Vergleichswerkzeug konventionelle Betonfräse	- 26 -
3 Lösungsansätze zur Innenkantendekontamination	- 27 -
3.1 Erster Demonstrator: Gleichdrehender Stufenfräser mit einem Antrieb.....	- 29 -
3.2 Zweiter Demonstrator: Stufenfräser mit zwei Antrieben.....	- 31 -
3.2.1 Gegendrehender Stufenfräser mit zwei Antrieben.....	- 31 -
3.2.2 Gleichdrehender Stufenfräser mit zwei Antrieben	- 33 -
3.3 Dritter Demonstrator: Gegendrehender Stufenfräser mit Getriebe und einem Antrieb.....	- 33 -
3.4 Arbeitsschutz	- 36 -
3.5 Wissenschaftliche Fragestellung	- 43 -
4 Experimentelles Versuchsprogramm	- 45 -
4.1 Versuchsstandaufbau	- 46 -
4.2 Probekörper	- 52 -

4.3 Verwendete Sensorik.....	- 54 -
4.4 Anordnung von Werkzeug und Probekörper.....	- 57 -
4.5 Versuchsplanung	- 60 -
5 Ergebnisse der Versuche	- 62 -
5.1 Darstellung der Einzelergebnisse	- 62 -
5.1.1 Kraftmessung	- 62 -
5.1.2 Gewicht der Demonstratoren.....	- 71 -
5.1.3 Ergebnisse Abtragsleistung.....	- 72 -
5.1.4 Ergebnisse Staubmenge	- 75 -
5.1.5 Ergebnisse Staubpartikelgröße	- 81 -
5.1.6 Ergebnisse der Vibrationsmessung.....	- 87 -
5.1.7 Ergebnisse des Schallpegels	- 93 -
5.1.8 Ergebnisse der Oberflächenqualitätsmessung	- 97 -
5.2 Analyse und Zwischenfazit	- 107 -
6 Auswertung und Gewichtung der Ergebnisse	- 131 -
6.1 Durchführung der Auswertung	- 131 -
6.2 Gewichtung der Ergebnisse und Nutzwertanalyse	- 132 -
6.3 Gesamtergebnis	- 136 -
6.4 Praxiserprobung	- 138 -
7 Fazit und Ausblick	- 141 -
7.1 Fazit.....	- 141 -
7.2 Ausblick	- 143 -
8 Literaturverzeichnis	- 146 -

Anhang	- 152 -
I. Korngrößenmessung Demonstratoren	- 152 -
II. Kriterien zur Verfahrensbewertung nach Hörenbaum et al.	- 188 -
III. Flächenleistung bei Wanddekontaminationssystemen.....	- 189 -
VI. Übersicht gängiger Verfahren der Dekontamination	- 190 -
V. Standardabweichung und Mittelwert, Fehlerbetrachtung.....	- 195 -
VI. Vollständige Kraftdiagramme.....	- 196 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flussschema: Eingangsparameter und Ausgangsparameter, eigene Darstellung mit Abbildung (Bodi Tools 2023)	- 3 -
Abbildung 2: Ablaufschema der Dissertation.....	- 5 -
Abbildung 3: Aufbau eines Siedewasserreaktors (Enye 2014).....	- 8 -
Abbildung 4: Aufbau eines Druckwasserreaktors (Enye 2014).....	- 8 -
Abbildung 5: Beton aus Gesteinskörnung und Zement	- 10 -
Abbildung 6: Links: Gesteinskörnung am Betonkörper, Rechts: Luftporen am Betonkörper	- 12 -
Abbildung 7: Links: Darstellung des Innenkantenbereichs (roter Doppelpfeil) an der Schnittgeraden von zwei Ebenen, Rechts: Draufsicht.....	- 13 -
Abbildung 8: Links: Darstellung des Inneneckenbereichs (rotes Kreuz) am Schnittpunkt von drei Ebenen, Rechts: Praxisbeispiel Unterzug und Stütze	- 14 -
Abbildung 9: Einteilung der verschiedenen Erscheinungsformen von Kontamination nach (Bach et al. 2003)	- 15 -
Abbildung 10: Mögliche Kontaminationsstellen in Schutzanstrich und Bauteil.....	- 16 -
Abbildung 11: Kategorisierung der Gebäudestruktur aus der Praxis (Riemann 2019), Beispiel Innenkanten in rot.....	- 18 -
Abbildung 12: Reaktorgebäude des Kernkraftwerks Würgassen (AKW Würgasse - Rückbau noch bis 2028, 2024); Wandvorsprünge und Rücksprünge (1), Kragplatten und Konsolen (2), Unterzüge (3), Rundungen an Wänden (4), Vertiefungen (5), Durchführungen (6), versetzte Wände (7), Trennfugen (8), Aussparungen (9)	- 18 -
Abbildung 13: Handgeführter Kontaminationsmonitor der Firma Berthold Technologies (Berthold Technologies GmbH & Co.KG 2021)	- 19 -
Abbildung 14: Tragbarer Kontaminationsmonitor der Firma Berthold Technologies (Berthold und Schreiber 2023)	- 20 -
Abbildung 15: Konventionelle Betonfräse Enviro C25	- 26 -
Abbildung 16: Links Werkzeug Helix 25, rechts Enviro Fräse C25 (Enviro 2020)...	- 26 -

Abbildung 17: Ansätze zum Abtrag durch verschiedene Demonstratoren, von links nach rechts: Demonstrator 1 gleichdrehend; Demonstrator 2 gegendrehend, Demonstrator 2 gleichdrehend, Demonstrator 3 gegendrehend; eigene Darstellung nach (Kurt Heppler et al. 2021)	- 27 -
Abbildung 18: Verschleißarten und Verschleißmechanismen nach (Hentschel 2014), angelehnt an DIN 50320	- 28 -
Abbildung 19: Diamantscheiben; links: Diamantscheibe für Beton/Estrich mit höherer Festigkeitsklasse, rechts: Diamantscheibe für Beton/Estrich mit normaler Festigkeitsklasse (Contec GmbH 2023)	- 29 -
Abbildung 20: CAD-Darstellung des ersten Demonstrators und Frontansicht	- 30 -
Abbildung 21: Erster Demonstrator, Antrieb mit Einhausung und fünf Diamantscheiben	- 31 -
Abbildung 22: Zweiter Demonstrator: CAD-Modell, Diamantscheibenaufbau und Werkzeug	- 32 -
Abbildung 23: Demonstrator 3, Oben: CAD-Darstellung der Diamantscheiben mit Getriebe im Zentrum; Unten: Darstellung der Drehrichtung der Diamantscheiben ..	- 34 -
Abbildung 24: Dritter Demonstrator mit Getriebe im Zentrum der Diamantscheiben, CAD-Modell und Demonstratorwerkzeug	- 35 -
Abbildung 25: Verweilzeit von Aerosol in der Atmosphäre nach (Rüger 2016), Modifiziert nach (Gabor 2019).....	- 39 -
Abbildung 26: CAD-Zeichnung des Versuchsaufbaus (Rentschler et al. 2023a)	- 47 -
Abbildung 27: Frontalansicht des Versuchsstandes mit Koordinatenangabe	- 47 -
Abbildung 28: Frontalansicht des Versuchsstandes geschlossen, Linearachse rot umrandet	- 48 -
Abbildung 29: Draufsicht Versuchsstand.....	- 49 -
Abbildung 30: Seitenansicht, Kettenwinde und Stahlschienen zur Befestigung der Lineareinheit	- 49 -
Abbildung 31: Unterschiedliche Ausrichtungsmöglichkeiten des Versuchsstands ..	- 49 -
Abbildung 32: Werkzeugaufnahme Eigenfertigung	- 51 -
Abbildung 33: Werkzeugaufnahme im Versuchsstand Ekont	- 51 -

Abbildung 34: Hergestellte Betonprobekörper der Betonfestigkeitsklasse C25/30 (Rentschler et al. 2023b).....	- 52 -
Abbildung 35: Bildung einer Innenkante aus zwei Betonkörpern, Innenkantenbereich rot markiert	- 53 -
Abbildung 36: Beispiel eines vorbereiteten Versuchsablaufs mit dem zweiten Demonstrator an einer erstellten Innenkante aus Betonkörpern.....	- 54 -
Abbildung 37: Darstellung der X-, Y- und Z-Richtung am Werkzeug	- 55 -
Abbildung 38: Schematische Darstellung des Oberflächenscans unter Anwendung der Rechteckregel (Metzger 2021).....	- 57 -
Abbildung 39: Links Gegenlaufräsen, Rechts: Gleichlaufräsen, eigene Darstellung nach (commonswiki 2023)	- 58 -
Abbildung 40: Links Gegenlaufräsen, Rechts: Gleichlaufräsen (commonswiki 2023) modifiziert nach eigener Darstellung	- 59 -
Abbildung 41: Von links nach rechts: Demonstrator 1 gleichdrehend; Demonstrator 2 gegendrehend, Demonstrator 2 gleichdrehend, Demonstrator 3 gegendrehend (eigene Darstellung nach (Kurt Heppler et al. 2021))	- 59 -
Abbildung 42: Demonstrator 1, X-Richtung in Vorschubrichtung, Y-Richtung in Schwerkraftrichtung	- 62 -
Abbildung 43: Demonstrator 1, X-Richtung in Vorschubrichtung, Z-Richtung orthogonal dazu	- 62 -
Abbildung 44: Y-Kräfte Betonfräse konventionell und Demonstrator 1, Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30.....	- 63 -
Abbildung 45: Vergleich der Reaktionskräfte Demonstrator 1, 2 und 3, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30	- 64 -
Abbildung 46: Reaktionskräfte 1. Demonstrator, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten, Betonfestigkeit C25/30	- 65 -
Abbildung 47: Reaktionskräfte 1. Demonstrator, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$ und 10 mm , Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30.....	- 66 -
Abbildung 48: Vergleich der Reaktionskräfte, Demonstrator 1, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Betondruckfestigkeit C25/30 und 30/37.....	- 67 -
Abbildung 49: Vergleich der Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Laufrichtung, Demonstrator 2, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Vorschub $v = 15 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30	- 68 -

Abbildung 50: Links: Gleichlauf mit vermehrt Kraft in Y-Richtung, Rechts: Gegenlauf mit Kraftverteilung in X- und Y-Richtung	- 68 -
Abbildung 51: Skizze zur Darstellung der Kräfte: Links Gleichdrehende Diamantscheiben, rechts gegendrehende Diamantscheiben.....	- 69 -
Abbildung 52: Vergleich der Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Drehrichtung, Demonstrator 2 ggd. und gld., Zustellung d = 10 mm, Vorschub v = 15 mm/s, Betonfestigkeit C25/30.....	- 69 -
Abbildung 53: Vergleich der Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Drehrichtung, Demonstrator 1 und 3, Zustellung d = 10 mm, Vorschub v = 10 mm/s, Betonfestigkeit C25/30.....	- 70 -
Abbildung 54: Gewicht der Demonstratorwerkzeuge im Vergleich	- 72 -
Abbildung 55: Stark vereinfachte Darstellung des Abtragsvolumens der Stufenfräser in der Ebene, Querschnittsfläche (rot) und Abtragslänge (blau).....	- 73 -
Abbildung 56: Stark vereinfachte Darstellung des Abtragsvolumens der Stufenfräser in der Innenkante, Querschnittsfläche (rot) und Abtragslänge (blau)....	- 74 -
Abbildung 57: Staubmessungen Betonfräse konventionell und Demonstrator 1 bei v = 10 mm/s und d = 10 mm in Beton C25/30	- 76 -
Abbildung 58: Staubmessungen Vergleich Demonstrator 1, 2 und 3 bei Vorschub v = 10 mm/s und Zustellung d = 10 mm, Betonfestigkeit C25/30.....	- 77 -
Abbildung 59: Staubmessungen Vergleich verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten, Demonstrator 1, Zustellung d = 5 mm, Betonfestigkeit C25/30.....	- 77 -
Abbildung 60: Staubmessungen Demonstrator 1, Vergleich Zustellung d = 5 mm und d = 10 mm, Vorschub v = 10 mm/s, Betonfestigkeit C25/30	- 78 -
Abbildung 61: Staubmessungen Vergleich Betonfestigkeit C25/30 und C30/37 bei Vorschub v = 10 mm/s und Zustellung d = 10 mm	- 79 -
Abbildung 62: Vergleich der maximalen Staubmenge in Abhängigkeit von der Laufrichtung, Demonstrator 3, Zustellung d = 10 mm, Betonfestigkeit C25/30	- 80 -
Abbildung 63: Vergleich der maximalen Staubmenge, Demonstrator 2 gegendrehend zu gleichdrehend, Zustellung d = 5 mm, Betonfestigkeit C25/30	- 80 -
Abbildung 64: Überblick Staubprobe Versuchsreihe 69, Demonstrator 1, v = 5 mm/s, d = 15 mm, C30/37	- 81 -
Abbildung 65: Detail Staubprobe Versuchsreihe 69, Demonstrator 1, v = 5 mm/s, d = 15 mm, C30/37	- 81 -

Abbildung 66: Vergleich der Feinstaubanteile der verschiedenen Demonstratoren, Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30	- 82 -
Abbildung 67: Vergleich der Feinstaubanteile bei verschiedenem Vorschub, Betonfräse konventionell, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30	- 83 -
Abbildung 68: Vergleich der Feinstaubanteile bei verschiedenem Vorschub, Demonstrator 2 gegenläufig, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30	- 84 -
Abbildung 69: Vergleich der Feinstaubanteile in Abhängigkeit von der Laufrichtung, Demonstrator 3, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30, Staub $<10 \mu\text{m}$	- 85 -
Abbildung 70: Vergleich der Feinstaubanteile in Abhängigkeit von der Werkzeugdrehrichtung, Demonstrator 2, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30, Staub $<10 \mu\text{m}$	- 86 -
Abbildung 71: Vergleich der Feinstaubanteile, Demonstrator 1 und 3, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30, Staub $<10 \mu\text{m}$	- 86 -
Abbildung 72: Vibrationsmessung Vergleich der unterschiedlichen Demonstratoren bei unterschiedlichem Vorschub, Zustellung $d=5 \text{ mm}$ und Betonfestigkeit C25/30 ..-	- 87 -
Abbildung 73: Vibrationsmessung Vergleich Demonstrator 1 und 3, ohne und mit Getriebe bei unterschiedlichem Vorschub, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$ und Betonfestigkeit C25/30	- 88 -
Abbildung 74: Vibrationsmessung Vergleich Betonfestigkeit C25/30 und C30/37, erster Demonstrator mit Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$ und Zustellung $d = 10 \text{ mm}$	- 89 -
Abbildung 75: Vibrationsmessung Vergleich Gegenlaufräsen und Gleichlaufräsen, erster Demonstrator mit Vorschub $v = 5 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 15 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C30/37	- 90 -
Abbildung 76: Vibrationsvergleich der Drehrichtung, zweiter Demonstrator mit gleichläufigen Diamantscheiben; Betonfestigkeit C25/30	- 91 -
Abbildung 77: Vibrationsmessung Vergleich Demonstrator 1 und 3, ohne und mit Getriebe bei unterschiedlichem Vorschub, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$ und Betonfestigkeit C25/30	- 92 -
Abbildung 78: Vergleich der durchschnittlichen Schallpegel von Demonstrator 1 und 2 bei unterschiedlichem Vorschub, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$ und Betonfestigkeit C25/30	- 93 -
Abbildung 79: Schallpegelmessung Vergleich der Zustellung, Demonstrator 2 mit Vorschub $v = 15 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30	- 94 -

Abbildung 80: Schallpegelmessung Vergleich Betonfestigkeit C25/30 und C30/37, Demonstrator 1 mit Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$	- 94 -
Abbildung 81: Schallpegelmessung Vergleich Gegenlaufräsen und Gleichlaufräsen, erster Demonstrator mit Vorschub $v = 5 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 15 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C30/37	- 96 -
Abbildung 82: Durchschnittliche Schallpegelmessungen Demonstrator 2, gegendrehender zu gleichdrehender Betrieb, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30	- 96 -
Abbildung 83: Stufenförmiger Betonabtrag im Zuge der Versuchsreihen	- 97 -
Abbildung 84: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch Demonstrator 1, gleichdrehend	- 98 -
Abbildung 85: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch Demonstrator 2, gegendrehend.....	- 99 -
Abbildung 86: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch Demonstrator 2, gleichdrehend	- 100 -
Abbildung 87: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch Demonstrator 3, gegendrehend.....	- 100 -
Abbildung 88: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch den konventionellen Betonfräser mit $v = 10 \text{ mm/s}$, $v = 15 \text{ mm/s}$ und $v = 20 \text{ mm/s}$ bei konstanter Zustellung $d = 5 \text{ mm}$ in Beton C25/30	- 101 -
Abbildung 89: Laserscanprofile vom Betonabtrag durch Demonstrator 2, gegendrehend; Links $v = 10 \text{ mm/s}$, Mitte $v = 15 \text{ mm/s}$, Rechts $v = 20 \text{ mm/s}$- 102 -	
Abbildung 90: Laserscanprofile vom Betonabtrag durch Demonstrator 1 ($v = 10 \text{ mm/s}$; $d = 5 \text{ mm}$), links: Betonfestigkeitsklasse C25/30, rechts: Betonfestigkeitsklasse C30/37	- 103 -
Abbildung 91: Laserscanprofile vom Betonabtrag durch Demonstrator 2 ($v = 15 \text{ mm/s}$; $d = 15 \text{ mm}$, C25/30), links: gegenläufig, rechts gleichläufig	- 104 -
Abbildung 92: Laserscanprofile vom Betonabtrag durch Demonstrator 1 ($v = 15 \text{ mm/s}$; $d = 15 \text{ mm}$, C30/37), links: gleichläufig, rechts gegenläufig	- 105 -
Abbildung 93: Laserscanprofile vom Betonabtrag ($v = 10 \text{ mm/s}$; $d = 10 \text{ mm}$, C25/30), links: Demonstrator 1 (gleichdrehend), rechts Demonstrator 3 (gegendrehend)	- 105 -
Abbildung 94: Laserscanprofile vom Betonabtrag ($v = 15 \text{ mm/s}$; $d = 15 \text{ mm}$, C25/30), links: Demonstrator 2 gleichdrehend, rechts Demonstrator 2 gegendrehend)	- 106 -

Abbildung 95: Durchschnittlicher Kraftbedarf der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, d = 5 mm.....	- 107 -
Abbildung 96: Lineare Trendlinie Kraftbedarf der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, d = 5 mm.....	- 108 -
Abbildung 97: Durchschnittlicher Kraftbedarf der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, d = 10 mm.....	- 109 -
Abbildung 98: Lineare Trendlinie Kraftbedarf der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, d = 10 mm.....	- 110 -
Abbildung 99: Staubmenge im Vergleich, Betonfestigkeit C25/30, Analyse aus Vorschub v = 10 mm/s, v = 15 mm/s und v = 20 mm/s.....	- 116 -
Abbildung 100: Feinstaubanteil im Vergleich, Betonfestigkeit C25/30, Analyse der Anteile von Fraktionen < 2,5 µm und < 10 µm.....	- 119 -
Abbildung 101: Vibrationsvektor im Raum mit X-, Y- und Z-Komponente.....	- 120 -
Abbildung 102: Durchschnittlicher Vibrationsbelastung der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, d = 5 mm	- 121 -
Abbildung 103: Lineare Trendlinie Vibration der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, d = 5 mm.....	- 122 -
Abbildung 104: Durchschnittlicher Vibrationsbelastung der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, d = 10 mm	- 123 -
Abbildung 105: Auswirkung der Betriebsart der entwickelten Demonstratorwerkzeuge auf die Laustärke bei Betonabtrag	- 127 -
Abbildung 106: Bewertung der Oberflächenqualität im Vergleich, Betonfestigkeit C25/30, Meta-Analyse aus Vorschub v=10 mm/s, v=15 mm/s und v=20 mm/s	- 129 -
Abbildung 107: Überblick über die betrachteten Anforderungsfaktoren	- 130 -
Abbildung 108: Praxiserprobung der Werkzeuge im Kernkraftwerk Obrigheim durch die SAT Kerntechnik GmbH (SAT. Kerntechnik)	- 139 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich derzeitig eingesetzter Geräte und Werkzeuge (Abbildungen (Hilti Deutschland 2024).....	- 25 -
Tabelle 2: Auslösewerte nach LärmVibrationsArbSchV	- 36 -
Tabelle 3: Orientierungstabelle Manuelles Heben, Halten und Tragen (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV))	- 40 -
Tabelle 4: Lastgewichte und Aktionskräfte mit einem erhöhten Risiko für die Verursachung bandscheibenbedingter Erkrankungen der Lendenwirbelsäule (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 01.09.2006)	- 41 -
Tabelle 5: Auslösewerte und Expositionsgrenzwerte für Hand-Arm-Vibrationen und Ganzkörper-Vibrationen (Vibrationen 2023).....	- 42 -
Tabelle 6: Ergebnisparameter/Ergebnisgruppen	- 46 -
Tabelle 7: Versuchsplanung mit den zu untersuchenden Eingangsparametern	- 61 -
Tabelle 8: Durchschnittliche Reaktionskräfte Demonstrator 1, 2 ggd. und 3, Zustellung d = 10 mm, Vorschub v = 10 mm/s, Betonfestigkeit C25/30.....	- 64 -
Tabelle 9: Durchschnittliche Reaktionskräfte, Demonstrator 1, Zustellung d = 10 mm, Vorschub v = 10 mm/s, Betondruckfestigkeit C25/30 und 30/37	- 67 -
Tabelle 10: Durchschnittliche Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Laufrichtung, Demonstrator 2, Zustellung d = 5 mm, Vorschub v = 15 mm/s, Betonfestigkeit C25/30.....	- 68 -
Tabelle 11: Durchschnittliche Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Drehrichtung, Demonstrator 2 ggd. und gld., Zustellung d = 10 mm, Vorschub v = 15 mm/s, Betonfestigkeit C25/30.....	- 70 -
Tabelle 12: Durchschnittliche Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Drehrichtung, Demonstrator 1 und 3, Zustellung d = 10 mm, Vorschub v = 10 mm/s, Betonfestigkeit C25/30	- 71 -
Tabelle 13: Übersicht der Vorschubgeschwindigkeiten und Zustellungen der untersuchten Werkzeuge	- 75 -
Tabelle 14: Maximale Staubmengen Demonstrator 1, Zustellung d = 5 mm bei Beton C25/30.....	- 78 -

Tabelle 15: Vibrationsvergleich der Drehrichtung, zweiter Demonstrator mit gleichläufigen Diamantscheiben; d = 10mm; Betonfestigkeit C25/30	- 90 -
Tabelle 16: Vergleich der durchschnittlichen Bearbeitungslautstärke bei verschiedenen Betonfestigkeiten	- 95 -
Tabelle 17: Durchschnittliche Kraft in Y-Richtung, Zustellung d = 5 mm, Betonfestigkeit C25/30.....	- 107 -
Tabelle 18: Durchschnittliche Kraft in Y-Richtung, Zustellung d = 10 mm, Betonfestigkeit C25/30.....	- 109 -
Tabelle 19: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich der Kraft in Y-Richtung ...	- 111 -
Tabelle 20: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich ihres Gewichts	- 112 -
Tabelle 21: Bewertung der Demonstratorwerkzeuge hinsichtlich Abtragsleistung .	- 114 -
Tabelle 22: Maximale Staubmesswerte bei einer Zustellung von d = 5 mm	- 115 -
Tabelle 23: Maximale Staubwerte bei einer Zustellung von d = 10 mm.....	- 115 -
Tabelle 24: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich Staubmenge	- 116 -
Tabelle 25: Darstellung der Feinstaubanteile < 2,5 µm der Demonstratoren bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten	- 118 -
Tabelle 26: Darstellung der Feinstaubanteile < 10 µm der Demonstratoren bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten	- 118 -
Tabelle 27: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich Feinstaubanteil.....	- 119 -
Tabelle 28: Durchschnittliche Vibrationsvektoren der Demonstratoren bei unterschiedlichem Vorschub mit einer Zustellung von d = 5 mm.....	- 121 -
Tabelle 29: Durchschnittliche Vibrationsvektoren der Demonstratoren bei unterschiedlichem Vorschub mit einer Zustellung von d = 10 mm.....	- 122 -
Tabelle 30: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich der durchschnittlichen Vibrationsvektoren	- 124 -
Tabelle 31: Durchschnittliche Schallpegel der Demonstratoren bei unterschiedlichem Vorschub mit einer Zustellung von d = 5 mm.....	- 125 -
Tabelle 32: Durchschnittliche Schallpegel der Demonstratoren bei unterschiedlichem Vorschub mit einer Zustellung von d = 10 mm.....	- 126 -

Tabelle 33: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich der durchschnittlichen Schallpegel	- 126 -
Tabelle 34: Restbetonstegbildung und Oberflächenqualität bei einer Zustellung von 5 mm, “+” = positiv bewertet, “-“ negativ bewertet, „(0)“ = keine Wertung	- 128 -
Tabelle 35: Restbetonstegbildung und Oberflächenqualität bei einer Zustellung 10 mm, “+” = positiv bewertet, “-“ negativ bewertet, „(0)“ = keine Wertung	- 128 -
Tabelle 36: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich der Restbetonstegbildung und Oberflächenqualität, „(0)“ = keine Wertung	- 129 -
Tabelle 37: Bewertungsgewichtung der verschiedenen Anforderungsfaktoren	- 133 -
Tabelle 38: Kompakttübersicht der Bewertungsergebnisse der Demonstratortypen und des Vergleichswerkzeugs	- 133 -
Tabelle 39: Kompakttübersicht der Bewertungsergebnisse der Demonstratortypen und des Vergleichswerkzeugs	- 135 -
Tabelle 40: Gesamttabelle, Bewertung aller Anforderungsfaktoren mit Gewichtung und resultierendem Gesamtergebnis	- 137 -
Tabelle 41: Gesamttabelle, Bewertung aller Anforderungsfaktoren mit Gewichtung und resultierendem Gesamtergebnis	- 137 -
Tabelle 42: Kurzfassung der Gesamtergebnisse, rechnerisch und gerundet.....	- 138 -
Tabelle 43: Subjektive Bewertung der Praxiserprobung durch die SAT Kerntechnik GmbH Abbildung 109: Praxiserprobung der Werkzeuge im Kernkraftwerk Obrigheim durch die SAT Kerntechnik GmbH (SAT. Kerntechnik)	- 139 -

Abkürzungsverzeichnis

AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CEM	Zement(-Haupt)art
DWR	Druckwasserreaktor
EKont	Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen
EKONT-2	Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen
IAEA	International Atomic Energy Agency
IK	Innenkante (Im Zuge dieser Arbeit)
INES	Internationale Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LärmVibrationsArbSchV	Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung
PM	Particulare matter
RDB	Reaktordruckbehälter
RKKB	Fachgebiet Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke (am KIT TMB)
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SWR	Siedewasserreaktor
TMB	Institut für Technologie und Management im Baubetrieb
TRLV	Technische Regeln Lärm und Vibration

Symbole und Einheiten

a	Jahr
B	Breite
Br	Arbeitsbreite pro Stunde
C	Normal- oder Schwerbeton
cm	Zentimeter
d	Zustellung
dB(A)	Bewerteter Schalldruckpegel
D	Durchmesser
Ø	Durchschnitt
$f_{ck,cube}$	Würfeldruckfestigkeit
$f_{ck,cyl}$	Zylinderdruckfestigkeit
°	Grad
g	Gramm
H	Höhe
h	Stunde
IK	(zu dekontaminierende) Innenkante
kg	Kilogramm
kN	Kilonewton
L	Länge
LC	Leichtbeton
μm	Mikrometer
mg	Milligramm
mm	Millimeter
mSv	Millisievert
m	Meter
m_w	(w/z-Wert) Massenverhältnis Wasser
m_z	(w/z-Wert) Massenverhältnis Zement
N	Newton
nm	Nanometer
%	Prozent

$PM_{2,5}$	Partikel mit Durchmesser $D \leq 2,5$ Mikrometer
PM_{10}	Partikel mit Durchmesser $D \leq 10$ Mikrometer
r	Radius
s	Sekunde
Sv	Sievert
v	Vorschubgeschwindigkeit
w	(w/z-Wert) Wasser
z	(w/z-Wert) Zement

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problematik

Am 30. Juni 2011 verabschiedete der Deutsche Bundestag den Ausstieg aus der Atomenergie. Politisch ausschlaggebend waren die Nuklearkatastrophen im Kernkraftwerk Tschernobyl aufgrund der Reaktorexplosion am 26. April 1986 und im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi infolge des starken Erdbebens vom 11. März 2011 (BMWK 2023). Der Rückbau der kerntechnischen Anlagen in Deutschland wird seitdem fokussiert und die daraus resultierenden technischen Herausforderungen werden angegangen. Durch die Stilllegung soll die ehemalige Kernkraftwerksfläche wieder uneingeschränkt nutzbar werden.

Eine technische Herausforderung in diesem Prozess ist die Dekontamination und Freimessung von Bauwerksteilen und Bauteilen der Kernkraftwerke, um im Nachgang einen konventionellen Rückbau der Gebäudesubstanz zu ermöglichen. Bauwerksteile, Materialien oder andere Abfälle, die nicht dekontaminiert werden können, werden als radioaktive Abfallgebinde zwischen- und nachfolgend endgelagert. Die Kontamination von Bauwerksteilen liegt meist oberflächlich in einer Tiefe von einigen Millimetern bis zu wenigen Zentimetern vor. Für die Dekontamination dieser Bereiche wird die Tiefe des Abtrags entsprechend so gewählt, dass die Fläche im Anschluss freigemessen werden kann. Beim Freimessen wird die Oberfläche auf vorhandene Kontamination geprüft. In deutschen Kernkraftwerken betrifft dies Betonoberflächen in einer Größenordnung zwischen 100 000 m² und 450 000 m² (Gentes et al. 2015).

Im Dekontaminationsvorgang liegen die Schwierigkeiten selten bei größeren, ebenen, leicht zugänglichen Flächen, sondern bei Störstellen in der Bauwerksgeometrie. Unter Störstellen werden geometrische Unebenheiten wie Innenkanten und -ecken verstanden. Diese Bereiche sind für größere Maschinensysteme schlecht zugänglich und weisen starke Inhomogenitäten in der Geometrie auf.

Im BMBF-geförderten Forschungsprojekt „Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Geräts für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und

Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont)“ wurden für die genannte Problematik der Störstellendekontamination Ansätze zum Abtrag von Betonoberflächen an Innenkanten behandelt. Derzeit erfolgt die Innenkantendekontamination vor Ort dem Stand der Technik entsprechend in Handarbeit durch Personal vor Ort. Hierbei kommen herkömmliche Werkzeuge und Geräte zum Einsatz, die nicht speziell für diesen Zweck ausgelegt sind. Beispiele für die eingesetzten Geräte sind Abbruchhämmer mit verschiedenen Aufsätzen wie Stemmeisen, Stockergeräte, Nadelgeräte sowie Schleif- und Fräsergeräte. Die physiologische Belastung der Facharbeiter durch das Einsatzgewicht der Geräte, die bei den Abtragsarbeiten entstehenden Erschütterungen, sowie die einzubringende körperliche Kraft sind hierbei die ausschlaggebenden Faktoren. Ebenfalls zu betrachten sind sekundäre Belastungsparameter der Werkzeuge wie die Lärmentwicklung bei den Arbeiten, die Staubentwicklung und die daraus notwendige Absaugung.

In dieser wissenschaftlichen Untersuchung wird gezeigt, wie der Betonabtrag an schwer zugänglichen Stellen wie Innenkanten verbessert werden kann. Konkret werden Parameter wie Abtragsleistung, Handhabbarkeit sowie umwelttechnische Auswirkungen untersucht, um ein tieferes Verständnis für diese Verfahren zu erhalten, daraus resultierend die Technologien zu verbessern und den technischen Stand des Rückbaus kerntechnischer Anlagen voranzutreiben. Ziel ist, die körperliche Belastung für das Personal und den Zeitbedarf für den Rückbauprozess zu senken, durch den gezielteren Abtrag Abfallmengen zu reduzieren sowie die Zwischen- undendlagerungskapazitäten zu schonen.

1.2 Zielsetzung und Methodik der Arbeit

Ziel dieser Promotion ist die Gewinnung wissenschaftlicher Erkenntnisse zum Betonabtrag an Innenkanten. Dieser Wissensgewinn kann vom kerntechnischen Kontext auf den konventionellen Rückbaubereich für diverse Anwendungsfälle übertragbar sein. Die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Werkzeuge sind handgeführt und elektrisch angetrieben. Der momentane Stand der Technik bietet zwar Vollautomatisierungspotenzial für große, ebene und leicht zugängliche Betonstrukturen, jedoch erweisen sich insbesondere Störstellen und Innenkanten aufgrund eines hohen Entwicklungs- und Kostenaufwands als ungeeignet für vollautomatisierte Verfahren und werden in der Praxis daher manuell bearbeitet. Die zu entwickelnden Verfahren und Demonstratoren werden objektiv und wissenschaftlich bewertet und auf eine Übertragbarkeit auf Anwendungsfälle geprüft. Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung einer oder mehrerer Demonstratoren, die im Vergleich zu derzeit am Markt verfügbaren Werkzeugen verbesserte Eigenschaften aufweisen. Hierzu werden Experten aus dem Bereich des kerntechnischen Rückbaus zu den relevanten Anforderungen an Dekontaminationswerkzeuge befragt. Der Großteil dieser Anforderungen kann in den Anforderungsgruppen Handhabbarkeit, Emissionen und Leistung erfasst werden (s. Abb. 1). Basierend auf diesen Kriterien werden konkrete Parameter versuchstechnisch gemessen und bewertet, um Abhängigkeiten zwischen den Anforderungswerten zu ermitteln. Aus diesen Ergebnissen werden Empfehlungen für anwendungsfallspezifische Verbesserung abgeleitet.

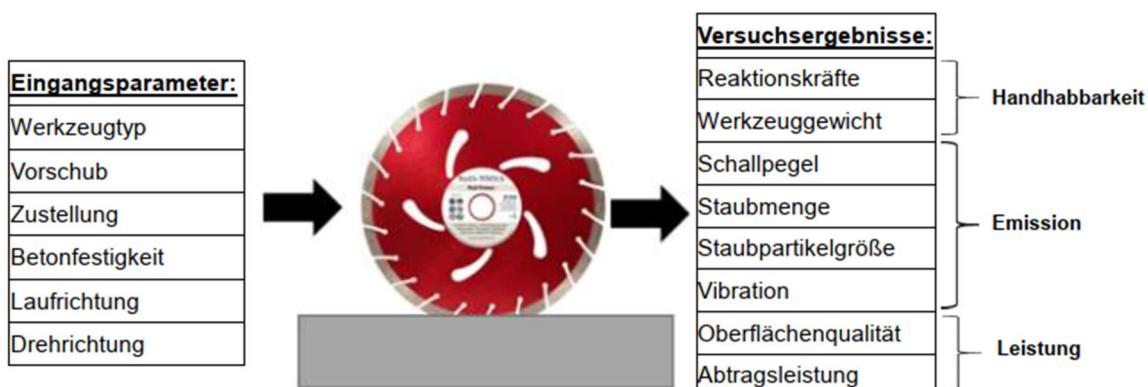


Abbildung 1: Flusschema: Eingangsparameter und Ausgangsparameter, eigene Darstellung mit Abbildung (Bodi Tools 2023)

Die Eignung der untersuchten Werkzeuge hängt von einer Vielzahl von Parametern ab, die in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: Abhängigkeitsfaktoren bzw. Eingangsparameter sowie relevante Versuchsergebnisse bzw. Ausgangsparameter. An die Feststellung der relevanten Eingangsparameter sowie Durchführung und Auswertung der Versuche folgen weitere Versuchsreihen auf Grundlage dieser Ergebnisse. Die Ergebnisse werden aufbereitet und analysiert. Anschließend wird eine Gewichtung der Ergebnisparameter durchgeführt, um eine kompakte Darstellung der Gesamtergebnisse dieser Forschung zu erhalten. In den hierfür erforderlichen Zwischenschritten wird jedes Ergebnis detailliert betrachtet und in separaten Unterkapiteln dargestellt, wie sich die zu untersuchenden Demonstratoren unter einem spezifischen Analysepunkt (z. B. Staubmengenentwicklung oder Schallemission) verhalten. Diese Untersuchungen umfassen sowohl isolierte Betrachtungen der einzelnen Demonstratoren als auch deren Vergleich untereinander, um die Auswirkungen von Eingangsparameteränderungen (z. B. Drehrichtung, Vorschub oder Zustellung) konkret zu erörtern. Die Forschungsarbeit soll einen kompakten Gesamtüberblick sowie eine detaillierte Betrachtung der Untersuchungsergebnisse bieten. Die Ergebnisse sollen klare Handlungsempfehlungen und konkrete Schlussfolgerungen beinhalten, die im wissenschaftlichen Kontext und in der Rückbaupraxis Anwendung finden.

Somit bietet diese Forschungsarbeit bei zukünftigen und aktuellen Rückbauprojekten und Forschungsvorhaben eine fundierte Wissensbasis.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst werden in Kapitel 2 die notwendigen Grundlagen in den Bereichen Kerntechnik, Dekontamination und untersuchte Materialien dargelegt, ergänzt durch einen Überblick über den momentanen Stand der Technik. Anschließend erfolgt die Definition der wissenschaftlichen Fragestellungen. In Kapitel 3 werden potenzielle Lösungsansätze zur Innenkantendekontamination vorgestellt und die verwendeten Werkzeuge erfasst.

Die praktischen Untersuchungen in Kapitel 4 dienen zur Planung der Versuche und des Versuchsstands. Hierbei werden konventionelle und neu entwickelte Demonstratorwerkzeuge in einem Versuchsstand implementiert und die

Durchführbarkeit der geplanten Versuchsreihen eruiert. Der Fokus liegt auf den Ausgangsparametern, anhand derer die Ergebniskapitel unterteilt sind. Diese sind wiederum nach den verschiedenen Eingangsparametern gegliedert und bilden das Kernelement der Arbeit. Aus den Versuchsreihen gesammelte Daten werden im Zuge eines Zwischenfazits pro Unterkapitel dargestellt. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Ausgangsparameter vollständig betrachtet und ein Gesamtfazit zu den Lösungsansätzen gezogen. Aus diesen Ergebnissen werden allgemeingültige Erkenntnisse abgeleitet und wissenschaftlich aufbereitet und es wird eine Gewichtung der Ergebnisse im Anwendungsfall der kerntechnischen Dekontamination vorgenommen. Der Aufbau der Arbeit ist in Abb. 2 zusammengefasst.

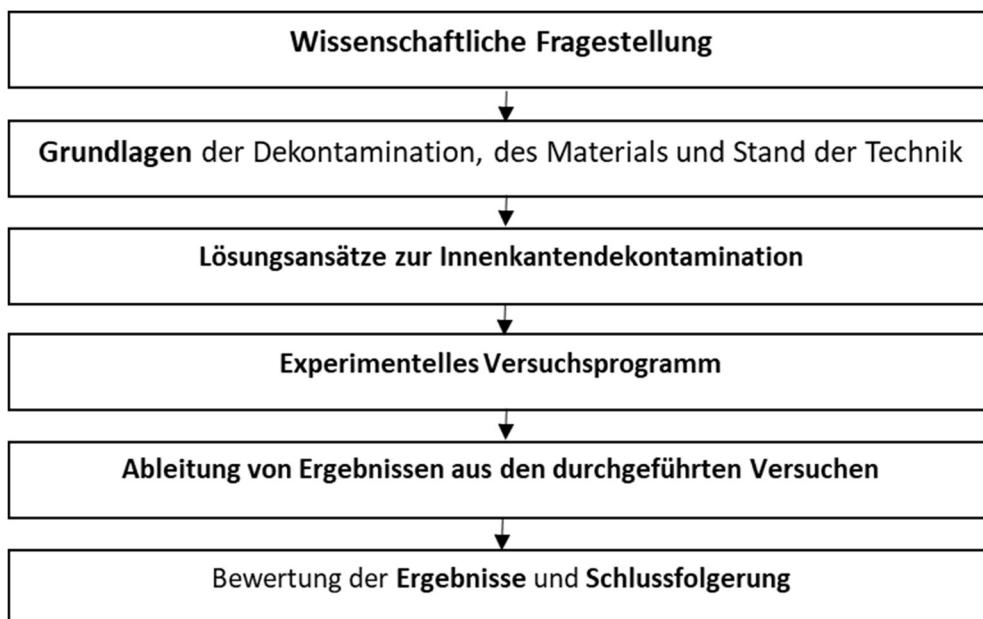


Abbildung 2: Ablaufschema der Dissertation

2 Grundlagen

2.1 Rückbau von Kernkraftwerken

2.1.1 Ausgangslage in Deutschland

„Vor uns liegen Jahrzehnte des Rückbaus. Denn von den 33 Kernkraftwerken, die einst in Betrieb genommen wurden, sind erst drei vollständig rückgebaut worden.“ (Bundesregierung 2023) Der Prozess des Rückbaus vom Leistungsbetrieb eines Kernkraftwerks bis zur uneingeschränkten Neunutzung der Fläche, der sogenannten „grünen Wiese“, erstreckt sich über mehrere Jahrzehnte und liegt kostentechnisch im Bereich von mehreren 100 Millionen bis Milliarden Euro.

Der Rückbauprozess nach dem Leistungsbetrieb besteht, grob untergliedert, aus der Nachbetriebsphase, Genehmigungsphase, Planungsphase, Stilllegungsphase und den geplanten Rückbauarbeiten. Der Rückbau lässt sich wiederum feiner in Rückbauphasen untergliedern (TÜV NORD 2024):

- Phase 0: Ausgangslage
- Phase 1: Demontage kontaminierte Komponenten im Maschinenhaus
- Phase 2: Rückbau Systeme Reaktorgebäude und Schnittfestlegung
- Phase 3: Rückbau Komponenten und Reaktorteile
- Phase 4: Zerlegung Reaktordruckbehälter, Abschirmung etc.
- Phase 5: Reinigung, Dekontamination, Freimessung Betonstruktur
- Phase 6: Abriss Maschinenhaus, Reaktorgebäude, Lagerung Abfälle

Die Untersuchungen dieser Arbeit werden sich überwiegend in Phase 5, im Themengebiet der Dekontamination von Beton bewegen. Je nach Größe des Kernkraftwerks umfasst dies Flächen von ca. 100 000 m² bis 450 000 m², die kontaminationsfrei sein müssen, bevor ein konventioneller Rückbau erfolgen kann. Zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit werden die Flächen bei Bedarf dekontaminiert und zwingend freigemessen, um eine erfolgreiche Dekontamination nachzuweisen oder erneut dekontaminiert zu werden, bis die Freimessung erfolgreich ist.

Die Oberflächen in Kernkraftwerken bestehen aus unterschiedlichen Materialien, die je nach Belastungsart auf verschiedene Arten dekontaminiert werden können. Ein großer Anteil der Oberflächenmaterialien sind metallische oder mineralische Oberflächen wie Stahl oder Beton. Die zu dekontaminierenden Objektoberflächen aus Beton und Stahlbeton in Kernkraftwerken sind in der Regel durch einen Schutzanstrich geschützt, wenn sie einer direkten oder indirekten Einwirkung aktiver Medien ausgesetzt sind. Diese Schutzschichten können jedoch schadhaft (Risse) oder von Medien durchdrungen worden sein. In solchen Fällen ist eine Dekontamination der Oberflächen notwendig.

Deren Ziel ist die Entsorgung der Komponenten und Bauteile durch verschiedene Pfade gemäß (StrlSchV 2018):

- Uneingeschränkte Freigabe zur Weiterverwendung oder Weiterverwertung
- Freigabe von Metallschrott zur Rezyklierung unter Beachtung bestimmter Bedingungen
- Freigabe zur Entsorgung als konventioneller Abfall (Deponierung)
- Entsorgung als radioaktiver Abfall

2.1.2 Aufbau eines Kernkraftwerks

Weltweit bilden der Siedewasserreaktor (SWR) und der Druckwasserreaktor (DWR) über 80 % aller Kernkraftwerke (IAEA 2020). Das grundsätzliche Wirkprinzip ist hierbei dasselbe: Die Kernreaktion erhitzt Wasser im Reaktordruckbehälter (RDB). Der Wasserdampf wird verwendet, um eine Turbine anzutreiben, die diese Energie in Strom umwandelt. Anschließend wird es dem Kreislauf wieder zugeführt. Es wird bei beiden Modellen Leichtwasser als Kühlmittel und Moderator sowie U-235 als Brennstoff verwendet (Enye 2014). In Abb. 3 und Abb. 4 sind beide Reaktortypen dargestellt.

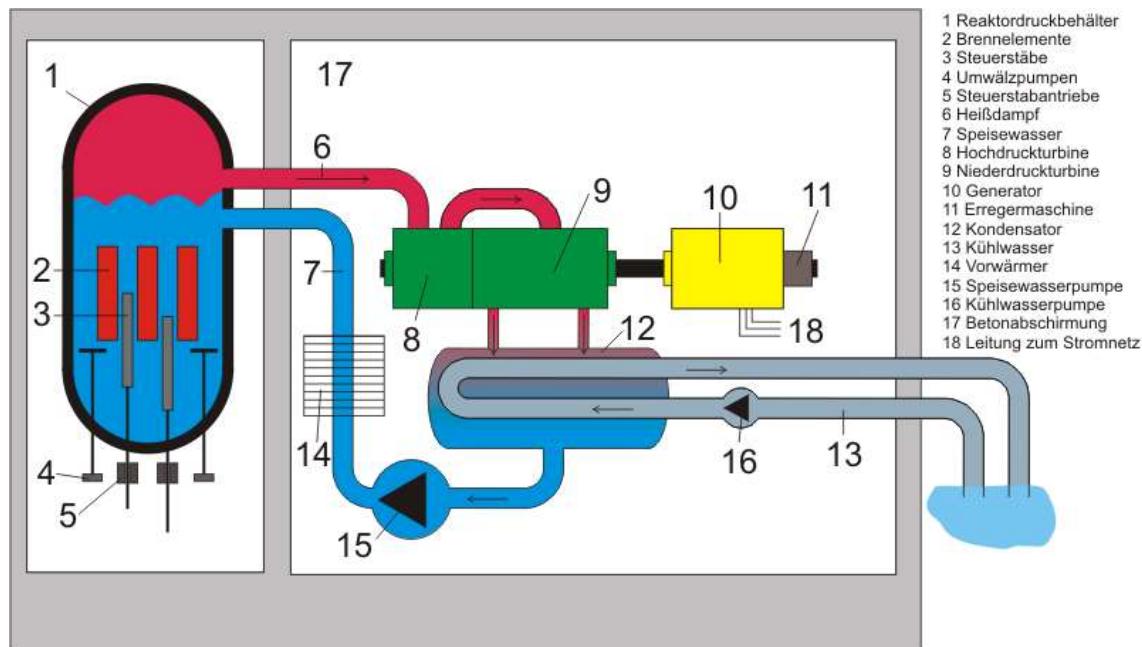


Abbildung 3: Aufbau eines Siedewasserreaktors (Enye 2014)

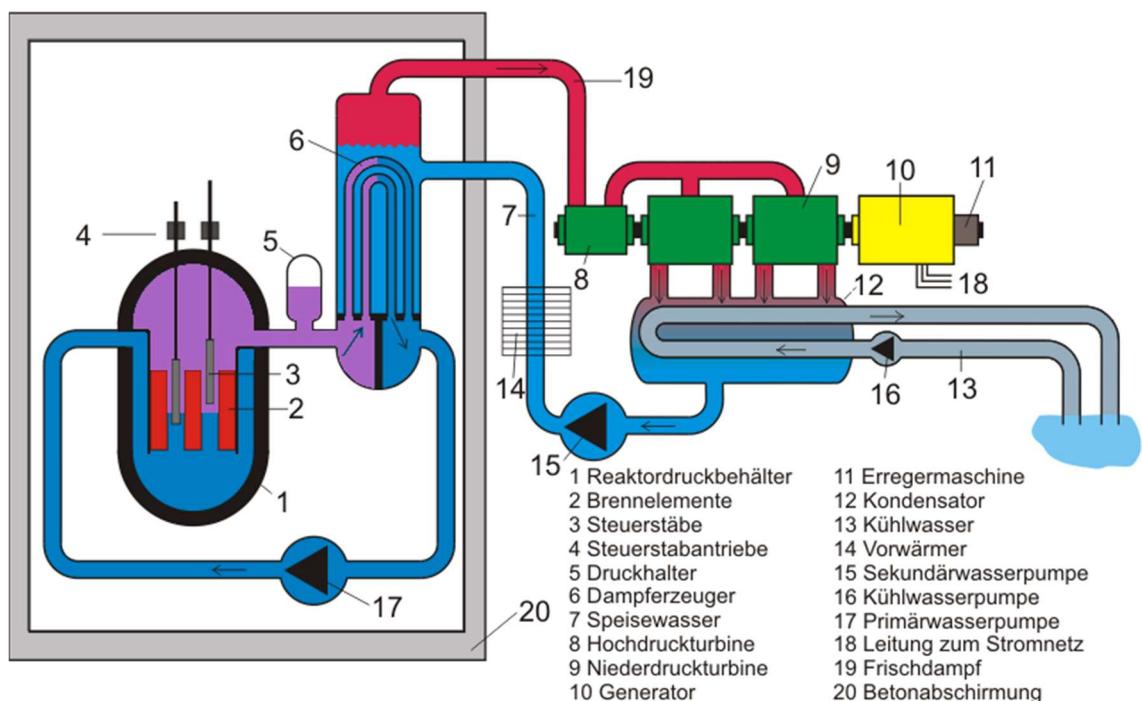


Abbildung 4: Aufbau eines Druckwasserreaktors (Enye 2014)

Das Siedewassерmodell ist durch einen zusammenhängenden Dampf-Wasser-Kreislauf gekennzeichnet. Das leichte Wasser wird durch die Kernreaktion von Uran erhitzt, verdampft und direkt über das Leitungssystem in die Turbinen des

Maschinenhauses geleitet. Anschließend wird der Dampf im Kondensator mittels eines getrennten Kühlwasserkreislaufs entspannt, verflüssigt und an den Reaktordruckbehälter zurückgeleitet.

Das Druckwassersystem nutzt zwei separate Kreisläufe: den Primärkreislauf, durch den Wasser den Reaktordruckbehälter durchfließt, und den Sekundärkreislauf. Bei diesem System ist das Maschinenhaus nicht in den Kontrollbereich integriert. Lediglich der Primärkreislauf kommt in direkten Kontakt mit den Brennstäben im Reaktordruckbehälter.

Das leichte Wasser wird durch die Kernreaktion erhitzt. Aufgrund von Drücken von bis zu 160 bar im Primärkreislauf verdampft das Wasser trotz hoher Temperaturen nicht. Die erhitze Flüssigkeit strömt in den Dampferzeuger, der als Schnittstelle zwischen beiden Kreisläufen fungiert, und übergibt dort seine thermische Energie an das Wasser im Sekundärkreislauf. Das Wasser im Sekundärkreislauf verdampft, treibt die Turbinen an, und die erzeugte Dampfenergie wird durch einen Generator in elektrische Energie umgewandelt. Hinsichtlich der Strahlenbelastung wird das Gelände des Kernkraftwerks in drei Strahlenschutzbereiche eingeteilt. In diesen kann ionisierende Strahlung auftreten, die den Grenzwert für das allgemeine Staatsgebiet überschreitet (Bundesamt für Strahlenschutz 2023):

- Überwachungsbereich ($\geq 1 \text{ mSv/a}$)
- Kontrollbereich ($\geq 6 \text{ mSv/a}$)
- Sperrbereich ($\geq 3 \text{ mSv/h}$)

Das gesamte Gelände des Kernkraftwerks wird hierbei als Überwachungsbereich behandelt. Der Kontrollbereich befindet sich somit im Überwachungsbereich und umfasst, in Abhängigkeit vom Reaktortyp, das Reaktorgebäude sowie das Maschinenhaus. Innerhalb des Kontrollbereichs befinden sich Sperrbereiche. Dies sind besonders ausgewiesene Flächen mit einer möglichen Ortsdosisleistung von mehr als 3 mSv pro Stunde.

2.1.3 Gebäudestruktur Beton

Der Baustoff Beton ist ein heterogener Werkstoff und besteht aus den Hauptbestandteilen Wasser, Zement und dem Zuschlag (typischerweise aus Gesteinskörnung). Zusätzlich zu den Hauptbestandteilen können Betonzusatzmittel wie Fließmittel, Luftporenbildner und Verzögerer sowie Betonzusatzstoffe wie Gesteinsmehle, Flugaschen oder verschiedene Stäube zugesetzt werden. Die Erhärtung des Betons findet durch eine chemische Reaktion des Zements mit Wasser statt, dies wird als Hydratation bezeichnet. So bildet sich der typische Querschnitt aus Gesteinskörnung und Zement (s. Abb. 5).

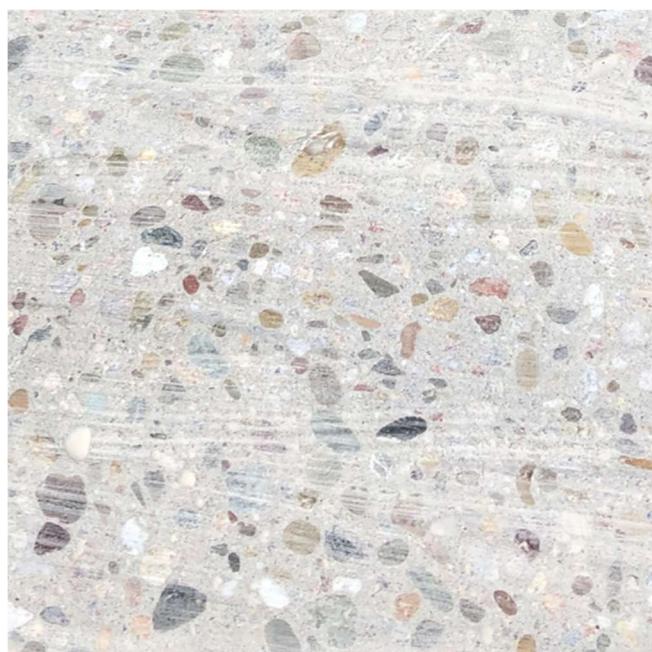


Abbildung 5: Beton aus Gesteinskörnung und Zement

Zement wird in die fünf Klassen CEM I bis CEM V eingeteilt, basierend auf dem Anteil an Portlandzementklinker, der den Hauptbestandteil bildet. CEM I besteht ausschließlich aus Portlandzementklinker. In den anderen Klassen wird er ergänzt zu Portland-Hüttenzement, Portland-Silikatstaubzement, Portland-Puzzolanzement, Portland-Flugaschenzement, Portland-Schieferzement, Portland-Kalksteinzement oder Portland-Kompositzement (CEM II) bzw. Hochofenzement (CEM III), Puzzolanzement (CEM IV) oder Kompositzement (CEM V) (Bergner et al. 2016).

Die Gesteinskörnung wird grob unterteilt in Füller, feine Gesteinskörnung und grobe Gesteinskörnung. Der Gesteinszuschlag macht hierbei im Normalfall ca.

70 % des Volumens aus und besteht oft aus Sand und Flusskies, also Gesteinsarten wie Granit, Basalt und Quarzit (Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1 2006).

Betone mit einer Dichte von weniger als 2000 kg/m³ werden als Leichtbetone bezeichnet, mit einer Dichte von mehr als 2600 kg/m³ als Schwerbetone. Die Dichte der vorherrschenden Normalbetone schwankt in der Regel zwischen 2100 und 2400 kg/m³.

Eine weitere wesentliche Komponente in der Betonherstellung ist Wasser. Als Zugabewasser wird Wasser in Trinkwasserqualität eingesetzt, weiterhin in der Natur vorkommendes Wasser, das frei von Bestandteilen ist, „die das Erhärten, andere Eigenschaften des Betons oder den Korrosionsschutz der Bewehrung ungünstig beeinflussen“ (Bergner et al. 2016). Im Hinblick auf die Kombination von Wasser und Zement ist der Wasserkennwert (w/z-Wert) zentral. Dieser Kennwert gibt das Massenverhältnis zwischen Anmachwasser m_w und der beigefügten Zementmasse m_z wieder (Bergner et al. 2016):

$$w/z = \frac{m_w}{m_z} \quad (\text{Gl. 1})$$

Mit einem niedrigeren w/z-Wert erhöht sich, allgemein formuliert, die Festigkeit des Betons. Die Festigkeit ist weiterhin abhängig von den Lagerungsbedingungen des verarbeiteten Betons, der Umgebungstemperatur, Witterungseinflüssen und der Erhärtungszeit. Zur Einteilung von Beton werden Druckfestigkeitsklassen verwendet. Die Druckfestigkeitsklassen sind ein Maß für seine maximale Widerstandsfähigkeit gegen Druck von außen und werden durch Kombination aus Buchstaben und zwei numerischen Werten beschrieben. Die Buchstaben geben Aufschluss, ob es sich um Normal- oder Schwerbeton (C) oder um einen Leichtbeton (LC) handelt. Der erste numerische Wert gibt die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit $f_{ck,cyl}$ in N/mm² an, der zweite Wert die charakteristische Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$ in N/mm². Eine handelsübliche und auch in dieser Arbeit versuchstechnisch verwendete Betondruckfestigkeitsklasse ist C25/30, ein Normalbeton mit einer Zylinderdruckfestigkeit von $f_{ck,cyl}$ von 25 N/mm² und einer Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$ von 30 N/mm².

Im konstruktiven Bereich wird Beton in Kombination mit Stahl als Stahlbeton eingesetzt, wobei meist gerippter Betonstahl in Stab- oder Mattenform als

Bewehrung verwendet wird. In vorliegender Arbeit nimmt der Betonstahl eine untergeordnete Rolle ein, da die Bewehrung eine Mindestbetonüberdeckung aufweisen sollte, die in der Regel höher ausfällt als die Abtragstiefe der Dekontamination. Die Mindestbetonüberdeckung bewegt sich zwischen 10 mm und 40 mm und ist damit größer als die meisten Kontaminationstiefen. Ausnahmen hiervon existieren sowohl bei der Kontaminationstiefe, die beispielsweise aufgrund von Rissen tiefer sein kann, als auch bei der Betonüberdeckung. Letztere kann beispielsweise durch nicht fachgerechten Einbau der Bewehrung in den Stahlbeton die erforderliche Mindestbetonüberdeckung verfehlten. Diese Spezialfälle bilden jedoch die Ausnahme und nicht die Regel ab und werden im Zuge der Untersuchungen daher vernachlässigt. Es wird der Fall des Kontaminationsabtrags im Beton ohne Stahlabtrag betrachtet.

Beton ist ein heterogener Werkstoff. Es bestehen Unterschiede in der Festigkeit der eingebundenen Gesteinskörnung im Beton im Vergleich zum Zement zwischen der Körnung. Darüber hinaus besitzen Betone eine gewisse Porosität durch Lufteinschlüsse (s. Abb. 6).

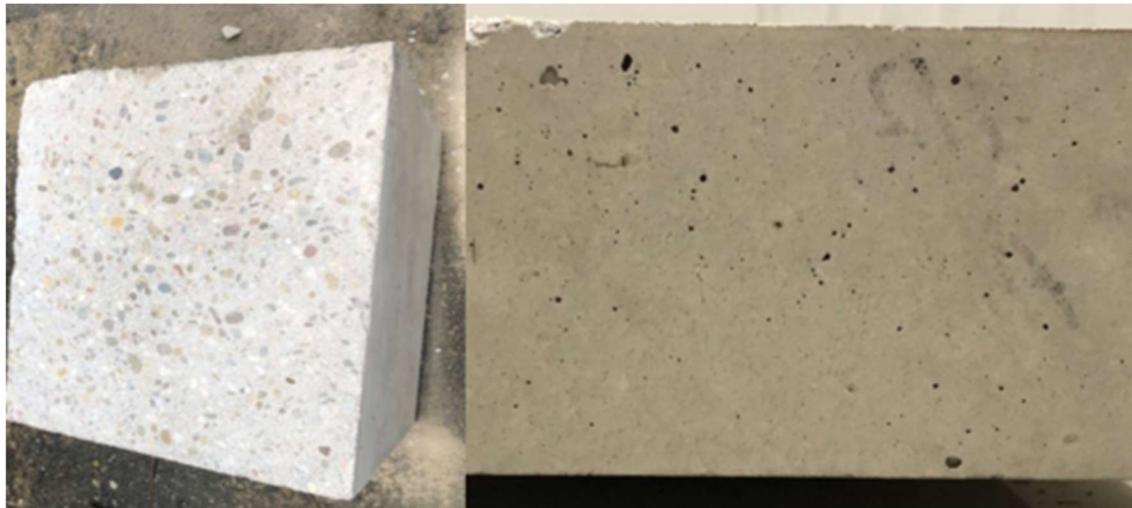


Abbildung 6: Links: Gesteinskörnung am Betonkörper, Rechts: Luftporen am Betonkörper

Gebäudestruktur Innenkante und Ecke

Als Innenkante wird in dieser Arbeit der kleinere Winkel zwischen zwei sich schneidenden Ebenen definiert (s. Abb. 7). Ein typisches Beispiel hierfür ist die Innenkante in einem Raum eines Bauwerks, die meist einen Winkel von 90° aufweist. Die Innenkante kann sich zwischen einer Raumwand und dem Raumboden, einer Raumwand und einer anderen Raumwand oder zwischen Raumwand und Raumdecke befinden. Eine Innenkante stellt das Pendant zur Außenkante dar. Die Bezeichnung Kante wird vorliegend auch als Synonym für Innenkante verwendet, da sich die behandelten Verfahren stets auf Innenkanten beziehen.



Abbildung 7: Links: Darstellung des Innenkantenbereichs (roter Doppelpfeil) an der Schnittgeraden von zwei Ebenen, Rechts: Draufsicht

Hierbei erfolgt eine klare Abgrenzung zum Begriff Ecke bzw. Innenecke. Die Ecke wird vorliegend als der Punkt definiert, an dem sich drei Ebenen schneiden (s. Abb. 8). Es gibt wiederum Außen- und Innenecken, wobei die Innenecke die kleineren Winkel aufweist. Im Normalfall werden Innenecken von drei Innenkanten kontaktiert, die diese ausbilden. Die (Innen-) Ecke liegt, um beim Beispiel des Raumes eines Bauwerks zu bleiben, am Treffpunkt zwischen Raumwand, Raumwand und Raumboden sowie am Treffpunkt Raumwand, Raumwand, Raumdecke vor. Der Begriff Ecke wird vorliegend als Synonym für Innenecke verwendet, da sich die behandelten Verfahren nur auf Innenecken beziehen.

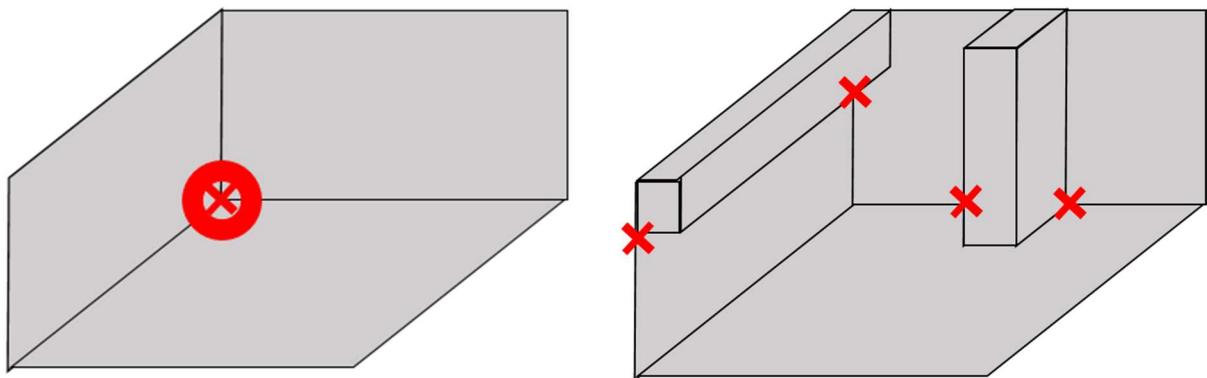


Abbildung 8: Links: Darstellung des Inneneckenbereichs (rotes Kreuz) am Schnittpunkt von drei Ebenen, Rechts: Praxisbeispiel Unterzug und Stütze

2.1.4 Kontamination und Dekontamination

Der Begriff Kontamination (lat. „contaminare“, übersetzt mit beflecken, verderben, verunreinigen) bezeichnet im Allgemeinen eine Verschmutzung oder Verunreinigung im weitesten Sinne. In dieser Arbeit wird der Begriff Kontamination als Synonym für Kontamination durch Radioaktivität verwendet, die eine Verschmutzung oder Verunreinigung von Objekten oder Personen durch oder mit radioaktiven Stoffen darstellt. Eine Kontamination ist normalerweise nicht mit den menschlichen Sinnen wahrnehmbar. Zum Nachweis sind spezielle Geräte erforderlich, wie beispielsweise Dosisleistungsmessgeräte.

Auf die im Kontext der Arbeit relevanten Messgeräte wird gesondert eingegangen (vgl. Kap. 5.1.8). Die verschiedenen Vorkommensarten der Kontamination im kerntechnischen Umfeld werden in Abb. 9 kurz erläutert und dargestellt:

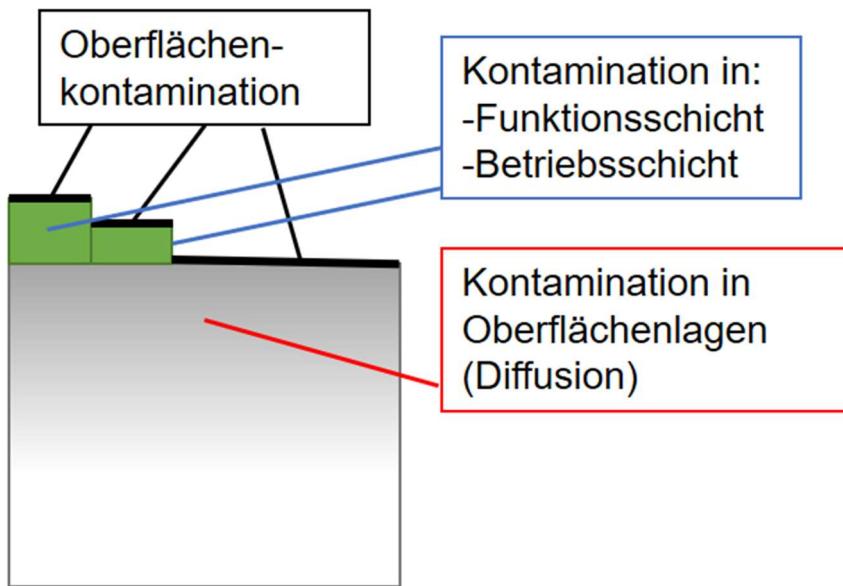


Abbildung 9: Einteilung der verschiedenen Erscheinungsformen von Kontamination nach (Bach et al. 2003)

(Bach et al. 2003) klassifizieren die Erscheinungsformen von Kontamination im kerntechnischen Umfeld wie folgt:

Oberflächenkontamination

- radioaktive Substanzen sind an Oberflächen angelagert, Bindungskräfte zur Oberfläche sind meist gering
- Kontamination kann durch Reinigung (Abwischen, Abspülen) entfernt werden

Kontamination in Oberflächenschichten

- Funktionsschichten
 - o wurden vor Einsatz eines Bauteils aufgebracht, z. B. Lacke oder Kunstharzversiegelungen am Beton
 - o radioaktive Isotope können durch Diffusion eindringen
- Betriebsschichten
 - o entstehen während des Bauteilbetriebs, z. B. Korrosionsschichten bei Metallen
 - o radioaktive Isotope werden während der Entstehung dieser Schichten eingelagert

Kontamination im Bauteil

- in den massiven Bauteilwerkstoff dringen radioaktive Isotope ein, z. B. in porösen Beton

Durchdringung

- Kontamination kann (abhängig von den Umständen) das komplette Bauteil durchdringen
- Kontamination ist in der Regel an der ausgesetzten Oberfläche am größten und nimmt zum Bauteilinneren hin ab, dadurch ist Kontamination in oberflächennahen Regionen eher stark konzentriert, was die Trennung des Materials nach Entsorgungsklassen ermöglicht (potenzielle Kosteneinsparungen)

Zur Beseitigung der Kontamination dient die Dekontamination. Die Möglichkeit zur Beseitigung einer radioaktiven Kontamination hängt von verschiedenen Randbedingungen ab, einschließlich der Grundbeschaffenheit und der Materialeigenschaften des zu dekontaminierenden Materials. Weitere Bedingungen sind die Art und Menge der Kontamination.

Auf Betonbauteilen im kerntechnischen Umfeld sind in der Regel mehrere Schutzanstriche aufgebracht. Die Kontamination liegt teils auf der direkten Oberfläche der Schutzanstriche, teils zwischen den jeweiligen Schichten und teils direkt auf oder leicht eingedrungen in der Betonoberfläche z.B. durch Risse (s. Abb. 10).

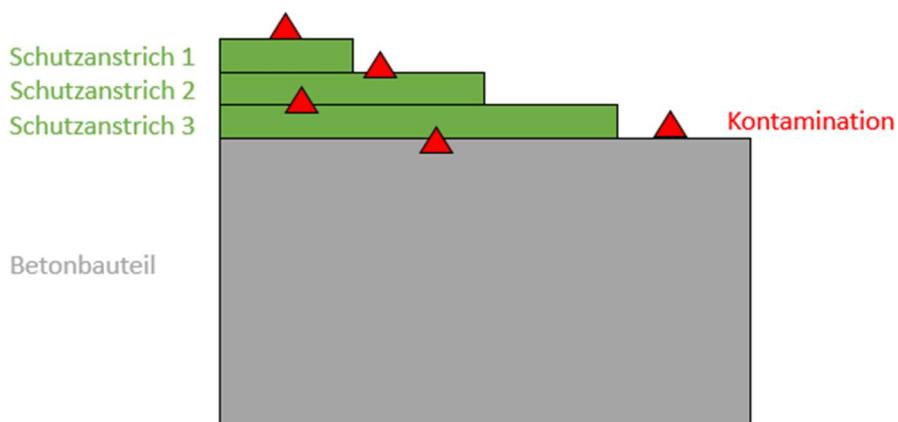


Abbildung 10: Mögliche Kontaminationsstellen in Schutzanstrich und Bauteil

Unter günstigen Bedingungen wie bei glatten, leicht zu reinigenden Oberflächen und sehr geringer Kontamination ohne Tiefeneintrag kann eine Dekontamination durch fachgerechtes Reinigen der Oberfläche stattfinden. Bei größeren bzw. tiefergehenden Kontaminationen ist ein Abtrag der Oberfläche abhängig von der Eindringtiefe der Kontamination erforderlich. So können kontaminierte von unkontaminierten Materialien getrennt werden, da der unkontaminierte Anteil den kontaminierten massetechnisch meist überwiegt.

Kernkraftwerke sind komplexe Bauwerke und weisen neben einer großen Anzahl an ebenen Flächen (vgl. Abb. 11) auch eine Vielzahl an geometrischen Unebenheiten auf, sogenannte Störstellen. Deren Dekontamination stellt eine technische Herausforderung dar, da neben Ecken und Kanten zahlreiche unterschiedliche geometrische Wandstrukturen vorzufinden sind. Beispiele für mögliche Störstellen sind in Abbildung 12 dargestellt: Wandvorsprünge und Rücksprünge (1), Kragplatten und Konsolen (2), Unterzüge (3), Rundungen an Wänden (4), Vertiefungen (5), Durchführungen (6), versetzte Wände (7), Trennfugen (8), Aussparungen (9) (AKW Würgasse - Rückbau noch bis 2028, 2024).



Abbildung 11: Kategorisierung der Gebäudestruktur aus der Praxis (Riemann 2019), Beispiel Innenkanten in rot

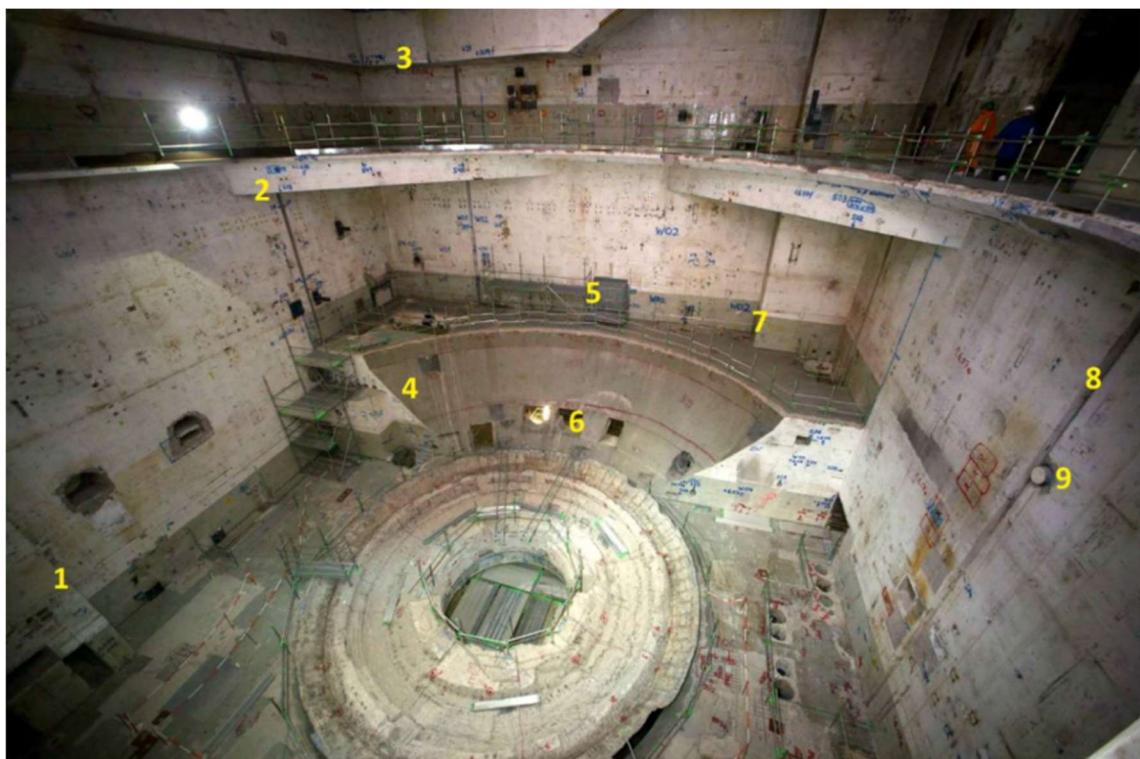


Abbildung 12: Reaktorgebäude des Kernkraftwerks Würgassen (AKW Würgasse - Rückbau noch bis 2028, 2024); Wandvorsprünge und Rücksprünge (1), Kragplatten und Konsolen (2), Unterzüge (3), Rundungen an Wänden (4), Vertiefungen (5), Durchführungen (6), versetzte Wände (7), Trennfugen (8), Aussparungen (9)

2.1.5 Freigabe und Freimessen

Um eine erfolgreich abgeschlossene Dekontamination eines Objekts zu bestätigen, ist eine Freigabe erforderlich. Die Freigabe im Strahlenschutz stellt in Deutschland einen speziellen Verwaltungsakt dar und bedeutet die Entlassung aus dem Geltungsbereich der „Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung“ (StrlSchV 2018). Die StrlSchV regelt den Umgang mit Radioaktivität. Daraus ergeben sich die Sachverhalte zur Freigabe im Strahlenschutz (Buzer.de 2023).

Der Verwaltungsprozess betrifft somit alle Objekte, die mit radioaktiven Stoffen kontaminiert sind. Die Freigabe dieser Objekte kann nur durch Einhaltung bzw. Unterschreitung der vorgegebenen Werte bzw. Wertgrenzen laut StrlSchV und deren Anlagen erreicht werden. Der Nachweis und der positive Abschluss des Freigabeprozesses entlassen das betreffende Objekt aus der StrlSchV und dieses kann der konventionellen Kreislaufwirtschaft übergeben werden. Die Einhaltung dieser Grenzwerte wird über das sogenannte Freimessen überprüft (s. Abb. 13).



Abbildung 13: Handgeführter Kontaminationsmonitor der Firma Berthold Technologies (Berthold Technologies GmbH & Co.KG 2021)

Das *Freimessen* ist ein Begriff aus der Nukleartechnik. Es bezieht sich auf das messtechnische Überprüfen von Bauteilen, Abbruchmaterialien oder anderen

Objekten aus unterschiedlichen Materialien wie Beton und Stahl auf nicht natürliche Radioaktivität. Wenn die Messwerte die geforderten Grenzwerte erfüllen bzw. unterschreiten, werden diese Objekte gesetzlich als frei von Radioaktivität betrachtet. Die Messung reduziert nicht die Strahlung, sondern bestätigt nur eine Unterschreitung der Grenzwerte für Radioaktivität. Das Freimessen dient dabei als Entscheidungsgrundlage und Voraussetzung zur Freigabe und wird deshalb auch als Entscheidungsmessung bezeichnet (Berthold Technologies GmbH & Co.KG 2021).

Für eine qualitativ gute Freimessung sollte die Oberfläche möglichst ebenmäßig sein. Alphastrahlung hat einen hauptsächlichen Wirkungskreis im Zentimeterbereich, weshalb bereits Betonunebenheiten oder Rückstände im Millimeterbereich signifikante Faktoren darstellen. Zudem sollte der Abstand zwischen Messsonde und frei zu messender Oberfläche konstant sein, z. B. eine Entfernung von 10 mm betragen. Ein Abweichen von diesem Wert kann zu Messungenauigkeiten führen. Daher ist die Ebenmäßigkeit der Betonoberfläche relevant für die Freimessung, da schon Geometrieveränderungen im Millimeterbereich Einfluss auf die Messergebnisse nehmen können. Die Freimessung ist beispielsweise durch Kontaminationsmonitore möglich (Berthold und Schreiber 2023), die bauartbedingt auf eine ebene Oberfläche angewiesen sind.



Abbildung 14: Tragbarer Kontaminationsmonitor der Firma Berthold Technologies (Berthold und Schreiber 2023)

Oberflächenkontaminations-Messgeräte (s. Abb. 14) zeichnen sich durch ihre große Detektoreoberfläche aus, welche ein zügiges Messen von größeren Flächen ermöglicht. „Unmittelbare Messgröße ist die durch die Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung von Radionukliden im Detektor ausgelöste Impulsrate, die bei bekanntem Radionuklid mittels eines Kalibrierfaktors in die zugehörige flächenbezogene Aktivität Bq/cm^2 entweder umgerechnet werden kann oder direkt zur Anzeige gebracht wird (Vogt und Schultz 2011)“. Die handgeführten Messgeräte besitzen eine dünne Folie ($0,3 \text{ mg}/\text{cm}^2$) als Eintrittsfenster.

2.2 Stand der Dekontaminationstechnik

Bei der Dekontamination von Oberflächen haben sich die drei Verfahrensgruppen der (elektro-)chemischen Verfahren, thermischen Verfahren und mechanischen Verfahren durchgesetzt. Die experimentellen Untersuchungen dieser Dissertation bewegen sich aufgrund der Eingrenzung des Forschungsgebiets ausschließlich im mechanischen Verfahrensbereich, daher werden die anderen Verfahrensgruppen lediglich kurz skizziert.

2.2.1 Verfahrensarten zur Dekontamination

Um eine Oberfläche chemisch abzutragen, wird diese entweder mit einem Gel oder Schaum benetzt. Hierbei basieren die meisten Reaktionen auf einem Oxidationsprozess, bei dem der Baustoff mit der Chemikalie reagiert und anschließend ein Reaktionsprodukt erzeugt. Dieses Verfahren wird meist bei metallischen Oberflächen verwendet, da bei offenporigen Oberflächen die Wirtschaftlichkeit nicht gegeben ist (Hübner et al. 2017). Der Vorteil des (elektro-)chemischen Verfahrens ist dessen flexibler Einsatz, weshalb es meist bei größeren und schwer zerlegbaren Bauteilen genutzt wird. Der wichtigste Nachteil ist das große Aufkommen von Sekundärabfällen, da die radioaktiven Partikel erhalten bleiben und die Chemikalie in Mitleidenschaft ziehen. Bei dem elektrochemischen Verfahren wird ein zu dekontaminierendes Bauteil mit einer Natriumnitrat- oder Natriumchlorid-Elektrolytlösung umgeben, an die über eine metallische Anode und Kathode eine Spannung angelegt wird. Dadurch kommt es zum Abtrag an der Oberfläche des Bauteils, welches an sich elektrisch leitend sein muss. Anschließend wird das abgetragene Material aus der Elektrolytlösung mittels Absetzen oder einer Zentrifuge entfernt (Hübner et al. 2017). Im Gegensatz zum rein chemischen Verfahren bietet dieses Verfahren den Vorteil, dass eine geringe Menge an Sekundärabfall entsteht. Nachteil dieses Verfahrens ist die Abhängigkeit von der Größe des Elektrolysebeckens sowie der notwendige Transport zum Becken und die Zerlegung (NEA Task Group on Decontamination 2020).

Bei den thermischen Verfahren wird ein Abtrag durch sehr hohe Temperaturen, sehr niedrige Temperaturen oder eine Kombination beider erreicht. Die hohen Temperaturen werden zum Beispiel durch Laserstrahlung erzeugt. Bei der so

genannten Laserablation wird das abzutragende Material geschmolzen, verdampft oder im geschmolzenen Zustand per Düse ausgeblasen. Ein positiver Aspekt ist, dass die radioaktiven Isotope in der Betonschmelze gebunden werden. Übliche Leistungen liegen bei ca. 2,3 m²/h bei 3 mm Abtragstiefe (Anthofer et al. 2013). Im Gegensatz dazu stehen thermische Verfahren mit niedrigen Temperaturen, hier anhand des Trockeneisstrahlens erläutert. Bei dem Verfahren werden Trockeneis-Pellets per Druckluft durch eine Düse auf die abzutragende Oberfläche geschossen. Die auf circa 300 m/s beschleunigten Pellets vergrößern sich beim Aufprall auf das circa 700-fache und erzeugen so Thermospannungen. Die Trockeneis-Pellets verdampfen nach dem Vorgang und das abgetragene Material kann abgesaugt werden (Hübner et al. 2017). Mit einer Kombination aus beiden Verfahren (Abtrag durch sehr hohe und durch sehr niedrige Temperaturen) ist es möglich, die Temperaturdifferenz auf der Oberfläche des abzutragenden Werkstoffs zu vergrößern und Vorteile wie Leistungsdichte, Einwirkzeit und genaue Geometrien zu nutzen. Dabei wird die Oberfläche zuerst per Laser stark erwärmt und anschließend per Trockeneisstrahl schlagartig abgekühlt. Die dadurch entstehenden Spannungen eignen sich speziell für die Bearbeitung von Werkstoffen wie Beton oder Keramik.

Die mechanischen Verfahren lassen sich in zwei Untergruppen unterteilen: Aufprallmechanismen und Schneiden/Spanabhebend. Ein Beispiel für Oberflächendekontamination durch einen Aufprallmechanismus ist die Hochdruck-Wasserstrahl-Technik mit zusätzlichem Abrasiv. Hierbei wird, dem Namen entsprechend, die Oberfläche per Wasserstrahl bearbeitet. Die große Menge an benötigtem Wasser führt zu großen Mengen an Sekundärabfall aus Wasser und Abtragsmaterial, die notwendigerweise aufbereitet werden müssen. Hierin liegt ein erheblicher Nachteil dieses Verfahrens. Weitere erhebliche Nachteile bei diesem Verfahren sind der hohe Lärmpegel und die Verletzungsgefahr. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen zum einen darin, dass es praktisch materialunabhängig eingesetzt werden kann und zum anderen in einer entfernungssensiblen Werkzeugführung (Hübner et al. 2017). Dem gegenüber stehen die spanabhebenden Verfahren, welche sich wiederum in zwei Untergruppen, mit definiertem Schneidewinkel und ohne definierten Schneidewinkel, unterteilen lassen. Mechanische, spanabhebende Verfahren mit

definiertem Schneidewinkel sind das Fräsen, Hämmern, Stocken, Nadeln oder Meißeln, bei denen der Abtrag im Millimeterbereich erfolgen kann. Der Abtrag mit Fräslamellen kann großflächig erfolgen und bringt gute Ergebnisse bei mineralischen Einsatzgebieten. Neuere Forschungsprojekte (DefAhS, MAARISS) befassen sich unter anderem mit dem Fräsen von Beton-Stahl-Verbundwerkstoffen und liefern hier ebenfalls gute Ergebnisse (Gabor et al. 2019; Braun et al. 2024). Spanabhebende Verfahren ohne definierten Schneidewinkel weisen keine einheitliche Abtragstiefe und keinen einheitlichen Schneidewinkel auf. Es wird meist mit Schleif- oder mit Bürstenverfahren gearbeitet. Ein Beispiel für das Schleifen sind rotierende, diamantbesetzte Scheiben beim Abtrag von Beton oder Mauerwerk. Bürsten werden in der Regel bei Stahlbauteilen verwendet, bei denen die Kontamination sehr oberflächennah anhaftet.

2.2.2 Aktuelle Dekontaminationspraxis

Nach heutigem Stand der Technik werden Störstellen wie Innenkanten überwiegend mit konventionellen, mechanischen Techniken dekontaminiert. Dabei kommen (Bohr-)Hammerwerkzeuge, Stockergeräte, Nadelpistolen oder Schleif- bzw. Fräswerkzeuge zum Einsatz. Diese Werkzeuge belasten das Arbeitspersonal durch Vibrationen, hohe erforderliche Rückstellkräfte und eine hohe Lautstärke. In Kombination mit den Schutzvorgaben im kerntechnischen Umfeld ergeben sich entsprechend lange Pausenzeiten für das Personal. Darüber hinaus entstehen bei den Arbeiten mit den genannten Werkzeugen meist hohe Staubmengen.

Eine Freimessung der Störstellen stellt aufgrund der komplexen Geometrie der Störstellen und der Eindringtiefe der Kontamination auch für das Personal des Strahlenschutzes eine technische Herausforderung dar. Deren Ziel ist es, Kontaminationsfreiheit nachzuweisen und damit eine Gefährdung für Mensch und Umwelt auszuschließen. Dies wird in der Regel nachgewiesen durch Direktmessungen mit Handkontaminationsmonitoren und gerasterte Materialproben. Die Anwendung der konventionellen Geräte hinterlässt eine unebene Oberfläche mit einer variablen Abtragstiefe, was ein Freimessen zusätzlich erschwert.

Tabelle 1: Vergleich derzeitig eingesetzter Geräte und Werkzeuge (Abbildungen (Hilti Deutschland 2024)

	Stocker und Hämmer	Nadelgeräte	Schleif- und Fräsgeräte	Konventionelle Betonfräse
				
Abtragstiefe [mm]	2 - 4	2 - 5	2 - 5	2 - 8
Lautstärke [dB(A)]	80 - 100	100	90	100
Investitionskosten (komplett)	~2.500 - 4.000€	~2.500 - 4.000€	~2.000 - 9.000€	~1.500 - 3.000€
Dekontamination von Innenkanten	nein	ja	ja	ja
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Abtrag dünner Betonschichten • geeignet für spröde Materialien • effektiv zur Dekontamination von Böden 	<ul style="list-style-type: none"> • geeignet für den Einsatz bei beengten Platzbedingungen • ermöglicht die Bearbeitung unterschiedlicher Oberflächenformen 	<ul style="list-style-type: none"> • laut Hersteller ist Kantenbearbeitung bis 3mm Tiefe möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • geeignet für den Einsatz bei beengten Platzbedingungen • laut Hersteller ist Kantenbearbeitung bis 8mm Tiefe möglich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Abtragsleistung • hinterlässt unebene Flächen 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Abtragsgeschwindigkeit • hinterlässt unebene Flächen 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Leistungsfähigkeit und Abtragsgeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Abtragsgeschwindigkeit • limitierte Tiefe

Aufgrund der in diesem Kapitel aufgezeigten Nachteile der aktuellen Dekontaminationsmethoden, speziell die geringe Abtragsleistung und die unebene Oberfläche, besteht der Bedarf an einer geeigneteren Lösung zur Innenkantendekontamination. Die Maschinen, die derzeit als „Stand der Technik“ gelten, sind Universalwerkzeuge und nicht speziell für den Anwendungsfall der Innenkantendekontamination entwickelt. Daher sind die in Tabelle 1 aufgeführten Vorteile und Nachteile stets im spezifischen Kontext zu betrachten. Eine an den Anwendungsfall angepasste Entwicklung ist daher ein sinnvoller Lösungsansatz für das Problem der Innenkantendekontamination. Die konventionelle Betonfräse ist aufgrund ihrer Bauweise und ihrer Eigenschaften das Gerät, was nach Stand der Technik am geeignetsten ist für die Betoninnenkantendekontamination. Daher wird dieses Gerät als Vergleichswerkzeug zu den entwickelten Lösungsansätzen betrachtet und im folgenden Kapitel genauer vorgestellt.

2.2.3 Vergleichswerkzeug konventionelle Betonfräse



Abbildung 15: Konventionelle Betonfräse Enviro C25

Eines der wenigen Werkzeugprodukte, das auf dem Markt verfügbar ist und mit dem ein Innenkantenabtrag eingeschränkt möglich ist, ist die Enviro Fräse C25 (Enviro 2020). Daher wird die konventionelle Betonfräse gesondert betrachtet und dient im Laufe dieser Arbeit als Vergleichswerkzeug (Stand der Technik) zu den neu entwickelten Werkzeugansätzen. Die Eckfräse besitzt als Antrieb einen Bosch Winkelschleifer, Professional GWS 17-125 CIE. Dieser treibt den zylinderförmigen Schleifteller (Helix25) an, der einzelne Zahnaufsätze mit Diamantenbesatz aufweist (s. Abb. 15). Der zahnradähnliche Werkzeugkopf befindet sich in einer Einhausung (s. Abb. 16). Der Gesamtaufbau weist ein Werkzeuggewicht von 4,05 kg auf. Die Antriebsfunktion besteht aus einem in sich rotierenden Antriebsstrang, der die Kräfte auf den Helixzylinder überträgt und dadurch die Zahnaufsätze bewegt. Die aufgebrachten Diamanten können somit den zu bearbeitenden Werkstoff ablösen.

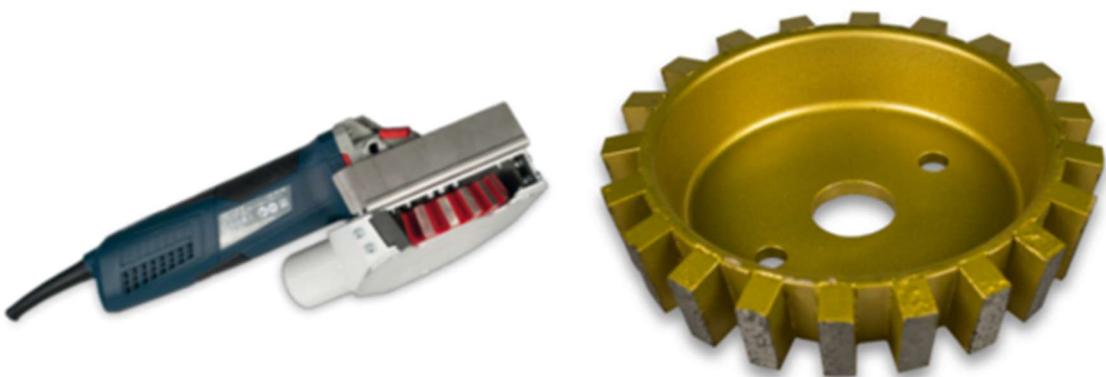


Abbildung 16: Links Werkzeug Helix 25, rechts Enviro Fräse C25 (Enviro 2020)

3 Lösungsansätze zur Innenkantendekontamination

Zur Beantwortung der Fragestellung zur Dekontamination von Innenkanten wurden mehrere Werkzeugansätze untersucht, die in den Kapiteln 3.1 bis 3.3 erläutert werden (s. Abb. 17). Grundlegend wurde mit verschiedenen Ansätzen gearbeitet. Die Grundlage ist ein Stufenfrässystem, das durch einen rotierenden Winkelschleifer angetrieben wird. Dieser Ansatz wurde in unterschiedlichen Umsetzungen in Demonstrator 1, 2 und 3 untersucht. Alle Ansätze sind für die händische Bedienung konzipiert, was die thematisierten Faktoren Werkzeuggewicht, Kraftaufwand und Schallpegel relevant macht (s. Kapitel 2.2.2). Den somit klassischen mechanischen Verfahren wurde das größte Potenzial zur Dekontamination von Innenkanten zugeschrieben, da mit Blick auf die Zukunft auch ein Übertragen der Forschungsresultate in den konventionellen Rückbau ermöglicht werden soll. Der Abtragsbereich der Demonstratoren wurde für die Untersuchungen mit Fokus auf die konkrete Anwendung bei der Dekontamination im kerntechnischen Bereich, speziell die Innenkanten, Ecken und andere Störstellen, definiert. Konkret wurde eine Abtragsbreite durch das Werkzeug von bis zu 20 mm bei einem untersuchten Tiefenabtrag von 5 mm bis 15 mm untersucht. Neben den genannten technischen Faktoren, wie auftretende Kräfte und Emissionen in verschiedenen Formen, wurden bauwirtschaftliche Faktoren wie Verschleißoptimierung, Handhabung und Demontierbarkeit des Werkzeugs als entscheidend betrachtet.



Abbildung 17: Ansätze zum Abtrag durch verschiedene Demonstratoren, von links nach rechts: Demonstrator 1 gleichdrehend; Demonstrator 2 gegendrehend, Demonstrator 2 gleichdrehend, Demonstrator 3 gegendrehend; eigene Darstellung nach (Kurt Heppler et al. 2021)

Die verwendeten Abtragssysteme des StufenfräSENS lassen sich den in Abb. 20 dargestellten Systemstrukturen zuweisen, eine präzisere Erläuterung erfolgt in Kapitel 3.1 bis 3.3. Hierbei können die Stufenfräser der Gruppe „Festkörper/Festkörper“ zugeordnet werden. Aufgrund des Diamantbesatzes der Trennscheiben können die aufgesetzten Diamanten auch als Partikel betrachtet werden. Daher werden ebenfalls die Systemstrukturen Festkörper/Partikel sowie Festkörper/Partikel/Festkörper berücksichtigt (s. Abb. 18).

Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung	Verschleißart	Mechanismus*
			a) b) c) d)
Gleiten		Gleitverschleiß	● ○ ○ ●
Rollen/Wälzen		Roll- und Wälzverschleiß	○ ○ ● ○
Festkörper/Festkörper			
Oszillieren		Schwingungsverschleiß	● ● ● ●
Stoßen		Stoßverschleiß	○ ○ ● ○
Festkörper/Partikel			
Stoßen		Zweikörper-Abrasiv-Stoßverschleiß	- ● ● ○
Gleiten/Rollen/Wälzen		Zweikörper-Abrasiv-Gleitverschleiß	- ● - ○
Festkörper/Partikel/Festkörper			
Gleiten			○ ● ○ ○
Wälzen		Dreikörper-Abrasiv-Verschleiß	○ ● ● ○
Stoßen			○ ○ ● ○

* a) Adhäsion b) Abrasion c) Oberflächenzerstörung d) Triboochemische Reaktion

● Hauptwirkung ○ Eventuelle Nebenwirkung

Abbildung 18: Verschleißarten und Verschleißmechanismen nach (Hentschel 2014), angelehnt an DIN 50320

Für die Stufenfräser werden Diamantscheiben für Beton und Estrich der Firma Contec Maschinenbau und Entwicklungstechnik GmbH (Contec GmbH 2023) verwendet. Die Diamantscheiben sind am äußeren Rand mit Industriediamanten besetzt und weisen eine Aufnahme für das antreibende Werkzeug auf. Zudem besitzen sie in regelmäßigen Abständen Aussparungen am Außenumfang, welche den Materialaustritt während der Bearbeitung der Betonoberfläche erleichtern (s. Abb. 19). Um den Winkel einer innenliegenden Kante durch die abtragenden Außenmaße des Werkzeugs zu erfassen, wurden 5 bzw. 6 Diamantfrässcheiben geometrisch derart auf dem rotierenden Werkzeugantrieb montiert, dass sie über ihre Außenkanten einen 90° -Winkel bilden. Der Durchmesser der Scheiben nimmt von der Mitte ausgehend ab.



Abbildung 19: Diamantscheiben; links: Diamantscheibe für Beton/Estrich mit höherer Festigkeitsklasse, rechts: Diamantscheibe für Beton/Estrich mit normaler Festigkeitsklasse (Contec GmbH 2023)

3.1 Erster Demonstrator: Gleichdrehender Stufenfräser mit einem Antrieb

Bei Demonstrator 1 handelt es sich um einen Stufenfräser mit Scheibensystem, der diese im direkten Verfahren zum Rotieren bringt (s. Abb. 20). Das Modell ist mit fünf Diamantscheiben ausgestattet, die achsensymmetrisch auf den rotierenden Teil des Winkelschleifers aufgesetzt werden. Die mittlere Scheibe ist

mit Durchmesser $D = 220$ mm die größte, nach außen verkleinern sich die Scheiben auf $D = 210$ mm und abschließend $D = 200$ mm. Die Diamantscheiben werden über einen Winkelschleifer „Bosch Professional GWS 19-125 CIE“ angetrieben. Das Gehäuse um die Diamantscheiben wurde aus Blech gefertigt und wird auf den Winkelschleifer montiert. Ein zusätzlicher Griff des Winkelschleifers kann an verschiedenen Stellen am Gehäuse angebracht werden. Das Gewicht des ersten Demonstrators beträgt 6850 Gramm.

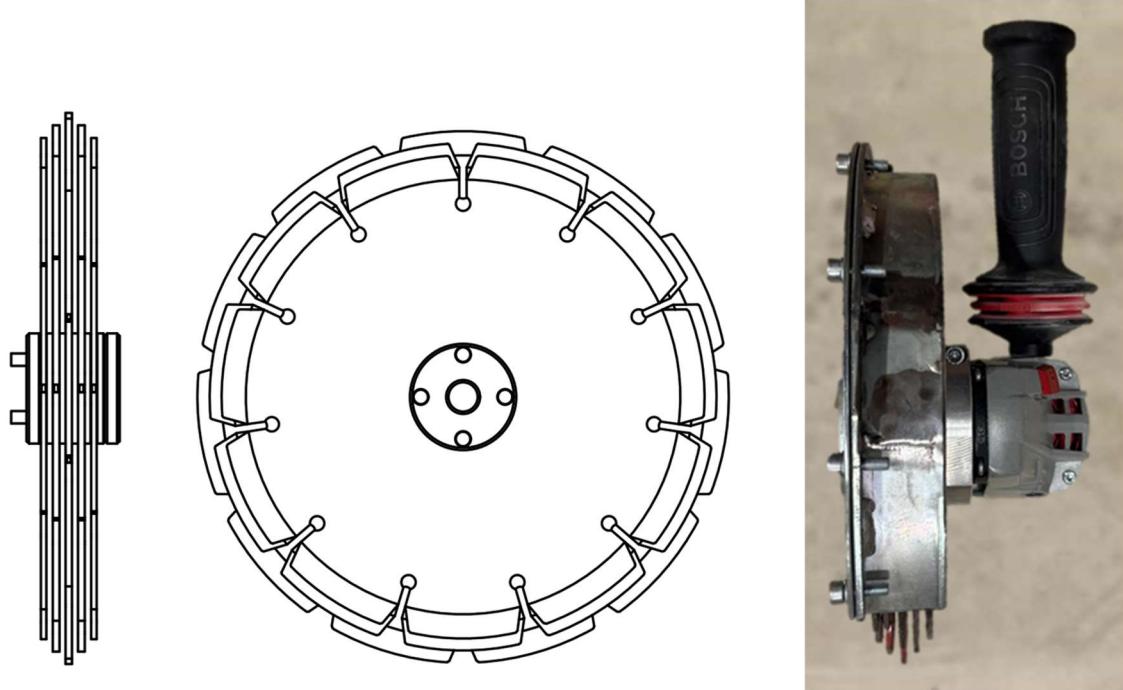
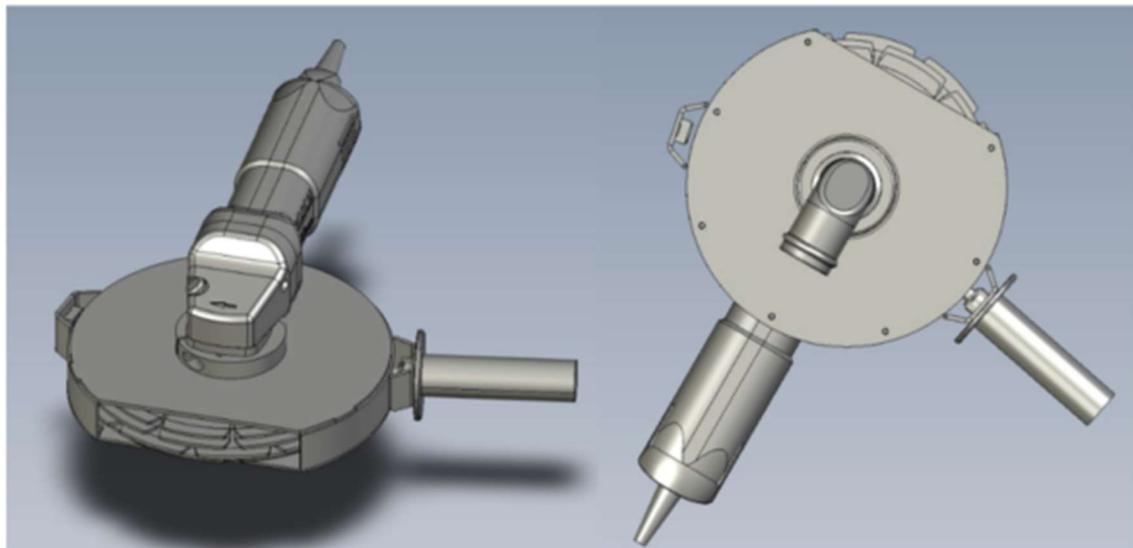


Abbildung 20: CAD-Darstellung des ersten Demonstrators und Frontansicht



Abbildung 21: Erster Demonstrator, Antrieb mit Einhausung und fünf Diamantscheiben

3.2 Zweiter Demonstrator: Stufenfräser mit zwei Antrieben

3.2.1 Gegendrehender Stufenfräser mit zwei Antrieben

Zur Reduzierung der entstehenden Kräfte und Momente bei einem gleichdrehenden Stufenfräser wurden gegendrehende Verfahren untersucht. Ziel ist es, die auftretenden Rotationskräfte durch unterschiedliche Drehung der Diamantscheiben auszugleichen. Bei Demonstrator 2 werden insgesamt 6 Diamantfrässcheiben verwendet. Jeweils 3 Scheiben werden von einem der insgesamt zwei Winkelschleifer angetrieben. Die Scheiben sind symmetrisch angeordnet, mit $D = 220 \text{ mm}$ im Zentrum, $D = 210 \text{ mm}$ im Übergang und $D = 200 \text{ mm}$ auf den Außenseiten. Mithilfe der beiden Antriebe können die unterschiedlichen Seiten des Werkzeugs einmal rechtsdrehend und einmal linksdrehend angetrieben werden. Diese Anordnung soll die Materialeingriffskräfte kompensieren. Für den konkreten Versuchsaufbau ist es erforderlich, die beiden Antriebe so kompakt und raumsparend anzuordnen, dass die Geometrie des Werkzeugs ein Bearbeiten des 90° -Winkels ermöglicht. Hierzu werden die beiden Antriebe versetzt zueinander angebaut. Zur Befestigung des zweiten Demonstrators an der Lineartechnik über die Werkzeugaufnahme wird am Demonstrator ein Adapterzylinder angebracht. Somit kann der zweite Demonstrator auf vergleichbarer Basis im Versuchsstand untersucht werden. An

das Blechgehäuse können beidseitig Absaugschläuche angeschlossen werden, was den Staubaustritt erheblich reduziert, da die Absaugung mit der Rotationsrichtung der jeweiligen Werkzeugseite übereinstimmt (s. Abb. 24). Das Gewicht des zweiten Demonstrators liegt inklusive Werkzeugaufnahme-Zylinder bei 16 150 Gramm.

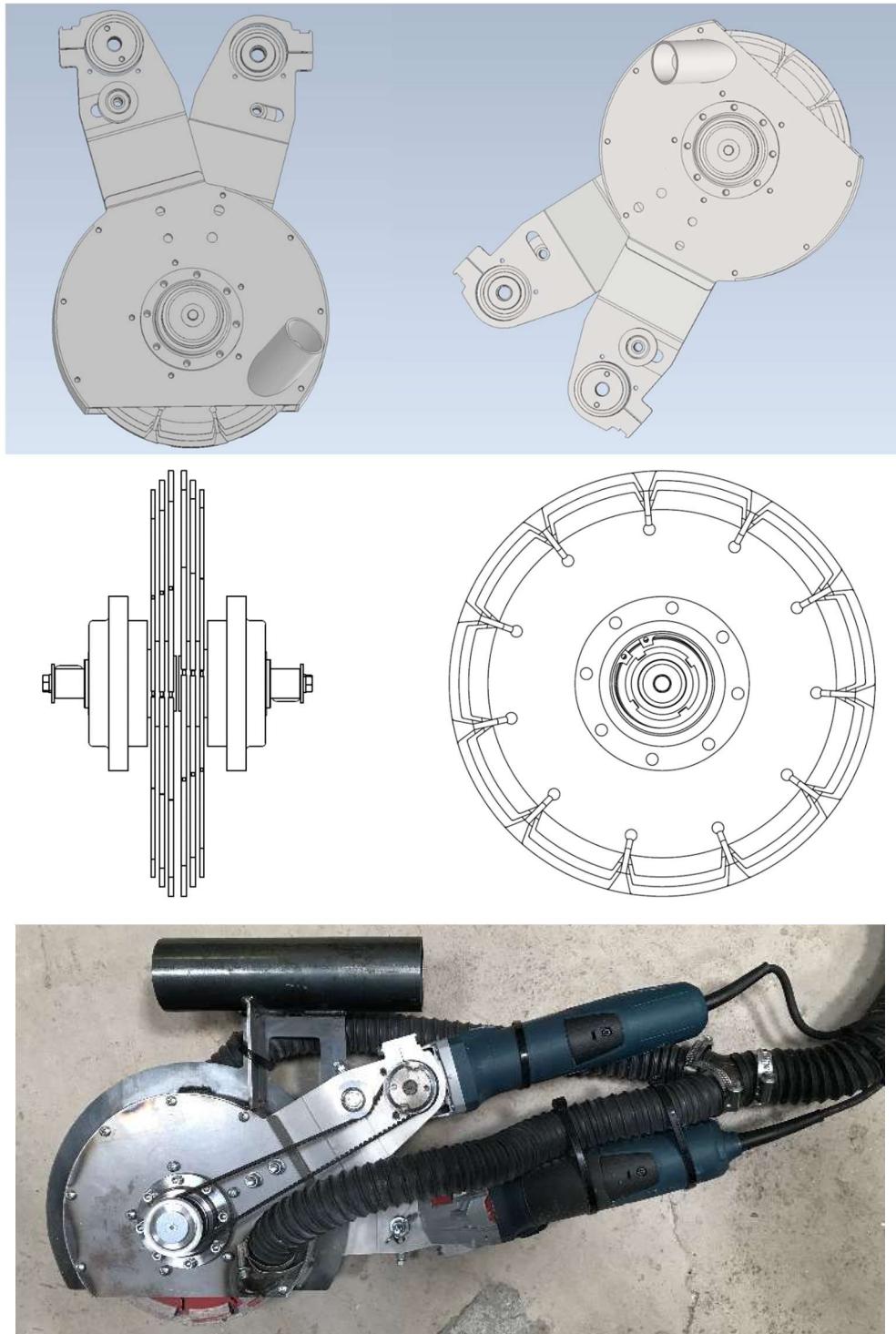


Abbildung 22: Zweiter Demonstrator: CAD-Modell, Diamantscheibenaufbau und Werkzeug

3.2.2 Gleichdrehender Stufenfräser mit zwei Antrieben

Zur Vergleichbarkeit von gegendrehendem und gleichdrehendem Betrieb sowie für die praktischen Untersuchungen wird der zweite Demonstrator gleichdrehend untersucht. Der Aufbau des Demonstrators ist identisch zur gegendrehenden Variante, mit dem Unterschied, dass beide Antriebe alle sechs Diamantscheiben in die gleiche Drehrichtung antreiben. Dies ermöglicht eine äquivalente Betrachtung der Mechanismen des gegendrehenden und gleichdrehenden Abtrags. Ermöglicht wird dies in der Praxis dadurch, dass ein Antrieb des zweiten Demonstrators auf die gegenüberliegende Seite des Antriebsriemens montiert wird. Durch die Drehung um 180° bewirkt der Antrieb eine invertierte Drehung der zugehörigen drei Diamantscheiben.

3.3 Dritter Demonstrator: Gegendrehender Stufenfräser mit Getriebe und einem Antrieb

Das Hauptmerkmal von Demonstrator 3 ist der gegenläufige Antrieb des Stufenfräzers mit symmetrischen Drehrichtungen. Der Demonstrator ist mit fünf Diamantfrässcheiben ausgestattet und wird lediglich durch einen Winkelschleifer angetrieben. Die mittlere Scheibe dreht sich in entgegengesetzter Richtung zu den zwei mal zwei außenliegenden Scheiben, deren Durchmesser nach außen hin abnimmt (s. Abb. 25). Durch das Getriebe werden die Diamantscheiben in unterschiedliche Drehrichtungen angetrieben, was hohe Relativgeschwindigkeiten zwischen der mittleren Scheibe und den angrenzenden Scheiben erzeugt. Somit fungiert die mittlere Scheibe als Zentrierung in der Innenkante und stabilisiert das Werkzeug als Führungsscheibe.

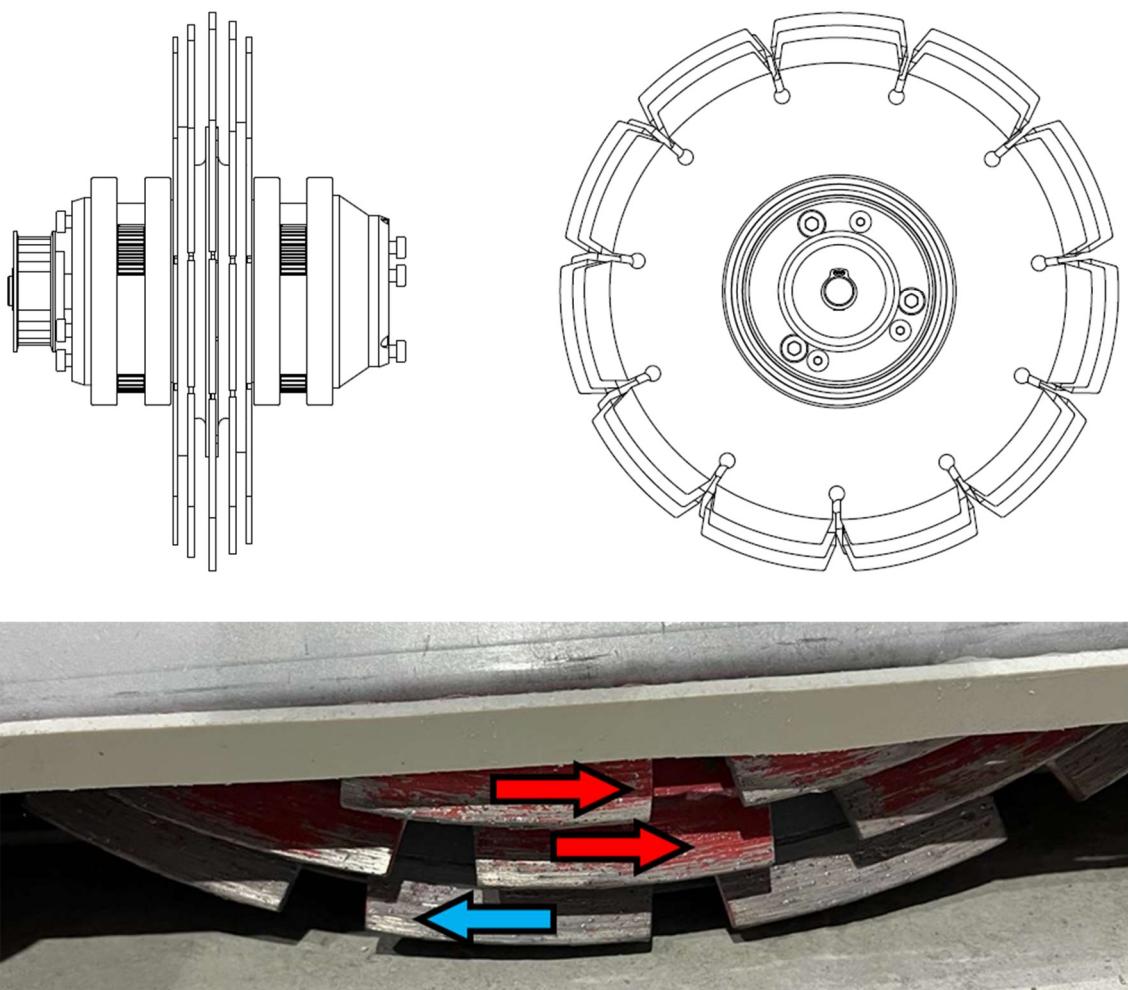


Abbildung 23: Demonstrator 3, Oben: CAD-Darstellung der Diamantscheiben mit Getriebe im Zentrum; Unten: Darstellung der Drehrichtung der Diamantscheiben

Das Getriebe wird einseitig über den Winkelschleifer angetrieben, wobei die angetriebene Welle das Sonnenrad darstellt. Das Sonnenrad ist über ein Fest- und ein Loslager im Getriebegehäuse aus Aluminium eingebettet und treibt axial drei Planetenradsätze an, von denen sich der erste und der letzte Planetenradsatz gleichen. Der mittlere Satz unterscheidet sich durch die Zahl der Planetenräder sowie die Übersetzung vom Sonnenrad auf das Planetenrad. Durch diese Getriebelösung ist die Drehrichtung der mittleren Scheibe variabel und besitzt eine geringere Umdrehungszahl. Dies wird durch den größeren Durchmesser der mittleren Scheibe ausgeglichen. Somit ähneln sich die Abtragsgeschwindigkeiten aller Scheiben, da das Werkzeug insgesamt einen Abtragswinkel von 90° besitzt (Kurt Heppler et al. 2021). Um einen platzsparenden und kompakten Aufbau des Getriebes zu erreichen, wurden die

Komponenten in Anlehnung an (Heppler und Dietrich 2022) schichtweise aufgebaut. Diese Bauweise ermöglicht es, das Getriebe platzsparend um den Mittelpunkt der Diamantscheiben am vorderen Ende des eingesetzten Trägergeräts zu positionieren (s. Abb. 26). Der dritte Demonstrator weist mit Getriebe und Schalteinrichtung ein Gewicht von 22,2 Kilogramm auf.

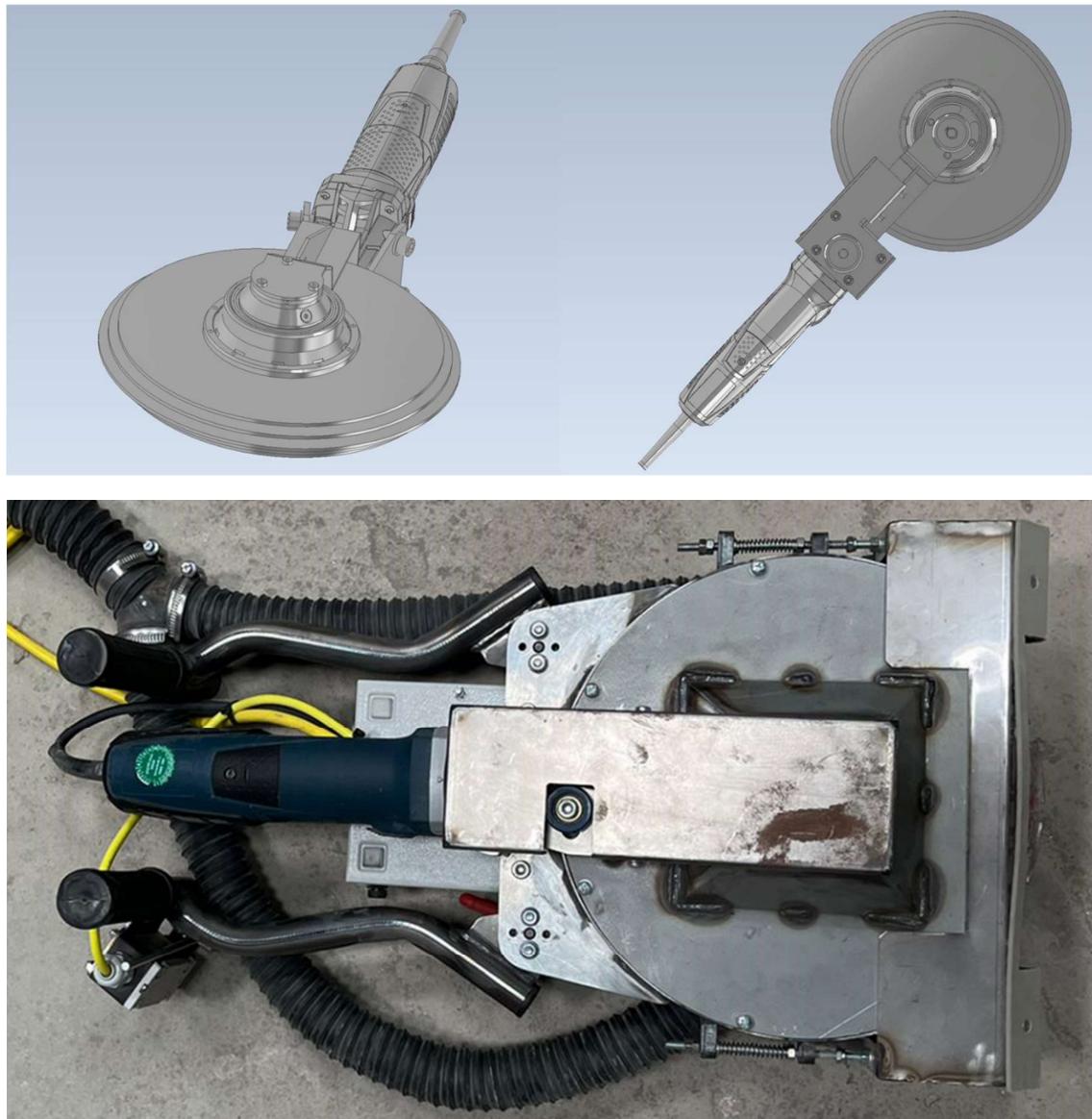


Abbildung 24: Dritter Demonstrator mit Getriebe im Zentrum der Diamantscheiben, CAD-Modell und Demonstratorwerkzeug

3.4 Arbeitsschutz

Die Ausgangsparameter der Versuche sind meist Teilespekte des Arbeitsschutzes. Zur Einordnung der Ergebnisse dient das Kapitel Arbeitsschutz. Hierbei werden in den verschiedenen Kategorien Lärmbelastung (Schall), Staubbelastrung (Staubmenge und Staubgröße) und Überbelastung des Muskel- und Skelettsystems (Kraftbedarf, Werkzeuggewicht und Vibration) Referenzen aus gegebenen Arbeitsschutzrichtlinien gezogen.

Lärmbelastung

„Als Lärm werden Geräusche bezeichnet, die stören, belästigen oder zu gesundheitlichen Schäden führen können. Alle Geräusche, die uns umgeben, können demnach als Lärm empfunden werden. Im Arbeitsschutz liegt der Fokus auf dem gehörschädigenden Lärm, der in der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV) durch Auslösewerte definiert wird“ (BG RCI 2020). Analog zu Grenzwerten zum Schutz vor Vibrationsexposition sind nach LärmVibrationsArbSchV Auslösewerte hinsichtlich Tages-Lärmexpositionspegel und Spitzenschalldruckpegel zu beachten (s. Tabelle 2). Die angepasste Einheit Dezibel dB(A) dient dazu, die Frequenzabhängigkeit der menschlichen Hörempfindlichkeit zu berücksichtigen. Schallpegelmesser, die dB(A) verwenden, sind mit einem A-Filter ausgestattet, der bestimmte Frequenzen abschwächt oder verstärkt. Niedrige und sehr hohe Frequenzen werden stärker gedämpft, da das menschliche Ohr bei diesen Frequenzen weniger empfindlich ist. Das erlaubt realistischere Einschätzungen der Auswirkungen von Lärm auf den Menschen.“

Tabelle 2: Auslösewerte nach LärmVibrationsArbSchV

	Tages- Lärmexpositionspegel	Spitzenschalldruckpegel
Untere Auslösewerte	80 dB(A)	135 dB(A)
Obere Auslösewerte	85 dB(A)	137 dB(A)

Der Lärmexpositionspegel definiert den Grenzwert für eine achtstündige Tagesbelastung und zielt darauf ab, langfristige Auswirkungen wie Lärmschwerhörigkeit zu vermeiden. Im Gegensatz dazu hat der Spitzenschalldruckpegel bei Erreichen unmittelbare Konsequenzen, die zu Verletzungen bzw. akuten, nichtreversiblen Hörschäden führen können. Der untere Auslösewert markiert den Grenzwert, bei dem die Beschäftigten über die Lärmbelastung informiert werden müssen. Es ist ein geeigneter Gehörschutz bereitzustellen und es muss eine arbeitsmedizinische Vorsorge und Beratung erfolgen. Der obere Auslösewert erfordert das Einrichten eines gekennzeichneten und, wenn möglich, abgegrenzten Lärmbereichs. In diesem Bereich muss versucht werden, den Schallpegel zu reduzieren. Der Gebrauch eines Gehörschutzes ist obligatorisch. Zudem sind regelmäßige arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen vorgeschrieben.

Bei der anschließenden Betrachtung der Versuchsergebnisse ist darauf zu achten, dass es sich bei der verwendeten Einheit Dezibel (dB(A)) um eine logarithmisch aufgebaute Größe handelt. Daher sind geringe Unterschiede im Vergleich zu z. B. den Reaktionskräften bei den Schallpegelmessungen deutlich stärker zu bewerten.

Staubbelastung

Bei mineralischen Stäuben, die einatembar sind, ist die Gesundheitsgefahr durch Staub ab einem Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) von 10 mg/m³ (E-Staubfraktion) gegeben (Gesundheitsgefahren durch Staub 2023). In den durchgeführten Versuchen ohne angebrachte Absaugung erreichten die anfallenden Staubemissionen pro Kubikmeter bis zu 4000 mg. In der Praxis finden Dekontaminationsarbeiten im kerntechnischen Bereich zwar unter Zuhilfenahme von Schutzausrüstung statt, jedoch sind Staubentwicklungen von kontaminiertem Material generell bedenklich und können zur Kontaminationsverschleppung (Weitertragen von Kontamination) beitragen. Durch die versuchstechnisch nachgewiesene hohe Staubmenge ist auch im konventionellen nichtkerntechnischen Bereich, bedingt durch die mineralische Staubbelastung sowie die Menge der Staubbelastung, der Einsatz von Atemschutzgeräten notwendig.

Für eine sinnvolle Betrachtung der Standarddurchmesser von Staubpartikeln wurde die Gesundheitsgefährdung abhängig vom Staubkorndurchmesser bewertet. Die international gängigste Eingruppierung erfolgt durch die United States Environmental Protection Agency (US EPA). Diese unterscheidet zwischen PM₁₀ und PM_{2,5}. Die Abkürzung PM steht hierbei für „particulate matter“ und bezeichnet ein Gemisch aus festen Partikeln und Flüssigkeitströpfchen, die in der Luft vorkommen (US EPA 2016). Die Gruppen sind wie folgt definiert:

- PM₁₀: Inhalierbare Partikel mit $D \leq 10 \mu\text{m}$ (US EPA 2016). Durch diese Größeneinteilung sollen die höheren Atemorgane und deren Anfälligkeit nachempfunden werden.
- PM_{2,5}: Feine, inhalierbare Partikel mit $D \leq 2,5 \mu\text{m}$ (US EPA 2016). Mit dieser Größeneinteilung wird der lungen- bzw. lungenbläschengängige Anteil des Staubes in der Bewertung dargestellt.

Der Begriff Staub wird wie folgt definiert:

- Nanostaub oder Ultrafeinstaub: Staub mit einem Korndurchmesser $< 0,1 \mu\text{m}$
- Feinstaub: Staub mit einem Korndurchmesser von $0,1 \mu\text{m}$ bis $2,5 \mu\text{m}$
- Grobstaub: Staub mit einem Korndurchmesser $> 2,5 \mu\text{m}$

In Abb. 17 ist die Einteilung von Staub nach Partikelgröße in Nanostaub, Feinstaub und Grobstaub sowie die Verweilzeit der jeweiligen Staubart in der Atmosphäre grafisch dargestellt. Die Korngröße ist somit nicht nur für die Lungengängigkeit entscheidend, sondern auch für die Dauer der Exposition.

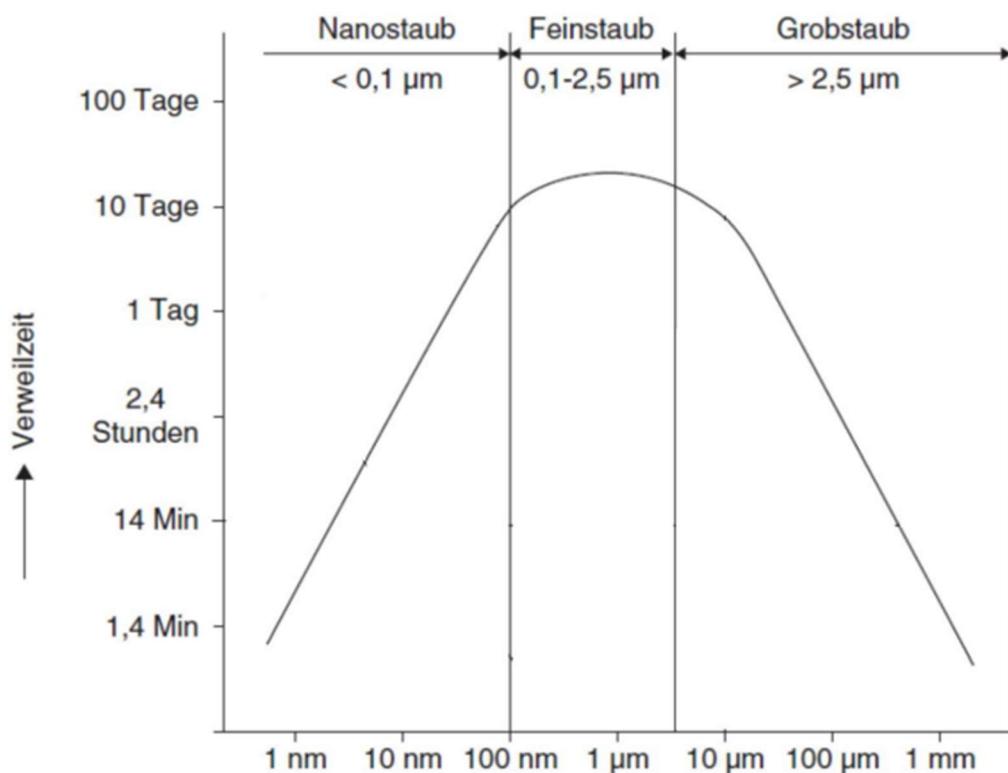


Abbildung 25: Verweilzeit von Aerosol in der Atmosphäre nach (Rüger 2016),
Modifiziert nach (Gabor 2019)

Überbelastung des Muskel- und Skelettsystems

Die Kräfte, die auf die Nutzer der Werkzeuge einwirken, stellen zusammen mit dem Werkzeuggewicht die Hauptbelastung für das handhabbare Lastgewicht dar. Um das Risiko einer Schädigung des Muskel- und Skelettsystems durch Überbelastung zu minimieren, wird eine möglichst niedrige Belastung durch die Reaktionskräfte angestrebt. Als Orientierung können die „Richtwerte von manuell zu handhabenden Lastgewichten“ (BG Bau 2020) der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft herangezogen werden (s. Tabelle 3). Die Richtwerte nennen maximale Häufigkeiten für das Ausüben der Tätigkeiten Heben, Halten oder Tragen und ermöglichen eine Bewertung, wann mit einer Überbelastung zu rechnen ist. Hierbei ist die Belastung von den Faktoren Häufigkeit der ausgeführten Bewegung, Last und Geschlecht des Nutzers abhängig (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) 2022).

Tabelle 3: Orientierungstabelle Manuelles Heben, Halten und Tragen (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV))

	Last	Häufigkeit	
		Frauen	Männer
Heben	5 bis 10 kg	100 x	150 x
	>10 bis 15 kg	50 x	100 x
	>15 bis 20 kg		50 x
Halten oder Tragen mit einer Dauer von ca. 5 s*	5 bis 10 kg	60 x	80 x
	>10 bis 15 kg	30 x	60 x
	>15 bis 20 kg		30 x

* Bei längeren Halte-/Tragedauern reduzieren sich die maximalen Häufigkeiten entsprechend. Bei einer Halte- oder Tragedauer von 10 s halbieren sich bspw. die Häufigkeiten.

Zusätzlich wird seitens der BG Bau aufbauend auf der Berufskrankheiten-Verordnung eine Unterscheidung in Tätigkeiten mit und ohne starke Rumpfneigung vorgenommen (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 01.09.2006), s. Tabelle 4. Neben der Belastung durch das Werkzeuggewicht werden Richtwerte für Zug- und Schubbewegungen aufgeführt, ab denen ein erhöhtes Risiko für bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule besteht. Diese Richtwerte dienen als Orientierung für die Bewertung der Messergebnisse in der Werkzeugvorschubrichtung.

Tabelle 4: Lastgewichte und Aktionskräfte mit einem erhöhten Risiko für die Verursachung bandscheibenbedingter Erkrankungen der Lendenwirbelsäule (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 01.09.2006)

Tätigkeit	Frauen	Männer
beidhändiges Heben	10 kg	20 kg
einhändiges Heben	5 kg	10 kg
beidhändiges Umsetzen	20 kg	30 kg
einhändiges Umsetzen	5 kg	10 kg
beidseitiges Tragen neben dem Körper, auf den Schultern oder dem Rücken	20 kg	30 kg
Tragen vor oder einseitig neben dem Körper	15 kg	25 kg
Ziehen	250 N	350 N
Schieben	300 N	450 N

Beim Heben von Lasten wird der Oberkörper je nach Höhe der Lastaufnahme oder Lastabgabe mehr oder weniger stark nach vorne geneigt. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Rumpfneigung und Wirbelsäulenbelastung werden deshalb in der Tabelle zwei Kategorien unterscheiden: "Heben" ist in der Regel mit deutlicher Rumpfneigung verbunden, während beim "Umsetzen" in diesem Zusammenhang keine starke Rumpfneigung auftritt.

Vibrationen am Arbeitsplatz stellen ein Gesundheitsrisiko dar. Aus diesem Grund sind in den Technischen Regeln Lärm und Vibration (TRLV) Grenzwerte für die Vibrationsexposition festgelegt. „Die Vibrationsbelastung am Arbeitsplatz wird als Tagesvibrationsexpositionswert A(8) auf 8 Stunden bezogen und durch den Vergleich mit den Auslöse- bzw. Expositionsgrenzwerten beurteilt.“ In Tabelle 5 sind Auslösewerte und Expositionsgrenzwerte für Hand-Arm-Vibrationen und Ganzkörper-Vibrationen dargestellt. Diese dienen dazu, die Gesundheit und Sicherheit von Arbeitskräften zu schützen, die regelmäßig Vibrationen ausgesetzt sind (Vibrationen 2023).

Tabelle 5: Auslösewerte und Expositionsgrenzwerte für Hand-Arm-Vibrationen und Ganzkörper-Vibrationen (Vibrationen 2023)

	Hand-Arm-Vibrationen (HAV)	Ganzkörper- Vibrationen(GKV)
Auslösewert: A(8)	2,5 m/s ²	0,5 m/s ²
Expositionsgrenzwert: A(8)	5 m/s ²	z-Richtung: 0,8 m/s ² x- und y-Richtung: 1,15 m/s ²

Der Anwendungsfall der Demonstratoren und bisherigen genutzten Werkzeuge gehört in die Kategorie der Hand-Arm-Vibrationen. Der Auslösewert (hier 2,5 m/s²) beschreibt den Schwellenwert, bei dessen Überschreitung Untersuchungen vorgenommen werden müssen, um die Ursache der Vibrationsbelastung mit dem Ziel zu ermitteln, deren Anteil zu verringern oder zu beseitigen. Der Expositionsgrenzwert (hier 5,0 m/s²) repräsentiert die maximal zulässige Vibrationsbelastung. Wird der Wert überschritten, sind Sofortmaßnahmen zu ergreifen, um die Vibrationsbelastung zu minimieren (Vibrationen 2023).

3.5 Wissenschaftliche Fragestellung

Die wissenschaftliche Fragestellung dieser Arbeit gliedert sich in drei aufeinander aufbauende Teilfragen. Diese beziehen sich auf die entwickelten Demonstratorwerkzeuge und deren Einflussbereiche im Oberflächenabtrag von Betoninnenkanten. Die Demonstratorwerkzeuge sind Stufenfräser mit verschiedenen Antriebs- und Drehmechanismen. Diese wurden in Kapitel 3 dargestellt. Die Untersuchungen erstrecken sich sowohl auf den direkten Anwendungsfall der kerntechnischen Dekontamination als auch auf den allgemeineren Fall des Betonabtrags.

- Forschungsfrage 1: Welchen Einfluss haben die verschiedenen entwickelten Stufenfräser auf die Bereiche Handhabbarkeit, Leistung und Emission?

Die grundlegende Problemstellung dieser Arbeit ist die Innenkanten- und Eckendekontamination. Diese Bereiche sind in der Bearbeitung komplexer und schwerer zugänglich im Vergleich zu großen, offenstehenden Flächen. Aus diesem Grund ist eine Überprüfung bestehender Werkzeuge auf ihre Eignung sowie die Entwicklung und Erprobung neuer Werkzeugansätze speziell für diesen Anwendungsfall notwendig. Um diese Thematik wissenschaftlich zu klären, werden die relevanten Werkzeugfaktoren benannt und messbar gemacht. Die erste, grundlegende Forschungsfrage untersucht daher die Auswirkungen der einzelnen Eingangsparameter (Werkzeugtyp, Vorschub, Zustellung, Betonfestigkeit, Lauf- und Drehrichtung) auf einen oder mehrere Ausgangsparameter (Reaktionskräfte, Vibrationen, Gewicht, Lärm, Staub, Leistung und Oberfläche). Die Ergebnisse werden im Anschluss betrachtet, um Aufschluss über die Auswirkungen zu erhalten. Hiermit soll die erste Forschungsfrage beantwortet werden.

Die Ergebnisse in den verschiedenen Ausgangsparametergruppen werden für die geplante Nutzung entsprechend ihrer Relevanz gewichtet und zu einem Gesamtergebnis zusammengefasst. Nach Abschluss aller Versuche wird, basierend auf der Auswertung der gesammelten Ergebnisse, eine Nutzwertanalyse für den Anwendungsfall in der kerntechnischen

Dekontamination durchgeführt. Hierbei werden die einzelnen Ergebnisse gewichtet und bewertet, um ein Gesamtergebnis zu formulieren.

- Forschungsfrage 2: Wie lässt sich der Nutzwert der Abtragsverfahren unter verschiedenen Aspekten bemessen?

Die übergreifende zweite Forschungsfrage umfasst den gesamten Untersuchungsbereich und integriert damit die Erkenntnisse aus der vorangegangenen Fragestellung. Die spezifischen Vor- und Nachteile der Mechanismen werden herausgearbeitet und formuliert. Ziel ist es, die allgemeine wissenschaftliche Erkenntnis und Übertragbarkeit der Ergebnisse in der Betonbearbeitung darzustellen. Die detaillierte Aufbereitung der einzelnen Ergebnisse in separaten Unterkapiteln liefert übertragbare Erkenntnisse für den gesamten Rückbaubereich und ermöglicht die gezielte Betrachtung der Auswirkungen einzelner Eingangsparameter auf die relevanten Ausgangsparameter.

4 Experimentelles Versuchsprogramm

Die entwickelten Werkzeuge werden in diesem Kapitel experimentell untersucht und bewertet, um ein besseres Verständnis des Dekontaminationsprozesses an Innenkanten zu erlangen. Ziel ist eine Erhöhung der Dekontaminationsleistung, Senkung der Emissionen sowie eine verbesserte Handhabung für den Nutzer. Die erzielten Erkenntnisse sollen für den kerntechnischen Rückbau als auch für den konventionellen Rückbau genutzt werden.

Die Daten der Versuche werden durch verschiedene Messsensoren erfasst, die in diesem Kapitel vorgestellt werden. In den Versuchen werden die für den Nutzer auftretenden Kräfte am Werkzeug gemessen. Die Kräfte werden in X-, Y- und Z-Richtung erfasst über eine Kraftmessdose, die am Werkzeug angebracht ist. Zudem wird die anfallende Staubmenge über ein am Versuchsstand angebrachtes Staubmessgerät mit Luftsauggerät erfasst. Darüber hinaus werden nach den Versuchen Staubproben des abgetragenen Materials genommen, um diese auf die Staubpartikelgröße zu untersuchen. Die für den Nutzer entstehenden Vibrationen werden über einen Vibrationsmesser direkt am Werkzeug erhoben und es findet während der Versuche eine Schallpegelmessung über ein Schallpegelmessgerät in einem fixierten Punkt des Versuchsstands statt. Im Nachgang an die Versuche werden die Oberflächenqualität und die Abtragsleistung des bearbeiteten Materials über einen Streifenlichtscanner an der Lineareinheit erfasst.

Tabelle 6: Ergebnisparameter/Ergebnisgruppen

Reaktionskräfte	Handhabbarkeit
Werkzeuggewicht	
Schallpegel	
Staubmenge	Emission
Staubpartikelgröße	
Vibration	
Oberflächenqualität	Leistung
Abtragsleistung	

Die Erhebung der Daten der Ergebnisparameter (s. Tabelle 6) und die anschließende Auswertung sollen Rückschlüsse über die Werkzeuge sowie die Eingangsparameter ermöglichen. Auf Basis einer detaillierten Aufschlüsselung der einzelnen Ergebnisgruppen können für individuelle Anwendungsfälle passende Werkzeuge gewählt und passende Eingangsparameter angenommen werden. Neben der Betrachtung der allgemeinen wissenschaftlichen Erkenntnisse in den Ergebnisgruppen findet die fallspezifische Betrachtung im Kontext der kerntechnischen Dekontamination und eine darauf aufbauende Nutzwertanalyse statt.

4.1 Versuchsstandaufbau

Der Versuchsstand soll vergleichbare Fahrten zum Oberflächenabtrag von Beton ermöglichen. Hierzu wurde der Versuchsstand in einem Stahlrahmen mit den Außenmaßen $2,45\text{ m} \times 1,20\text{ m} \times 1,25\text{ m}$ ($L \times B \times H$) konzipiert (s. Abb. 26). Der Versuchsstand wurde vorab per CAD-Software (Rentschler et al. 2023a)

konstruiert, der Stahlrahmen aus rechteckigen Profilen (80 mm × 120 mm) bildet gleichzeitig Einhausung und Montagehaltung für die anderen Bauteile

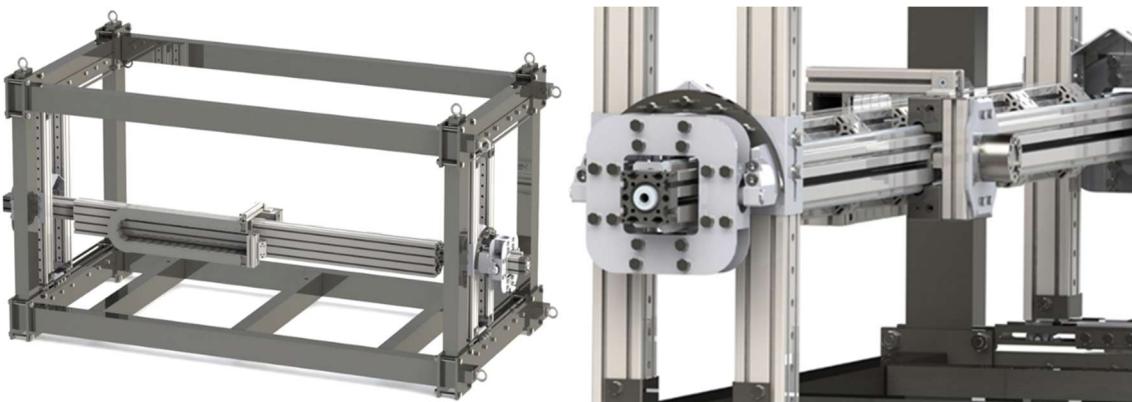


Abbildung 26: CAD-Zeichnung des Versuchsaufbaus (Rentschler et al. 2023a)

Der Stahlrahmen wird an den offenen Seiten durch Plexiglasplatten in Aluminiumprofilrahmen eingehaust. Die Front des Versuchsstands ist über zwei Flügeltüren zu öffnen, die Oberseite über einen einseitig angeschlossenen Deckel. Auf diese Weise können Betonversuchskörper durch die Front in den Versuchsstand eingebracht werden.

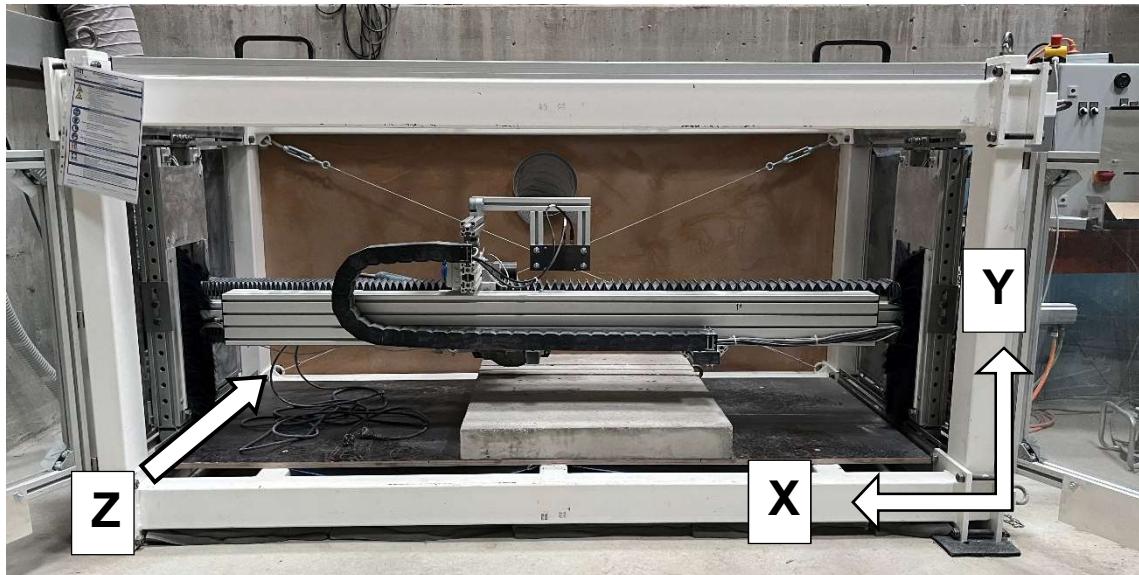


Abbildung 27: Frontalansicht des Versuchsstandes mit Koordinatenangabe

In Längsrichtung im Raum des Stahlrahmens befindet sich die Lineareinheit Typ euroLINE 170 (Abb. 28 rot) mit integriertem Linearmotor der Firma IEF-Werner GmbH mit 2879 mm Gesamtlänge, die einen Hub von 2553 mm ermöglicht. Hieraus ergibt sich mit den angebauten Schlitten- und Kabelbauteilen eine effektive Testlänge von ca. 1600 mm. Eine Bewegung in Y-Richtung (nach oben und unten) ist mittels Kettenwinden möglich, die an beiden Enden der Lineareinheit angebracht sind. Die Werkzeugaufnahme kann entlang der Lineareinheit in X-Richtung verfahren werden (frontal betrachtet nach links und rechts). Eine Verschiebung der Lineareinheit in Z-Richtung (vorne und hinten) ist durch Positionsänderung der Halteschienen an den Enden der Lineareinheit möglich (s. Abb. 28).

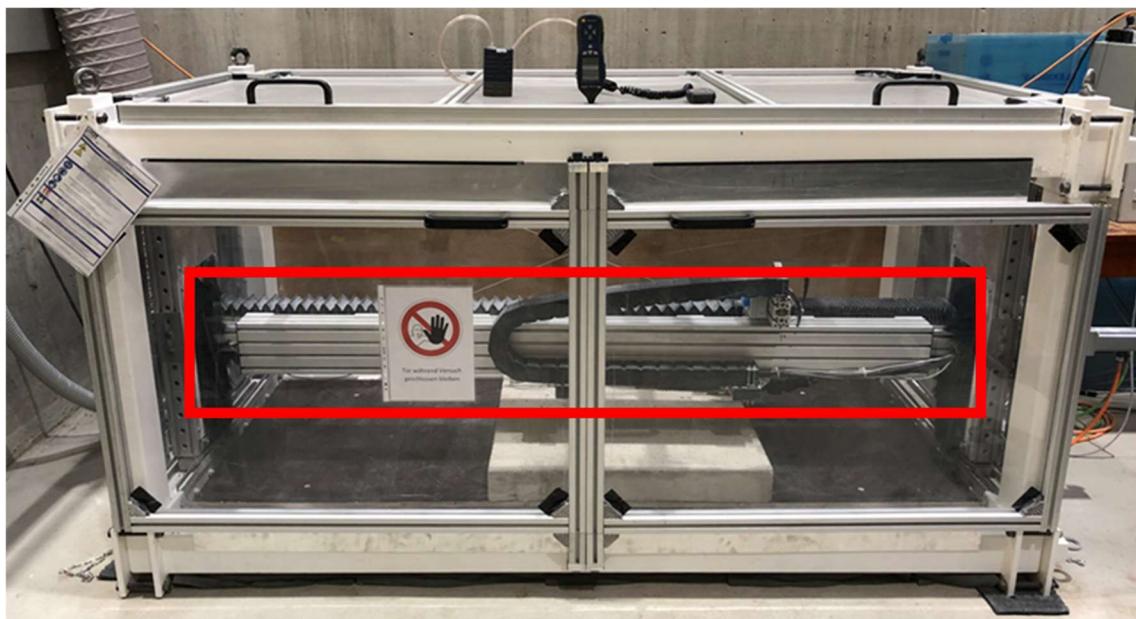


Abbildung 28: Frontalansicht des Versuchsstandes geschlossen, Linearchase rot umrandet

Die Lineareinheit wird somit per Kettenzug parallel zum Betonprobekörper ausgerichtet. Um ungewünschte Bewegungen der Lineareinheit zu verhindern, fixieren die äußeren vier Schienen die Lineareinheit mittels Schrauben im Stahlrahmen (s. Abb. 29–31).

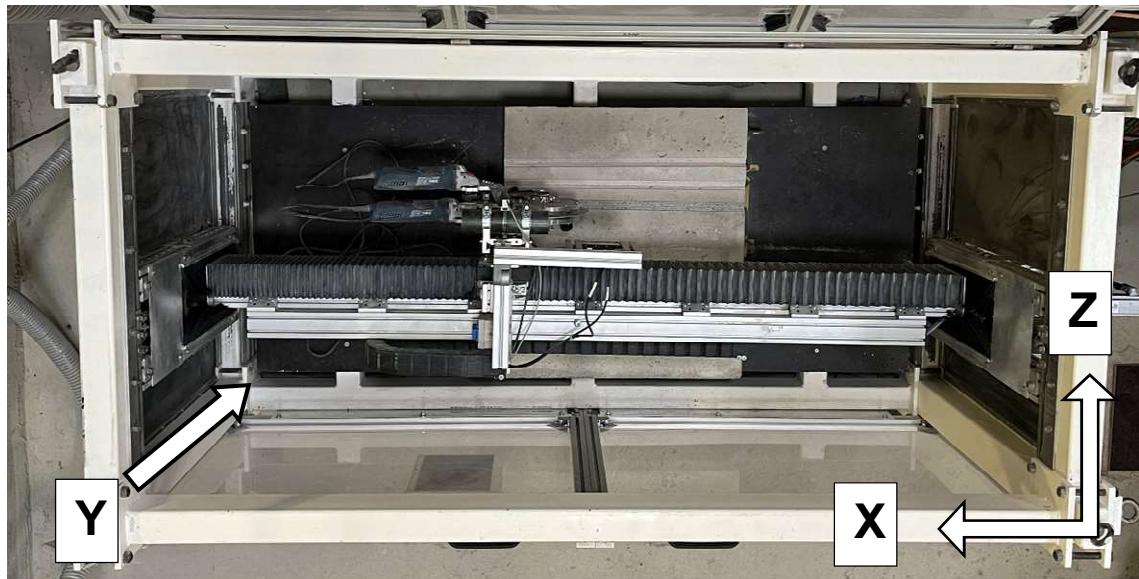


Abbildung 29: Draufsicht Versuchsstand



Abbildung 30: Seitenansicht, Kettenwinde und Stahlschienen zur Befestigung der Lineareinheit

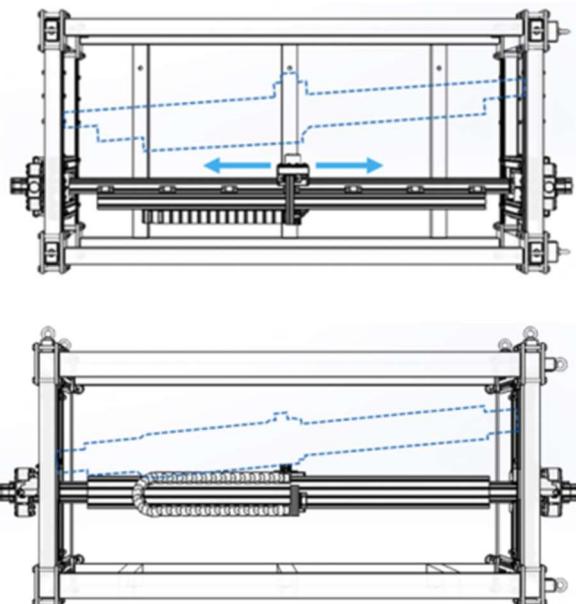


Abbildung 31: Unterschiedliche Ausrichtungsmöglichkeiten des Versuchsstands

Der Versuchsstand ist darüber hinaus an den seitlichen Anschlussseiten der Lineareinheit mit beweglichen Abdichtungen ausgestattet, die zur Begrenzung der Staubentwicklung dienen. An der hinteren Seite ist der Versuchsstand mit Anschlüssen für einen Industriesauger der Firma Contec Modell „CDM 3000 Longo“ sowie einem Luftreiniger der Firma DustControll Modell „DC AirCube“

1200“ ausgestattet. Diese dienen der Absaugung des entstandenen Betonstaubs.

Werkzeugaufnahme

Der nutzbare bewegliche Teil der Lineareinheit, der Schlitten, wird zur Verbindung der Lineareinheit mit den zu testenden Prototypwerkzeugen mit einer Werkzeugaufnahme ausgestattet. Aufgrund der Werkzeugaufnahme muss eine Kraftmessdose integriert werden. Dies geschieht über den mittleren Teil der Werkzeugaufnahme. Die mittlere Platte der Aufnahme wird links und rechts von Schienenplatten flankiert und kann über äußere Schrauben fixiert werden. Diese unabhängige Anordnung der einzelnen Platten ermöglicht eine präzise Ausrichtung des Werkzeugs parallel zum Versuchskörper. Zur Bestimmung der exakten Position des Werkzeugs in der Werkzeugaufnahme sind innerhalb der Schienen der äußeren Platten Maßketten eingearbeitet. Diese zeigen den Abstand der Platten zueinander an und erleichtern das Messen in der Schiene. Auf den äußeren Schienenplatten befindet sich jeweils eine Rohrschelle, in die entweder das Werkzeug oder bei Werkzeugen mit mehreren Antrieben die Behelfshalterung eingespannt werden kann (s. Abb. 32 und 33).

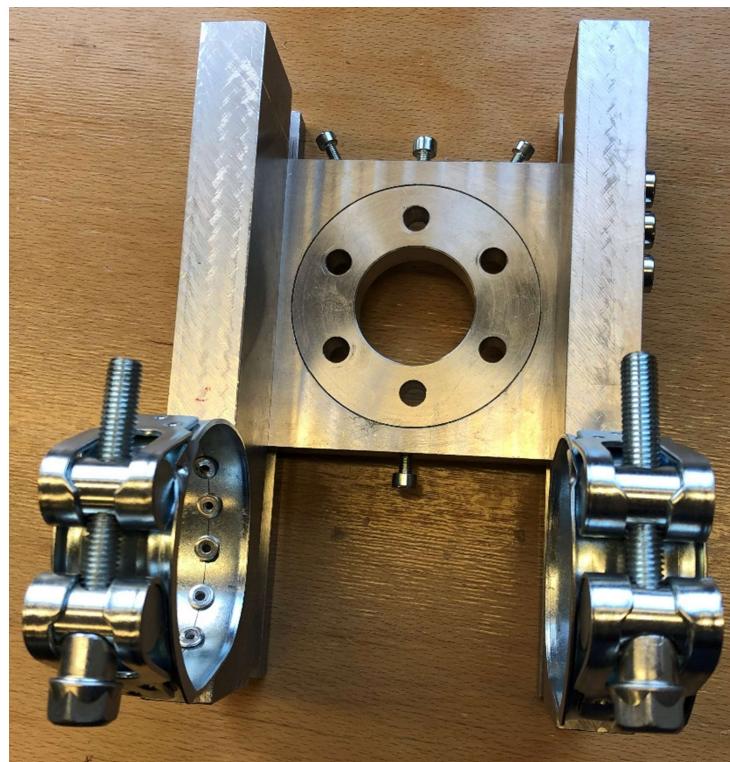


Abbildung 32: Werkzeugaufnahme Eigenfertigung



Abbildung 33: Werkzeugaufnahme im Versuchsstand Ekont

4.2 Probekörper

Die Probekörper der Versuchsreihen bestehen aus quaderförmigen Betonkörpern. Diese werden entweder einzeln zur Simulation einer Horizontalfläche genutzt oder rechtwinklig angeordnet, um eine Innenkante zu simulieren (s. Abb. 34 und 35). Die Quader zur Versuchsdurchführung wurden mit drei verschiedenen Außenmaßen betoniert:

- 80 cm × 90 cm × 10 cm
- 80 cm × 30 cm × 10 cm
- 160 cm × 40 cm × 20 cm

Hergestellt wurden die Quader mit zwei verschiedenen Betonfestigkeitsklassen:

- C25/30
- C30/37

Die Betonkörper wurden jeweils mit einer Bewehrungslage ausgestattet, um die Stabilität während der Versuche zu sichern und entstehende Zugkräfte aufzunehmen. Die Bewehrung stand dabei in keinem direkten Kontakt zu den untersuchten Werkzeugen.



Abbildung 34: Hergestellte Betonprobekörper der Betonfestigkeitsklasse C25/30 (Rentschler et al. 2023b)

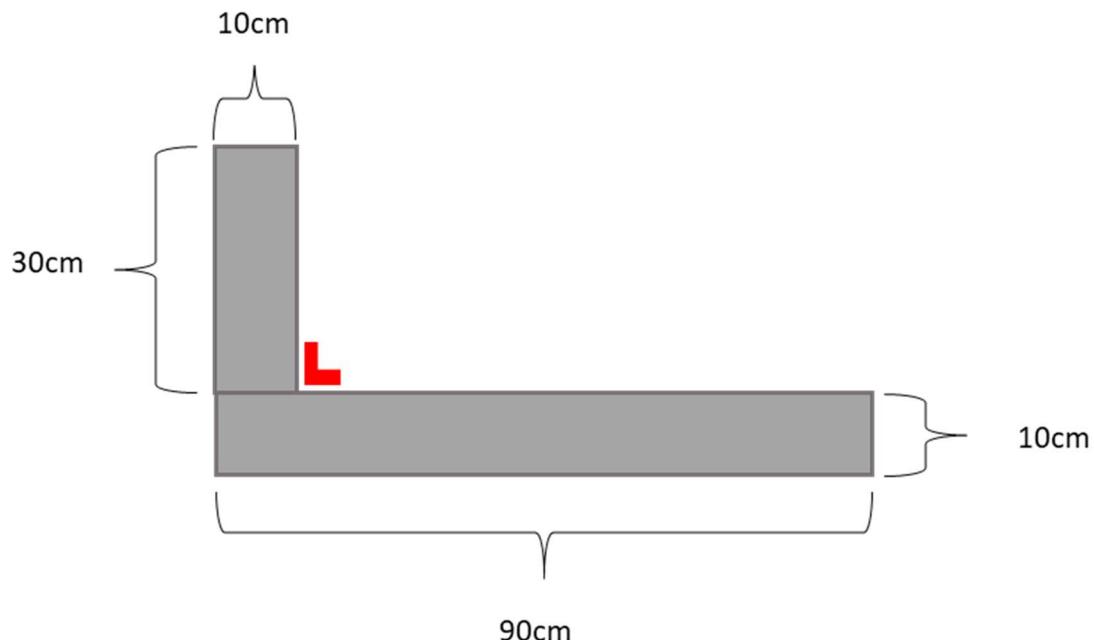


Abbildung 35: Bildung einer Innenkante aus zwei Betonkörpern, Innenkantenbereich rot markiert

Versuchsablauf

In den Versuchsstand wird ein Betonprobekörper seitlich eingeführt und fixiert. Anschließend wird die Lineareinheit über dem Betonkörper mittels der äußeren Schienen positioniert und ausgerichtet. In die Werkzeugaufnahme wird das zu untersuchende Werkzeug eingespannt, die Werkzeugaufnahmeposition wird über die Schienenplattenabstände notiert und das Werkzeug wird parallel zum Betonkörper ausgerichtet. Die Werkzeugeindringtiefe bzw. Zustellung wird über die Kettenwinden grob eingestellt und über die Werkzeugaufnahme feinjustiert und notiert. Nach dem Versuchsdurchlauf wird die reale Eindringtiefe mit der voreingestellten abgeglichen. Die Sensoren für die Kraft- und Vibrationsmessung am Werkzeug sind hierbei aktiv und zeichnen ab Beginn der Versuchsfahrt auf. Das Mikrofon des Schallpegelmeters befindet sich an der Einhausungsöffnung, der Schallpegelmeter selbst außerhalb. Gleiches gilt für die Staubmesssonde und das Staubmessgerät. Das Werkzeug wird eingeschaltet und die Einhausung des Versuchsstandes geschlossen (s. Abb. 36). Die Lineareinheit kann nun über den angeschlossenen Rechner gestartet werden, wobei Geschwindigkeit und Beschleunigung des Lineareinheit-Schlittens wählbar sind. Bei Start der

Lineareinheitfahrt bewegt sich das auf dem Schlitten angebrachte Werkzeug durch den Betonprobekörper und trägt dabei planmäßig den Beton im Wirkungsbereich ab. Nach der Versuchsfahrt werden alle aufgezeichneten Messdaten gespeichert und von dem erzeugten Staub wird manuell eine Probe entnommen.



Abbildung 36: Beispiel eines vorbereiteten Versuchsablaufs mit dem zweiten Demonstrator an einer erstellten Innenkante aus Betonkörpern

4.3 Verwendete Sensorik

Die verschiedenen Geräte der Sensorik dienen dazu, die Ergebnisse der experimentellen Versuche aufzuzeichnen und Daten zu erhalten, die im Anschluss ausgewertet werden. Die gemessenen Daten werden verwendet, um die wissenschaftliche Fragestellung zu den Ausgangsparametern zu beantworten und dienen als Grundlage für die Bewertung im Anwendungsfall.

Schallpegelmeter

Die Schallpegelmessungen finden mit dem Schallpegelmeter PCE-322 A der Firma PCE Instruments statt. Hierzu wird das Mikrofon des Schallpegelmeters durch eine Öffnung der Einhausung in den Versuchsstand eingeführt. Während

der Versuchsdurchführungen wird der Schallpegel kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet und bildet auf diese Weise die Schallemission ab.

Staubmonitor

Die Staubmessungen erfolgen mittels Echtzeit-Staubmonitor der Firma Casella CEL Modell „CEL-712“. Der Staubmesser arbeitet in Verbindung mit einer Probenahmepumpe Modell „Casella Tuff Personal Sampling Pumps“. Bei den Versuchen wird die Messsonde auf dem Versuchsstand platziert und die Öffnung in Kombination mit der angeschlossenen Pumpe an den Versuchsstand angelegt. Die Pumpleistung liegt bei allen durchgeföhrten Versuchen konstant bei 2 Litern pro Minute. Auf diese Weise kann die Staubentwicklung beim Abtragsprozess gemessen werden und die Staubemissionen werden quantitativ sichtbar.

Kraftmessdose

Die Messung der Kräfte erfolgt direkt am Werkzeug über einen 3-achsigen Kraftsensor der Firma ME-Meßsysteme Modell „K6D80 2kN/100Nm/CG“. Das ermöglicht die Kraftmessungen in drei zueinander senkrechten Achsen (ME-Meßsysteme 2021). Das Gerät wird so geeicht, dass im Ruhezustand alle Kräfte den Wert Null aufweisen.

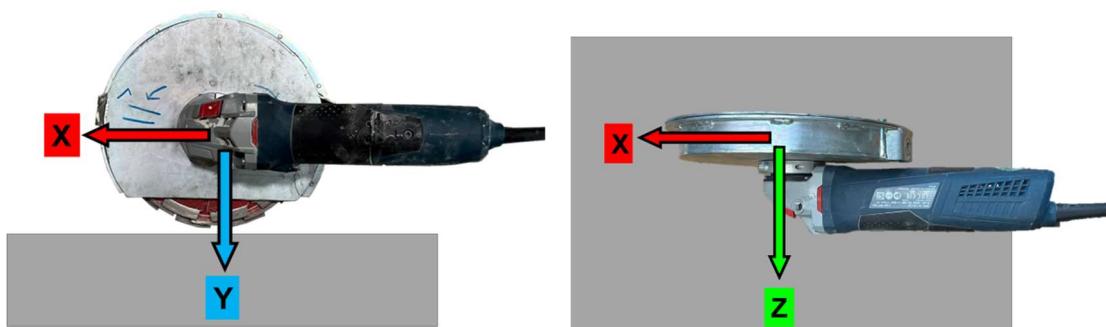


Abbildung 37: Darstellung der X-, Y- und Z-Richtung am Werkzeug

Vibrationsmesser

Für die Messung der Vibrationen wird ein „Hand Arm Tri-Axial Vibration Meter“ der Firma Pulsar vB eingesetzt. Das Gerät ist für die Vibrationsmessung bei handgeführten Werkzeugen besonders geeignet und entspricht der ISO 5349:2001. Es werden die auftretenden Vibrationen während der Versuchsdurchführung gemessen und als Vibrationsvektor ausgegeben. Somit können Rückschlüsse über die Vibrationsbelastung für den Nutzer gewonnen werden.

Oberflächen-Laserscanner

Um eine Oberflächenaufnahme des bearbeiteten Betons zu generieren, wird das Lasermessgerät scanCONTROL 3010 der Firma MicroEpsilon verwendet. Das Messgerät wirft mithilfe des Triangulationsprinzips Laserlinien auf ein Objekt und wertet dann die Reflexionen aus. Um den Laserscan auswerten zu können, werden verschiedene Programme benötigt. Zum einen handelt es sich um die Betriebssoftware des Lasers „ScanCONTROL Configuration Tools“ von MicroEpsilon. Dieses Programm wird dafür verwendet, Messparameter des Lasers wie Sättigungsgrad oder Messfrequenz einzustellen und die Messung anschließend zu starten und durchzuführen. Das Programm bietet die Möglichkeit, die Messwerte als Datei zur Datenauswertung auszugeben und beinhaltet zusätzlich einige Funktionen, um die Messergebnisse auszuwerten. Zum anderen wird das Programm „scanCONTROL 3D-View“ von MicroEpsilon verwendet. Mithilfe dieses Programms können die im „ScanCONTROL Configuration Tools“ erstellten Dateien ausgelesen und dreidimensional dargestellt werden. Auch ist es hiermit möglich, die Messpunkte im ASCII-Dateiformat auszugeben, um diese weiter zu bearbeiten (Metzger 2021).

Das Lasermessgerät erzeugt eine zweidimensionale Linie aus mehreren nebeneinanderliegenden Punkten und generiert daraus 2D-Linienprofile. Bei der Überfahrt des Lasers mit der Lineareinheit werden diese Linienprofile nebeneinandergelegt und aus der Vielzahl dieser Profile eine Oberflächenaufnahme des bearbeiteten Betons generiert. Diese Erzeugung ist abhängig von der Laserfrequenz (wiederholte Vorgänge pro Sekunde = Hertz) und der Überfahrtsgeschwindigkeit der Lineareinheit (Strecke pro Sekunde). Die

Messpunkte erzeugen auf diese Weise im Vergleich mit der unbearbeiteten Betonoberfläche eine sogenannte Negativform (s. Abb. 37). So ist die Aufnahme des bearbeiteten Betons als zerstörungsfreie Messung in kurzer Zeit möglich.

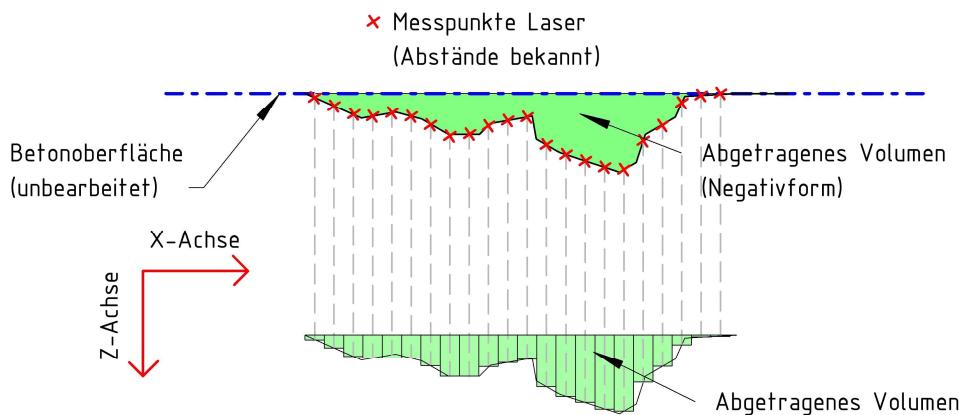


Abbildung 38: Schematische Darstellung des Oberflächenscans unter Anwendung der Rechteckregel (Metzger 2021)

Hierbei ist zu beachten, dass durch dieses Verfahren keine hundertprozentige Genauigkeit erreicht werden kann, da die bearbeitete Oberfläche komplex ist. Die einzelnen Laserpunkte besitzen einen bekannten Abstand zueinander, zwischen diesen wird jedoch eine Annäherungslösung erzeugt. Für den Zweck dieser Arbeit ist die erzielte Genauigkeit jedoch ausreichend exakt. Gleichermaßen gilt neben der Laserprofilrichtung auch für die Linearfahrtrichtung, da die Fahrtgeschwindigkeit sowie die Laserfrequenz bekannt sind.

4.4 Anordnung von Werkzeug und Probekörper

Die nachfolgenden Begriffsdefinitionen sind nicht als vollständige oder geometrische Definitionen zu verstehen, sondern dienen zur Veranschaulichung im Rahmen der vorliegenden Arbeit.

Vorschub und Zustellung

Der Begriff „Vorschub“, der ursprünglich aus der Zerspanetechnik stammt, wird in dieser Arbeit in einer ähnlichen, jedoch an den spezifischen Versuchsaufbau angepassten Weise verwendet. Durch den Vorschub wird das Werkzeug, hier

konkret der Demonstrator, am Werkstoff, hier konkret der abzutragende Beton, entlanggeführt. Ohne diese Bewegung findet kein neuer Abtrag statt.

„Vorschub“ wird vorliegend synonym für Vorschubgeschwindigkeit genutzt. Er definiert, welche Distanz in welcher Zeit mit dem Werkzeug zurückgelegt und damit bearbeitet wird. Am konkreten Beispiel des Versuchsaufbaus wird er in Millimeter pro Sekunde gemessen. Der Vorschub grenzt sich komplett von der Umdrehungszahl des Werkzeugkopfes ab und steht in keiner direkten Verbindung.

Die Zustellung lässt sich vereinfacht als geplante Tiefe des Schnitts bzw. des Bearbeitungsvorgangs beschreiben. Aufgrund der natürlichen Ungenauigkeit des Werkstoffs Beton wird im Zuge der Begriffsdefinition in dieser Arbeit auf die geplante Tiefe und nicht auf die tatsächliche Tiefe des Schnitts Bezug genommen. Die Zustellung ergibt zusammen mit dem Vorschub und dem Werkzeugquerschnitt das Gesamtabtragsvolumen im Werkstück. Im konkreten Beispiel des Versuchsaufbaus beschreibt die Zustellung das Eindringen des Werkzeugs in den Werkstoff in Millimetern.

Gegenläufigkeit und Gleichläufigkeit

Bei Fräsvorgessen werden die Vorschubrichtungen in Abhängigkeit von der Umlaufrichtung (rechtsdrehend oder linksdrehend) des Werkzeugs betrachtet. Dies ergibt das so genannte Gleichlauffräsen oder Gegenlauffräsen, welches in Abbildung 38 dargestellt wird (commonswiki 2023).

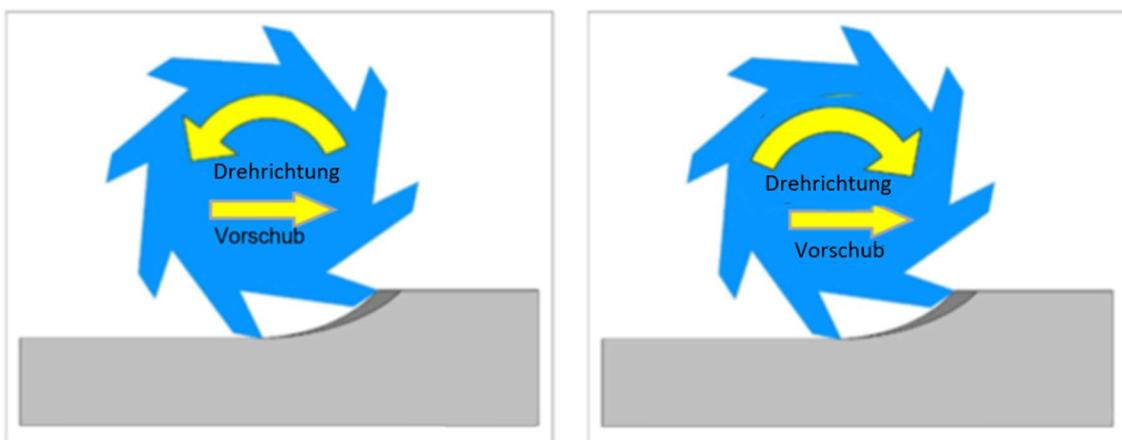


Abbildung 39: Links Gegenlauffräsen, Rechts: Gleichlauffräsen, eigene Darstellung nach (commonswiki 2023)

Es ist bekannt, dass das Gegenlauffräsen im Metallbereich zu höheren Vibrationen als das Gleichlauffräsen führt (Milberg 1992). Das System kann von gegenläufigem Fräsen zu gleichläufigem Fräsen umgewandelt werden, indem bei der gleichen Umlaufrichtung des Werkzeugs die Vorschubrichtung umgekehrt wird (s. Abb. 40).

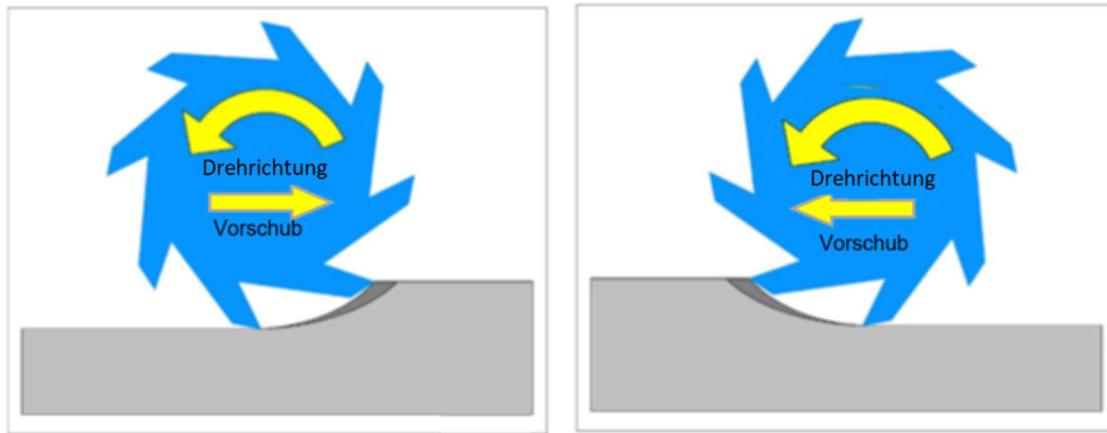


Abbildung 40: Links Gegenlauffräsen, Rechts: Gleichlauffräsen (commonswiki 2023) modifiziert nach eigener Darstellung

Gegendrehend (ggd.) und gleichdrehend (gld.)

Der Begriff „Drehrichtung“ beschreibt die Bewegung der einzelnen Scheiben zueinander. Die Einteilung in gleichdrehend oder gegendrehend erfolgt in dieser Arbeit auf Grundlage der „Laufrichtung“. In einem gleichdrehenden Werkzeugsystem drehen alle Frässcheiben in der gleichen Richtung. Drehen die Frässcheiben in verschiedene Drehrichtungen, wird es als „gegendrehend“ bezeichnet. Die Drehrichtung ist somit unabhängig von der Vorschubrichtung und kann lokal innerhalb des Systems betrachtet werden. In Abb. 41 wird die Drehrichtung für die Demonstratorwerkzeuge dargestellt.



Abbildung 41: Von links nach rechts: Demonstrator 1 gleichdrehend; Demonstrator 2 gegendrehend, Demonstrator 2 gleichdrehend, Demonstrator 3 gegendrehend (eigene Darstellung nach (Kurt Heppler et al. 2021))

4.5 Versuchsplanung

Um die entwickelten Werkzeugansätze zu untersuchen, wurden praktische Versuchsreihen in einem Versuchsstand durchgeführt (s. Kapitel 4.1). Die variablen Eingangsparameter in den Versuchen umfassten den Werkzeugtyp, die Laufrichtung der Diamantscheiben zueinander, die Vorschubgeschwindigkeit, die Zustelltiefe, die Drehrichtung des Werkzeugs beim Kontakt mit dem Material und die Materialfestigkeit, hier die Betonfestigkeitsklasse des Probekörpers. Die Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt neben der generellen Tauglichkeit des Werkzeugs unter den genannten Eingangsparametern die Reaktionskräfte für den Nutzer, das Werkzeuggewicht, die Staubmenge, die Staubpartikelgröße, die Vibrationen, den entstehenden Schallpegel und die Oberflächenqualität des bearbeiteten Materials.

Die Werkzeugtypen inklusive des am Markt verfügbaren Betonfräzers wurden experimentell untersucht. Der Betonfräser diente als Vergleichsobjekt zum Stand der Technik, um die Ergebnisse realitätsnah einordnen zu können. Je nach Werkzeugtyp wurden die Laufrichtungen gegenläufig und gleichläufig untersucht. Es wurden die Vorschubgeschwindigkeiten $v = 5 \text{ mm/s}$, $v = 10 \text{ mm/s}$, $v = 15 \text{ mm/s}$ und $v = 20 \text{ mm/s}$ in den Versuchsreihen gewählt. Eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit wurde als nicht praxistauglich und ökonomisch uninteressant eingestuft. Die Werkzeuge zeigten bereits bei der minimalen Vorschubgeschwindigkeit von $v = 5 \text{ mm/s}$ durchweg nutzbare Ergebnisse, weshalb Versuchsreihen mit einer noch niedrigeren Vorschubgeschwindigkeit nicht zielführend waren. Die Höchstgeschwindigkeit wurde mit $v = 20 \text{ mm/s}$ festgelegt, da bei Geschwindigkeiten $> 20 \text{ mm/s}$ kein konstantes Schnittprofil mehr gewährleistet werden konnte und die resultierende Oberflächenqualität den Anforderungen nicht genügen würde. Die Abstufung in Schritten von 5 mm/s gab einen hinreichend genauen Aufschluss über die Auswirkungen einer Vorschubgeschwindigkeitsänderung. Daher wurde eine feinere Abstufung der Versuche im Hinblick auf das Verhältnis von Arbeitsaufwand zu Ergebnisqualität als nicht sinnvoll erachtet.

Es wurden die Zustelltiefen $d = 5 \text{ mm}$ und $d = 10 \text{ mm}$ experimentell untersucht. Einzelne Versuche wurden ebenfalls mit $d = 15 \text{ mm}$ gefahren. Die Zustelltiefen wurden für den Anwendungsfall der Dekontamination von Betoninnenkanten

beim Rückbau kerntechnischer Anlagen ausgewählt. Die Kontamination liegt hier üblicherweise in einer Tiefe von wenigen Millimetern bis zu einem Zentimeter vor, was einen Abtrag > 10 mm in der Regel nicht erforderlich macht. Neben Versuchen mit variierenden numerischen Eingangsparametern wurden ebenfalls Versuche mit den Drehrichtungen gleichdrehend und gegendrehend durchgeführt, um die Auswirkungen dieser Variablen zu erfassen. Insgesamt wurden 73 Versuchsläufe durchgeführt mit einer jeweiligen Länge von 80cm Beton. Die Versuche wurden mehrfach durchgeführt. Aufgrund der Anzahl der Versuche sowie der Streckenlänge eines Versuchs konnte die Standardabweichung als gering eingestuft werden (Anlage V.) trotz der Heterogenität des Werkstoffs Beton. Als Materialeingangsparameter wurde der Einfluss der Betonfestigkeitsklasse des Probekörpers untersucht. Ein Großteil der Versuche wurde in Probekörpern der Klasse C 25/30 durchgeführt, für Vergleichsversuche wurden Probekörper der Klasse C 30/37 verwendet. Neben der Festigkeitsklasse ist das Alter der Probekörper relevant für die Versuche, da sich die Zementfestigkeit in einem mehrjährigen Prozess erhöht. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung dieser Untersuchungen fanden die vergleichenden Versuche ausschließlich zwischen den zwei genannten Betonfestigkeitsklassen statt.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die untersuchten Eingangsparameter.

Tabelle 7: Versuchsplanung mit den zu untersuchenden Eingangsparametern

Werkzeugtyp	Laufrichtung	Vorschubgeschwindigkeit
1	gleichläufig	5 mm/s
2	gegenläufig	10 mm/s
3		15 mm/s
Betonfräser		20 mm/s
Zustellungstiefe	Drehrichtung	Betonfestigkeit
5 mm	gleichdrehend	C25/30
10 mm	gegendrehend	C30/37
(15 mm)		

5 Ergebnisse der Versuche

5.1 Darstellung der Einzelergebnisse

5.1.1 Kraftmessung

Bei der Verwendung eines handgeführten Werkzeugs zum Betonabtrag entstehen Kräfte, die auf den Nutzer wirken. Um das Werkzeug in der gewünschten Position zu halten, muss die physische Kraft des Nutzers den auftretenden Reaktionskräften in X-, Y- und Z-Richtung entgegenwirken. Daher werden die auftretenden Kräfte am Werkzeug gemessen und hinsichtlich ihrer Handhabbarkeit betrachtet.

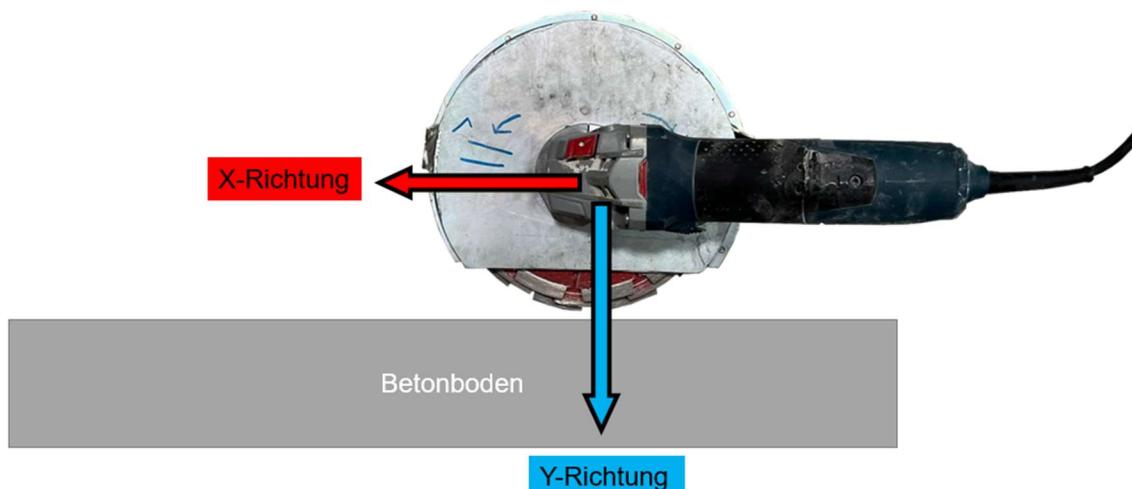


Abbildung 42: Demonstrator 1, X-Richtung in Vorschubrichtung, Y-Richtung in Schwerkraftrichtung

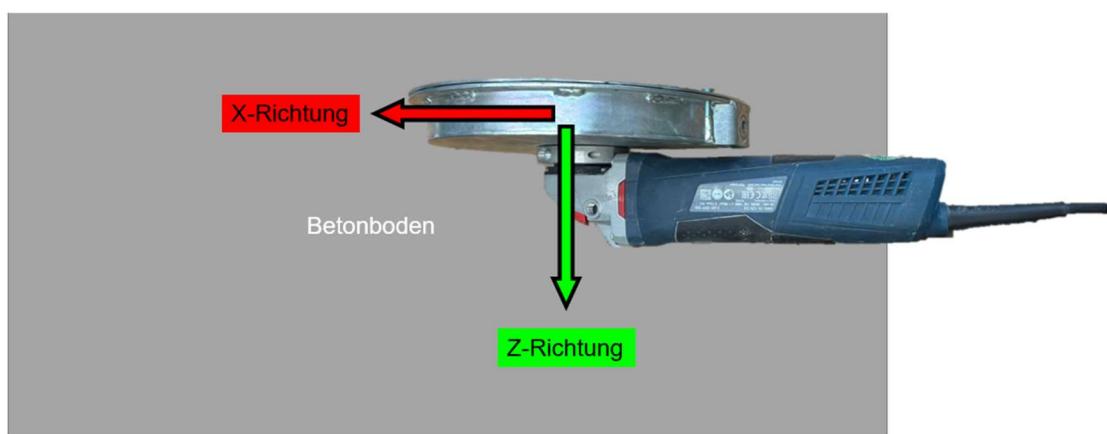


Abbildung 43: Demonstrator 1, X-Richtung in Vorschubrichtung, Z-Richtung orthogonal dazu

In Abb. 41 und 42 wird die Richtung der Kräfte in X-, Y- und Z-Richtung beim Einsatz der Werkzeuge am Boden dargestellt. Kräfte in Y-Richtung wirken in Richtung der Schwerkraft, die X-Richtung entspricht der Vorschubrichtung und die Z-Richtung der Drehachse der Diamantscheiben.

Die Diagramme in den Abbildungen 44 bis 51 zeigen demnach für einen Versuch mit einem Werkzeug jeweils die Kraft oder Kräfte, die auf den Nutzer wirken. Besonders auffällig sind in der Regel Y-Kräfte (Vollstrich), die entgegen der Schwerkraft wirken. Der Nutzer muss beispielsweise bei einer Bodeninnenkante das Werkzeug nach unten drücken. Die auftretenden Kräfte in X- (Strichlinie) und Z-Richtung (Strichpunktlinie) bewegen sich im Bereich um 0 N ($+/-5$ N, Darstellung im Anhang). Bei der Mehrzahl der Diagramme bilden die Y-Kräfte den größten Anteil, daher wird dieser Graph als Vollstrich betrachtet. In der Abbildung 44 wird der Y-Kraftbedarf des Nutzers von Demonstrator 1 mit dem der konventionellen Betonfräse verglichen.

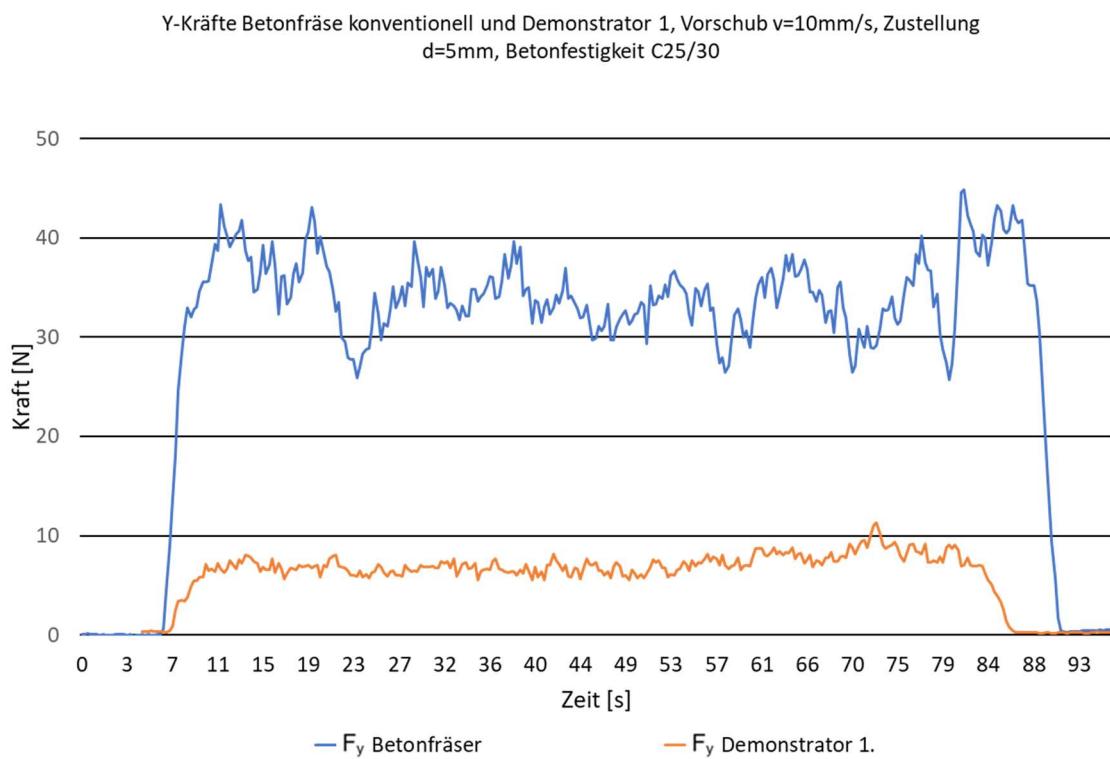


Abbildung 44: Y-Kräfte Betonfräse konventionell und Demonstrator 1, Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

Beim Vergleich der bei einer Abtragstiefe von 5 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s aufzubringenden Kräfte wird ersichtlich,

dass diese bei Demonstrator 1 ungefähr ein Viertel der bei dem herkömmlichen Betonfräser erforderlichen Kräfte betragen. Die Kräfte in X- und Z-Richtung bewegen sich im Bereich von ± 5 N, die ausschlaggebende Richtung ist die Y-Richtung. Der Betonfräser generiert während des Abtrags eine durchschnittliche Kraft von 33,69 N die auf den Nutzer wirken im Vergleich zu 7,01 N bei Demonstrator 1. Die Berechnung der durchschnittlichen Kraft erfolgte aus der Summe aller Versuchswerte > 0 dividiert durch die Anzahl dieser Versuchswerte.

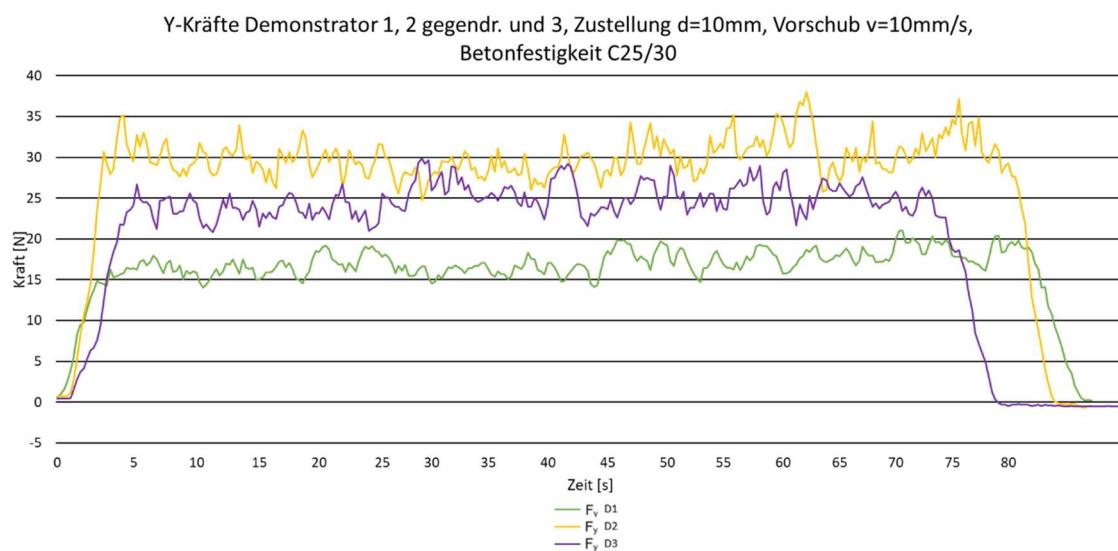


Abbildung 45: Vergleich der Reaktionskräfte Demonstrator 1, 2 und 3, Zustellung $d = 10$ mm, Vorschub $v = 10$ mm/s, Betonfestigkeit C25/30

Tabelle 8: Durchschnittliche Reaktionskräfte Demonstrator 1, 2 ggd. und 3, Zustellung $d = 10$ mm, Vorschub $v = 10$ mm/s, Betonfestigkeit C25/30

	F_y [N]	F_x [N]	F_z [N]
Demonstrator 1	16,38	-2,05	-3,14
Demonstrator 2, ggd.	28,42	8,05	1,83
Demonstrator 3	22,97	-5,86	-1,68

Der Vergleich der Demonstratoren 1 bis 3 (s. Abb. 46) zeigt, dass Demonstrator 1 mit durchschnittlich 16,38 N die niedrigsten Y-Werte aufweist. Die X-Werte von Demonstrator 1 liegen durchschnittlich bei $-2,05$ N, was bei einer vereinfachten

Umrechnung von $1 \text{ kN} \approx 100 \text{ kg}$ einer Belastung von $\approx 200 \text{ g}$ entspricht. Im Vergleich der Reaktionskräfte der Demonstratoren 1 bis 3 weist Demonstrator 2 mit durchschnittlich 28,42 N die höchsten Y-Werte auf (s. Tabelle 8). Die Werte in X-Richtung erreichen +8,05 N bei Demonstrator 2 im Vergleich zu -2,05 N und -5,86 N bei Demonstrator 1 und 3. Diese Verteilung der gemessenen Kräfte in X- und Y-Richtung ist auf das gegendrehende System bei Demonstrator 2 zurückzuführen. Demonstrator 3 bewegt sich im Mittelfeld mit durchschnittlichen Y-Werten von 22,97 N und X-Durchschnittswerten von -5,86 N. Ziel ist eine möglichst niedrige Belastung, daher repräsentieren niedrige Kräfte ein vorteilhafteres Werkzeug für den Benutzer.

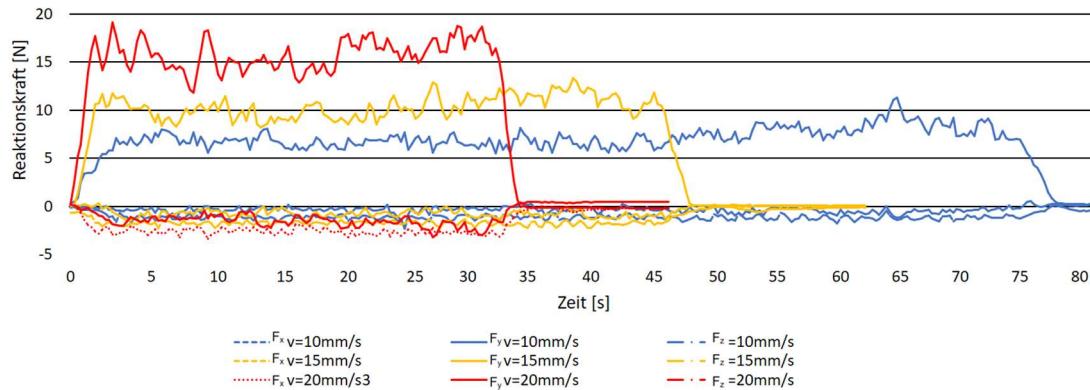


Abbildung 46: Reaktionskräfte 1. Demonstrator, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten, Betonfestigkeit C25/30

Der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Reaktionskräfte wird im Diagramm in Abb. 45 ersichtlich. Hierbei wurde der erste Demonstrator bei einer Zustellung von 5 mm mit drei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten durch Beton C25/30 bewegt. Die Ergebnisse aus Abb. 45 zeigen, dass in diesem Fall eine höhere Vorschubgeschwindigkeit auch höhere Reaktionskräfte hervorruft. Die durchschnittliche Reaktionskraft bei einer Zustellung von 5 mm lag bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s bei 7,01 N, bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 15 mm/s bei 10,00 N und bei 20 mm/s Vorschub bei 15,20 N. Eine höhere Vorschubgeschwindigkeit hat höhere Reaktionskräfte

zur Folge, da das Werkzeug mehr Material bei gleicher Zeit abtragen muss. Die Kraft, die benötigt wird, um das Werkzeug gegen den Widerstand des Materials zu führen, steigt mit der Zunahme der abzutragenden Menge. Gleichzeitig ermöglicht eine höhere Vorschubgeschwindigkeit eine kürzere Bearbeitungsdauer.

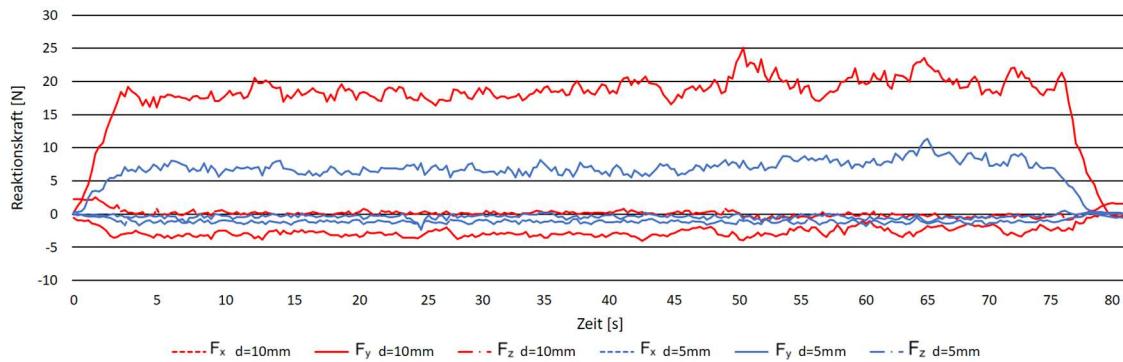


Abbildung 47: Reaktionskräfte 1. Demonstrator, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$ und 10 mm , Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30

Ebenso steigen bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit und zunehmender Zustellung die Reaktionskräfte wie erwartet von durchschnittlich 7,01 N auf 18,17 N. Das Diagramm in Abb. 46 verdeutlicht den bei einer Zustellung von 10 mm konstant höheren Kraftbedarf in Y-Richtung gegenüber einer Zustellung von 5 mm. Hierbei steigen die erforderlichen Reaktionskräfte auf mehr als das Doppelte mit einzelnen Spitzen bis zu 25 N. Die Ursache liegt analog zur Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit an einer erhöhten Abtragsmenge bei gleicher Zeiteinheit. Aus der höheren Abtragsmenge resultiert ein höherer Widerstand. Eine mathematische Auswertung des Kraftbedarfs bei verschiedenen Zustellungen erfolgt in Kapitel 5.2.

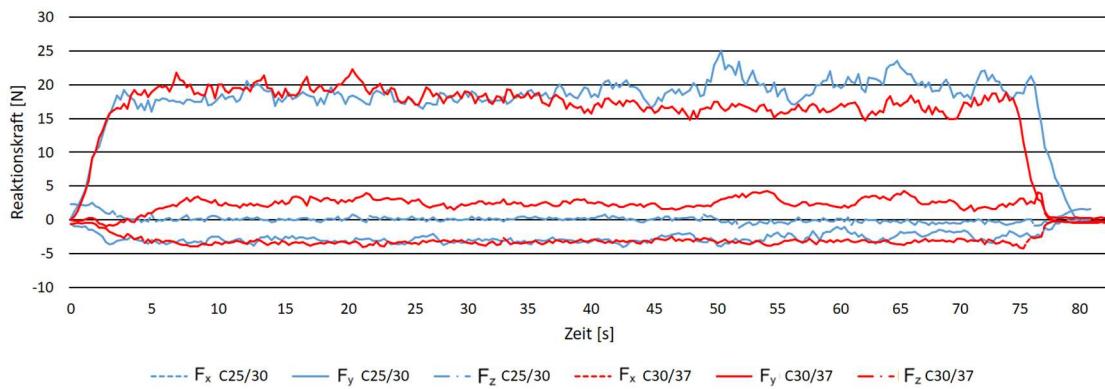


Abbildung 48: Vergleich der Reaktionskräfte, Demonstrator 1, Zustellung d = 10 mm, Vorschub v = 10 mm/s, Betondruckfestigkeit C25/30 und 30/37

In der Auswertung der Betondruckfestigkeiten C25/30 und C30/37 zeigte sich kein signifikanter Unterschied bei den Y-Reaktionskräften von Demonstrator 1. Die Messungen erfolgten bei einer Zustellung d = 10 mm und einem Vorschub v = 10 mm/s (s. Abb. 48 und Tabelle 9).

Tabelle 9: Durchschnittliche Reaktionskräfte, Demonstrator 1, Zustellung d = 10 mm, Vorschub v = 10 mm/s, Betondruckfestigkeit C25/30 und 30/37

	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
C25/30	0,13	17,74	-2,64
C30/37	-2,96	16,00	2,18

In den Versuchen konnte der Einfluss der Laufrichtung (s. Kapitel 4.4) auf die auftretenden Reaktionskräfte gezeigt werden. Bei der gleichläufigen Bearbeitung treten vereinfacht betrachtet nur Reaktionskräfte in Y-Richtung auf, welche mit Absolutwerten von durchschnittlich > 25 N die dominierende Kraftkomponente sind. Die Reaktionskräfte in X-Richtung sowie Z-Richtung liegen gerundet bei 0 N. Im Gegensatz dazu zeigt die gegenläufige Bearbeitung eine andere Verteilung der Kräfte. Die Y-Reaktionskräfte sind zwar mit 21,59 N immer noch am höchsten, aber im Vergleich zur gleichläufigen Bearbeitung (25,52 N) geringer. Beim gegenläufigen Prinzip fallen Reaktionskräfte in X-Richtung auf, welche bei fast 10 N liegen. Das zeigt, dass die hohen Y-Reaktionskräfte des GleichlauffräSENS sich beim Gegenlauffräsen auf die Y- und X-Achse verteilen (s. Abb. 49 und Tabelle 10).

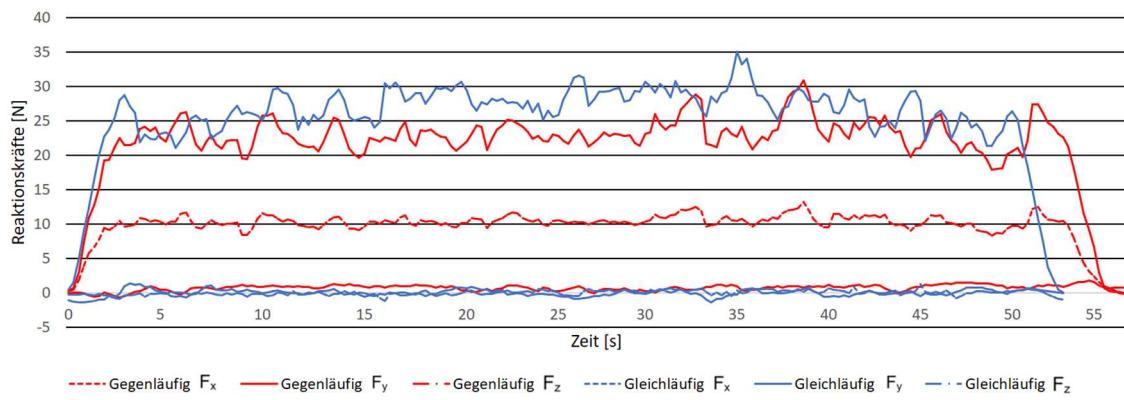


Abbildung 49: Vergleich der Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Laufrichtung, Demonstrator 2, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Vorschub $v = 15 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30

Wie vorangegangen beschrieben, wirken beim Abtrag im Gleichlauf hauptsächlich Kräfte in Y-Richtung auf den Nutzer. Die X- und Z-Kräfte liegen hier bei ca. 0 N. Beim Abtrag im Gegenlauf verteilen sich die auf den Nutzer wirkenden Kräfte in X- und Y-Richtung. Dies ist dadurch bedingt, dass die Diamantscheiben sich beim Gleichlauf in Richtung der Schwerkraft in den Beton eindrehen. Somit muss der Nutzer nur gegen diese Richtung wirken. Beim Gegenlauf hingegen drehen die Diamantscheiben aus dem Beton heraus, was eine Kraft durch den Nutzer in Vorschubrichtung notwendig macht.

Tabelle 10: Durchschnittliche Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Laufrichtung, Demonstrator 2, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Vorschub $v = 15 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30

	$F_x \text{ [N]}$	$F_y \text{ [N]}$	$F_z \text{ [N]}$
Gegenlauf	9,74	21,59	0,71
Gleichlauf	-0,04	25,52	0,02

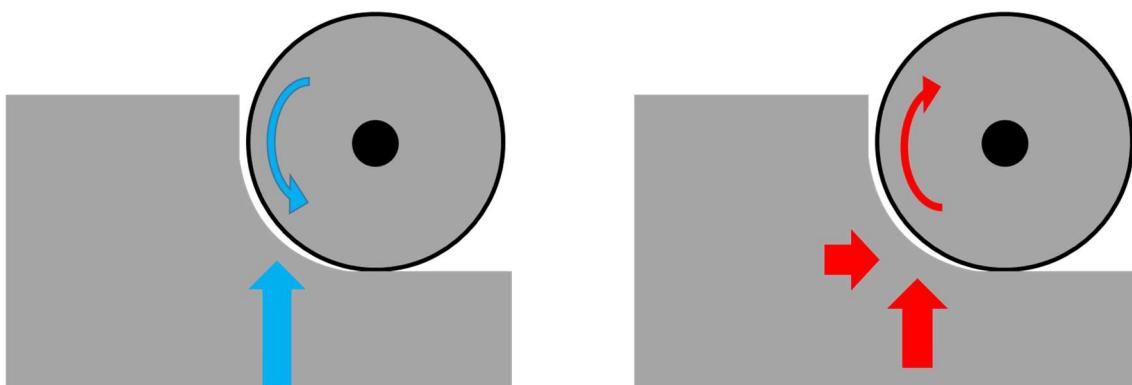


Abbildung 50: Links: Gleichlauf mit vermehrt Kraft in Y-Richtung, Rechts: Gegenlauf mit Kraftverteilung in X- und Y-Richtung

Der Einfluss der Drehrichtung auf die X-Reaktionskräfte zeigt am Beispiel von Demonstrator 2 ähnliche Beziehungen wie bei der Betrachtung der Laufrichtung. Dies ist dadurch bedingt, dass bei gegendrehendem Betrieb eine Werkzeughälfte gegenläufig zu betrachten ist. Das führt zu erwartbaren Kräften in X-Richtung. Die Y-Kräfte bei gleichdrehendem Betrieb verhalten sich ebenfalls ähnlich wie bei der Betrachtung der Laufrichtung. Sie sind höher und die X-Reaktionskräfte nähern sich dem Wert Null an (s. Tabelle 11).

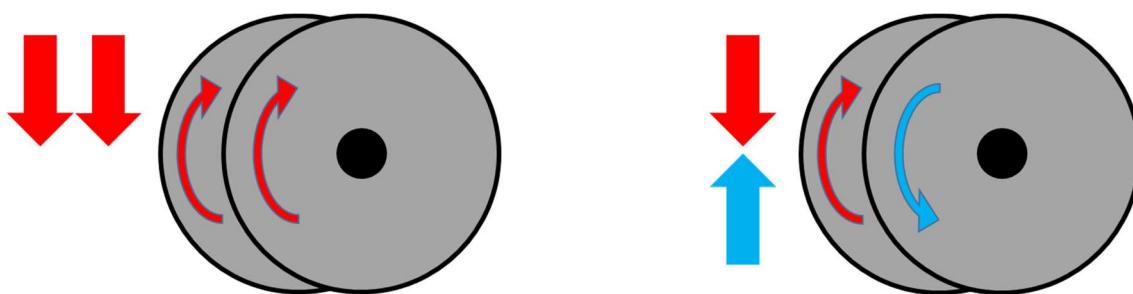


Abbildung 51: Skizze zur Darstellung der Kräfte: Links Gegendrehende Diamantscheiben, rechts gleichdrehende Diamantscheiben

Bei gegendrehendem Betrieb gleichen sich die Kräfte zu einem gewissen Maß aus. Dadurch wirken sich niedrigere Y-Kräfte auf den Nutzer aus, was in den Graphen dargestellt werden kann.

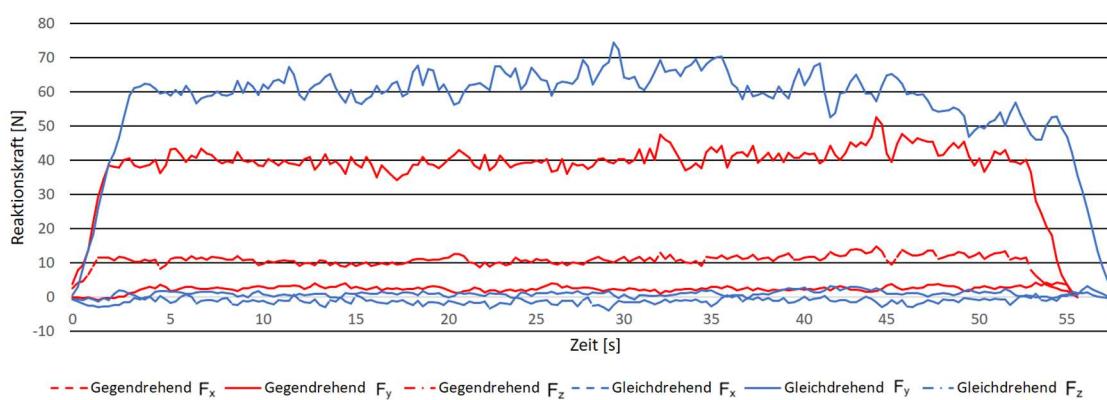


Abbildung 52: Vergleich der Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Drehrichtung, Demonstrator 2 ggd. und gld., Zustellung $d = 10$ mm, Vorschub $v = 15$ mm/s, Betonfestigkeit C25/30

Tabelle 11: Durchschnittliche Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Drehrichtung, Demonstrator 2 ggd. und gld., Zustellung $d = 10$ mm, Vorschub $v = 15$ mm/s, Betonfestigkeit C25/30

	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
Gegendrehend	10,58	38,43	2,44
Gleichdrehend	-1,10	56,74	1,02

Die Reaktionskräfte in Z-Richtung bewegen sich sowohl bei der gegendrehenden als auch der gleichdrehenden Versuchsreihe um den Wert Null, mit Durchschnittswerten von ca. 1–2 N, was bei einer Nutzung des Demonstrators von Hand einer Belastung von ca. 100–200 g in Z-Richtung gleichkommt (s. Tabelle 11). Dies ist im Verhältnis zu den X- und Y-Reaktionskräften vernachlässigbar.

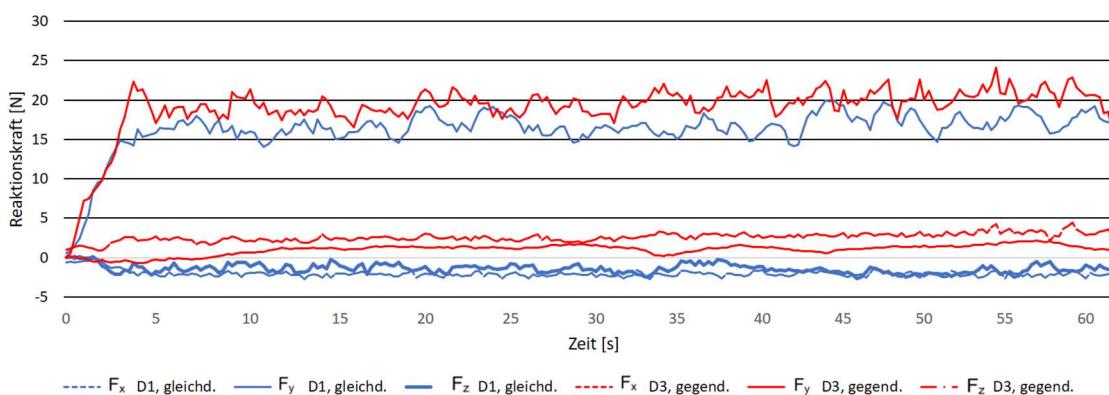


Abbildung 53: Vergleich der Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Drehrichtung, Demonstrator 1 und 3, Zustellung $d = 10$ mm, Vorschub $v = 10$ mm/s, Betonfestigkeit C25/30

Der Vergleich zwischen Demonstrator 1 (gleichdrehend) und Demonstrator 3 (gegendrehend) unterstreicht die Ergebnisse von Demonstrator 2, dass die Reaktionskräfte bei Gegendrehung in X-Richtung zunehmen. Die Y-Werte unterscheiden sich jedoch mit einer Differenz von 2,17 N nur gering (vgl. Tabelle 12). Die Durchschnittswerte für Demonstrator 1 und 3 sind in Tabelle 12 abgebildet.

Tabelle 12: Durchschnittliche Reaktionskräfte in Abhängigkeit von der Drehrichtung, Demonstrator 1 und 3, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30

	$F_x [\text{N}]$	$F_y [\text{N}]$	$F_z [\text{N}]$
Gleichdrehend, D1	-2,02	16,27	-1,36
Gegendrehend, D3	2,55	18,44	1,05

In X-Richtung sind die Reaktionskräfte gegendrehend leicht erhöht, wie bereits aus den vorherigen Versuchen zu erwarten war, in der gleichdrehenden Variante im Bereich von 2 N. Die Y-Kräfte sind bei Demonstratorwerkzeug 3 höher. Die Z-Werte bewegen sich konstant im Bereich um den Wert Null. Eine detaillierte Analyse erfolgt in Kapitel 5.2, die Auswertung in Kapitel 6.

5.1.2 Gewicht der Demonstratoren

Da es sich bei den zu untersuchenden Demonstratoren um Handwerkzeuge handelt und diese umfassend auf verschiedene Faktoren der Nutzung hin untersucht werden, ist ihr Einsatzgewicht eine relevante Größe (s. Abb. 54). Besonders im Hinblick auf die Reaktionskräfte ist das Einsatzgewicht interessant, da die größten Reaktionskräfte in Y-Richtung entgegen der Erdanziehung auftreten. Somit ist zu bedenken, dass Kräfte, die aus dem Eigengewicht des Werkzeugs und der Erdanziehung resultieren, die Summe der auf den Benutzer wirkenden Kräfte reduzieren oder verstärken können.

Das Werkzeuggewicht von Demonstrator 1 liegt bei 6,85 kg. Hierbei wiegt das Trägergerät von Bosch laut Herstellerangaben 2,40 kg, somit beträgt das Gewicht von Einhausung und fünf Diamantscheiben insgesamt 4,45 kg.

Demonstrator 2 hat ein Gesamtgewicht von 16,15 kg, in welches unter anderem zwei Trägergeräte mit insgesamt 4,8 kg einfließen. Ebenfalls besitzt der zweite Demonstrator insgesamt sechs Diamantscheiben und damit eine leicht größere Einhausung als Demonstrator 1. Im Gesamtgewicht von 16,15 kg ist der angebrachte Werkzeugaufnahme-Zylinder inbegriffen. Dieser war zur Durchführung der Versuche notwendig und darf bei der Gegenüberstellung von Reaktionskräften und Einsatzgewicht daher nicht vernachlässigt werden. Bei

einem Realgebrauch entfällt das Gewicht des Werkzeugaufnahmeyzylinders von 0,98 kg und es ergibt sich ein Realgewicht von 15,17 kg.

Demonstrator 3 weist mit 22,20 kg das höchste Gesamtgewicht auf. Dieses setzt sich aus dem üblichen Trägergerät, dem Getriebe, einer Schaltbox, den fünf Diamantscheiben mit Einhausung sowie zwei Handgriffen zusammen.

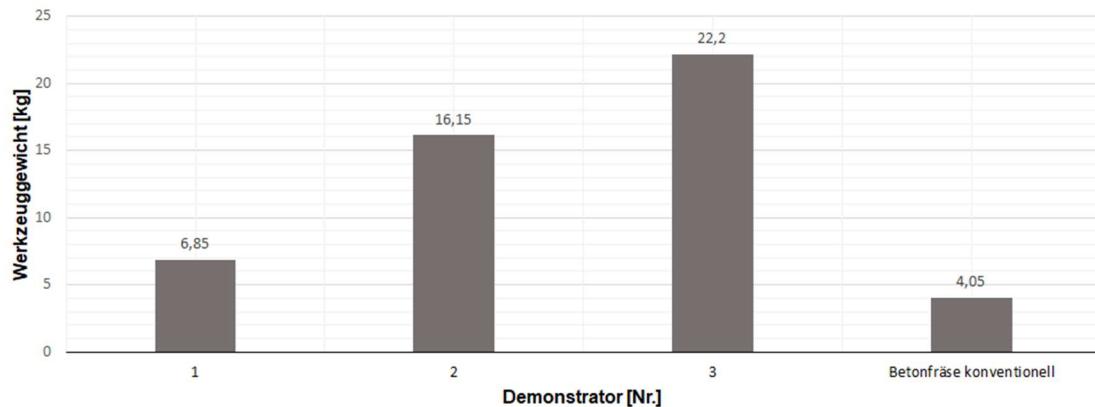


Abbildung 54: Gewicht der Demonstratorwerkzeuge im Vergleich

5.1.3 Ergebnisse Abtragsleistung

Der Abtrag lässt sich in dieser Untersuchung als Körper beschreiben. Dieser ist charakterisiert durch eine Querschnittsfläche, die dem Werkzeugschnittbild entspricht, und einer Länge, die dem Vorschub multipliziert mit der Zeit entspricht.

Abb. 52 stellt das für den Anwendungsfall in der Ebene dar.

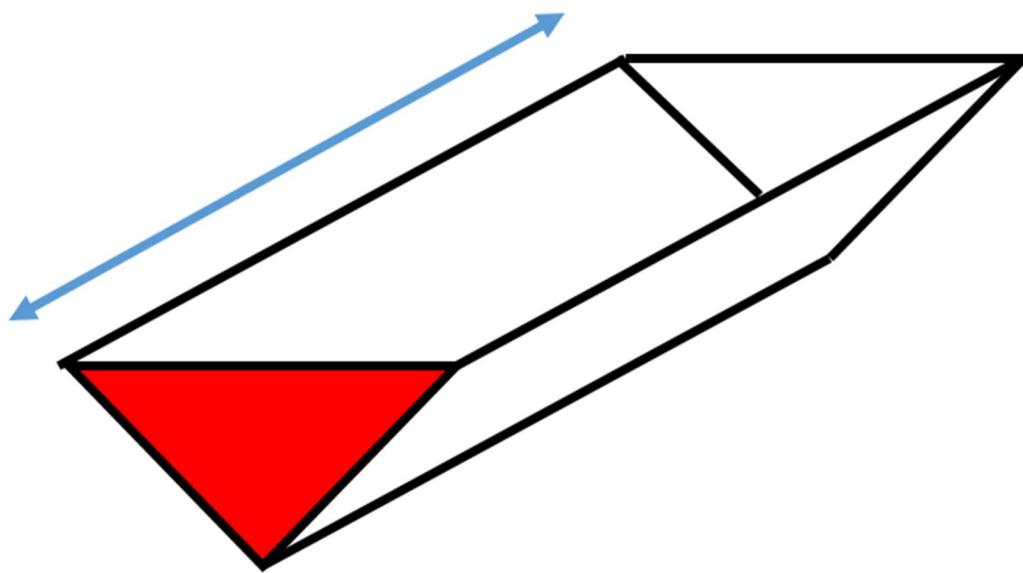


Abbildung 55: Stark vereinfachte Darstellung des Abtragsvolumens der Stufenfräser in der Ebene, Querschnittsfläche (rot) und Abtragslänge (blau)

Durch die spezifische Form von Innenkanten (s. Kapitel 2.1.3) entsteht bei einem rechtwinkligen Abtrag eine Sparrenform. Deren Volumen wird durch die Querschnittsfläche multipliziert mit der Abtragslänge beschrieben. Das Abtragsvolumen setzt sich somit aus der Breite, der Tiefe und der Länge zusammen.

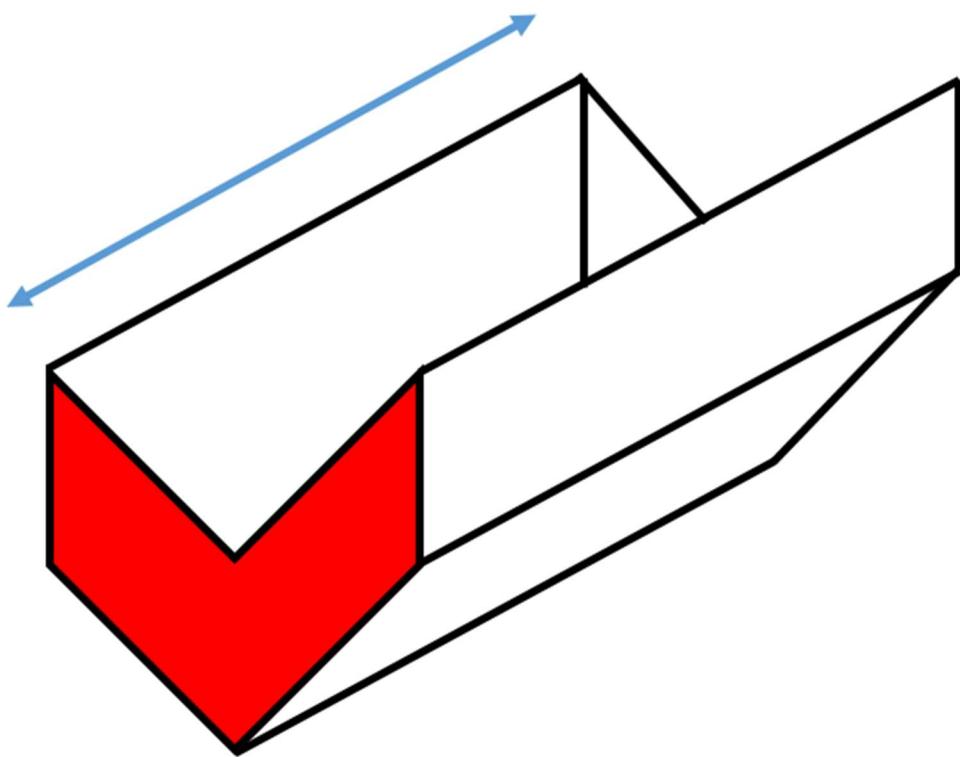


Abbildung 56: Stark vereinfachte Darstellung des Abtragsvolumens der Stufenfräser in der Innenkante, Querschnittsfläche (rot) und Abtragslänge (blau)

Da Demonstrator 1–3 zum Abtrag an Innenkanten entwickelt wurden, wird vorausgesetzt, dass die größeren, anschließenden Wandflächen bereits abgetragen wurden oder nachfolgend separat abgetragen werden. Somit ist die Abtragsbreite der Werkzeuge, unter der Voraussetzung, dass alle Werkzeuge in einem Arbeitsgang den Innenkantenbereich abtragen, für die Leistungsbetrachtung irrelevant. Diese Voraussetzung ist in dieser Untersuchung gegeben. Entscheidend für die Beurteilung der Abtragsleistung sind somit die Tiefe, welche durch die Zustellung bestimmt wird, und die Länge des Abtragsvolumens, welche durch die Vorschubgeschwindigkeit bestimmt wird.

Betrachtet wurden die Ergebnisse der untersuchten Parameter Vorschubgeschwindigkeit, maximale Zustellung und maximale Vorschubgeschwindigkeit bei maximaler Zustellung (s. Abschnitt 4.5). Die Vorschubgeschwindigkeiten konnten im Bereich von 5 mm/s bis 20 mm/s mit allen Werkzeugen untersucht werden. Höhere Vorschubgeschwindigkeiten waren zwar möglich, jedoch nur bei geringen, irrelevanten Zustelltiefen. Die Zustelltiefe von 15 mm konnte von Demonstrator 2 in beiden Betriebsweisen

(ggd. und gld.) erreicht werden. Bei Demonstrator 1 lag die maximale Zustellung bei 13 mm. Demonstrator 3 konnte bis zur Zustelltiefe von 11 mm abtragen, unter günstigen Bedingungen bis 12 mm. Der konventionelle Betonfräser konnte bauartbedingt nur eine maximale Zustellung von 5 mm erreichen. Die maximalen Vorschubgeschwindigkeiten bei maximal erreichbarer Zustellung betrugen 20 mm/s für den konventionellen Betonfräser und Demonstrator 3 sowie 15 mm/s für Demonstrator 1 und 2 (s. Tabelle 13).

Tabelle 13: Übersicht der Vorschubgeschwindigkeiten und Zustellungen der untersuchten Werkzeuge

Demonstrator-typ	Vorschub v	max. Zustellung d_{max}	Vorschub bei max. Zustellung [mm/s] v_{max} bei d_{max}	Vorschub bei max. Zustellung [m/h] v_{max} bei d_{max}
Betonfräse konventionell	5 – 20 mm/s	5 mm	20 mm/s	72 m/h
Demonstrator 1	5 – 20 mm/s	13 mm	15 mm/s	54 m/h
Demonstrator 2, ggd.	5 – 20 mm/s	15 mm	15 mm/s	54 m/h
Demonstrator 2, gld.	5 – 20 mm/s	15 mm	15 mm/s	54 m/h
Demonstrator 3	5 – 20 mm/s	11 – 12 mm	20 mm/s	72 m/h

5.1.4 Ergebnisse Staubmenge

In Abb. 54 sind die Staubmengen im Vergleich zwischen Demonstrator 1 und dem aktuell bei Dekontaminationsarbeiten im kerntechnischen Bereich angewendeten Betonfräser dargestellt. Der Vorschub betrug 10 mm/s und die Zustellung lag bei einer Tiefe von 5 mm. Die Versuche wurden an einem Beton der Festigkeitsklasse C25/30 durchgeführt. Bei dem Vergleich von Staubmengen ist die Betrachtung der Maximalwerte interessant. Diese lagen bei dem ersten Demonstrator bei unter 1000 mg/m³, bei der Betonfräse bei unter 3000 mg/m³.

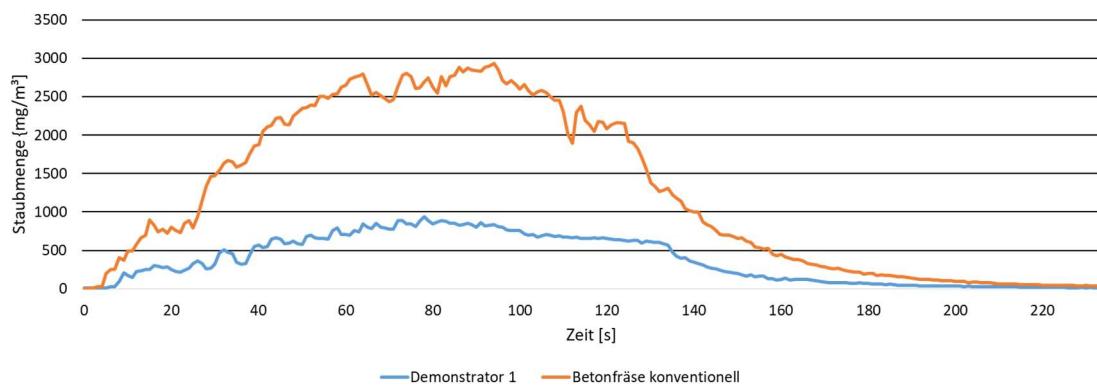


Abbildung 57: Staubmessungen Betonfräse konventionell und Demonstrator 1 bei $v = 10 \text{ mm/s}$ und $d = 10 \text{ mm}$ in Beton C25/30

Die Staubentwicklung zeigt im Vergleich der Demonstratoren 1–3 zum Teil starke Unterschiede. Die Höchstwerte im Bereich von 3500 mg/m^3 bis 4000 mg/m^3 wurden durch Demonstrator 2 erzeugt. Hierbei ist zu beachten, dass der zweite Demonstrator sechs Diamantscheiben mit insgesamt zwei Antrieben besitzt und die Gegendrehung nicht vorschubssymmetrisch ist (im Gegensatz zu Demonstrator 3). Die Höchstwerte von Demonstrator 1 und Demonstrator 3 erreichen ähnliche Bereiche, jedoch unterscheidet sich der Kurvenverlauf (s. Abb. 55) bis zum Erreichen der Höchstwerte signifikant. Bei dem gleichdrehenden System (Demonstrator 1) ist ein starker Anstieg sowie ein rasches Abflachen nach dem Arbeitsgang (bei ca. 90 s) zu beobachten. Bei dem gegendrehenden Getriebesystem (Demonstrator 3) baut sich die Staubmenge in der Luft langsamer auf und hält bis ca. 145 s an, bevor ein Abflachen des Graphen beobachtet werden kann.

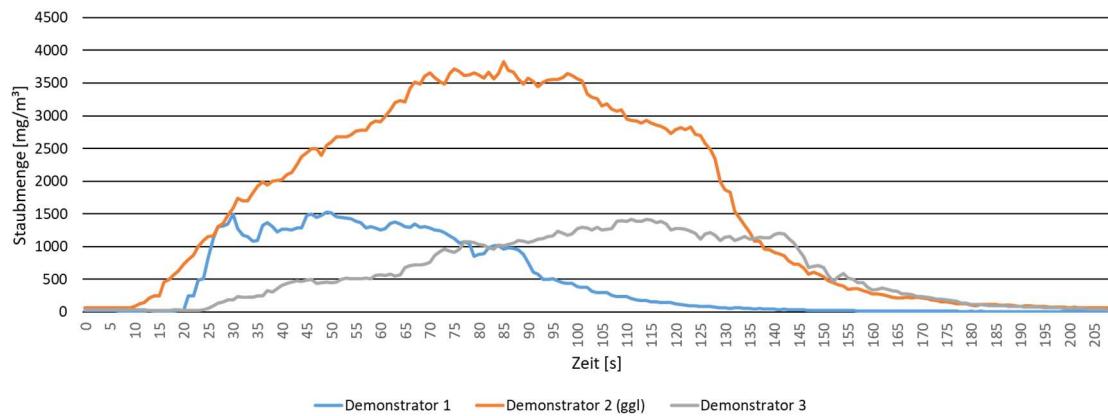


Abbildung 58: Staubmessungen Vergleich Demonstrator 1, 2 und 3 bei Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$ und Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

Die gemessenen Daten zur Staubentwicklung in Bezug zur Vorschubgeschwindigkeit entsprachen der Erwartung, dass bei schnellerer Bearbeitung eine größere Menge Staub entsteht. Besonders deutlich war der Anstieg der Staubmenge bei der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit von 15 mm/s auf 20 mm/s (s. Abb. 59). Aus den erhobenen Daten wurde ein Staubvolumen-Zeit-Diagramm erstellt. Anschließend wurden die absoluten maximalen Staubmengen tabellarisch erfasst und deren relative Änderung zum Messwert bei der geringsten Vorschubgeschwindigkeit (10 mm/s) berechnet.

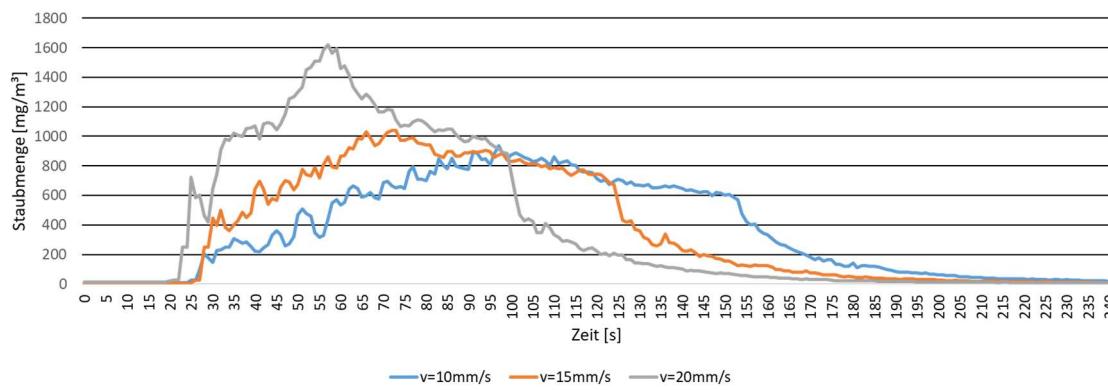


Abbildung 59: Staubmessungen Vergleich verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten, Demonstrator 1, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

Die maximale gemessene Staubmenge bei einem Vorschub von 10 mm/s lag bei 938 mg/m^3 . Bei einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit auf 15 mm/s

steigerte sich die gemessene Staubmenge um 10,98 % (1041 mg/m^3). Bei einer Erhöhung des Vorschubs von 10 mm/s auf 20 mm/s nahm die maximale Staublast der Umgebungsluft um 72,81 % zu und erreichte 1621 mg/m^3 (s. Tabelle 14). Je niedriger die Vorschubgeschwindigkeit ist, desto länger dauert der Versuchsablauf und dabei die Staubentwicklung.

Tabelle 14: Maximale Staubmengen Demonstrator 1, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$ bei Beton C25/30

	Maximale Staublast [mg/m^3]	Steigerung zu $v = 10 \text{ mm/s}$ [%]
$v = 10 \text{ mm/s}$	938	0
$v = 15 \text{ mm/s}$	1041	10,98
$v = 20 \text{ mm/s}$	1621	72,81

Es zeigte sich ebenfalls, dass die Staublast in Abhängigkeit zur ansteigenden Zustellung zunimmt. Dies ist dadurch begründet, dass bei einer höheren Zustellung mehr Beton entfernt wird. Erwartungsgemäß entsteht bei der Bearbeitung eine höhere Staublast.

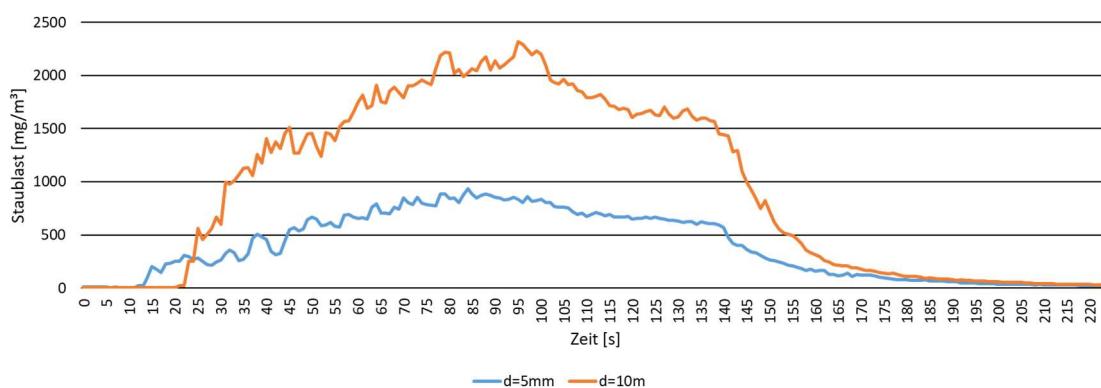


Abbildung 60: Staubmessungen Demonstrator 1, Vergleich Zustellung $d = 5 \text{ mm}$ und $d = 10 \text{ mm}$, Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30

Bei einer Erhöhung der Zustellung von $d = 5 \text{ mm}$ auf $d = 10 \text{ mm}$ erhöhte sich die Staubhöchstlast von ca. 1000 mg/m^3 auf über 2000 mg/m^3 (s. Abb. 60). Es findet eine größere Menge an Abtrag durch die höhere Zustellung statt, was sich in der Staublast äußert.

Bei Versuchen zur Staubentwicklung von Demonstrator 1 mit einer höheren Betondruckfestigkeitsklasse war die Staubentwicklung geringer als bei einer niedrigeren Betondruckfestigkeit. Bei einem Vorschub von 10 mm/s und einer Zustellung von 10 mm wurden bei Beton der Festigkeitsklasse C25/30 maximale Staubmengen bis zu 2320 mg/m^3 gemessen, bei einer Betondruckfestigkeit von C30/37 wurden 1449 mg/m^3 erreicht (s. Abb. 61).

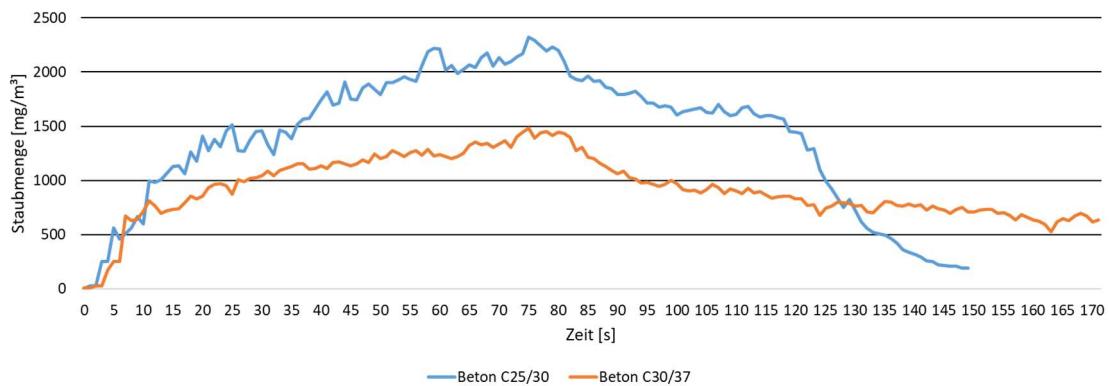


Abbildung 61: Staubmessungen Vergleich Betonfestigkeit C25/30 und C30/37 bei Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$ und Zustellung $d = 10 \text{ mm}$

Ähnlich den Messergebnissen zum Einfluss der Drehrichtung konnten beim Parameter Laufrichtung höhere Staubemissionen bei gegenläufigem Abtrag beobachtet werden. Die Staublastwerte lagen für beide Laufrichtungen in einem ähnlichen Bereich. Der gleichläufige Abtrag lag sowohl bei $v = 10 \text{ mm/s}$ als auch bei $v = 15 \text{ mm/s}$ bei ca. 1400 mg/m^3 . Dem gegenüber stand der höhere Wert von ca. 1900 mg/m^3 bei beiden Vorschubgeschwindigkeiten für den gegenläufigen Abtrag (s. Abb. 62).

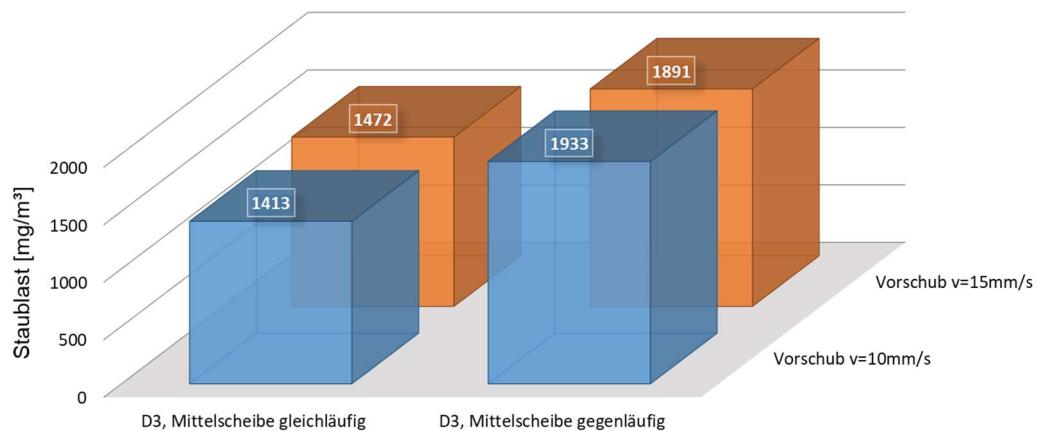


Abbildung 62: Vergleich der maximalen Staubmenge in Abhängigkeit von der Laufrichtung, Demonstrator 3, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

Bei einem direkten Vergleich der Drehrichtungen am Beispiel des zweiten Demonstrators ergaben sich für den gegendrehenden im Vergleich zum gleichdrehenden Betrieb unter jeweils gleichen Bedingungen deutlich höhere Werte (Steigerungen um 50 % bis 150 %). Im gegendrehenden Betrieb lagen die maximalen Staublastmengen unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit konstant über 2500 mg/m^3 Staub in der Umgebungsluft. Im gleichdrehenden Betrieb wurden Staubkonzentrationen von ca. 1000 mg/m^3 bei $v = 10 \text{ mm/s}$ und $v = 15 \text{ mm/s}$ sowie ca. 1750 mg/m^3 in der höchsten untersuchten Vorschubgeschwindigkeit von $v = 20 \text{ mm/s}$ gemessen (s. Abb. 63).

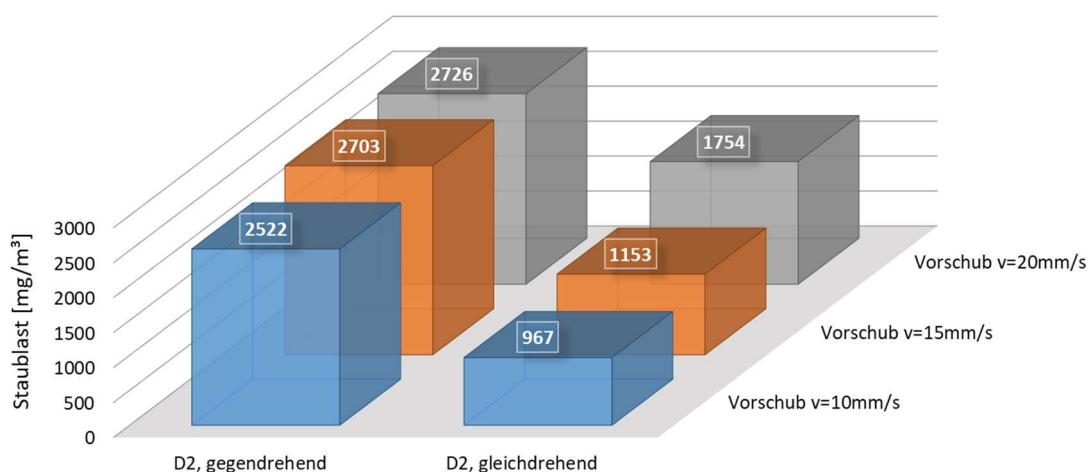


Abbildung 63: Vergleich der maximalen Staubmenge, Demonstrator 2 gegendrehend zu gleichdrehend, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

5.1.5 Ergebnisse Staubpartikelgröße



Abbildung 64: Überblick Staubprobe Versuchsreihe 69, Demonstrator 1, $v = 5 \text{ mm/s}$, $d = 15 \text{ mm}$, C30/37



Abbildung 65: Detail Staubprobe Versuchsreihe 69, Demonstrator 1, $v = 5 \text{ mm/s}$, $d = 15 \text{ mm}$, C30/37

Bei der Betrachtung der Staubemissionen der Demonstratoren wurde neben der anfallenden Staubmenge auch die Zusammensetzung des Staubes betrachtet (s. Abb. 64 und 65). Hierbei lag der Fokus auf dem Korngrößendurchmesser des Staubes, der bei einem Arbeitsgang entsteht.

Bei dem nachfolgenden Vergleich der Staubkorngrößen werden speziell die Prozentsätze der Korngrößen kleiner $2,5 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ betrachtet, wie im

Kapitel 6.4.1 aus gesundheitlicher Sicht begründet. Die Gesamtstaubmenge bleibt bei diesen Betrachtungen vorerst unberücksichtigt, die kombinierten Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden in Kapitel 7 ausgewertet.

Das nachstehende Diagramm (Abb. 66) zeigt eine Gesamtübersicht als Vergleich der getesteten Demonstratoren mit Betrachtung der Feinstaubfraktion. Die Betrachtung der einzelnen Abhängigkeitsfaktoren wie Vorschubgeschwindigkeit, Drehrichtung der Scheiben zueinander, Getriebeeinfluss und Vorschubrichtung erfolgt separat. Vereinfacht ist aus Abb. 66 ersichtlich, dass Demonstrator 3 den geringsten Anteil an Feinstaub erzeugt (4,79 % bzw. 12,32 %). Bei Demonstrator 2 erzeugt unter den gegebenen Randbedingungen die gegendrehende Variante weniger Feinstaub (ggd. 5,89 % und 15,83 % gegenüber gld. 7,07 % und 18,82 %).

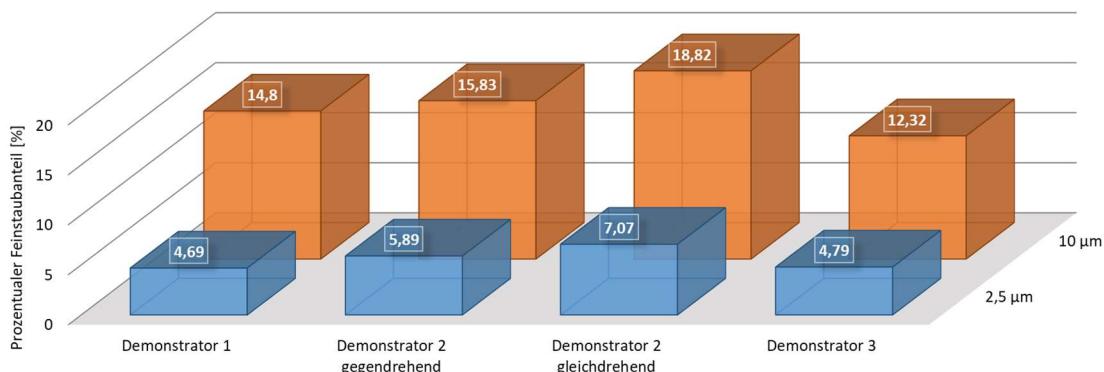


Abbildung 66: Vergleich der Feinstaubanteile der verschiedenen Demonstratoren, Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

Ebenfalls wurden Staubproben zur Betrachtung des Feinstaubanteils des konventionellen Betonfräzers untersucht. Da die Messwerte des konventionellen Betonfräzers nur bei einer Zustellung von 5 mm erhoben werden konnten, ist ein direkter wissenschaftlicher Vergleich mit den Staubproben von Demonstrator 1–3 nur eingeschränkt möglich. Durchgeführt wurde daher lediglich eine Betrachtung der Staubemissionen in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit. Werte für den konventionellen Betonfräser und für die entwickelten Demonstratoren liegen in einem ähnlichen Bereich. Es ist eine konstante Abnahme von $v = 10 \text{ mm/s}$ mit 15,17 % über $v = 15 \text{ mm/s}$ mit 13,43 %

zu $v = 20 \text{ mm/s}$ mit 12,59 % des Feinstaubanteils bei Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit für den konventionellen Betonfräser ersichtlich (s. Abb. 67).

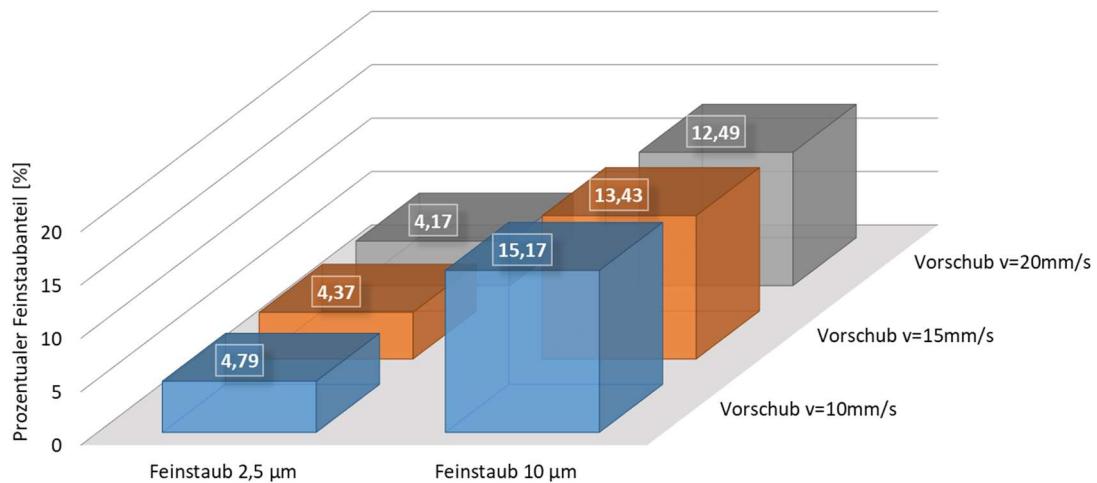


Abbildung 67: Vergleich der Feinstaubanteile bei verschiedenem Vorschub, Betonfräse konventionell, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

Ein signifikanter Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit konnte bei Demonstrator 2 nicht festgestellt werden (s. Abb. 68). Die Änderungen des Feinstaubanteils an der Gesamtstaubemission nach Änderung der Vorschubgeschwindigkeit lagen unter 0,22 %, was im Bereich der Messungenauigkeit liegt. Es wurde erwartet, dass bei niedrigerer Vorschubgeschwindigkeit ein höherer Feinstaubanteil anfällt, da eine Betoneinheit langsamer und damit auch öfter bearbeitet wird, was zu kleineren Staubpartikeln führen würde. Diese Annahme konnte in den Versuchen nicht belegt werden. Es wurde beobachtet, dass sich der Anteil an Feinstaub bei Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit teilweise marginal erhöhte.

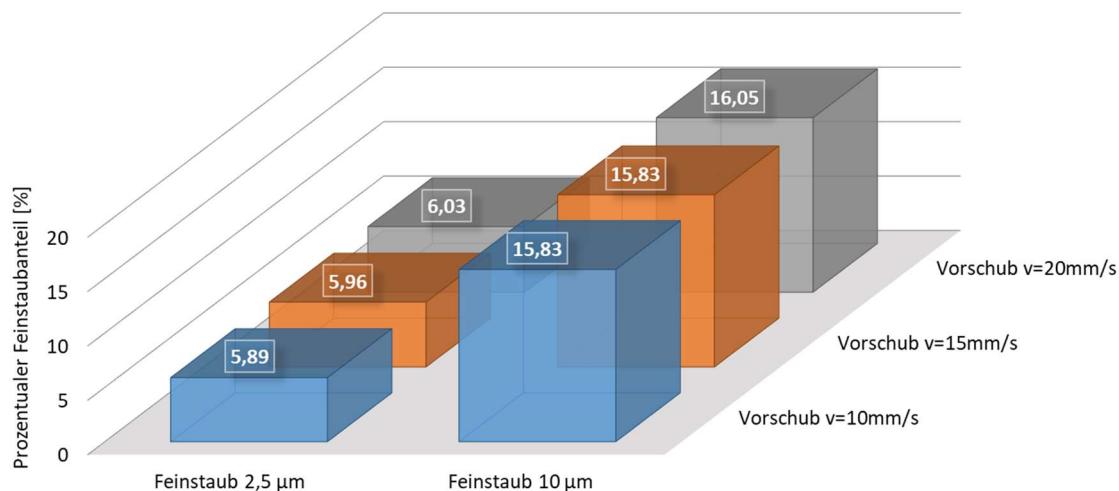


Abbildung 68: Vergleich der Feinstaubanteile bei verschiedenem Vorschub, Demonstrator 2 gegenläufig, Zustellung d = 10 mm, Betonfestigkeit C25/30

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung zeigten einen signifikanten Einfluss der Laufrichtung auf die Staubkorngrößenverteilung bei einer niedrigen Vorschubgeschwindigkeit (s. Abb. 69). Bei der Betrachtung der Ergebnisse von Demonstrator 3 ist der Werkzeugaufbau zu berücksichtigen (s. Kapitel 3.3), durch den die Diamantscheiben zueinander gegendrehend sind. Ein Teil der Diamantscheiben ist somit stets gleichläufig, der andere gegenläufig.

Die Bezeichnung „Mittelscheibe gleichläufig“ bedeutet, dass die Mehrzahl der Scheiben (4) gegenläufig ist (Scheibensatz bei Demonstrator 3 immer gegendrehend). Die Bezeichnung „Mittelscheibe gegenläufig“ bedeutet, dass die Mehrzahl der Scheiben (4) gleichläufig ist (Scheibensatz bei Demonstrator 3 immer gegendrehend). Bei $v = 10 \text{ mm/s}$ erhöhte sich der Feinstaubanteil bei gegenläufiger Mittelscheibe im Vergleich zum gleichläufigen Betrieb von 12,32 % auf 15,12 %. Das entspricht einer Erhöhung von 2,8 %. Bei $v = 15 \text{ mm/s}$ betrug diese Erhöhung 0,67 %.

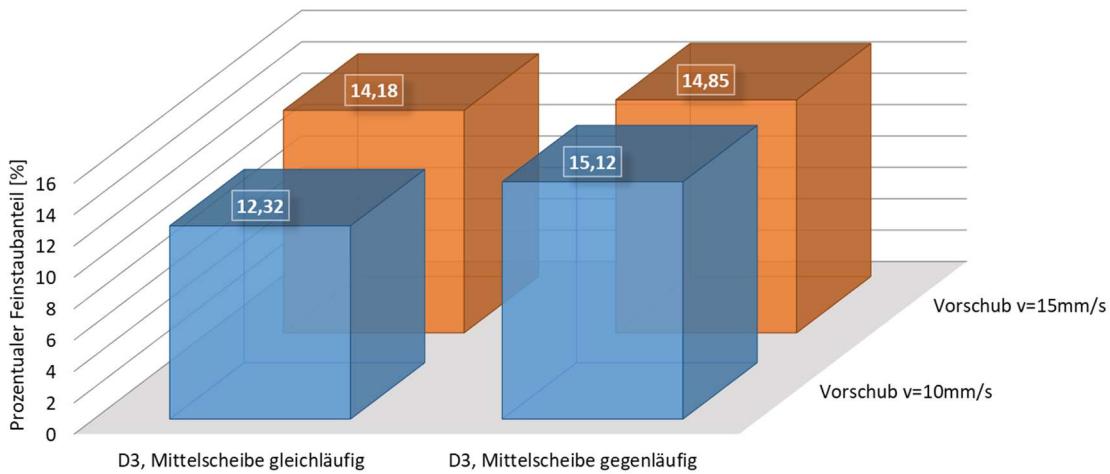


Abbildung 69: Vergleich der Feinstaubanteile in Abhängigkeit von der Laufrichtung, Demonstrator 3, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30, Staub $< 10 \mu\text{m}$

Am Beispiel von Demonstrator 2 wurde der Einfluss der Werkzeugscheibendrehrichtung (s. Kapitel 4.4) auf den Feinstaubanteil untersucht (s. Abb. 70). Zusätzlich wurde der Feinstaubanteil zwischen Demonstrator 1 und Demonstrator 3 verglichen, da diese ebenfalls gleich- bzw. gegendrehende Systeme darstellen.

Bei Demonstrator 2 zeigte sich über alle Vorschubgeschwindigkeiten hinweg eine Erhöhung von Staubanteilen $< 10 \mu\text{m}$ bei gleichdrehendem System im Vergleich zum gegendrehenden System, was in Abb. 67 ersichtlich wird. Bei $v = 10 \text{ mm/s}$ nahm der Feinstaubanteil von gegendrehend zu gleichdrehend von 15,83 % auf 18,82 % zu, bei $v = 15 \text{ mm/s}$ von 15,83 % auf 21,2 % und bei $v = 20 \text{ mm/s}$ von 16,05 auf 19,43 %. Die Hypothese, dass ein gegendrehender Abtrag für mehr Feinstaub sorgt, konnte im Versuch mit Demonstrator 2 nicht verifiziert werden.

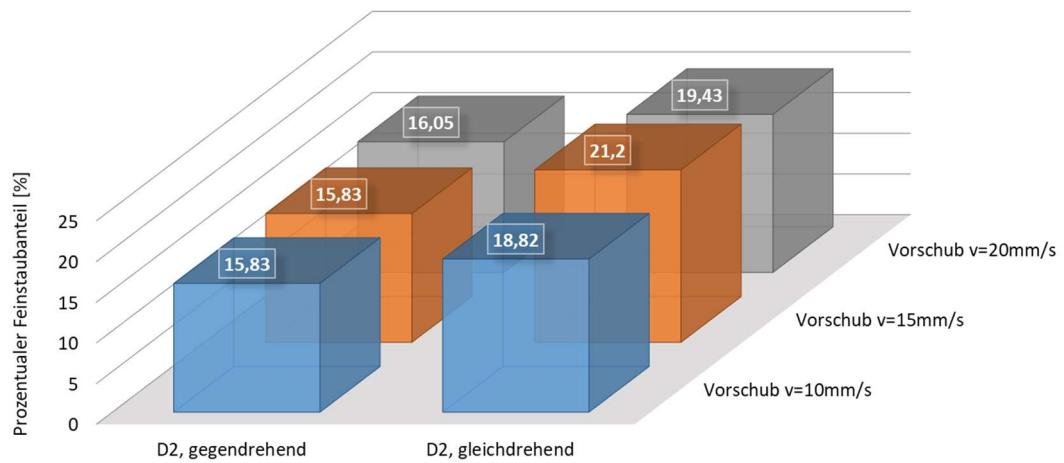


Abbildung 70: Vergleich der Feinstaubanteile in Abhängigkeit von der Werkzeugdrehrichtung, Demonstrator 2, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30, Staub $< 10 \mu\text{m}$

Um den Einfluss der Getriebeart auf den Feinstaubanteil zu untersuchen, wurden Staubproben aus den Versuchen mit Demonstrator 1 und Demonstrator 3 verglichen. Es zeigten sich geringfügige Unterschiede (s. Abb. 71). Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s betrug die Differenz 0,17 % zugunsten von Demonstrator 1 (gleichdrehend), bei der Vorschubgeschwindigkeit 15 mm/s lediglich 0,05 %. Demonstrator 1 zeigt unter den gegebenen Randbedingungen numerisch bessere Ergebnisse in einem vernachlässigbar geringen Umfang. Die Differenzen könnten mit Untersuchungsfaktoren wie Messfehler, Probenahme und Untersuchungsgenauigkeit begründet werden.

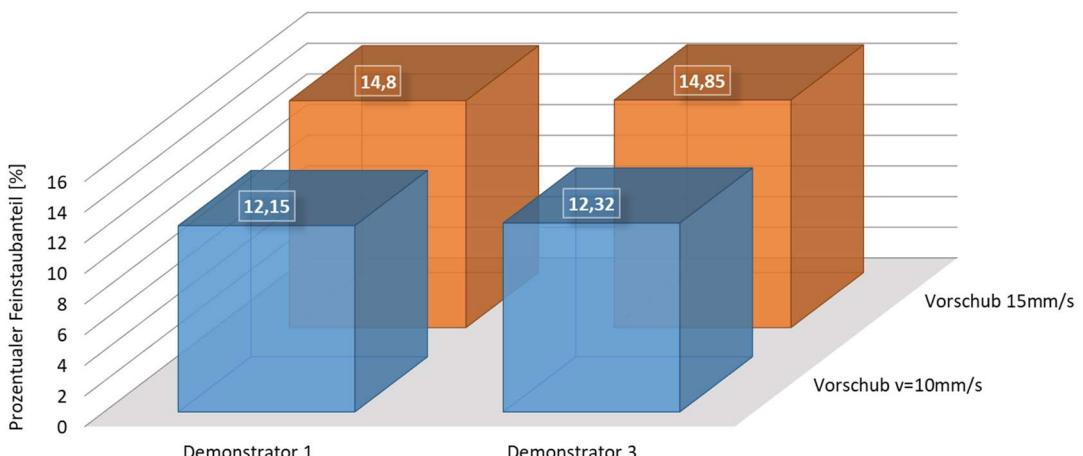


Abbildung 71: Vergleich der Feinstaubanteile, Demonstrator 1 und 3, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30, Staub $< 10 \mu\text{m}$

5.1.6 Ergebnisse der Vibrationsmessung

Vibrationen entstehen durch Schwingungen von Objekten. Die Bewegung des Objektes kann durch verschiedene Weisen erzeugt werden wie mechanische Einflüsse, akustische Wellen, Resonanz oder externe Energiezufuhr. Im Falle des Betonabtrags sind sowohl mechanische Einflüsse für die Vibrationen verantwortlich als auch die Energiezufuhr durch die Elektromotoren der Werkzeuge. Ein Großteil der Vibrationen entsteht durch den Betonabtrag, was sich im Vergleich der Ergebnisse mit (10 – 20 mm/s) und ohne Vorschub (0 mm/s) in Abbildung 72 zeigt.

Bei den Vibrationsmessungen wird ersichtlich, dass ein erhöhter Vorschub in der Regel zu erhöhten Vibrationen führt. Eine Ausnahme bildet Demonstrator 2 mit einer geringen Abnahme der Vibrationen um $0,3 \text{ m/s}^2$ bei Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit von 15 mm/s auf 20 mm/s. Zur umfassenden Beurteilung der Vibrationswerte unter Belastung wurden die Vibrationen der Demonstratoren bei Betrieb ohne Bearbeitungsvorgang (entspricht 0 mm/s Vorschub) gemessen. Beim konventionellen Betonfräser wurden sowohl der Auslösewert als auch der Expositionsgrenzwert von 5 m/s^2 bereits beim niedrigsten untersuchten Vorschub signifikant überschritten und erreichte Werte $> 7 \text{ m/s}^2$. Demonstrator 1 lag mit allen gemessenen Werten oberhalb des Auslösewerts von $2,5 \text{ m/s}^2$, blieb jedoch unter dem Expositionsgrenzwert. Die kleinsten Vibrationswerte wurden von Demonstrator 2 erzielt, bei dem alle gemessenen Werte unterhalb des Auslösegrenzwerts lagen. Der Maximalwert lag bei Demonstrator 2 bei $2,01 \text{ m/s}^2$ (s. Abb. 72).

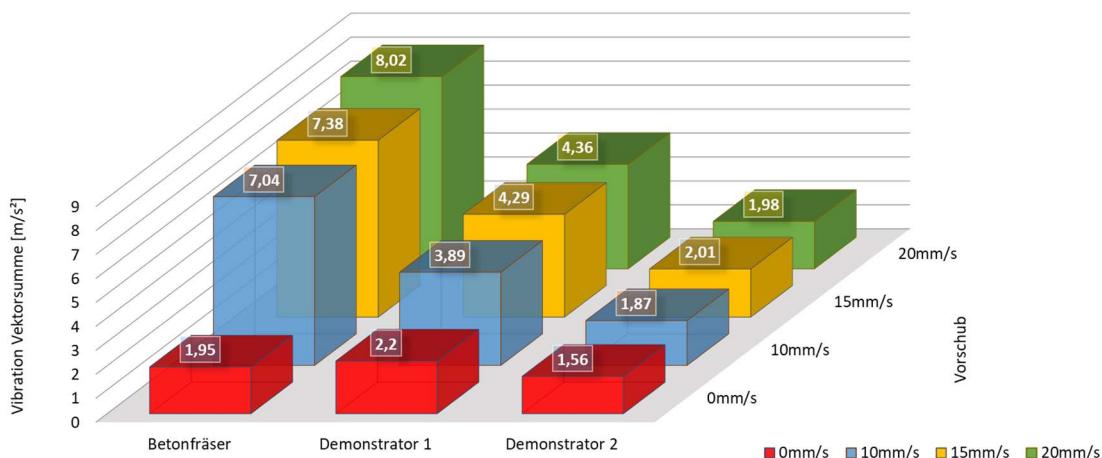


Abbildung 72: Vibrationsmessung Vergleich der unterschiedlichen Demonstratoren bei unterschiedlichem Vorschub, Zustellung d=5 mm und Betonfestigkeit C25/30

Die Auswirkungen von einem gleichdrehenden System zu einem gegendrehenden System hinsichtlich des Einflusses auf die Hand-Arm-Vibrationen werden in Abb. 73 verglichen. Hierbei wird ersichtlich, dass die Vibrationen in Demonstrator 3 durch die entgegengesetzt wirkenden Rotationskräfte deutlich abgemindert werden zu Demonstrator 1. Dies wird deutlich bei einer Zustellung von $d = 10 \text{ mm}$ und Vorschubgeschwindigkeiten von $v = 10 \text{ mm/s}$ bis $v = 20 \text{ mm/s}$. Hier lagen die Vibrationen bei Demonstrator 1 (gleichdrehendes System) zwischen $5,64$ und $6,63 \text{ m/s}^2$, bei Demonstrator 3 (gegendrehendes System) lediglich zwischen $2,07$ und $3,19 \text{ m/s}^2$.

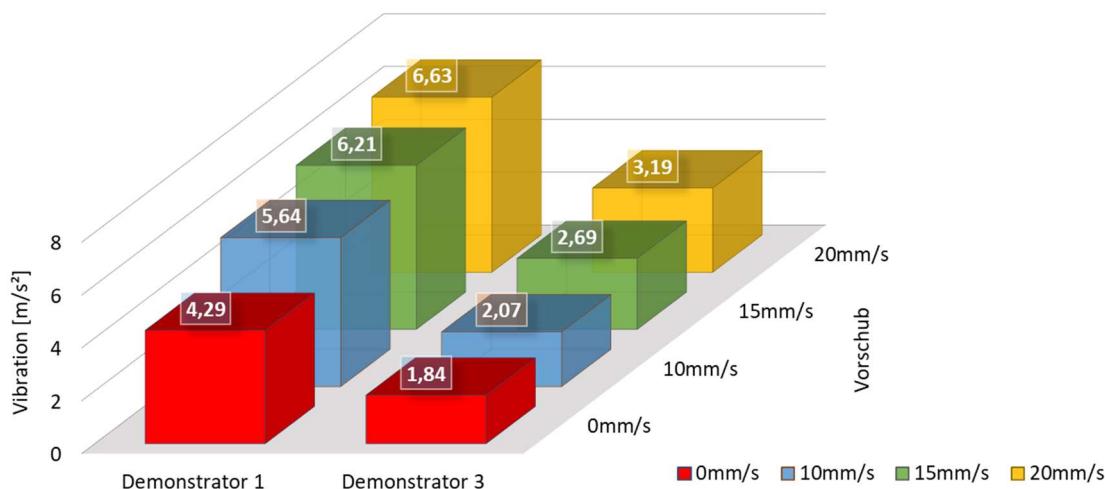


Abbildung 73: Vibrationsmessung Vergleich Demonstrator 1 und 3, ohne und mit Getriebe bei unterschiedlichem Vorschub, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$ und Betonfestigkeit C25/30

Die Betonfestigkeitsklasse hatte in den durchgeföhrten Versuchen einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Vibrationen. Unter gleichen Voraussetzungen in Bezug auf Vorschubgeschwindigkeit und Zustellung traten bei Beton der Festigkeitsklasse C25/30 mit $5,07 \text{ m/s}^2$ höhere Vibrationswerte auf als beim Beton der Festigkeitsklasse C30/37 mit $3,10 \text{ m/s}^2$ (s. Abb. 74). Durch die härtere Betonfestigkeit kommt es zu einem konstanteren Schnitt durch den Beton.

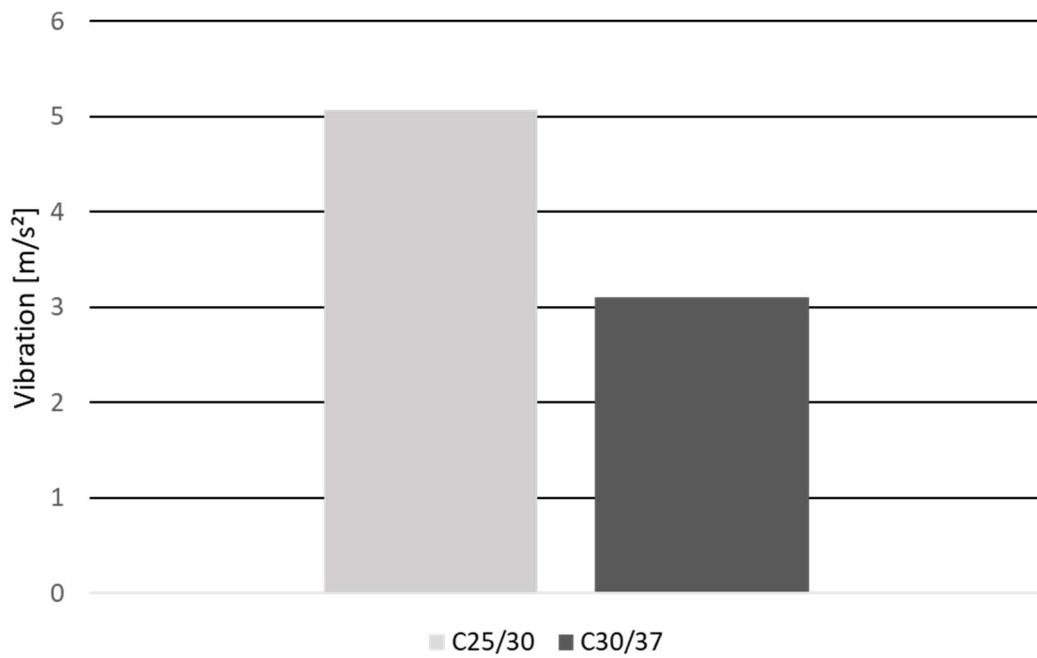


Abbildung 74: Vibrationsmessung Vergleich Betonfestigkeit C25/30 und C30/37, erster Demonstrator mit Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$ und Zustellung $d = 10 \text{ mm}$

Bei Fräsvorgängen wird die Vorschubrichtung in Abhängigkeit von der Umlaufrichtung (rechtsdrehend oder linksdrehend) des Werkzeugs betrachtet (vgl. Kap. 4.4).

Das Gegenlaufräsen ist im Metallbereich für höhere Vibrationen im Gegensatz zum Gleichlaufräsen bekannt (Milberg 1992). Diese Feststellung ist aufgrund der Unterschiede zwischen den Werkstoffen Metall und Beton, wie z. B. heterogener Aufbau von Beton, unterschiedliche Dichte, Belastbarkeit etc., nicht direkt übertragbar. Höhere Vibrationen beim Gegenlaufräsen konnten in der versuchstechnischen Durchführung am konkreten Beispiel der Innenkantendekontamination nur in geringfügigem Umfang nachgewiesen werden. Im Vergleich von Gegenlaufräsen zu Gleichlaufräsen wies das Gegenlaufräsen einen um $0,1 \text{ m/s}^2$ höheren Vibrationsgesamtvektor auf (s. Abb. 75) und ist damit vernachlässigbar. Die Grundfeststellung aus dem Metallbereich erweist sich an diesen konkreten Versuchen im Betonbereich zwar als richtig, die Unterschiede sind jedoch marginal und demnach nicht signifikant.

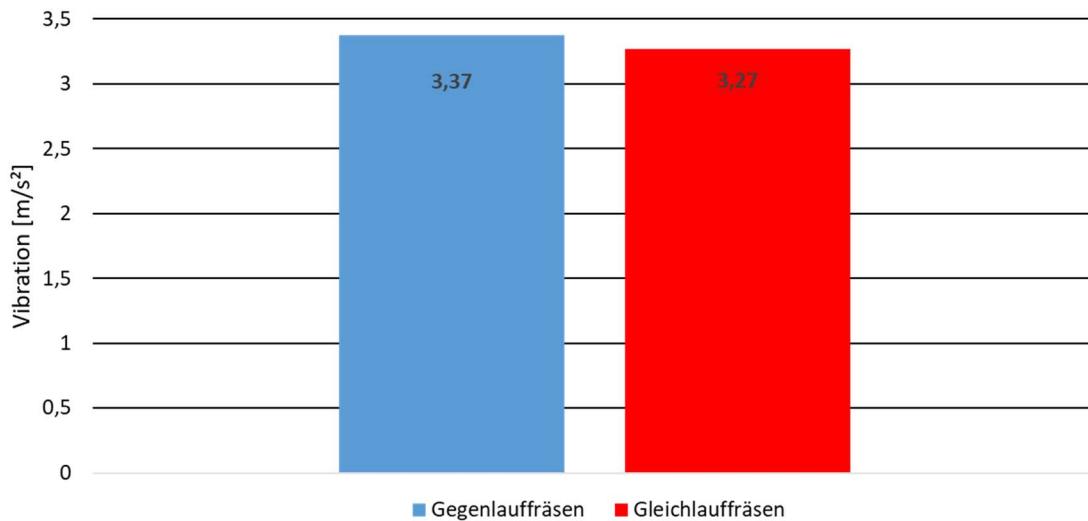


Abbildung 75: Vibrationsmessung Vergleich Gegenlauffräsen und Gleichlauffräsen, erster Demonstrator mit Vorschub $v = 5 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 15 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C30/37

Weiterhin wurden die Versuchsergebnisse von Demonstrator 2 hinsichtlich des Einflusses der Drehrichtungen der Diamantscheiben auf die Vibration untersucht und verglichen. Da Demonstrator 2 aus zwei Trägergeräten besteht und somit zwei Antriebe hat, ergab sich die Möglichkeit, beide Werkzeugseiten in gleicher Richtung als auch entgegengesetzt zueinander anzutreiben. Die Versuchsergebnisse zeigen bei einer Zustellung von 10 mm eine Verringerung der Vibrationen vom gegendrehenden zum gleichdrehenden Fräsvorgang. Eine Abnahme der Vibrationen findet bei $d = 10 \text{ mm}$ und $v = 10 \text{ mm/s}$ von $2,75 \text{ m/s}^2$ auf $2,13 \text{ m/s}^2$ statt, bei $v = 15 \text{ mm/s}$ von $3,05 \text{ m/s}^2$ auf $2,40 \text{ m/s}^2$ und bei $v = 20 \text{ mm/s}$ von $2,68 \text{ m/s}^2$ auf $2,41 \text{ m/s}^2$. Eine ausführliche Analyse der Vibrationen findet in Kap. 5.2 statt

Tabelle 15: Vibrationsvergleich der Drehrichtung, zweiter Demonstrator mit gleichläufigen Diamantscheiben; $d = 10\text{mm}$; Betonfestigkeit C25/30

Vorschub	Gegendrehend	Gleichdrehend	Änderung
$v = 10 \text{ mm/s}$	$2,75 \text{ m/s}^2$	$2,13 \text{ m/s}^2$	- 22,5%
$v = 15 \text{ mm/s}$	$3,05 \text{ m/s}^2$	$2,40 \text{ m/s}^2$	- 21,3%
$v = 20 \text{ mm/s}$	$2,68 \text{ m/s}^2$	$2,41 \text{ m/s}^2$	- 10,0%

Aus den Messwerten bei Zustellung 5 mm können keine eindeutigen Aussagen abgeleitet werden. Hier variieren die Vibrationen von niedriger Vorschubgeschwindigkeit zu hoher Vorschubgeschwindigkeit.

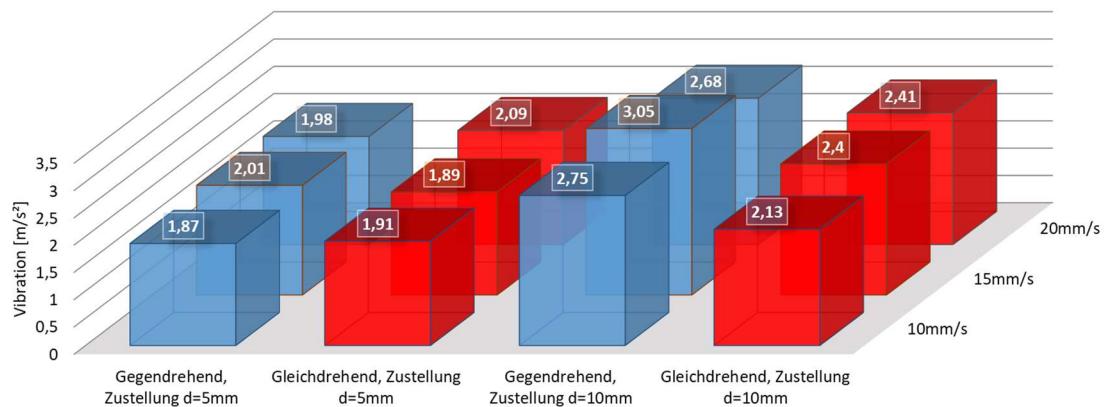


Abbildung 76: Vibrationsvergleich der Drehrichtung, zweiter Demonstrator mit gleichläufigen Diamantscheiben; Betonfestigkeit C25/30

Demonstrator 2 und 3 sind mit gegendrehenden Diamantscheiben betreibbar. Der Unterschied liegt neben der verschiedenen Antriebsanzahl und Scheibenzahl hauptsächlich darin, dass Demonstrator 3 auch beim gegendrehenden Fräsen achsensymmetrisch ist und daher keine Drehmomente um die Y-Achse entstehen. Aus den Versuchsreihen wird klar ersichtlich, dass das Getriebe sich senkend auf die resultierenden Vibrationsvektoren bei gegendrehendem Fräsen auswirkt. Dies ist ersichtlich in Abbildung 77, bei dem die Vibrationsvektoren von Demonstrator 3 mit Getriebe niedriger sind als die Vibrationsvektoren von Demonstrator 1 ohne Getriebe bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit. Im Vergleich zu Demonstrator 1 verringern sich bei Demonstrator 3 die Vibrationsvektoren bei einem Vorschub von 10 mm/s um 63 %, bei 15 mm/s um 57 % und bei 20 mm/s um 52 %. Durchschnittlich konnten die Vibrationen bei gleichen Parametern um 57 % reduziert werden.

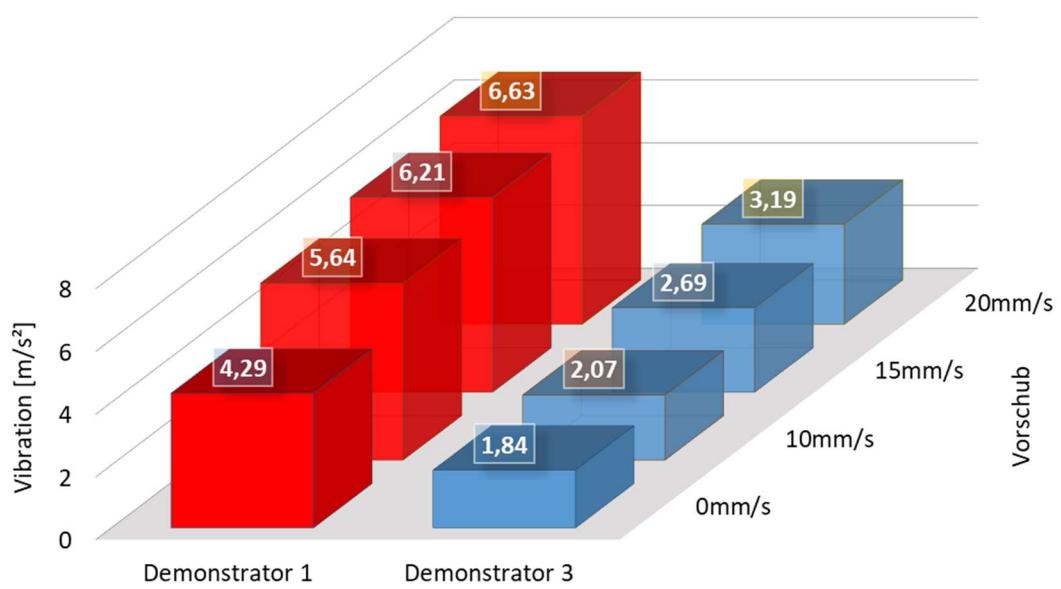


Abbildung 77: Vibrationsmessung Vergleich Demonstrator 1 und 3, ohne und mit Getriebe bei unterschiedlichem Vorschub, Zustellung d = 10 mm und Betonfestigkeit C25/30

5.1.7 Ergebnisse des Schallpegels

Die untersuchten Demonstratoren mit Diamantscheiben (in Betrieb zwischen 105,2 dB(A) und 108,29 dB(A)) verursachen einen höheren Schallpegel als der konventionelle Betonfräser (in Betrieb zwischen 99,9 dB(A) und 102,18 dB(A), s. Abb. 78). Bei Demonstrator 1 ist der erwartete Anstieg des Lärmppegels in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit deutlich zu erkennen.

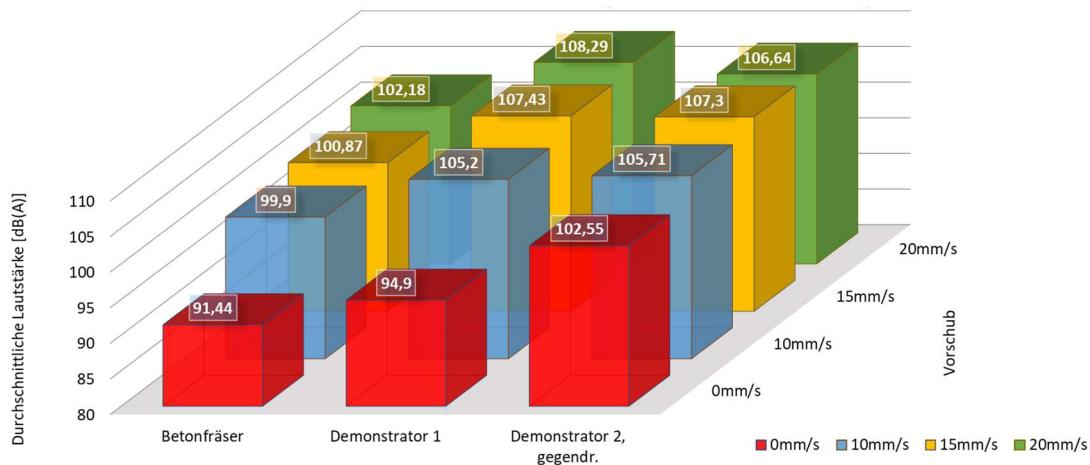


Abbildung 78: Vergleich der durchschnittlichen Schallpegel von Demonstrator 1 und 2 bei unterschiedlichem Vorschub, Zustellung d = 5 mm und Betonfestigkeit C25/30

Die Auswertung von Demonstrator 2 zeigt, dass der Schallpegel bis zu einem gewissen Umfang von der Zustellung des Werkzeugs beeinflusst wird (s. Abb. 79). Je größer die Zustellung ist, desto geringer ist der Schallpegel. Dabei ist zu beachten, dass sich der abtragende Teil des Werkzeugs mit zunehmender Zustellung tiefer im Material befindet. Dadurch befindet sich, in Vorschubrichtung gesehen, an drei von vier Seiten der Bearbeitungsstelle Material und von oben kommend das Werkzeug selbst. Unter anderem durch die Porosität des Betons wird somit ein Teil des entstehenden Schalls direkt durch das umliegende Betonmaterial absorbiert.

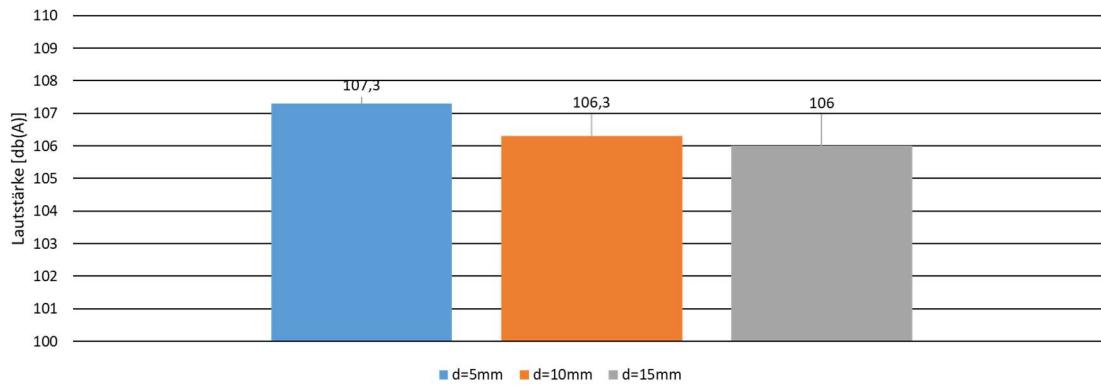


Abbildung 79: Schallpegelmessung Vergleich der Zustellung, Demonstrator 2 mit Vorschub $v = 15 \text{ mm/s}$, Betonfestigkeit C25/30

Ein Vergleich der verschiedenen Betonfestigkeitsklassen unter gleichen Rahmenbedingungen (Vorschub, Zustellung, Demonstrator) zeigt deutliche Unterschiede in der Lautstärke der Bearbeitung. Die aufgezeichneten Messwerte bewegen sich ca. $\pm 2 \text{ dB}$ um die durchschnittliche Lautstärke, was mit der Heterogenität des bearbeiteten Betons sowie dem Diamantbesatz zu begründen ist (s. Abb. 80).

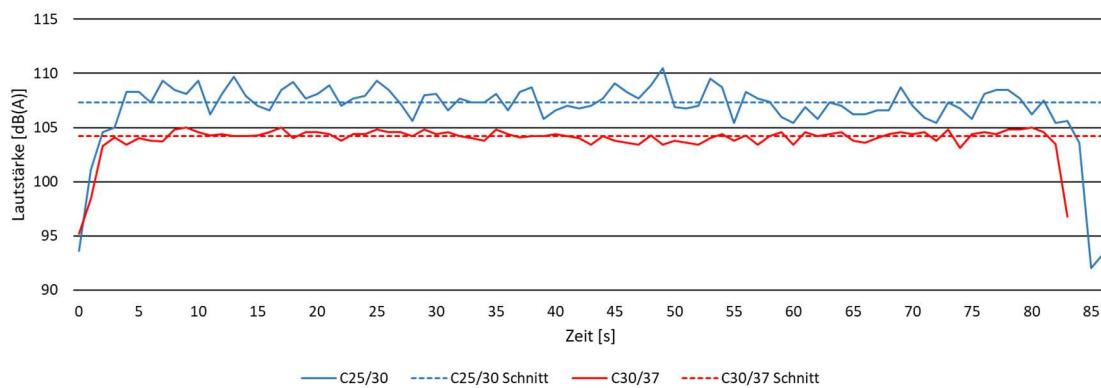


Abbildung 80: Schallpegelmessung Vergleich Betonfestigkeit C25/30 und C30/37, Demonstrator 1 mit Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$

Tabelle 16: Vergleich der durchschnittlichen Bearbeitungslautstärke bei verschiedenen Betonfestigkeiten

	C25/30	C30/37
Durchschnittliche Lautstärke bei Demonstrator 1, $v = 10 \text{ mm/s}$ und $d = 10 \text{ mm}$	107,3 dB(A)	104,2 dB(A)

Mit zunehmender Druckfestigkeit des Betons sank die beobachtete durchschnittliche Lautstärke bei der Bearbeitung. Für die Betonfestigkeit C25/30 wurde bei $v = 10 \text{ mm/s}$ und $d = 10 \text{ mm}$ eine durchschnittliche Lautstärke von 107,3 dB(A) ermittelt, für die Betonfestigkeit C30/37 waren es 104,2 dB(A) (s. Tabelle 16). Die Differenz zwischen den beiden Betondruckfestigkeiten liegt somit bei 3,1 dB(A).

In den Ergebnissen wurde ersichtlich, dass anhand der Versuche keine Unterschiede in der Lärmemission zwischen Gegenlauffräsen und Gleichlauffräsen im Beton aufgezeigt werden konnten (s. Abb. 81). Da die Kurven der Schallpegelmessung deckungsähnlich sind, wurde der Durchschnittswert betrachtet, um den Einflussfaktor der Heterogenität des Betons außer Acht zu lassen. Hierbei wurde für beide Drehrichtungen ein Durchschnittswert von ca. 103,8 dB(A) ermittelt. Die rechnerische Differenz von 0,02 dB(A) zwischen beiden Durchschnittswerten ist als vernachlässigbar klein zu betrachten und liegt im Bereich der Messgenauigkeit.

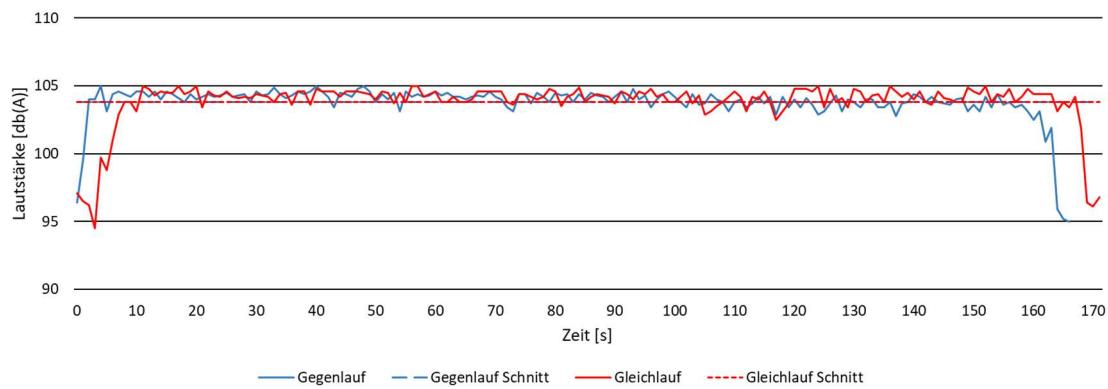


Abbildung 81: Schallpegelmessung Vergleich Gegenlauffräsen und Gleichlauffräsen, erster Demonstrator mit Vorschub $v = 5 \text{ mm/s}$, Zustellung $d = 15 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C30/37

Abweichend von den Resultaten zum Einfluss der Laufrichtung besitzt die Drehrichtung einen Einfluss auf die durchschnittliche Schallemission. Der durchschnittliche Schallpegel während des Bearbeitungsvorgangs mit Demonstrator 2 liegt im gegendrehenden Betrieb um 0,8 dB bis 1,5 dB niedriger als im gleichdrehenden Betrieb (s. Abb. 82).

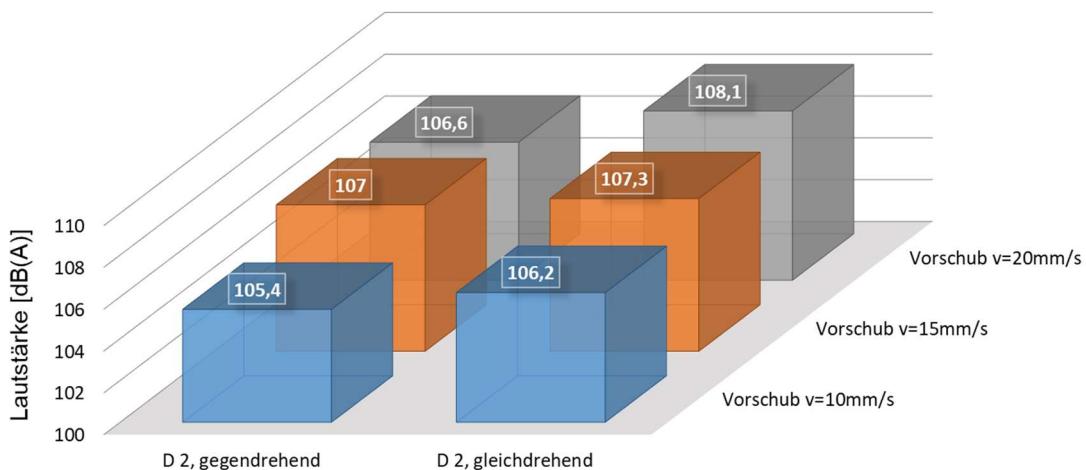


Abbildung 82: Durchschnittliche Schallpegelmessungen Demonstrator 2, gegendrehender zu gleichdrehender Betrieb, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

5.1.8 Ergebnisse der Oberflächenqualitätsmessung

Die Oberflächenqualität ist von zwei verschiedenen Blickwinkeln her relevant für die Innenkantendekontamination. Zum einen geben Oberfläche und eventuelle Rückstände Aufschluss über die Kontaminationsfreiheit, da nicht entferntes Material immer noch Kontamination enthalten kann. Zum anderen wird nach dem Bearbeitungsvorgang der Restbeton freigemessen. Für diese Freimessung ist eine möglichst plane Fläche von Vorteil. Dies erhöht die Genauigkeit bei der Freimessung. In Abbildung 83 ist exemplarisch ein Laserscan eines durchgeföhrten Betonabtrags dargestellt.

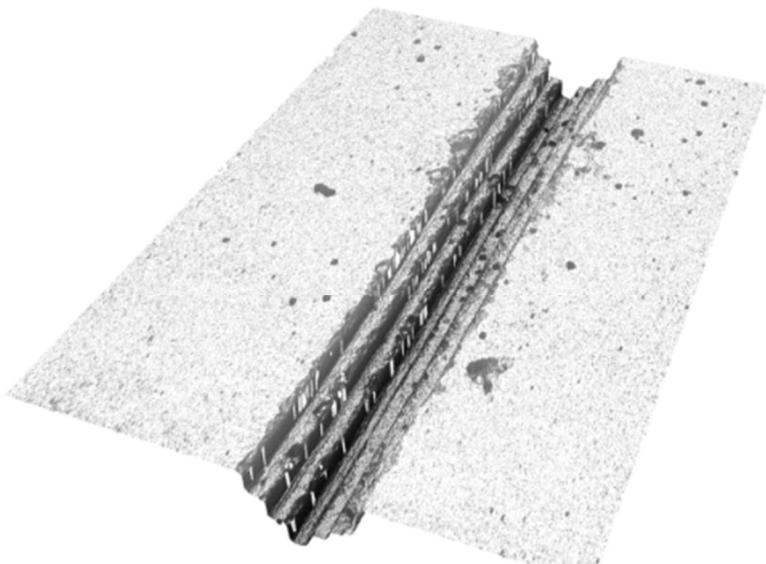


Abbildung 83: Stufenförmiger Betonabtrag im Zuge der Versuchsreihen

Ziel ist die möglichst vollständige Entfernung des Betons, hierbei geben die Betonrückstände darüber Aufschluss, wie geeignet der Fräsvorgang ist. Bei den verwendeten Demonstratoren formten sich diese Rückstände meist als sogenannte Stege aus. Diese sind abhängig vom Diamantscheibenabstand, der Betonfestigkeit, der Vorschubgeschwindigkeit und Zustellung sowie Lauf- und Drehrichtung und bestehen aus Betonrückständen, die zwischen den Trennscheiben zurückbleiben. Deren Reduzierung war ein Ziel der vorliegenden Maschinenentwicklung. Neben den Stegen bestehen Rückstände in Diamantscheibenrichtung, diese sind jedoch bei durchweg allen Demonstratoren im Profil der Trennscheiben abgetragen und es waren diesbezüglich über alle durchgefahrenen Versuchsreihen keine Probleme feststellbar. Wenn es beim

Abtrag zum Ausfall in Vorschubrichtung kam, wurde das Komplettsystem vom Betonmaterial gestoppt, ohne Qualitätsverluste an der Fräskante zu verursachen. Dies ermöglichte eine klare Erkennbarkeit des Punktes, bis zu dem ein Abtrag in gleichbleibender Qualität stattgefunden hatte.

Im Oberflächenlaserscan des Profils von Demonstrator 1 (s. Abb. 84) zeigt sich der Aufbau der fünf Diamantscheiben des Werkzeugs. Die äußeren Scheiben kamen bei der horizontalen Anwendung mit der Oberfläche des Betons in Kontakt aufgrund der Zustellung. Die mittlere und die innere Scheibe sorgten für die treppenförmige Abstufung des Profils. In senkrechter Richtung in Zustellungsrichtung ist die bearbeitete Fläche glatt und leicht zur Werkzeugmitte geneigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Diamantscheiben bei einem längeren Kontakt zum Betonumfeld weiterhin in geringem Umfang abtragen. Die eigentlichen horizontalen Abtragsflächen weisen die typische Struktur von abgetragenem Beton auf und ähneln Bruchflächen.

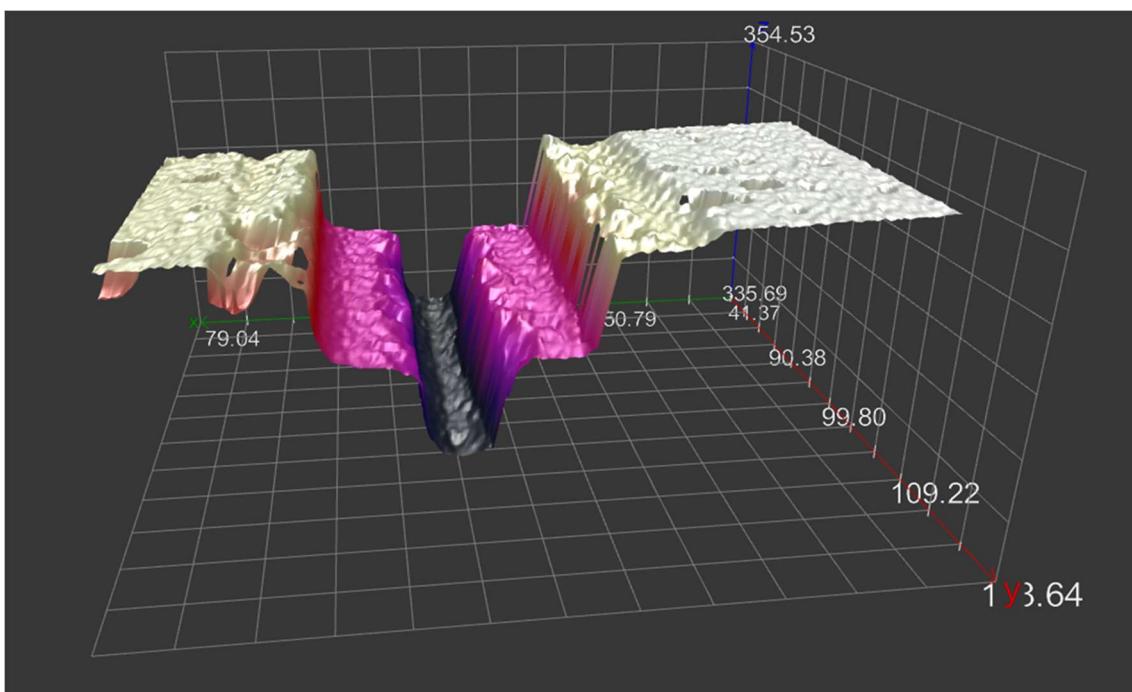


Abbildung 84: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch Demonstrator 1, gleichdrehend

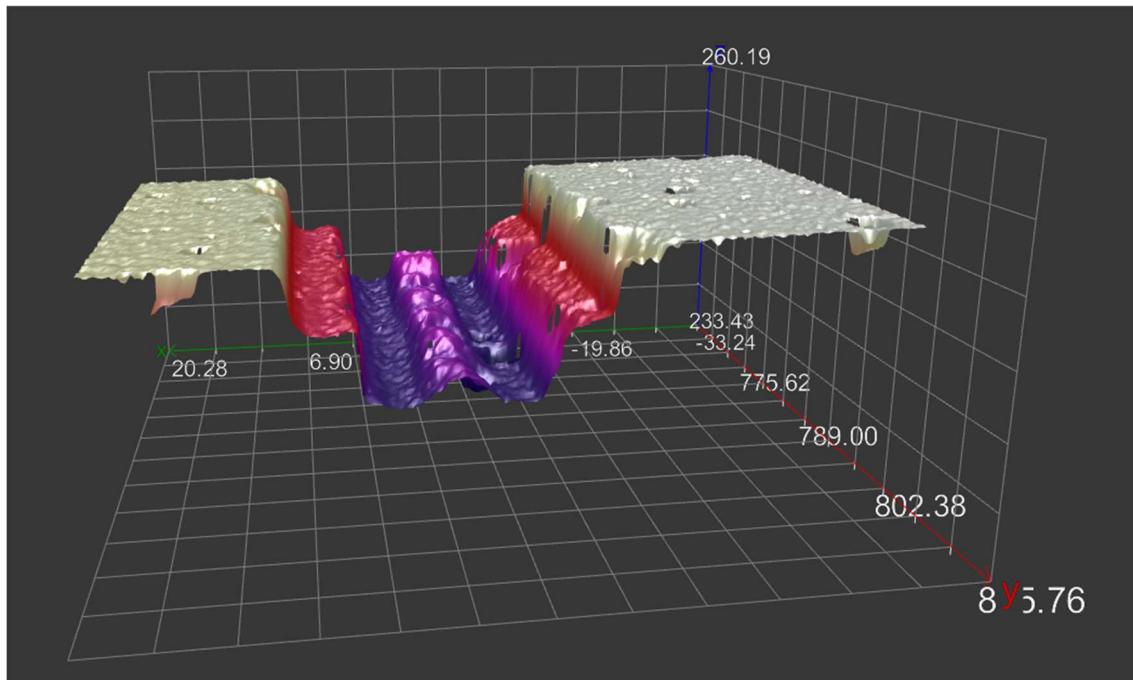


Abbildung 85: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch Demonstrator 2, gegendrehend

Demonstrator 2 zeichnet sich durch insgesamt 6 Diamantscheiben aus. Diese erzeugten eine Betonabtragsstruktur, die von der mit Demonstrator 1 (mit 5 Diamantscheiben) erzeugten abweicht und vereinfacht als achsensymmetrisch beschrieben werden kann. Im gegendrehenden Betrieb (s. Abb. 82) zeigen beide Seiten des Profils einen treppenförmigen Aufbau, getrennt durch einen Steg aus Restbeton. Die vertikalen Flächen sind leicht geneigt mit einer glatteren Oberfläche als die der horizontalen Abtragsflächen. Die horizontalen Flächen zeigen bruchflächenähnliche Oberflächen, diese weisen jedoch eine eher ebenmäßige Gesamtfläche aus.

Im gleichdrehenden Betrieb ist die grobe Abtragsstruktur ähnlich. Unterschiede sind in der Ausprägung des Restbetonstegs zwischen den inneren Diamantscheiben zu erkennen. Dieser ist deutlich flacher und weniger präsent ausgeprägt. Die leichte Neigung der vertikalen Schnittflächen bleibt konstant, ebenso die bruchflächenähnliche Horizontalausprägung (s. Abb. 86).

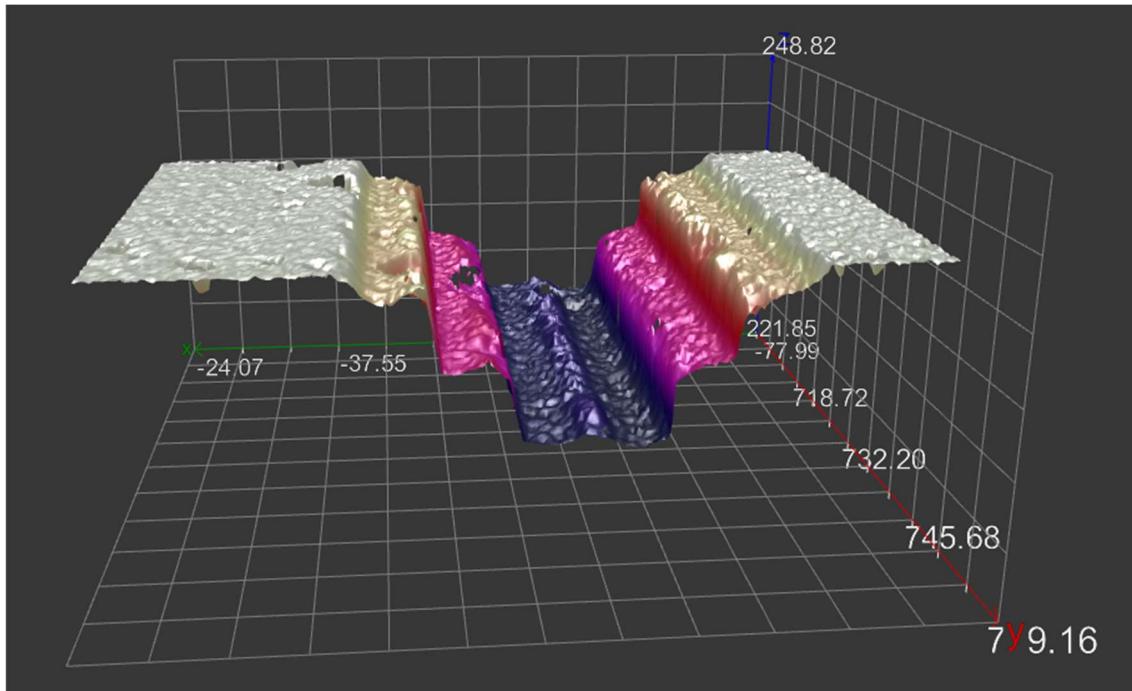


Abbildung 86: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch Demonstrator 2, gleichdrehend

Die Oberflächenstruktur, die durch Demonstrator 3 erreicht wurde, ähnelte vom Aufbau her den Ergebnissen von Demonstrator 1 (vgl. Abb. 84 und 86), da wiederum fünf Diamantscheiben verwendet werden. Analog zu den anderen Demonstratoren ergibt sich eine ungefähre Symmetrie in Vorschubrichtung und ein treppenförmiger Aufbau.

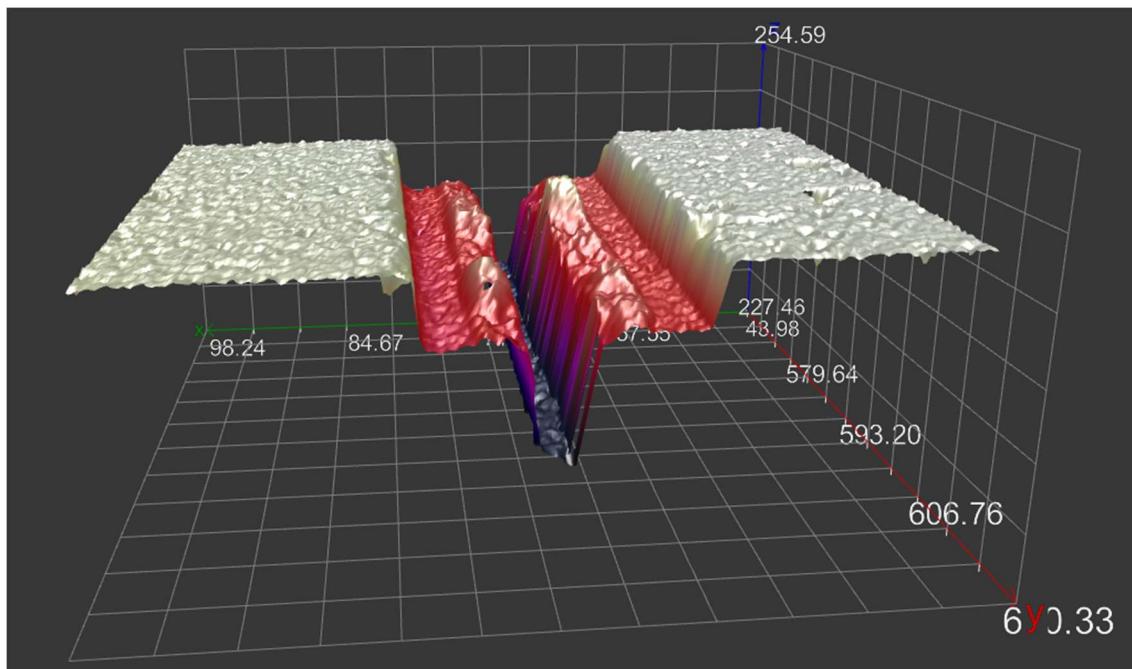


Abbildung 87: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch Demonstrator 3, gegendrehend

Charakteristisch für das Laserscanprofil von Demonstrator 3 ist eine markante Mittelpur, die schmäler ausfällt und eine stärkere Neigung an den vertikalen Schnittflächen aufweist als ein Abtrag mit Demonstrator 1. Zwischen der inneren und den zwei mittleren Scheiben sind erhöhte Restbetonstege zu erkennen. Die horizontalen Bearbeitungsflächen sind ebenmäßig und gleichen der Oberflächenstruktur des unbearbeiteten Betons (s. Abb. 87).

Der konventionelle Betonfräser erzielte eine gute Oberflächenqualität in der Ebene, jedoch wird deutlich, dass der Betonfräser nicht für Innenkanten ausgelegt ist, da im Querschnitt keine V-Form zu erkennen ist (s. Abb. 88). Aufgrund des einfachen Aufbaus, charakterisiert durch eine einzelne breite Scheibe, findet keine Stegbildung statt. Die Qualität der Oberfläche ist sehr gut. Da der Fräser jedoch nicht zum Anwendungsfall Innenkante passt, ist dies kein Vorteil. Die unterschiedlichen getesteten Vorschubgeschwindigkeiten ergeben wenig bis keine Unterschiede im Querprofil. Mit diesem Vergleichswerkzeug ist ein Abtrag nur bis Zustellung $d = 5$ mm möglich und vom Hersteller vorgesehen. Ein Vergleich bei $d = 10$ mm konnte daher nicht durchgeführt werden.

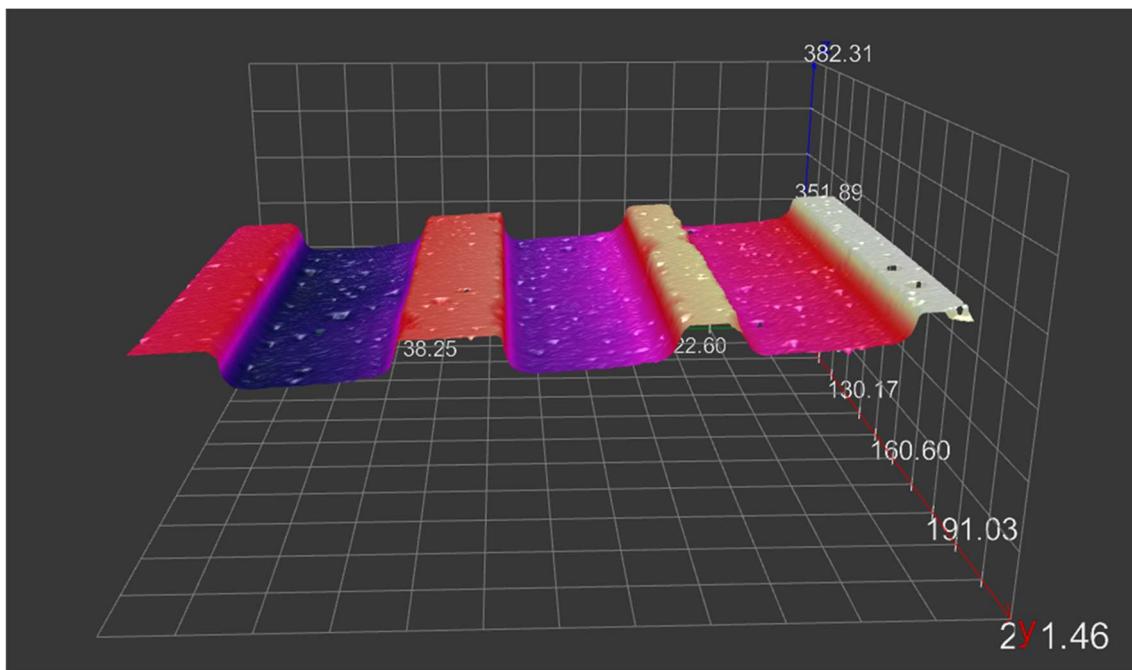


Abbildung 88: Laserscanprofil vom Betonabtrag durch den konventionellen Betonfräser mit $v = 10$ mm/s, $v = 15$ mm/s und $v = 20$ mm/s bei konstanter Zustellung $d = 5$ mm in Beton C25/30

Die Vorschubgeschwindigkeit hat relativ große Auswirkungen auf die Oberflächenstruktur, insbesondere auf die Stegbildung des Restbetons. Abb. 89 veranschaulicht die Auswirkungen einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit auf die Restbetonstegbildung. Eine Erhöhung von $v = 10 \text{ mm/s}$ auf $v = 15 \text{ mm/s}$ ergibt noch keine signifikanten Restbetonsteg-Ausbildungen, bei $v = 20 \text{ mm/s}$ hingegen sind die Betonstege so beständig, dass es zwischen den inneren Diamantscheiben teilweise zu keinem Betonabtrag mehr kommt und der Betonsteg auf dem ursprünglichen Oberflächenniveau bleibt.

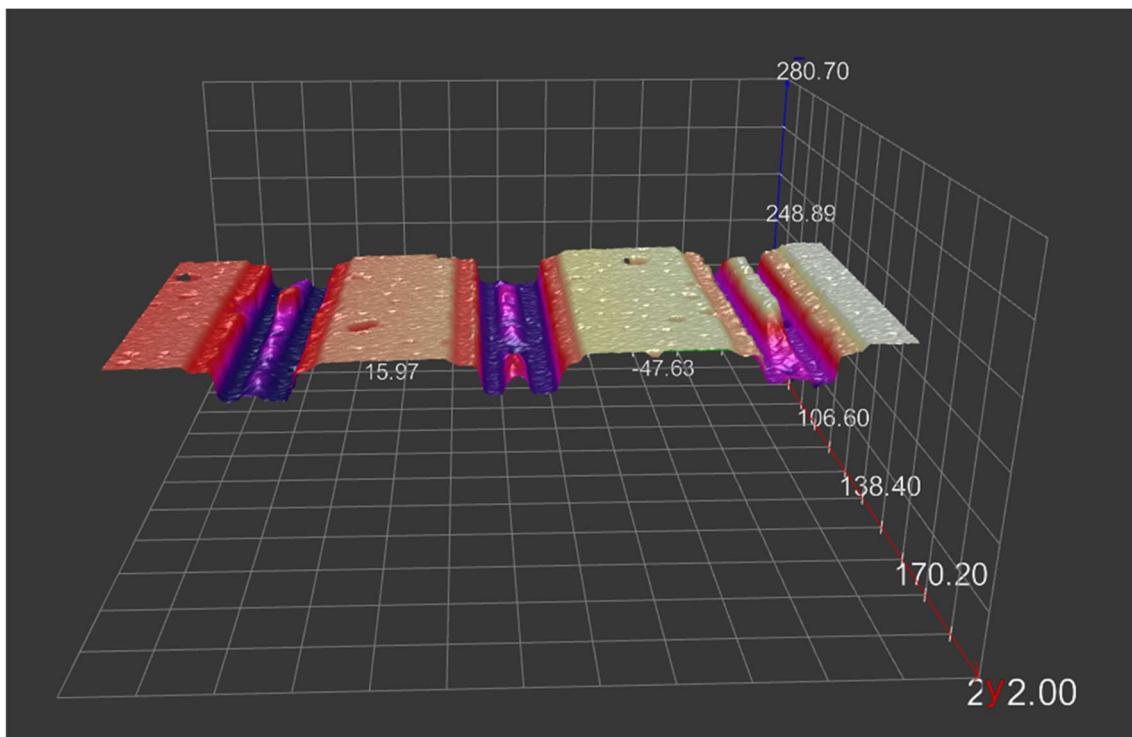


Abbildung 89: Laserscanprofile vom Betonabtrag durch Demonstrator 2, gegendrehend; Links $v = 10 \text{ mm/s}$, Mitte $v = 15 \text{ mm/s}$, Rechts $v = 20 \text{ mm/s}$

Der Vergleich der bearbeiteten Betonstrukturen unter dem Aspekt der Betonfestigkeit ergab, dass der höherfeste Beton C30/37 einen ebenmäßigeren Fräsprozess ermöglicht, der eher einem Schneiden gleicht. Der Beton der niedrigeren Festigkeitsklasse bildete dagegen eine eher gebrochene Oberfläche aus (s. Abb. 90). Die einzelnen Fräsrillen, die durch die Diamantscheiben erzeugt werden, sind bei C30/37 rundlicher ausgebildet und es ist ein schwerer differenzierbarer Bereich zwischen vertikaler und horizontaler Schnittfläche

festzustellen. Die mittlere Diamantscheibe nimmt im weicheren Beton C25/30 eine dominantere Position ein. Die Fräsrille ist im Vergleich zu den äußeren Scheiben daher etwas tiefer ausgeprägt, wohingegen die Diamantscheiben und die zugehörigen Fräsrillen im härteren Beton gleichmäßiger belastet werden und somit die Werkzeugabtragsgeometrie eingehalten wird. Oberflächentechnisch zeigt sich hier, dass eine höhere Betonfestigkeit eine ebenmäßigere Bearbeitungsfläche hervorbringt und weniger Bruchflächen entstehen.

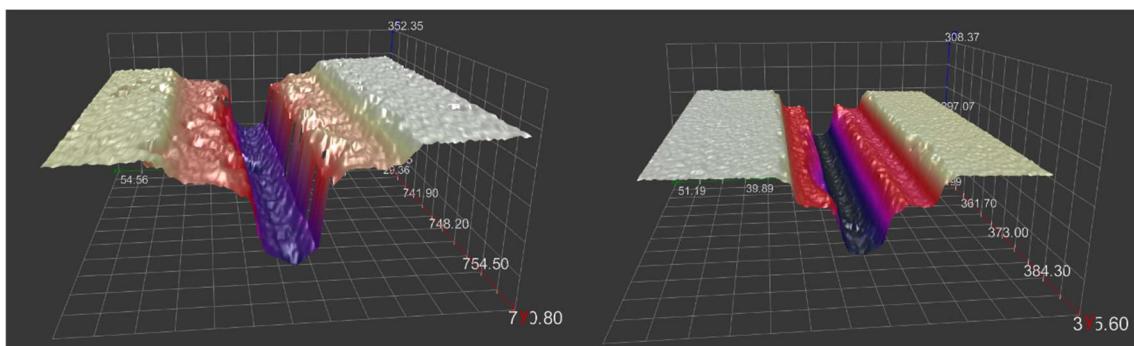


Abbildung 90: Laserscanprofile vom Betonabtrag durch Demonstrator 1 ($v = 10 \text{ mm/s}$; $d = 5 \text{ mm}$), links: Betonfestigkeitsklasse C25/30, rechts: Betonfestigkeitsklasse C30/37

Die Änderung der Vorschubrichtung zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenstruktur. Dies ist bei den Laserscanprofilen aller gleichdrehenden Demonstratoren gleichermaßen zu erkennen, wie hier in Abb. 91 für Demonstrator 2 und in Abb. 92 für Demonstrator 1 gezeigt.

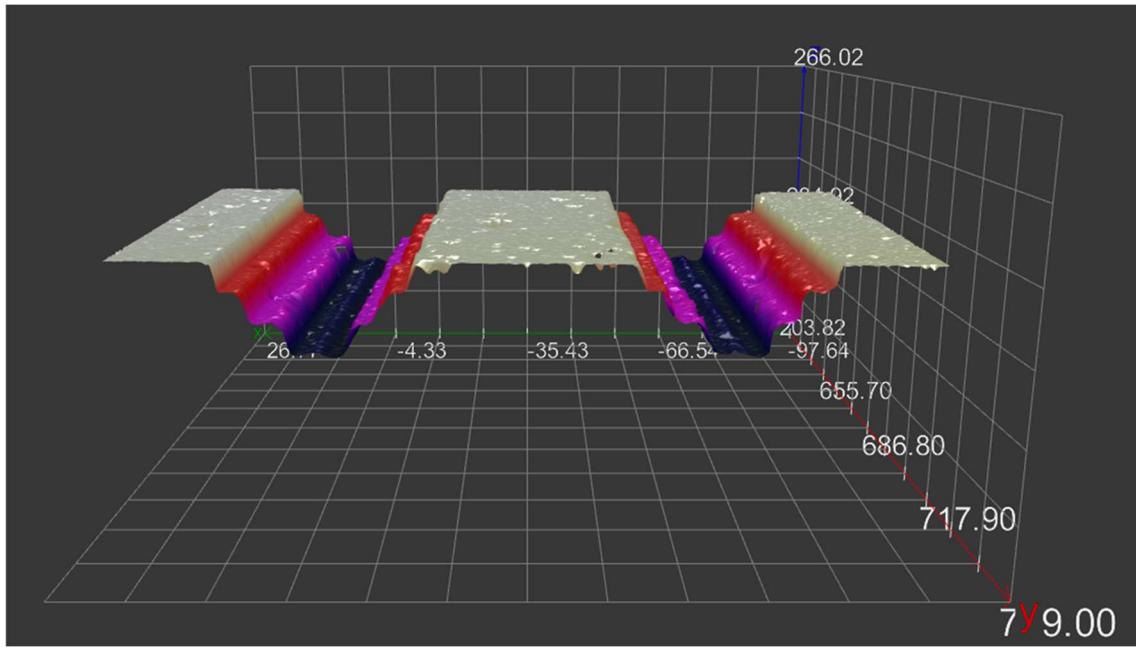


Abbildung 91: Laserscanprofile vom Betonabtrag durch Demonstrator 2 ($v = 15 \text{ mm/s}$; $d = 15 \text{ mm}$, C25/30), links: gegenläufig, rechts gleichläufig

Ein Einfluss der Anzahl der Diamantscheiben auf die Oberflächenstruktur bei Änderung der Vorschubrichtung konnte nicht nachgewiesen werden. Da die Vorschubrichtung der Diamantscheiben bei gegendrehenden Werkzeugvarianten unterschiedlich ausfällt, wird der Getriebeeinfluss bzw. die Drehrichtung separat betrachtet, um eventuelle Einflüsse auszuschließen und eindeutig identifizieren zu können.

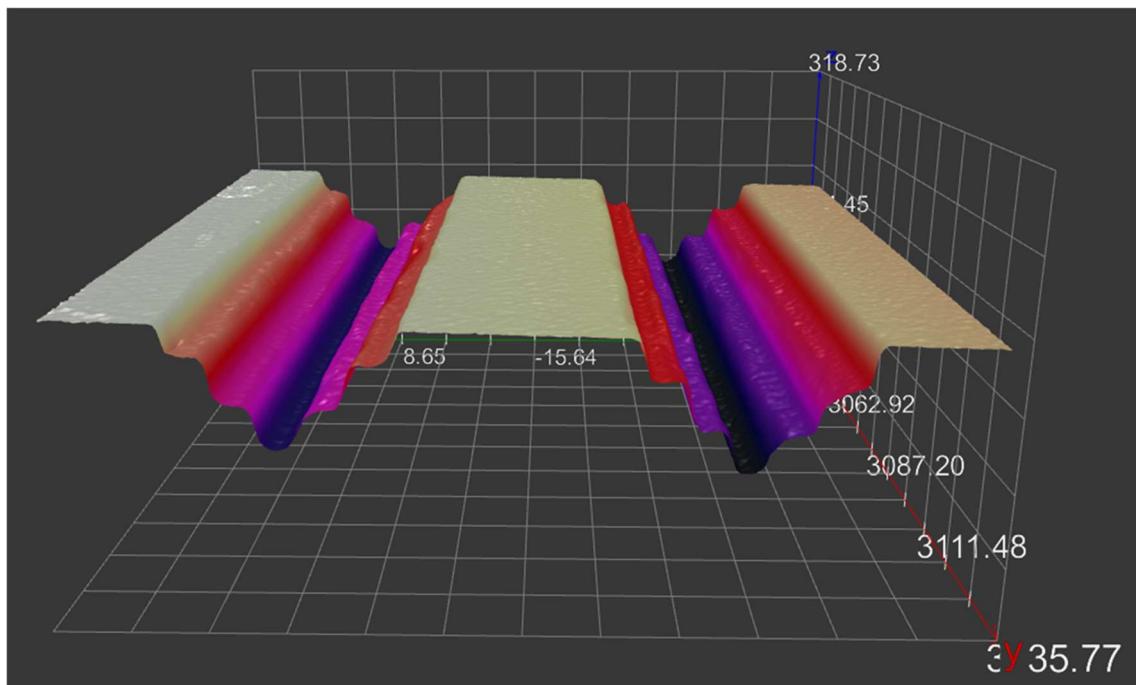


Abbildung 92: Laserscanprofile vom Betonabtrag durch Demonstrator 1 ($v = 15 \text{ mm/s}$; $d = 15 \text{ mm}$, C30/37), links: gleichläufig, rechts gegenläufig

Der Einfluss der Scheibendrehrichtung auf die Oberflächenstruktur und Oberflächenqualität (vereinfacht als Getriebeeinfluss bezeichnet) ist in Abb. 93 dargestellt. Die Unterschiede sind deutlich zu erkennen.

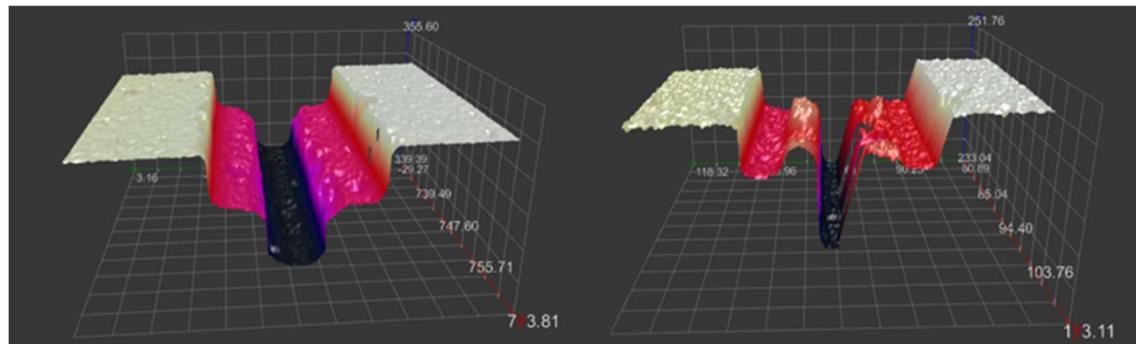


Abbildung 93: Laserscanprofile vom Betonabtrag ($v = 10 \text{ mm/s}$; $d = 10 \text{ mm}$, C25/30), links: Demonstrator 1 (gleichdrehend), rechts Demonstrator 3 (gegendrehend)

Beim Vergleich der Demonstratoren mit fünf Scheiben (Demonstrator 1 gleichdrehend, Demonstrator 3 gegendrehend) zeigt sich eine deutlich ebenmäßiger Struktur beim Abtrag durch den gleichdrehenden Demonstrator. Die horizontalen Schnittflächen sind beim gleichdrehenden System deutlich glatter und weniger bruchflächenartig. Die vertikalen Schnittflächen haben eine geringere Neigung und es kommt allgemein zwischen den Schneideblättern zu weniger Restbetonstegen als beim gegendrehenden System. Als neu identifiziertes Problem weist die in sich gegendrehende Variante eine geringere Achsensymmetrie auf, speziell die Restbetonstege zwischen der inneren Diamantscheibe und den darauf folgenden äußeren Diamantscheiben brechen unregelmäßig und nicht planbar oder symmetrisch.

Die Aussagen zum Einfluss der Scheibendrehrichtung auf die Oberflächenstruktur und Oberflächenqualität wurden am zweiten Nachweismodell (Demonstrator 2) überprüft.

Die Symmetrie ist auch beim gleichdrehenden zweiten Demonstrator deutlich stärker als im gegendrehenden Betrieb ausgeprägt (s. Abb. 94). Die vertikalen Schnittflächen weisen wenig Unterschiede auf und ähneln sich. Die horizontalen Schnittflächen sind, analog zum Vergleich zwischen Demonstrator 1 und 3 (vgl. Abb. 93), ebenmäßiger und weniger bruchflächenartig als im gegendrehenden Betrieb. Die Restbetonstege sind ebenfalls deutlich markanter und es können vermehrt Ausbrüche aus der Betonmatrix festgestellt werden.

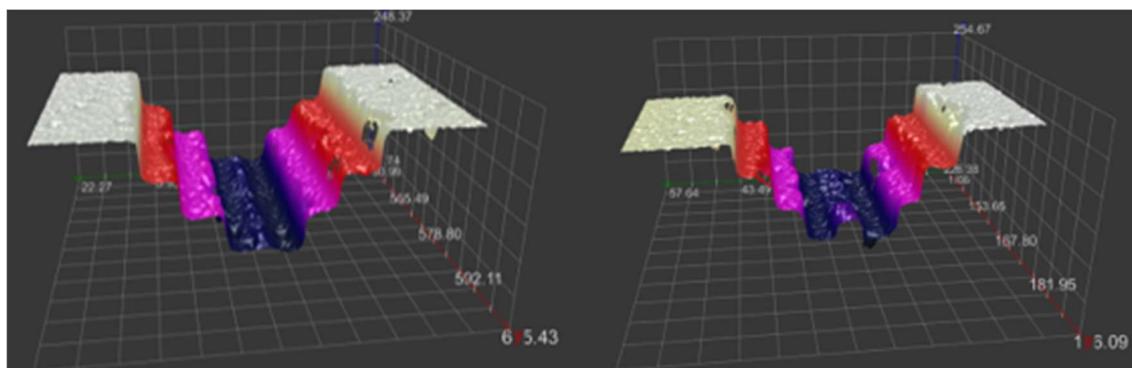


Abbildung 94: Laserscanprofile vom Betonabtrag ($v = 15 \text{ mm/s}$; $d = 15 \text{ mm}$, C25/30), links: Demonstrator 2 gleichdrehend, rechts Demonstrator 2 gegendrehend)

5.2 Analyse und Zwischenfazit

Kraftbedarf

Für die Auswertung der Reaktionskräfte wurden jeweils pro Demonstratorwerkzeug und pro Vorschubgeschwindigkeit die durchschnittlichen Reaktionskräfte in Y-Richtung für eine komplette Versuchsfahrt von 80 cm in Beton der Festigkeitsklasse C25/30 mit Zustellung $d = 5 \text{ mm}$ ermittelt. Demonstratortyp 3 erlaubte unter diesen Parametern aufgrund seiner Geometrie keine Messwerte, da bauartbedingt lediglich eine Zustellung von 10 mm möglich ist. Anschließend wurde aus den unterschiedlichen Ergebnissen ein zustellungsspezifischer Durchschnittswert gebildet (s. Tabelle 17 und Abb. 95).

Tabelle 17: Durchschnittliche Kraft in Y-Richtung, Zustellung $d = 5 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

Demonstratortyp	v=10 mm/s	Zunahme 10→15mm/s	v=15 mm/s	Zunahme 15→20mm/s	v=20 mm/s
Betonfräse konventionell	33,69 N	59%	53,73 N	14%	61,31 N
Demonstrator 1	7,01 N	43%	10,00 N	52%	15,20 N
Demonstrator 2, ggd.	14,80 N	36%	20,10 N	14%	22,84 N
Demonstrator 2, gld.	17,57 N	23%	21,59 N	45%	31,25 N
Demonstrator 3	(4,52 N)	-	-	-	-

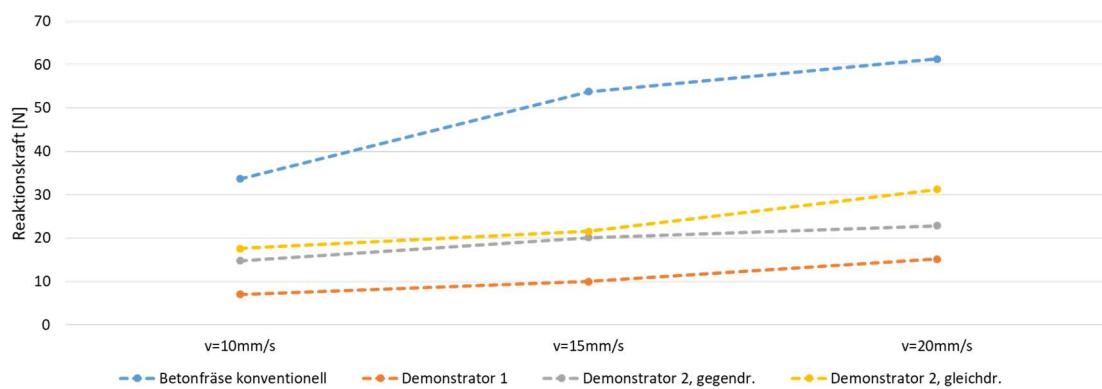


Abbildung 95: Durchschnittlicher Kraftbedarf der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, $d = 5 \text{ mm}$

Mathematische Auswertung der Kräfte bei d=5mm:

Beschreiben lässt sich der funktionale Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Kraftbedarf des Nutzers mittels linearer Regression.

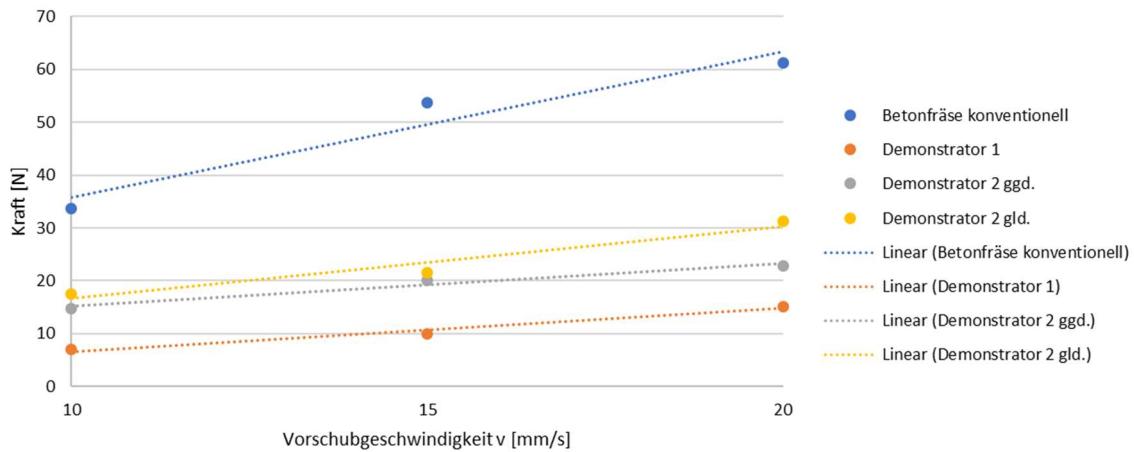


Abbildung 96: Lineare Trendlinie Kraftbedarf der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, $d = 5 \text{ mm}$

Betrachtung bei Zustellung $d=5\text{mm}$

- Betonfräse konventionell $y = 2,762x + 8,147 \quad R^2 = 0,937$
- Demonstrator 1 $y = 0,819x - 1,548 \quad R^2 = 0,976$
- Demonstrator 2 gegendrehend $y = 0,804x + 7,187 \quad R^2 = 0,967$
- Demonstrator 2 gleichdrehend $y = 1,368x + 2,950 \quad R^2 = 0,946$

Diese Versuchsreihen und Messwertanalyse wurden für eine erhöhte Vergleichbarkeit zudem mit einer Zustellung von $d = 10 \text{ mm}$ durchgeführt (s. Tabelle 18 und Abb. 96). Die übrigen Eingangsparameter sind identisch zur vorherigen Aufstellung. Der Demonstrator „Betonfräse konventionell“ konnte aufgrund seiner Geometrie keine Zustellung von $d = 10 \text{ mm}$ ermöglichen.

Tabelle 18: Durchschnittliche Kraft in Y-Richtung, Zustellung $d = 10 \text{ mm}$, Betonfestigkeit C25/30

Demonstratortyp	$v=10 \text{ mm/s}$	Zunahme $10 \rightarrow 15 \text{ mm/s}$	$v=15 \text{ mm/s}$	Zunahme $15 \rightarrow 20 \text{ mm/s}$	$v=20 \text{ mm/s}$
Betonfräse konventionell	-	-	-	-	-
Demonstrator 1	17,74 N	40%	24,77 N	51%	37,37 N
Demonstrator 2, ggd.	28,60 N	34%	38,44 N	16%	44,49 N
Demonstrator 2, gld.	39,11 N	26%	49,23 N	46%	72,04 N
Demonstrator 3	22,97 N	31%	30,01 N	39%	41,78 N

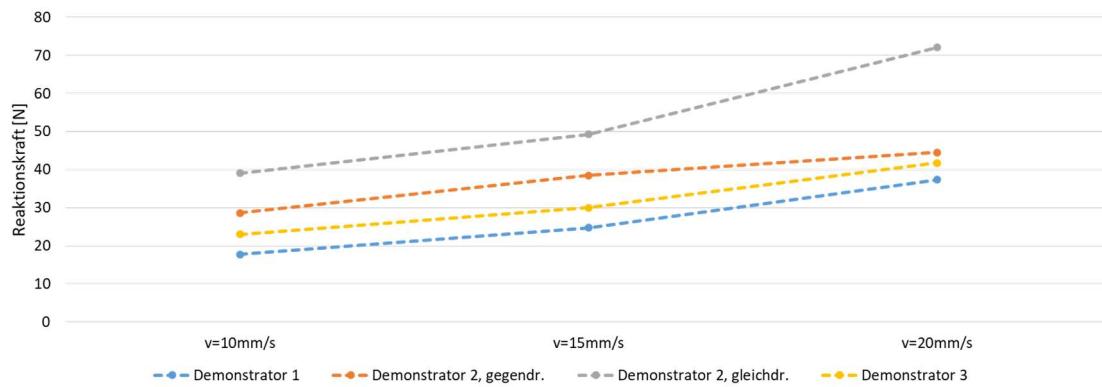


Abbildung 97: Durchschnittlicher Kraftbedarf der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, $d = 10 \text{ mm}$

Mathematische Auswertung der Kräfte bei $d=10\text{mm}$:

Beschreiben lässt sich der funktionale Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Kraftbedarf des Nutzers ebenfalls mittels linearer Regression. Der Kraftbedarf des Nutzers ist in diesen Fällen direkt abhängig zur Vorschubgeschwindigkeit.

Betrachtung bei Zustellung d=10mm

- Demonstrator 1 $y = 1,963x - 2,818 \quad R^2 = 0,974$
- Demonstrator 2 gegendrehend $y = 1,589x + 13,342 \quad R^2 = 0,981$
- Demonstrator 2 gleichdrehend $y = 3,293x + 4,065 \quad R^2 = 0,953$
- Demonstrator 3 $y = 1,881x + 3,372 \quad R^2 = 0,979$
-

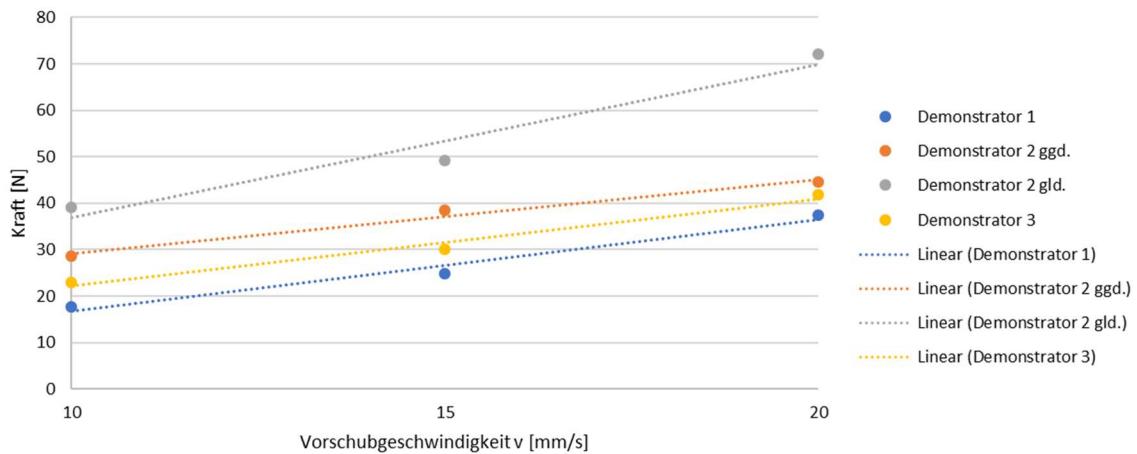


Abbildung 98: Lineare Trendlinie Kraftbedarf der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, d = 10 mm

Anschließend wurden die Zustellungs durchschnittswerte zu einem Gesamtwert zusammengefasst um die Werkzeuge zu bewerten. Da lediglich ein Vergleich innerhalb der Demonstratorengruppe stattfindet, wurde der Demonstrator mit den günstigsten Werten mit 10/10 bewertet, der ungünstigste mit 1/10. Werte dazwischen wurden interpoliert. Bei fehlenden Werten wurde der vorhandene Wert als Durchschnitt verwendet und ein Negativpunkt floss in die Bewertung ein (s. Tabelle 19).

Tabelle 19: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich der Kraft in Y-Richtung

Demonstratortyp	$\varnothing d = 5 \text{ mm}$	$\varnothing d = 10 \text{ mm}$	\varnothing Gesamt	Bewertung
Betonfräse konventionell	60,81 N	-	(60,81 N)	1/10
Demonstrator 1	10,74 N	26,63 N	18,69 N	10/10
Demonstrator 2, ggd.	19,25 N	37,18 N	28,22 N	6,15/10
Demonstrator 2, gld.	23,47 N	53,46 N	38,47 N	2/10
Demonstrator 3	-	31,59 N	(31,59 N)	3,78/10

Demonstrator 1 erfordert in der durchschnittlichen Betrachtung die geringste physische Kraft des Nutzers im Vergleich der Werkzeuge, die konventionelle Betonfräse hat den größten Kraftbedarf. Die vorteilhaften Ergebnisse von Demonstrator 1 können durch mehrere Faktoren erklärt werden. Zum einen zeigt der direkte Antrieb der Diamantscheiben im Vergleich zu bspw. Demonstrator 3 eine niedrigere erforderliche Kraft des Nutzers. Ebenfalls zeigt der Gebrauch von fünf Diamantscheiben und einem Antrieb (Demonstrator 1 und Demonstrator 3 – 1 x 1.900 Watt) einen niedrigeren Kraftbedarf als die Konfiguration mit sechs Diamantscheiben und zwei Antrieben (Demonstrator 2 gegenrehend und gleichdrehend – 2 x 1.1900 Watt). Im Vergleich zwischen Demonstrator 1 und der konventionellen Betonfräse wird deutlich, dass der Einsatz von Diamantscheiben deutlich kraftsparender ist als die Verwendung des zahnradförmigen Schleiftellers der konventionellen Betonfräse.

Die Auswirkungen der einzelnen Eingangsparameter auf den Ausgangsparameter Reaktionskraft wurden in Kapitel 5.1.1 dargestellt. Eine finale Auswertung aller Ausgangsparameter und deren Gewichtung findet in Kapitel 6 statt. Gleichermaßen gilt für die nachfolgenden Kapitel, die Auswirkungen wurden in Kapitel 5.1.1 bis 5.1.8 detailliert betrachtet.

Werkzeuggewicht

Die Gewichtsbewertung wurde für das Komplettsystem vorgenommen. Hierzu zählen der Antrieb bzw. die Antriebe, der Werkzeugkopf (Diamantscheiben bzw. Frässcheibe) und, falls vorhanden, die externe Schaltung und Elektronik. Die konventionelle Betonfräse weist mit ca. 4 kg das geringste Gewicht auf, Demonstrator 3 mit über 22 kg das höchste (s. Tabelle 20).

Tabelle 20: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich ihres Gewichts

Demonstratortyp	Gewicht des Systems	Bewertung
Betonfräse konventionell: Ein Antrieb, ein breites Fräsräder	4,05 kg	10,00/10
Demonstrator 1: Ein Antrieb, 5 Diamantscheiben, kein Getriebe	6,85 kg	8,20/10
Demonstrator 2: Zwei Antriebe, 6 Diamantscheiben (2x3), indirekter Antrieb	16,15 kg	4,01/10
Demonstrator 3: Ein Antrieb, 5 Diamantscheiben, Getriebe	22,20 kg	1,00/10

Das Gewicht der Werkzeuggesamtsysteme unterscheidet sich erheblich zwischen den verschiedenen Demonstratoren. Wie erwartet, führen der zusätzliche Antrieb und die zusätzliche Diamantscheibe bei Demonstrator 2 zu einem signifikant höheren Gewicht im Vergleich zu Demonstrator 1. Das Getriebesystem von Demonstrator 3 weist gegenüber Demonstrator 1 ein sehr hohes Gewichtsplus auf, da bisher keine Maßnahmen zur Gewichtsreduktion des Getriebes umgesetzt wurde. Die konventionelle Betonfräse weist durch ihren einfachen Aufbau und das niedrige Gewicht des Schleiftellers im Vergleich zu den mit fünf Diamantscheiben ausgestatteten Demonstratoren 1 und 3 das niedrigste Gewicht auf.

Abtragsleistung

Zur Bewertung der Abtragsleistung wurden die maximal mögliche Zustellung und die maximal mögliche Vorschubgeschwindigkeit bei maximaler Zustellung betrachtet. Die aufgestellten Bewertungspunkte wurden errechnet aus der maximalen Zustellung und der maximalen Vorschubgeschwindigkeit (s. Tabelle 21).

Die Abtragsleistung bildet sich aus der Zustellung (Eindringtiefe des Abtrags) und der Vorschubgeschwindigkeit (wie schnell das Werkzeug in Abtragsrichtung bewegt werden kann). Der Widerstand gegen den Vorschub ist stark abhängig von der Zustellung, je höher die Zustellung, desto größer der Widerstand (dargestellt in Kap. 5.1.4). Um eine möglichst hohe Abtragsleistung zu erzeugen, müssen Zustellung und Vorschubgeschwindigkeit möglichst hoch sein.

Die maximale Zustellung d_{max} [mm] wurde für die aufgestellte Bewertung doppelt gewichtet und zur maximalen Vorschubgeschwindigkeit v_{max} bei d_{max} [mm/s] addiert, da eine reine Aufsummierung von maximaler Vorschubgeschwindigkeit und Zustellung den Einfluss der maximalen Zustellung auf die maximale Vorschubgeschwindigkeit zu stark vernachlässigen würde. Dies kann damit begründet werden, dass die Zustellung und der Vorschub beide gleich relevant sind für den Abtrag, der Vorschub aber einen höheren Zahlenwert besitzt. Durch die Verdopplung des Zahlenwerts der Zustellung entsteht eine ausgeglichene Gewichtung zwischen Zustelltiefe und Vorschubgeschwindigkeit. Der errechnete Punktewert ist als einheitenslos zu betrachten und dient lediglich der anschließenden Bewertung.

Tabelle 21: Bewertung der Demonstratorwerkzeuge hinsichtlich Abtragsleistung

Demonstrator Typ	max. Zustellung d_{max}	Vorschub bei max. Zustellung [mm/s] v_{max} bei d_{max}	Vorschub bei max. Zustellung [m/h] v_{max} bei d_{max}	Errechneter Punktwert	Bewertung
Betonfräse konventionell	5 mm	20 mm/s	72 m/h	30	1/10
Demonstrator 1	13 mm	15 mm/s	54 m/h	41	7,6/10
Demonstrator 2, ggd.	15 mm	15 mm/s	54 m/h	45	10/10
Demonstrator 2, gld.	15 mm	15 mm/s	54 m/h	45	10/10
Demonstrator 3	11–12 mm	20 mm/s	72 m/h	43	8,8/10

Die Bewertung fand auf Grundlage der errechneten Punktwerte statt. Eine hohe Abtragsleistung und damit ein hoher errechneter Punktwert werden als positiv angesehen. Der höchste erreichte Punktwert wurde mit 10/10 bewertet, der niedrigste mit 1/10. Die Zwischenwerte wurden interpoliert. Demonstrator 2 erhielt in beiden Betriebsarten hierdurch die Bewertung 10/10, die konventionelle Betonfräse erzielte die niedrigste Zahl an Bewertungspunkten und damit 1/10. Aus der Interpolation der Untersuchung ergeben sich für Demonstrator 1 die Bewertung 7,6/10 und für Demonstrator 3 die Bewertung 8,8/10.

Staubmenge

Für die Auswertung der Staubmenge wurden pro Demonstratorwerkzeug und pro Vorschubgeschwindigkeit die maximalen Staubmengen für eine komplette Versuchsfahrt von 80 cm in Beton der Festigkeitsklasse C25/30 mit Zustellung $d = 5$ mm ermittelt. Demonstrator 3 erlaubte unter diesen Parametern aufgrund seiner Geometrie keine Messwerte. Anschließend wurde aus den unterschiedlichen Ergebnissen ebenfalls ein zustellungsspezifischer Durchschnittswert gebildet (s. Tabelle 22).

Tabelle 22: Maximale Staubmesswerte bei einer Zustellung von $d = 5 \text{ mm}$

Demonstratortyp	$v = 10 \text{ mm/s}$	$v = 15 \text{ mm/s}$	$v = 20 \text{ mm/s}$	\varnothing
Betonfräse konventionell	2934 mg/m ³	3282 mg/m ³	3078 mg/m ³	3098 mg/m³
Demonstrator 1	938 mg/m ³	1041 mg/m ³	1621 mg/m ³	1200 mg/m³
Demonstrator 2, ggd.	2522 mg/m ³	2703 mg/m ³	2726 mg/m ³	2650 mg/m³
Demonstrator 2, gld.	967 mg/m ³	1153 mg/m ³	1754 mg/m ³	1291 mg/m³
Demonstrator 3	270 mg/m ³	-	-	-

Die konventionelle Betonfräse lieferte die höchsten Staubwerte aufgrund der Geometrie ihres Schleiftellers. Die Demonstratorwerkzeuge mit fünf Diamantscheiben (Demonstrator 1 und 3) verursachten bei verschiedenen Zustellungen geringere Staubmenge als die Werkzeuge mit 6 Diamantscheiben (Demonstrator 2 ggd. Und gld.), was auf die niedrigere Diamantscheibenanzahl zurückzuführen ist. Bei Änderung der Vorschubgeschwindigkeit konnten wenig Regelmäßigkeiten festgestellt werden.

Nachstehend (s. Tabelle 23) wurden die Ergebnisse für Zustellung $d = 10 \text{ mm}$ bewertet, ebenfalls bei einer Versuchsfahrt durch 80 cm Beton der Festigkeitsklasse C25/30.

Tabelle 23: Maximale Staubwerte bei einer Zustellung von $d = 10 \text{ mm}$

Demonstratortyp	$v = 10 \text{ mm/s}$	$v = 15 \text{ mm/s}$	$v = 20 \text{ mm/s}$	\varnothing
Betonfräse konventionell	-	-	-	-
Demonstrator 1	1948 mg/m ³	1659 mg/m ³	1526 mg/m ³	1711 mg/m³
Demonstrator 2, ggd.	3832 mg/m ³	3619 mg/m ³	3755 mg/m ³	3735 mg/m³
Demonstrator 2, gld.	2642 mg/m ³	3287 mg/m ³	2500 mg/m ³	2810 mg/m³
Demonstrator 3	1413 mg/m ³	1891 mg/m ³	1018 mg/m ³	1441 mg/m³

Nachstehende Tabelle 23 fasst die Bewertung der Staubmengen zusammen. Diese erfolgte nach dem bereits vorgestellten Bewertungssystem. Die Zwischenwerte wurden interpoliert, der niedrigste Gesamtwert wurde mit 10/10 bewertet, der höchste mit 1/10. Für Demonstrator 2 gld. ergibt sich die Bewertung 6,9/10. Die konventionelle Betonfräse wurde aufgrund der hohen Messwerte (Staubmenge) und eines Fehlwerts mit 1/10 bewertet. Demonstrator 3 verursachte die niedrigste Staubmenge, jedoch wurde als Sanktion für eine nicht durchführbare Versuchsreihe die Bewertung 9/10 vergeben.

Tabelle 24: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich Staubmenge

Demonstratortyp	$\varnothing d = 5 \text{ mm}$	$\varnothing d = 10 \text{ mm}$	$\varnothing \text{ Gesamt}$	Bewertung
Betonfräse konventionell	3098 mg/m ³	-	(3098 mg/m ³)	1/10
Demonstrator 1	1200 mg/m ³	1711 mg/m ³	1455 mg/m ³	10/10
Demonstrator 2, ggd.	2650 mg/m ³	3735 mg/m ³	3192 mg/m ³	1/10
Demonstrator 2, gld.	1291 mg/m ³	2810 mg/m ³	2050 mg/m ³	6,9/10
Demonstrator 3	-	1441 mg/m ³	(1441 mg/m ³)	9/10

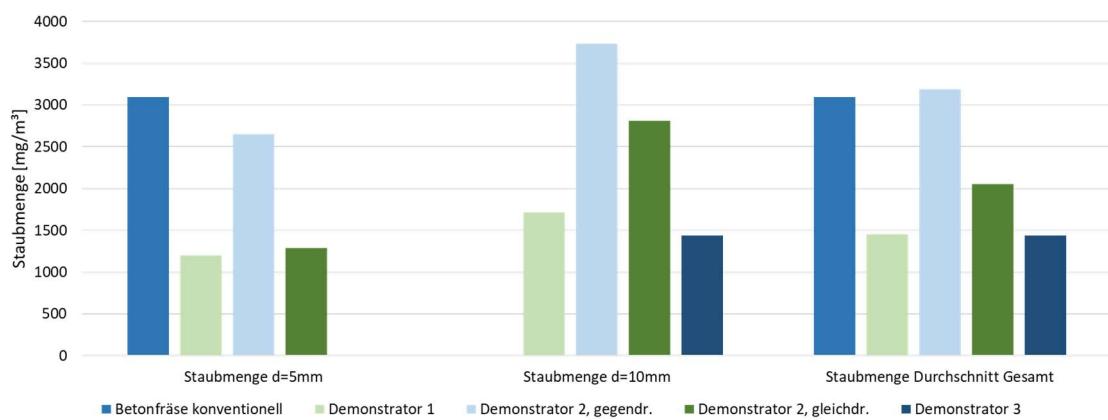


Abbildung 99: Staubmenge im Vergleich, Betonfestigkeit C25/30, Analyse aus Vorschub $v = 10 \text{ mm/s}$, $v = 15 \text{ mm/s}$ und $v = 20 \text{ mm/s}$

Demonstrator 1 erzeugte laut Betrachtung der Durchschnittswerte die geringste Staubmenge im Vergleich der Werkzeuge; die konventionelle Betonfräse erzeugte die größte Staubmenge. Bei Demonstrator 2 wurden höhere maximale

Staubmengen gemessen als bei Demonstrator 1 und 3, was durch die Verwendung von sechs anstatt fünf Diamantscheiben begründet ist. Des Weiteren zeigt Demonstrator 2 gegendrehend deutlich höhere Werte im Vergleich zu Demonstrator 2 gleichdrehend. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Stauberzeugung beim Abtrag in zwei Richtungen durch zwei Antriebe eine stärkere Zerkleinerung im mittleren Bereich zwischen den unterschiedlich drehenden Diamantscheiben hervorruft. Beim Vergleich zwischen Demonstrator 1 und Demonstrator 3 bei einer Zustellung von $d = 10 \text{ mm}$ konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden; hier liefert das gegendrehende System von Demonstrator 3 niedrigere Maximalwerte als das gleichdrehende System von Demonstrator 1. Dies ist auf die bessere Abstimmung der gegendrehenden Diamantscheiben durch das Getriebe zurückzuführen, da die Gegendrehung der mittleren Diamantscheibe für eine Symmetrie in Abtragsrichtung sorgt. Hinsichtlich der maximalen Staubmenge im Kontext des Betonabtrags bei Innenkanten kann daher die Aussage getroffen werden, dass ein gegendrehendes System ohne Getriebelösung, sprich ein punktsymmetrisches gegendrehendes System, die Staubmenge erhöht, während ein spiegelsymmetrisches gegendrehendes System mit Getriebe eine Verringerung der Staubmenge bewirkt.

Staubpartikelgröße

Die Bewertung der Staubpartikelgröße bzw. des Feinstaubanteils fand anhand der gemessenen Feinstaubanteile $< 2,5 \mu\text{m}$ und $< 10 \mu\text{m}$ statt. Dies sind gängige Größen zur Einschätzung der Gesundheitsauswirkungen von Staub (vgl. Kap. 5.1.5). Es wurden in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit und Demonstratortyp Durchschnittswerte gebildet. Die Prozentwerte des Werkzeugs „Betonfräse konventionell“ sind eingeklammert, da lediglich eine Zustellung von $d = 5 \text{ mm}$ untersucht werden konnte und daher nur ein eingeschränkter Vergleich zu den Demonstratorwerkzeugen möglich ist.

Tabelle 25: Darstellung der Feinstaubanteile < 2,5 µm der Demonstratoren bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten

Demonstrator	$v = 10 \text{ mm/s}$	$v = 15 \text{ mm/s}$	$(v = 20 \text{ mm/s})$	\emptyset
Betonfräse konventionell	(4,79 %)	(4,37 %)	(4,17 %)	(4,44 %)
Demonstrator 1	4,69 %	5,78 %	-	5,23 %
Demonstrator 2, ggd.	5,89 %	5,96 %	(6,03 %)	5,93 %
Demonstrator 2, gld.	7,07 %	5,96 %	(7,31 %)	6,52 %
Demonstrator 3	\emptyset 5,36 %	\emptyset 5,66 %	-	5,51 %

Tabelle 26: Darstellung der Feinstaubanteile < 10 µm der Demonstratoren bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten

Demonstratortyp	$v = 10 \text{ mm/s}$	$v = 15 \text{ mm/s}$	$(v = 20 \text{ mm/s})$	\emptyset
Betonfräse konventionell	(15,17 %)	(13,43 %)	(12,49 %)	(13,69 %)
Demonstrator 1	12,15 %	14,80 %	-	13,48 %
Demonstrator 2, ggd.	15,83 %	15,83 %	(16,05 %)	15,83 %
Demonstrator 2, gld.	18,82 %	21,20 %	(19,43 %)	20,01 %
Demonstrator 3	12,32 %	14,85 %	-	13,59 %

Nachfolgende Tabelle 27 fasst die Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich Staubpartikelgröße zusammen. In der Fraktion < 10 µm sind zwar Anteile der Fraktion < 2,5 µm enthalten, beide Fraktionen werden dennoch mit jeweils 50 % gewichtet („ \emptyset Gesamt“), um eine höhere Ausgewogenheit zu erhalten und die Fraktion > 2,5 µm zu repräsentieren. Der Demonstrator mit dem niedrigsten Feinstaubanteil erhielt die Bewertung 10/10, der Demonstrator mit dem höchsten Feinstaubanteil 1/10. Die restlichen Werte wurden interpoliert. Die konventionelle Betonfräse wurde für die Bewertungsskala nicht einbezogen, da technisch kein Abtrag von 10 mm möglich war. Daher wurde der konventionellen Betonfräse trotz der niedrigsten Feinstaubwerte eine 5/10 vergeben, um eine neutrale

Bewertung zu erhalten und eine Beeinflussung des Gesamtergebnisses auszuschließen.

Tabelle 27: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich Feinstaubanteil

Demonstratortyp	$\varnothing < 2,5 \mu\text{m}$	$\varnothing < 10 \mu\text{m}$	\varnothing Gesamt -punkte	Bewertung
Betonfräse konventionell	(4,44 %)	(13,69 %)	(9,07)	(5/10)
Demonstrator 1	5,23 %	13,48 %	9,36	10/10
Demonstrator 2, ggd.	5,93 %	15,83 %	10,88	6,50/10
Demonstrator 2, gld.	6,52 %	20,01 %	13,27	1/10
Demonstrator 3	5,51 %	13,59 %	9,55	9,54/10

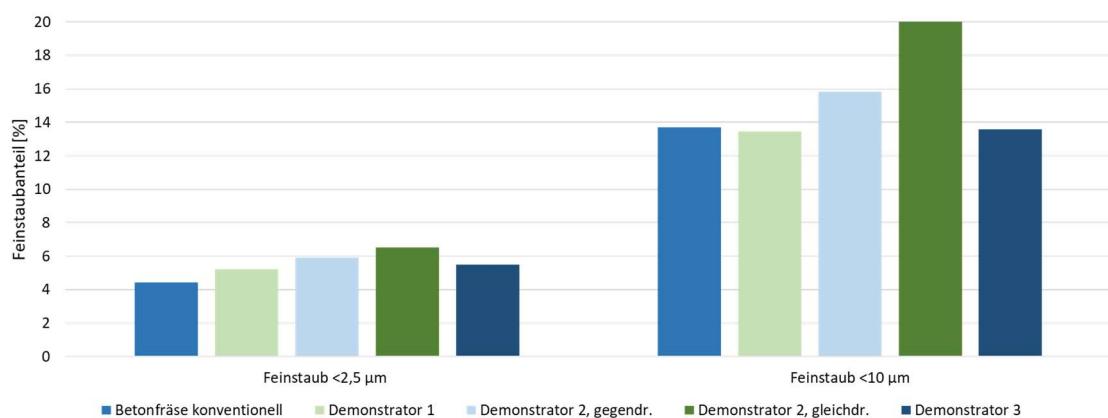


Abbildung 100: Feinstaubanteil im Vergleich, Betonfestigkeit C25/30, Analyse der Anteile von Fraktionen < 2,5 μm und < 10 μm

Die Auswertung der Durchschnittswerte zeigt, dass Demonstrator 1 den geringsten Feinstaubanteil und Demonstrator 2 im gleichdrehenden Betrieb den höchsten Feinstaubanteil aller untersuchten Werkzeuge erzeugt. Die Resultate des Feinstaubanteils von Demonstrator 1 und Demonstrator 3 lassen den Schluss zu, dass das gegendrehende System mit Getriebe höhere Feinstaubanteile erzeugt. Die symmetrische Gegendrehung der Diamantscheiben resultiert bei Demonstrator 3 in einer höheren Zerkleinerung

des abgetragenen Materials. Hierbei ist die Art der Gegendrehung entscheidend. Bei Demonstrator 2 sorgt ein gegendrehender Betrieb für niedrigere Feinstaubanteile im Vergleich zum gleichdrehenden Betrieb. Dies ist auf die Bauweise von Demonstrator 2 zurückzuführen, bei dem die Gegendrehung der Diamantscheiben seitenabhängig erfolgt. Dadurch kommt das abgetragene Material weniger in Berührung mit der gegendrehenden Seite des Werkzeugs, was eine weitere Zerkleinerung verhindert.

Vibrationsmessung

Die Vibrationen wurden in die drei Achsenrichtungen aufgezeichnet. Diese werden zu einem Vibrationsvektor zusammengefasst.

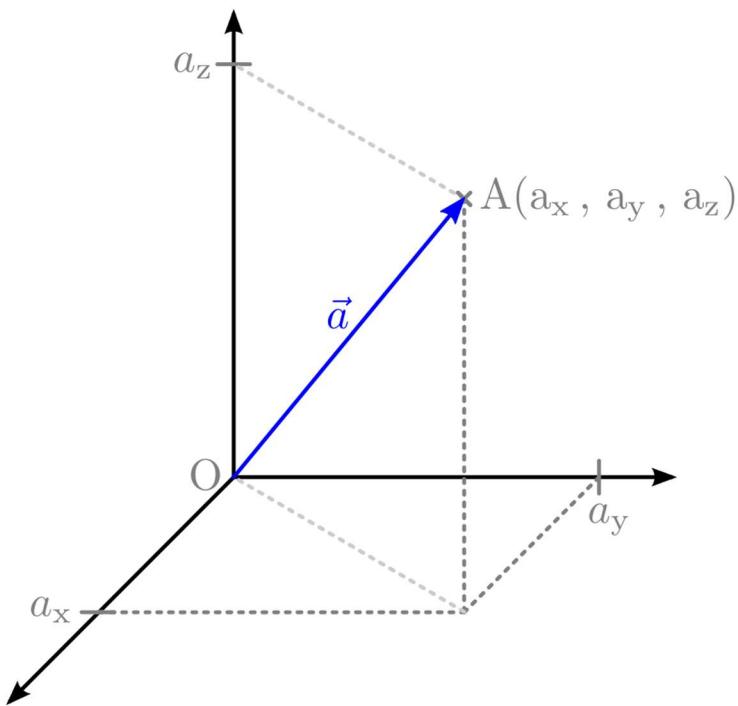


Abbildung 101: Vibrationsvektor im Raum mit X-, Y- und Z-Komponente

Diese Vorgehensweise wurde für jeden Demonstrator und unter den zuvor festgelegten Vorschubgeschwindigkeiten durchgeführt. Dargestellt sind die durchschnittlichen Vibrationsvektoren bei Zustellung $d = 5 \text{ mm}$ (s. Tabelle 28 und Abb. 102) und bei Zustellung $d = 10 \text{ mm}$ (s. Tabelle 29 und Abb. 104).

Ergebnisse bei d=5mm

Tabelle 28: Durchschnittliche Vibrationsvektoren der Demonstratoren bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten mit einer Zustellung von $d = 5 \text{ mm}$

Demonstratortyp	$v = 10 \text{ mm/s}$	$v = 15 \text{ mm/s}$	$v = 20 \text{ mm/s}$	$\bar{\sigma}$
Betonfräse konventionell	7,04 m/s ²	7,38 m/s ²	8,02 m/s ²	7,48 m/s²
Demonstrator 1	3,89 m/s ²	4,29 m/s ²	4,36 m/s ²	4,18 m/s²
Demonstrator 2, ggd.	1,87 m/s ²	2,01 m/s ²	1,98 m/s ²	1,95 m/s²
Demonstrator 2, gld.	1,91 m/s ²	1,89 m/s ²	2,09 m/s ²	1,96 m/s²
Demonstrator 3	2,14 m/s ²	-	-	-

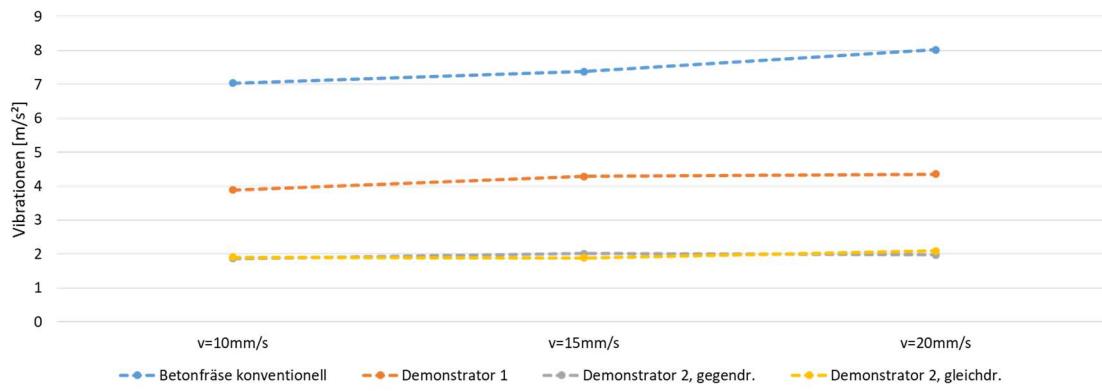


Abbildung 102: Durchschnittlicher Vibrationsbelastung der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, $d = 5 \text{ mm}$

Mathematische Betrachtung Vibration bei d=5mm:

- Betonfräse konventionell $y = 0,098x + 6,010$
- Demonstrator 1 $y = 0,047x + 3,475$
- Demonstrator 2 gegendrehend $y = 0,011x + 1,788$
- Demonstrator 2 gleichdrehend $y = 0,018x + 1,693$

Bei Aufstellung der linearen Regression wird deutlich, dass die Steigung der Graphen sehr niedrig ist und annähernd als Konstante interpretiert werden kann. Dies zeigt, dass die Vorschubgeschwindigkeit nur einen sehr geringen bis keinen

Einfluss auf die auftretenden Vibrationen hat. Die Vibrationen entstehen beim Betonabtrag durch die Diamantscheiben des Werkzeugs unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit. Die konventionelle Betonfräse weist aufgrund der Breite des Schleiftellers die höchsten Vibrationen auf im Vergleich zu den Diamantscheiben.

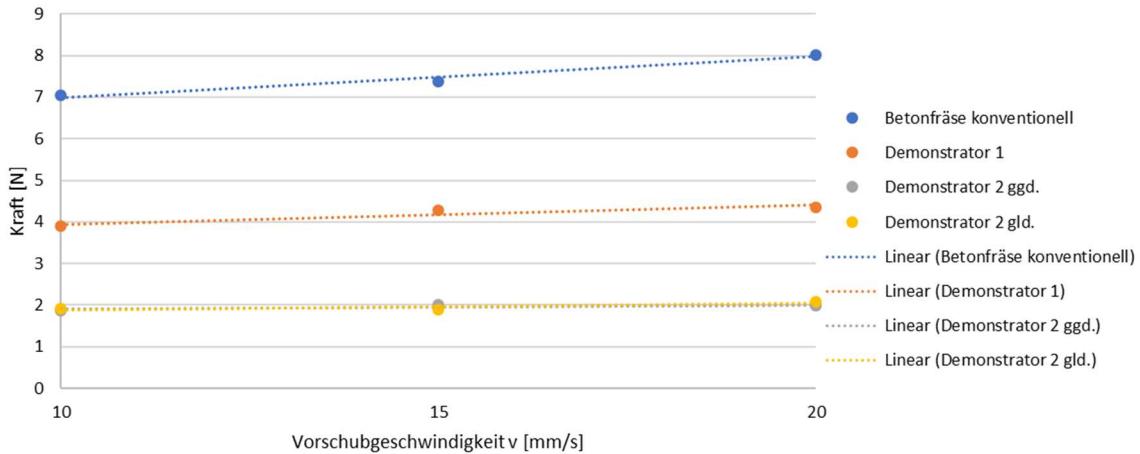


Abbildung 103: Lineare Trendlinie Vibration der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, $d = 5 \text{ mm}$

Ergebnisse bei $d=10\text{mm}$

Tabelle 29: Durchschnittliche Vibrationsvektoren der Demonstratoren bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten mit einer Zustellung von $d = 10 \text{ mm}$

Demonstratortyp	$v = 10 \text{ mm/s}$	$v = 15 \text{ mm/s}$	$v = 20 \text{ mm/s}$	$\bar{\sigma}$
Betonfräse konventionell	-	-	-	-
Demonstrator 1	$5,64 \text{ m/s}^2$	$6,21 \text{ m/s}^2$	$6,63 \text{ m/s}^2$	$6,16 \text{ m/s}^2$
Demonstrator 2, ggd.	$2,75 \text{ m/s}^2$	$3,05 \text{ m/s}^2$	$2,68 \text{ m/s}^2$	$2,83 \text{ m/s}^2$
Demonstrator 2, gld.	$2,13 \text{ m/s}^2$	$2,40 \text{ m/s}^2$	$2,41 \text{ m/s}^2$	$2,31 \text{ m/s}^2$
Demonstrator 3	$2,07 \text{ m/s}^2$	$2,69 \text{ m/s}^2$	$3,19 \text{ m/s}^2$	$2,65 \text{ m/s}^2$

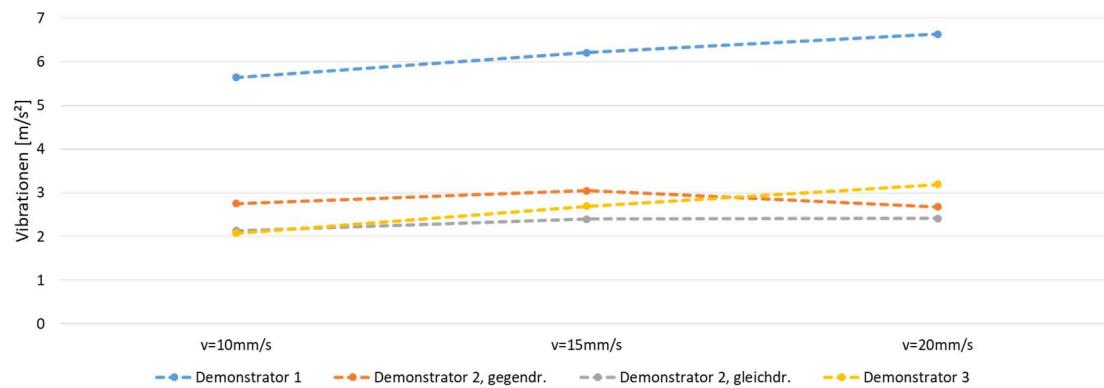
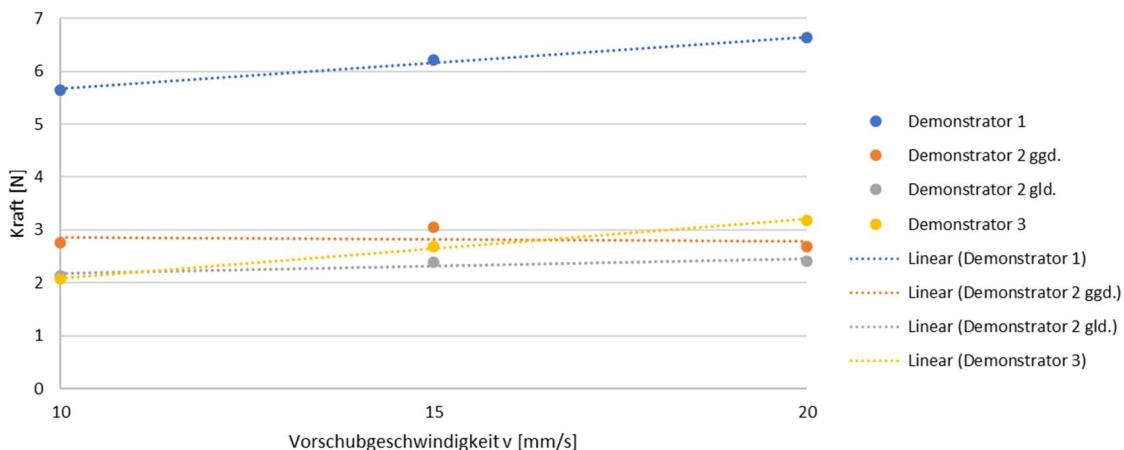


Abbildung 104: Durchschnittlicher Vibrationsbelastung der Werkzeuge bei steigender Vorschubgeschwindigkeit, $d = 10 \text{ mm}$

Mathematische Betrachtung Vibration bei $d=10\text{mm}$:

- Demonstrator 1 $y = 0,099x + 4,675$
- Demonstrator 2 gegendrehend $y = -0,007x + 2,9317$
- Demonstrator 2 gleichdrehend $y = 0,028x + 1,8933$
- Demonstrator 3 $y = 0,112x + 0,97$



Bei einer Zustellung von $d=10\text{mm}$ wird ebenfalls deutlich, dass die Steigung der Graphen sehr niedrig ist und annähernd als Konstante interpretiert werden kann. Dies bestätigt, dass die Vorschubgeschwindigkeit nur einen sehr geringen bis keinen Einfluss auf die auftretenden Vibrationen hat. Die Vibrationen entstehen beim Betonabtrag durch die Diamantscheiben des Werkzeugs unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit und verhalten sich bei beiden Zustellungstiefen konstant zur Vorschubgeschwindigkeit.

Die Bewertung der Vibrationsvektoren ist in Tabelle 29 dargestellt. Der niedrigste Gesamtdurchschnittswert wurde mit $2,14 \text{ m/s}^2$ bei Demonstrator 2 im gleichdrehenden Betrieb ermittelt, der höchste mit $7,48 \text{ m/s}^2$ bei der konventionellen Betonfräse.

Tabelle 30: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich der durchschnittlichen Vibrationsvektoren

Demonstratortyp	$\varnothing d = 5 \text{ mm}$	$\varnothing d = 10 \text{ mm}$	$\varnothing \text{ Gesamt}$	Bewertung
Betonfräse konventionell	$7,48 \text{ m/s}^2$	-	(7,48 m/s²)	1/10
Demonstrator 1	$4,18 \text{ m/s}^2$	$6,16 \text{ m/s}^2$	5,17 m/s²	2/10
Demonstrator 2, ggd.	$1,95 \text{ m/s}^2$	$2,83 \text{ m/s}^2$	2,39 m/s²	2,66/10
Demonstrator 2, gld.	$1,96 \text{ m/s}^2$	$2,31 \text{ m/s}^2$	2,14 m/s²	10/10
Demonstrator 3	-	$2,65 \text{ m/s}^2$	(2,65 m/s²)	4,33/10

Die Auswertung der Durchschnittswerte zeigt, dass Demonstrator 2 im gleichdrehenden Betrieb die geringsten und die konventionelle Betonfräse die größten Vibrationen aller untersuchten Werkzeuge erzeugt. Die starken Vibrationen der konventionellen Betonfräse sind auf die Breite des Schleiftellers zurückzuführen, der im Vergleich zu den schmalen Diamantscheiben signifikant größer ist. Demonstrator 2 zeigt in beiden Betriebsweisen deutlich geringere Vibrationsemissionen als Demonstrator 1 und Demonstrator 3. Der Grund ist, dass durch zwei Antriebsgeräte mit jeweils drei Diamantscheiben eine geringere Abtragsmenge pro Antriebsmaschine bearbeitet wird als bei Demonstrator 1 und 3, bei denen eine Antriebsmaschine fünf Diamantscheiben zur Bearbeitung nutzt. Im Vergleich von Demonstrator 1 und Demonstrator 3 bei einer Zustellung von $d = 10 \text{ mm}$ lässt sich feststellen, dass ein gegendrehender Mechanismus mit Getriebe niedrigere Vibrationsemissionen verursacht. In diesem Beispiel werden für Demonstrator 1 Vibrationsemissionen von $6,16 \text{ m/s}^2$ und für Demonstrator 3 lediglich $2,65 \text{ m/s}^2$ ermittelt. Des Weiteren lässt sich eine Abhängigkeit von der Art der Gegendrehung (zwei Antriebe oder Getriebe) feststellen. Beim Vergleich

der Dreharten bei Demonstrator 2 wird ersichtlich, dass bei einer Zustellung von $d = 10$ mm der gleichdrehende Betrieb zu höheren Vibrationsemissionen führt. Der gleichdrehende Betrieb verursacht hierbei $2,31 \text{ m/s}^2$, der gegendrehende Betrieb $2,83 \text{ m/s}^2$. Eine seitenabhängige Gegendrehung steigert in diesem Szenario die Vibrationsemissionen, bedingt durch den spezifischen Aufbau des Werkzeugs.

Schallpegel

Die Schallpegel wurden aus den durchschnittlichen Messergebnissen der Versuchsreihen gebildet. Tabelle 31 zeigt die Ergebnisse für die Zustellung von 5 mm. Für einen Vergleich der Werte ist die logarithmische Beziehung der Einheit Dezibel dB(A) zu beachten. Bei einer Zustellung von $d = 5$ mm zeigt sich, dass die konventionelle Betonfräse die niedrigsten Schallwerte aufweist. Bei der Ergebniszusammenstellung der Versuchsreihen mit Zustellung von $d = 10$ mm (s. Tabelle 32) wurde die konventionelle Betonfräse aus bautechnischen Gründen nicht einbezogen. Tabelle 33 gibt eine Übersicht über die Gesamtbewertung der Schallemissionen.

Tabelle 31: Durchschnittliche Schallpegel der Demonstratoren bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten mit einer Zustellung von $d = 5$ mm

Demonstratortyp	$v = 10 \text{ mm/s}$	$v = 15 \text{ mm/s}$	$v = 20 \text{ mm/s}$	\varnothing
Betonfräse konventionell	99,9 dB(A)	100,87 dB(A)	102,18 dB(A)	100,98 dB(A)
Demonstrator 1	105,20 dB(A)	107,43 dB(A)	108,29 dB(A)	106,97 dB(A)
Demonstrator 2, ggd.	105,40 dB(A)	107,00 dB(A)	106,60 dB(A)	106,33 dB(A)
Demonstrator 2, gld.	106,20 dB(A)	107,30 dB(A)	108,10 dB(A)	107,20 dB(A)
Demonstrator 3	107,20 dB(A)	-	-	-

Tabelle 32: Durchschnittliche Schallpegel der Demonstratoren bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten mit einer Zustellung von $d = 10 \text{ mm}$

Demonstratortyp	$v = 10 \text{ mm/s}$	$v = 15 \text{ mm/s}$	$v = 20 \text{ mm/s}$	\varnothing
Betonfräse konventionell	-	-	-	-
Demonstrator 1	107,30 dB(A)	108,90 dB(A)	109,30 dB(A)	108,50 dB(A)
Demonstrator 2, ggd.	106,00 dB(A)	106,20 dB(A)	106,60 dB(A)	106,27 dB(A)
Demonstrator 2, gld.	107,30 dB(A)	107,20 dB(A)	109,50 dB(A)	108,00 dB(A)
Demonstrator 3	107,20 dB(A)	107,00 dB(A)	107,70 dB(A)	107,30 dB(A)

Tabelle 33: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich der durchschnittlichen Schallpegel

Demonstratortyp	$\varnothing d = 5 \text{ mm}$	$\varnothing d = 10 \text{ mm}$	$\varnothing \text{ Gesamt}$	Bewertung
Betonfräse konventionell	100,98 dB(A)	-	(100,98 dB(A))	9/10
Demonstrator 1	106,97 dB(A)	108,50 dB(A)	107,74 dB(A)	1/10
Demonstrator 2, ggd.	106,33 dB(A)	106,27 dB(A)	106,30 dB(A)	10/10
Demonstrator 2, gld.	107,20 dB(A)	108,00 dB(A)	107,60 dB(A)	1,875/10
Demonstrator 3	-	107,30 dB(A)	(107,30 dB(A))	3,125/10

Die Auswertung der Durchschnittswerte zeigt, dass Demonstrator 2 im gegendrehenden Betrieb den geringsten und Demonstrator 1 den höchsten Schallpegel aller untersuchten Werkzeuge erzeugt. Die konventionelle Betonfräse zeigt den niedrigsten Wert (bei $d = 5 \text{ mm}$), was durch das Abtragssystem bedingt ist. Der signifikante Unterschied in den Schallpegeln von Stufenfräsern (Demonstrator 1 bis 3 erzielen $> 106 \text{ dB(A)}$ im Vergleich zur konventionellen Betonfräse ($< 101 \text{ dB(A)}$) verdeutlicht, dass die entwickelten Stufenfräser mit Diamantscheiben eine höhere Schallbelastung verursachen.

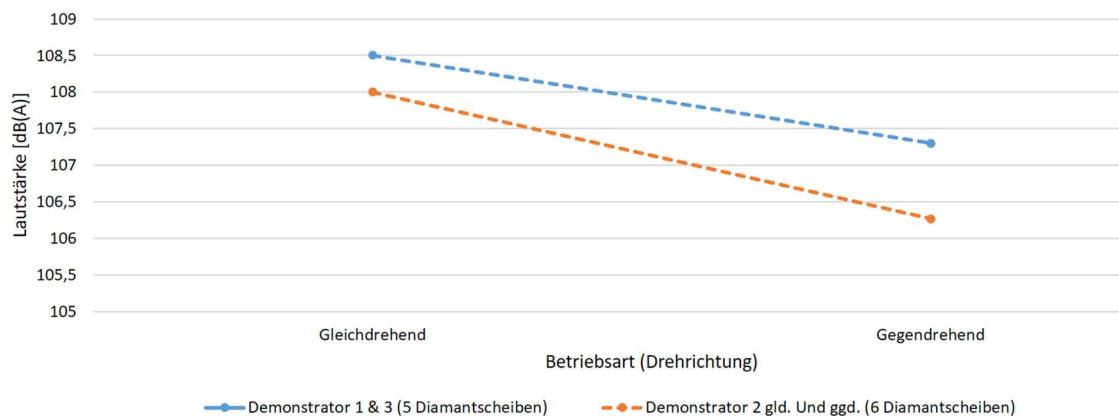


Abbildung 105: Auswirkung der Betriebsart der entwickelten Demonstratorwerkzeuge auf die Laustärke bei Betonabtrag

Die entwickelten Stufenfräser mit gegendrehendem Betriebssystem verursachten geringere Schallbelastungen als die gleichdrehenden Systeme, wie sowohl der Vergleich von Demonstrator 2 gegendrehend und gleichdrehend als auch der Vergleich von Demonstrator 1 und Demonstrator 3 verdeutlicht. Diesbezüglich kann eine Senkung der Lautstärke von 1,20 dB(A) bei den entwickelten Stufenfräsern mit fünf Diamantscheiben festgestellt werden sowie eine Senkung von 1,73 dB(A) bei den entwickelten Stufenfräsern mit sechs Diamantscheiben von gleichdrehendem Betrieb zu gegendrehendem Betrieb.

Oberflächenqualität

Die Oberflächenqualität wird vereinfacht mit einem Punktesystem bewertet, um eine bessere Übersichtlichkeit der Auswertung zu gewährleisten. Bei unerwünschter Stegbildung wird die entsprechende Kategorie negativ bewertet, bei Fehlen einer Stegbildung wird eine positive Bewertung vergeben. Als zweiter Bewertungsfaktor wird die Qualität des Schnittbilds betrachtet. Hierbei ist das Ziel, möglichst eben und gleichmäßig an die geplante V-Form des Querschnitts zu kommen und einen zuverlässigen, gleichmäßigen Abtrag zu ermöglichen. Speziell eine tiefere Zustellung von 10 mm hat starke Auswirkungen auf die Restbetonstegbildung und die Oberflächenqualität (vgl. Kapitel 5.1.7 und Abb. 88–90). Daher werden sowohl Zustellung $d = 5 \text{ mm}$ als auch $d = 10 \text{ mm}$ analysiert (s. Tabellen 34 und 35).

Zur Bewertung der Ergebnisse werden die Werkzeuge anhand einer Punkteskala bewertet, wobei 10/10 Punkte für den am höchsten bewerteten und 1/10 Punkte

für den am niedrigsten bewerteten vergeben werden (siehe Tab.36). Dies geschieht auf Grundlage von Tabelle 34 und 35. Zwischenwertungen werden interpoliert. Wenn ein Arbeitsgang nicht vollständig durchgeführt wurde, wird das Ergebnis der durchgeführten Reihen verwendet und mit einem Abzugspunkt –1 versehen.

Tabelle 34: Restbetonstegbildung und Oberflächenqualität bei einer Zustellung von 5 mm, “+” = positiv bewertet, “-“ negativ bewertet, „(0)“ = keine Wertung

Demonstrator-typ	$v = 10 \text{ mm/s}$		$v = 15 \text{ mm/s}$		$v = 20 \text{ mm/s}$		\emptyset
	Steg	Qualität	Steg	Qualität	Steg	Qualität	
Betonfräse Konventionell	+	-	+	-	+	-	3/6
Demonstrator 1	+	+	+	+	+	+	6/6
Demonstrator 2, ggd.	+	-	+	+	-	+	4/6
Demonstrator 2, gld.	+	-	+	-	+	-	3/6
Demonstrator 3	+	-	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)

Tabelle 35: Restbetonstegbildung und Oberflächenqualität bei einer Zustellung 10 mm, “+” = positiv bewertet, “-“ negativ bewertet, „(0)“ = keine Wertung

Demonstrator-typ	$v = 10 \text{ mm/s}$		$v = 15 \text{ mm/s}$		$v = 20 \text{ mm/s}$		\emptyset
	Steg	Qualität	Steg	Qualität	Steg	Qualität	
Betonfräse konventionell	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
Demonstrator 1	+	+	+	+	+	+	6/6
Demonstrator 2, ggd.	-	+	-	+	-	+	3/6
Demonstrator 2, gld.	+	+	+	+	+	+	6/6
Demonstrator 3	-	-	+	-	-	-	1/6

Tabelle 36: Bewertung der Demonstratoren hinsichtlich der Restbetonstegbildung und Oberflächenqualität, „(0)“ = keine Wertung

Demonstratortyp	$\varnothing d = 5 \text{ mm}$	$\varnothing d = 10 \text{ mm}$	$\varnothing \text{ Gesamt}$	Bewertung
Betonfräse konventionell	3/6	(0)	(3/6)	4,00/10
Demonstrator 1	6/6	6/6	6/6	10,00/10
Demonstrator 2, ggd.	4/6	3/6	3,5/6	5,83/10
Demonstrator 2, gld.	3/6	6/6	4,5/6	7,50/10
Demonstrator 3	(0)	1/6	(1/6)	0,66/10

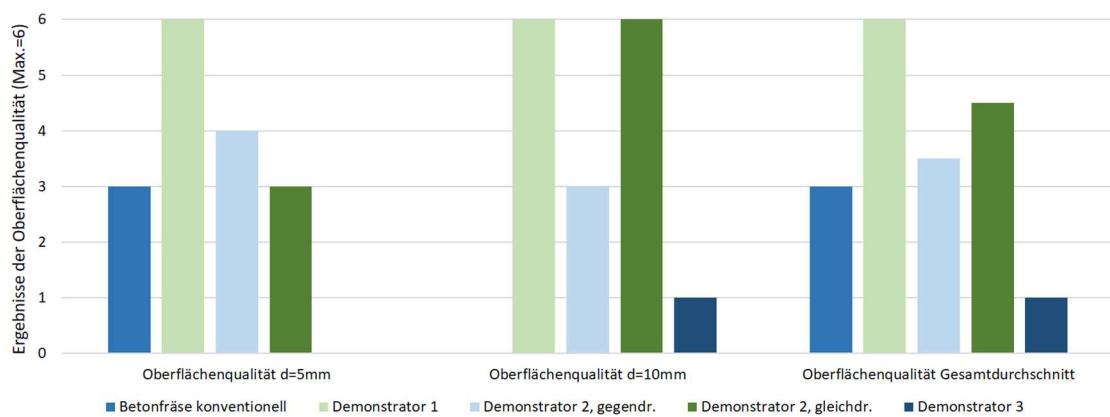


Abbildung 106: Bewertung der Oberflächenqualität im Vergleich, Betonfestigkeit C25/30, Meta-Analyse aus Vorschub v=10 mm/s, v=15 mm/s und v=20 mm/s

Aus der Betrachtung der Durchschnittswerte wird ersichtlich, dass Demonstrator 1 die für eine Freimessung geeignete und Demonstrator 3 die für eine Freimessung ungeeignete Oberflächenqualität von allen getesteten Werkzeugen erzeugte. Die konventionelle Betonfräse erzeugte keine Restbetonstege, allerdings ist die Abtragsform nicht an Innenkanten angepasst und ein Abtrag bei $d = 10 \text{ mm}$ kann bautechnisch bedingt nicht durchgeführt werden. Demonstrator 1 lieferte eine restbetonstegfreie Oberfläche sowie die gewünschte Abtragsform sowohl bei $d = 5 \text{ mm}$ als auch bei $d = 10 \text{ mm}$ und erzielte dadurch die Maximalbewertung. Demonstrator 2 im gegendrehenden

Betrieb wies Probleme mit der Restbetonstegbildung speziell bei höherer Zustellung auf. Im gleichdrehenden Betrieb konnte Demonstrator 2 bei Zustellung $d = 10$ mm alle Kriterien erfüllen, bei einer niedrigen Zustellung von $d = 5$ mm wurde die Abtragsform jedoch nicht erfüllt. Hinsichtlich des Kriteriums Oberflächenqualität bewegt sich Demonstrator 2 in beiden Betriebsarten im mittleren Feld. Demonstrator 3 wies bei der Oberflächenqualität im hohen Zustellungsbereich $d = 10$ mm bei der Restbetonstegbildung als auch bei der Abtragsform Probleme auf und erzielte das niedrigste Punktergebnis.

Die Auswirkungen der einzelnen Eingangsparameter auf den Ausgangsparameter Oberflächenqualität wurden in den entsprechenden Unterkapiteln dargestellt. Die finale Auswertung aller Ausgangsparameter und deren Gewichtung findet in Kapitel 6 statt.

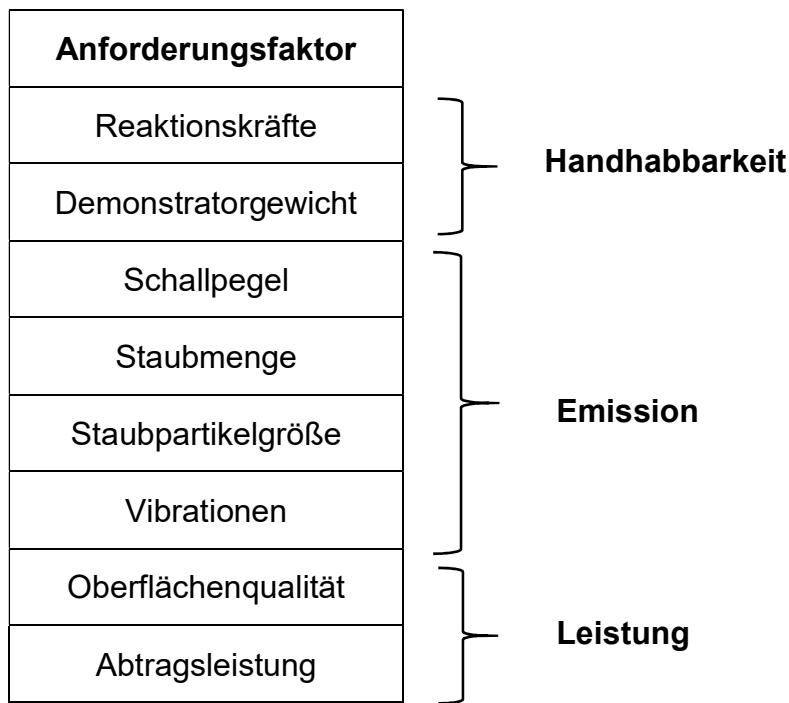


Abbildung 107: Überblick über die betrachteten Anforderungsfaktoren

6 Auswertung und Gewichtung der Ergebnisse

6.1 Durchführung der Auswertung

Da das Gesamtpotenzial der Innenkantendekontamination von verschiedenen Ergebnisparametern abhängig ist, von denen die signifikantesten innerhalb dieser Promotion versuchstechnisch erfasst wurden, erfolgt nun eine bewertete und gewichtete Analyse dieser Parameter. Die Bewertung der einzelnen Anforderungsparameter ist notwendigerweise abhängig von den spezifischen Eigenschaften der Parameter. Im Fallbeispiel „Schallpegel“ kann die Bewertung der Messung vereinfacht nach dem Prinzip „Je leiser, desto besser“ stattfinden, hier liegt ein niedriger Messwert im Interesse. Entgegen dieser simplifizierten Aussage ist der Sachverhalt doch komplexer: Um am Fallbeispiel festzuhalten, erhöht sich zwar der Schallpegel bei einer Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit, gleichzeitig sinkt bei erhöhtem Vorschub die Bearbeitungszeit für eine Betonlängeneinheit und damit auch die Dauer der Lärmexposition. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Messwerte nicht nur eindimensional, sondern mehrdimensional zu betrachten. Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die Abhängigkeiten der Anforderungsparameter zueinander. Als triviales Fallbeispiel können hierzu die Staubmengenmesswerte mit ihrer Abhängigkeit zu den Staubpartikelgrößen herangezogen werden. Enthält eine Versuchsreihe beispielsweise eine vorteilhaft niedrigere Menge an gesundheitsschädlichem Feinstaub von mehreren Prozentpunkten, ist diese im realen Gesamtsystem natürlich nur dann niedriger, wenn die gesamt exponierte Staubmenge die gleiche Masse wie beim Konkurrenzdemonstrator besitzt.

Den genannten Sachverhalten geschuldet, wurden in den Zwischenfazit-Unterkapiteln die einzelnen Ausgangsparameter zunächst in sich geschlossen bewertet. Im nächsten Schritt fand die Bewertung unter Berücksichtigung der wechselseitigen Abhängigkeiten statt. Final werden in diesem Kapitel nun die Parameter gewichtet, eine gesamtsystematische Bewertung der Ergebnisse vorgenommen sowie Schlussfolgerung hinsichtlich der Konsequenzen gezogen.

6.2 Gewichtung der Ergebnisse und Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse der Werkzeuge kann mit der Summenformel zur Nutzwertanalyse durchgeführt werden:

$$\sum_{m=1}^n f_m k_m \quad (\text{Gl. 2})$$

mit

n Anzahl der analysierten Ausgangsparameter

f_m [0, 1]

f_m Bewertung des Werkzeugs im Ausgangsparameter

k_m Gewichtungsfaktor

Die Formel fasst die Bewertungen der Ausgangsparameter zusammen, multipliziert diese mit der entsprechenden Gewichtung und bildet so einen Kennwert für die Nutzwertanalyse. Die Bewertung der Ausgangsparameter basiert auf einem vergleichenden Ansatz und ist begrenzt auf den Zahlenbereich zwischen 0 und 1. Die Aufstellung der Gewichtungsfaktoren kann beliebig zu einer Summe von 100 % gebildet werden; für den Anwendungsfall Kerntechnik wurde eine Gewichtungsverteilung auf Grundlage von Ekont-projektinternen Expertengesprächen und Praxiserfahrungen gebildet.

Da die unterschiedlichen Anforderungen an die entwickelten Demonstratoren verschiedene Bedeutungen für die Gesamtnutzbarkeit aufweisen, werden diese für die finale Gesamtbewertung unterschiedlich gewichtet. Die Gewichtung der einzelnen Anforderungsfaktoren fand im Bereich zwischen 10 % und 15 % statt, so wurde jeder Faktor berücksichtigt und nicht überproportional stark gewertet (s. Tabelle 36). Die Gewichtung fand in Zusammenarbeit mit Experten statt, die einen konkreten Bezug zu Rückbaustellen haben oder diese selbst durchführen. So kann gewährleistet werden, dass mögliche Anwender direkt als wertende Zielgruppe identifiziert und einbezogen werden.

Tabelle 37: Bewertungsgewichtung der verschiedenen Anforderungsfaktoren

Anforderungsfaktor	Gewichtung	
Reaktionskräfte	15 %	Handhabbarkeit
Demonstratorgewicht	15 %	
Schallpegel	10 %	Emission
Staubmenge	10 %	
Staubpartikelgröße	10 %	Leistung
Vibrationen	10 %	
Oberflächenqualität	15 %	Leistung
Abtragsleistung	15 %	
Summe	100 %	

Ein Anteil von 15 % der Gesamtbewertung wird dem Demonstratorgewicht zugeordnet, da ein handgeföhrtes Werkzeug praktikabel sein muss und aus der Praxisbefragung deutlich wurde, dass ein zu schweres Werkzeuggewicht häufig auf direkte Ablehnung der Benutzer stößt. Das Werkzeuggewicht steht in direkter Beziehung zu den Reaktionskräften, da beide Faktoren die physische Kraft des Nutzers beanspruchen. Daher entfallen in Summe 30 % auf die physische Kraftbeanspruchung, also auf die Handhabbarkeit.

Die Staubmenge sowie die Staubpartikelgröße sind ebenfalls komplementär zu betrachten. Die Staubmenge wurde mit 10 % gewichtet, da signifikante

Unterschiede in den Messergebnissen darauf hindeuten, dass die Staubmenge die Feinstaubmenge beeinflusst, welche in der Staubpartikelgröße berücksichtigt wird. Die Gesamtsumme von 20 % für Staubmenge und Staubpartikelgröße ist im Vergleich zur Handhabbarkeit geringer, da hinsichtlich der Staubbelastung bei den Arbeiten Schutzvorkehrungen getroffen werden und somit keine direkte Belastung des Nutzers auftritt. Im Gegensatz dazu findet bei der physischen Kraftbeanspruchung eine direkte Nutzerbelastung statt. Lösungsmöglichkeiten wie unterstützende Exoskelette sind für den konkreten Anwendungsfall der Innenkantendekontamination noch nicht ausgelegt oder allgemein noch nicht ausgereift, da sie beispielsweise hauptsächlich für Überkopfarbeiten konzipiert sind (Hilti Deutschland 2023).

Die Vibrationsbelastung wurde mit 10 % gewichtet. Vibrationen belasten den Nutzer physisch, auch wenn sie nicht direkt die körperliche Kraft beanspruchen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Berücksichtigung der maximal zulässigen Belastungszeit des Nutzers. Die Entscheidung für die Gewichtung beruht darauf, dass im Praxisfall keine weiteren Schutzvorkehrungen des Nutzers vor Vibrationsbelastungen ergriffen werden, jedoch die üblichen Pausenzeiten im kerntechnischen Arbeiten automatisch eingehalten werden.

Als letzter Emissionsfaktor wurde die Schallbelastung betrachtet. Die Nutzer tragen bei Arbeiten, die hohe Lärmpegel erzeugen, in der Regel einen Gehörschutz, wodurch eine Direktbelastung durch Schall vermieden wird. Daher wurde die Gewichtung der Schallbelastung ebenfalls bei 10 % angesetzt, da individuelle Schutzvorkehrungen mit verschiedenen abgestuften Gehörschutzausrüstungen angewendet werden können (Berufsgenossenschaft Holz und Metall 2020). Die vier Emissionskategorien Staubmenge, Staubpartikelgröße, Vibrationen und Schallpegel erhalten somit eine Gesamtgewichtung von 40 %.

Die Oberflächenqualität wurde mit einer Gewichtung von 15 % bewertet. Diese stellt entgegen zu den anderen Faktoren keine Nutzerbelastung dar, sondern gibt Aufschluss über die Freimessbarkeit und Qualität der bearbeiteten Werkstelle. Nur eine Oberfläche, die nach Bearbeitung zur Freimessung mindestens tauglich ist, kann akzeptiert werden. Die händische Verwendung der Werkzeuge bietet jedoch beim praktischen Einsatz eine große Flexibilität, sodass Stegbildung und

fehlende Oberflächenqualität durch Bewegungen des Werkzeugs in alle drei Raumachsen ausgeglichen werden können. Diese Ausgleichsarbeit verursacht jedoch einen Mehraufwand für den Nutzer, den es zu vermeiden gilt. Somit ist in dieser Gewichtung auch eine Effizienzbewertung enthalten. Die Abtragsleistung wird ebenfalls im höheren Bereich mit 15 % gewichtet, da diese ein wichtiger Faktor für die grundsätzliche Verwendung eines Werkzeugs ist. Die Abtragsleistung lag bei allen entwickelten Demonstratoren höher als beim konventionellen Betonfräser, was den Anforderungen an eine schnellere Betonbearbeitung entsprach.

Ein Überblick über die Bewertungsergebnisse ist in Tabelle 39 dargestellt, um die Demonstratortypen direkt in einem oder mehreren Anforderungsfaktoren ohne Wertung der Wichtigkeit vergleichen zu können. Die Gewichtungsumrechnung und Darstellung dieser Ergebnisse erfolgen separat in Kapitel 6.3.

Tabelle 39: Kompaktübersicht der Bewertungsergebnisse der Demonstratortypen und des Vergleichswerkzeugs

Demonstratortyp	Reaktionskräfte	Demonstrator-gewicht	Staubmenge	Staupartikel-größe	Vibrationen	Schallpegel	Abtrags-leistung	Oberflächen-qualität
Betonfräse konventionell	1/10	10/10	1/10	(5/10)	1/10	9/10	1/10	4/10
Demonstrator 1	10/10	8,20/10	10/10	10/10	2/10	1/10	7,6/10	10/10
Demonstrator 2, gegendr.	6,15/10	4,01/10	1/10	6,50/10	2,66/10	10/10	10/10	5,83/10
Demonstrator 2, gleichdr.	2/10	4,01/10	6,9/10	1/10	10/10	1,875/10	10/10	7,5/10
Demonstrator 3	3,78/10	1/10	9/10	9,54/10	4,33/10	3,125/10	8,8/10	0,66/10

6.3 Gesamtergebnis

In der Gesamtübersicht in Tabelle 38 werden die Bewertungsergebnisse sowie die Gewichtungen der einzelnen Anforderungsfaktoren dargestellt und daraus die gewichtete Gesamtbewertung der Demonstratortypen errechnet. Die resultierende Wertung ermöglicht einen Gesamtvergleich aller untersuchten Werkzeuge unter Berücksichtigung der definierten Anforderungsparameter. Aufgrund der starken Konzentration sämtlicher verwendeter Untersuchungen und Aspekte ist diese Gesamtübersicht speziell im Kontext dieser Arbeit zu betrachten und variiert bei anderen Anwendungs- oder Nutzungsfällen der Demonstratoren.

Bei der Verrechnung der Gewichtung mit der Bewertung der einzelnen Demonstratoren ergibt sich für jeden Anforderungsfaktor pro Demonstrator ein Ergebniswert. Dieser spiegelt die Performance des jeweiligen Demonstrators im Vergleich zu den anderen Demonstratoren bzw. dem konventionellen Betonfräser wider und bezieht sich auf den speziellen Anforderungsfaktor mit der entsprechenden Gewichtung. Die Gesamtergebnisse ergeben sich aus der Addition der einzelnen Ergebniswerte und sind ein Maß für die Gesamtperformance der Werkzeuge im Direktvergleich. Diese Einzelwerte des Gesamtergebnisses werden im Kapitel 7 (Fazit) detailliert beschrieben.

Tabelle 40: Gesamttafel, Bewertung aller Anforderungsfaktoren mit Gewichtung und resultierendem Gesamtergebnis

	Reaktionskräfte			Demonstratorgewicht			Staubmenge			Staubpartikelgröße		
	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis
Betonfräse konventionell	1/10	15,00%	0,15	10/10	15,00%	1,5	1/10	10,00%	0,1	(5/10)	10,00%	0,5
Demonstrator 1	10/10	15,00%	1,5	8,20/10	15,00%	1,23	10/10	10,00%	1	10/10	10,00%	1
Demonstrator 2, gegendl.	6,15/10	15,00%	0,9225	4,01/10	15,00%	0,6015	1/10	10,00%	0,1	6,50/10	10,00%	0,65
Demonstrator 2, gleichdr.	2/10	15,00%	0,3	4,01/10	15,00%	0,6015	6,9/10	10,00%	0,69	1/10	10,00%	0,1
Demonstrator 3	3,78/10	15,00%	0,567	1/10	15,00%	0,15	9/10	10,00%	0,9	9,54/10	10,00%	0,954

	Vibrationen			Schallpegel			Abtragsleistung			Oberflächenqualität			Gesamt-ergebnis
	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis	Bewertung	Gewichtung	Ergebnis	
1/10	10,00%	0,1	9/10	10,00%	0,9	1/10	15,00%	0,15	4/10	15,00%	0,6	4	
2/10	10,00%	0,2	1/10	10,00%	0,1	7,6/10	15,00%	1,14	10/10	15,00%	1,5	7,67	
2,66/10	10,00%	0,266	10/10	10,00%	1	10/10	15,00%	1,5	5,83/10	15,00%	0,8745	5,9145	
10/10	10,00%	1	1,875/10	10,00%	0,1875	10/10	15,00%	1,5	7,5/10	15,00%	1,125	5,504	
4,33/10	10,00%	0,433	3,125/10	10,00%	0,3125	8,8/10	15,00%	1,32	6,66/10	15,00%	0,099	4,7355	

Die Gesamtergebnisse der Demonstratoren werden in Tabelle 42 zusammengefasst und als rechnerisch kompletter Wert und als gerundeter Wert dargestellt. Die Gesamtergebnisse erstrecken sich von 4,00 Gesamtpunkten (GP) bis 7,67 GP, was die Ausgewogenheit des Ergebnisses unterstreicht und die Benennung eines Favoriten erlaubt.

Tabelle 42: Kurzfassung der Gesamtergebnisse, rechnerisch und gerundet

Demonstratortyp	Gesamtergebnis	Gesamtergebnis gerundet
Betonfräse konventionell	4,0000	4,00
Demonstrator 1	7,6700	7,67
Demonstrator 2, gegendr.	5,9145	5,91
Demonstrator 2, gleichdr.	5,5040	5,50
Demonstrator 3	4,7355	4,74

6.4 Praxiserprobung

Im Anschluss an die wissenschaftliche Untersuchung der entwickelten Werkzeuge im Versuchsstand konnten Praxiserprobungen im Kernkraftwerk Obrigheim durchgeführt werden. Bei den Praxiserprobungen handelte es sich im Gegensatz zu den Untersuchungen im Versuchsstand nicht um wissenschaftliche Versuchsdurchführungen mit Messsensorik. Die Praxiserprobung dienten dem Nachweis einer generellen Nutzbarkeit der Werkzeuge, dem Gewinn von Praxiserfahrung im Einsatz, der Betrachtung von etwaigen Problemstellungen und Schwierigkeiten in der Praxis sowie der Gewichtung der verschiedenen Ausgangsparameter aus Anwendersicht.



Abbildung 108: Praxiserprobung der Werkzeuge im Kernkraftwerk Obrigheim durch die SAT Kerntechnik GmbH (SAT. Kerntechnik)

Tabelle 453: Subjektive Bewertung der Praxiserprobung durch die SAT Kerntechnik GmbH

Werkzeug	Handhabbarkeit	Abtragsleistung	Oberflächenqualität
Demonstrator 1	Gut	Sehr gut	Sehr gut
Demonstrator 2, ggd.	Hohes Gewicht	Sehr gut	Gut
Demonstrator 3	Hohes Gewicht	Sehr gut	Restbetonstegbildung

Der aufwändige Genehmigungsprozess und die Praxiserprobung wurden vom „Ekont“-Projektpartner SAT Kerntechnik GmbH und deren Mitarbeitenden durchgeführt. Die Versuchswerkzeuge wurden im Anschluss an die durchgeführte Praxiserprobung in den Bereichen Handhabbarkeit, Abtragsleistung und Oberflächenqualität subjektiv bewertet (s. Tabelle 43). Die Emissionen (Staubmenge und -größe, Vibration und Schallpegel) wurden im Zuge dieser Praxiserprobung nicht betrachtet, da eine Bewertung unter den gegebenen Umständen als nicht sinnvoll betrachtet wurde.

Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass die Werkzeuge ihren Zweck des Innenkantenabtrags erfüllen konnten und es zu keinen Ausfällen der Technik kam. Die Einhausung schützt den Anwender vor den Diamantscheiben als auch vor aufkommendem Staub. Die Absaugung konnte problemlos mit den Werkzeugen verbunden werden und war während der Arbeiten, trotz beengter Verhältnisse, kein geometrisches Hindernis. Die Dekont-Beschichtung als auch der darunterliegende Beton konnten erfolgreich abgetragen werden. Die Bewertungsergebnisse in den einzelnen Kategorien erfolgten anhand der Prädikate „sehr gut“, „gut“ oder dem Hinweis auf aufgefallene Probleme. Die Handhabbarkeit wurde bei Demonstratorwerkzeug 1 als gut eingestuft, während Demonstrator 2 und 3 aufgrund des hohen Eigengewichts in der Handhabbarkeit negativ eingeschätzt wurden. Die Abtragsleistung für alle drei Stufenfräser wurde als sehr gut bewertet, da sie eine höhere Leistung als Geräte nach aktuellem Stand der Technik aufweisen. Es war ein Zeitgewinn im Vergleich zu konventionellen Methoden ersichtlich. Die Oberflächenqualität wurde bei Demonstrator 1 als sehr gut eingeschätzt, bei Demonstrator 2 als gut. Demonstrator 3 zeigte Defizite durch Restbetonstegbildung in der bearbeiteten Fuge, die ein Freimessen erschweren.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen dieser Arbeit zeigen neue, effektive Wege auf, mit trocken-mechanischen Abtragsverfahren geometrische Störstellen wie Innenkanten zu dekontaminieren. Durch die entwickelten Werkzeuggeometrien kann eine Dekontamination von Baumaterialien wie Beton exakter durchgeführt werden und die Anpassung des Werkzeugs an den Anwendungsfall erlaubt ein vorteilhafteres Dekontaminieren. Dies spiegelt sich in den unterschiedlichen Ausgangsparametern wider, die auf die menschliche Nutzung zugeschnitten sind und eine hohe Relevanz im Themenbereich Arbeitsschutz aufweisen. Perspektivisch können dadurch die Belastungen für das Personal der Kernkraftwerke reduziert, die Zwischen- sowieendlagerkapazitäten durch die geringere Menge an Abfällen geschont und die Dekontaminationsarbeiten beschleunigt werden.

Für die praktischen Untersuchungen zu den entwickelten Demonstratoren wurden über 70 Versuchsreihen durchgeführt, um die Auswirkungen der verschiedenen Eingangsparameter auf die Messergebnisse wissenschaftlich analysieren zu können. Zu den variablen Eingangsparameter gehörten neben dem Demonstratortyp die Vorschubgeschwindigkeit, die Zustellungstiefe, die Betonfestigkeitsklasse, die Laufrichtung des Demonstrators in Vorschubrichtung oder gegen Vorschubrichtung und je nach Demonstratortyp die Drehrichtung der Diamantscheiben miteinander oder gegeneinander. Die daraus resultierenden Ergebnisse und gemessenen Ausgangsparameter umfassen neben der Abtragsleistung an sich auch die auftretenden Reaktionskräfte für den Benutzer, die Vibrationsemissionen, das Demonstratorgesamtgewicht, die Lärmemissionen, die produzierte Staubmenge sowie deren Feinstaubanteil bzw. die Staubkorngrößenverteilung als auch die geschaffene Oberflächenqualität der dekontaminierten Fläche in Bezug auf die Freimessbarkeit.

Um die genannten Parameter umfassend zu untersuchen, wurde ein spezieller Versuchsstand konzipiert und gebaut. Dieser besteht aus einem boxförmigen Stahlprofilrahmen, der zugleich die Einhausung bildet. Parallel zur Stellfläche verläuft eine Lineareinheit, an die der zu untersuchende Demonstrator

angebracht wird. Die Lineareinheit ist beidseitig in Kardangelenken gelagert, sodass eine freie Bewegung der Linearachse im Raum sowie eine Anpassung an den unter die Linearachse eingebrachten Betonprobekörper gewährleistet sind. In den Versuchsstand eingelassen sind die erforderlichen Sensoren, um die genannten Messungen durchführen zu können.

Auf diese Weise konnte anhand der Versuchsreihen ermittelt werden, welche Vorteile der jeweils verwendete technische Mechanismus liefert. Der marktübliche konventionelle Betonfräser, der den aktuellen Stand der Technik in der Praxis darstellt, zeichnet sich speziell durch sein geringes Gesamtgewicht aus. Der entwickelte Demonstrator 1, aufbauend auf einem Antrieb mit fünf Diamanttrennscheiben mit nach außen abnehmendem Radius von 220 mm, 210 mm und 200 mm, konnte im Vergleich die besten Ergebnisse hinsichtlich der für den Benutzer auftretenden Reaktionskräften aufweisen. Bei der Staubmenge und dem Feinstaubanteil, welche bei der Betonbearbeitung entstehen, erzielte der erste Demonstrator die emissionsniedrigsten Messwerte von den untersuchten Werkzeugen. In der Bearbeitungsergebnisbetrachtung (hinterlassene Oberfläche) konnte der erste Demonstrator über die verschiedenen Versuchsreihen hinweg die durchschnittlich geeignete Oberfläche für die Freimeßung erzeugen. Demonstrator 2 im gegendrehenden Betrieb bestand aus zwei Antrieben mit jeweils drei Scheiben, insgesamt also sechs Scheiben mit ebenfalls nach außen abnehmendem Durchmesser (mittig 2 x 220 mm, anschließend beidseitig nach außen D = 210 mm und D = 200 mm). Jeweils drei Diamantscheiben wurden in entgegengesetzter Richtung angetrieben. Der Demonstrator erzielte bei den gemessenen Schallpegeln durchschnittlich die niedrigsten Emissionswerte. Demonstrator 2 im gleichdrehenden Betrieb besitzt denselben Aufbau, nur werden alle sechs Diamantscheiben in die gleiche Drehrichtung angetrieben. Durch dieses Prinzip wurden die vergleichsweise niedrigsten Vibrationen für den Nutzer erzielt. Den Abschluss bildete Demonstrator 3, bestehend aus einem Antrieb mit fünf Diamantscheiben, der über ein neu entwickeltes Getriebe die jeweils zwei äußeren Scheiben mit einer entgegengesetzten Drehrichtung zur mittleren Diamantscheibe antreibt. Dieser Demonstrator vereint zahlreiche Aspekte der

vorangegangenen Demonstratoren. Bei der Mehrzahl der Messkategorien wurden niedrige bis durchschnittliche Vergleichsergebnisse erzielt.

Unter Berücksichtigung der Gewichtung der einzelnen Ergebniskategorien und mit aktuellem Entwicklungsstand zum Ende des ersten Forschungsprojekts „Ekont“ bietet der erste Demonstrator in der Gesamtbewertung die geeignetste Anwendung. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse und der Vergleiche mit den anderen Demonstratortypen und dem konventionellen Betonfräser kann so eine Weiterentwicklung der Werkzeuge stattfinden, um die Vorteile der verschiedenen Mechanismen optimal zu vereinen.

7.2 Ausblick

Die Demonstratoren bieten Raum für die Optimierung weiterer Nutzerfaktoren. Diese variieren je nach Nutzer und Verwendungszweck und umfassen, neben den technischen, auch teilweise menschenabhängige, wirtschaftliche, umwelttechnische und persönliche Faktoren. Im Zuge dieser Forschungsarbeit wurde der Fokus auf die technischen Faktoren gelegt, wodurch eine Abgrenzung zu den nichttechnischen Bereichen vorgenommen wurde. Die im Rahmen dieser Studie vernachlässigten Faktoren sind unter anderem:

- Personalspezifische Faktoren
 - Einsatzerfahrung und deren Auswirkungen auf die Nutzung
- Kombinierte Faktoren: Technisch und Personalspezifisch
 - Unfallrisiko
 - Gefährdungspotenzial für die Umgebung
 - Flexibilität
- Betriebstechnische Faktoren
 - Langzeitzuverlässigkeit und Störanfälligkeit
 - Wartungsaufwand
- Wirtschaftliche Faktoren
 - Anschaffungskosten
 - Betriebskosten

Auch unter den bisher analysierten Faktoren bestehen weiterhin Optimierungsmöglichkeiten, die im Zuge des EKONT-2-Projekts angegangen und nachstehend näher betrachtet werden. Kurzfristige Verbesserungen werden

im Bereich Demonstratorenengewicht erwartet, da Entwicklungen hier eine schnelle und unkomplizierte Verbesserung der Handhabung ermöglichen.

Diese wissenschaftliche Arbeit wurde im Kontext des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts „Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont)“ durchgeführt, welches planmäßig am 30.06.2023 endete. Für das Forschungsprojekt wurde ein Folgeprojekt beantragt und bewilligt, welches die Erkenntnisse aus dem ersten Projekt aufgreifen und die Fortsetzung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Zeitraum vom 01.07.2023 bis zum 30.06.2026 ermöglichen soll. Der kurz- und mittelfristige Forschungsausblick ist damit gegeben. Das Folgeprojekt trägt den Namen „Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKONT-2)“ und zeigt einen starken Bezug zum Vorgängerprojekt. Inhaltlich wird der Forschungsschwerpunkt auf folgenden Themen liegen (Rentschler et al. 2023b):

- Verbesserung der Handhabung
 - Gewichtsreduktion
 - Verringerung der Außenmaße
 - Überarbeitung der Kantenführung
- Verbesserung der Qualität des Abtrages
 - Exakte Tiefenführung und einstellbare Abtragstiefe
 - Zur Freimeßung geeignete Oberfläche
 - Reduzierung von überflüssigem Materialabtrag
 - Abtrag von Oberflächen mit sog. Dekontaminationsbeschichtungen

Ziele, die bereits im ersten Forschungsprojekt fokussiert wurden, werden weiterhin verfolgt und verbessert:

- Verbesserung der Arbeitssicherheit
 - Verringerung der Staubbelastrung
 - Reduzierung der Vibrationen und Belastung des Muskel-Skelettsystems
- Geringerer Zeitbedarf für die Dekontamination

In Bezug auf den Aspekt Handhabung liegt der Fokus darauf, bei gleichbleibend guten Abtragsleistungen und Arbeitssicherheitsfaktoren das Werkzeug von den Außenmaßen zu verkleinern, das Werkzeuggewicht zu verringern und eine handliche Nutzung durch den Benutzer zu ermöglichen. Mögliche Forschungsansätze sind die Entkoppelung des Werkzeugs vom Antrieb durch auf dem Rücken tragbare Antriebe oder extern mitgeführte Antriebe. Ebenfalls wird der Gedanke von Führungsschienen oder Auflagern zur Verbesserung der Werkzeugführung näher untersucht.

Hierzu soll der Exkurs mit einem oszillierenden Werkzeug weiter vertieft werden. Der Antrieb kann über einen Exzenter erzeugt werden, der die notwendigen Vibrationsbewegungen erzeugt oder über entgegenlaufenden Unwuchten, deren Kräfte sich summieren. Andere interessante Ansätze für die Oszillation sind Änderungen an der Körnung des Werkzeugaufsatzen.

Bei den rotierenden Demonstratoren soll die Tiefenführung verbessert werden, um eine niedrigere Reibung zwischen Demonstratorgehäuse und (Beton-)Oberfläche zu gewährleisten. Forschungsgedanken umfassen eine Bettung auf einem Luftkissen, das unter dem Gerät durch z. B. Druckluft erzeugt wird, oder konventionellen Führungsrollen, die jedoch einen direkten Kontakt aufweisen.

Die Oberflächenqualität, die bereits im ersten Forschungsprojekt EKont untersucht wurde, soll kontinuierlich weiterverbessert werden. Untersucht werden sollen die Auswirkungen der Scheibenanzahl, die Abstandsparameter zwischen den Diamantscheiben und der Angriffswinkel zwischen Werkzeug und Werkstoff. Um das Zusetzen des Werkzeugansatzes, also meist der Diamantkörnung, zu verhindern, werden SpülLuftthematiken betrachtet, die für eine konstant unverschlossene Bearbeitungsobерfläche am Werkzeug sorgen können. So können Betonstaubreste und Feinstaub nicht nur von der Werkzeugfläche, sondern auch aus der zu bearbeitenden Innenkante und dem Frässchnitt entfernt und ausgeblasen werden. Dies trägt damit passiv zu einer verbesserten Oberflächenqualität bei.

8 Literaturverzeichnis

AKW Würgasse - Rückbau noch bis 2028, (2024). Online verfügbar unter <https://www.hna.de/lokales/fritzlar-homberg/fritzlar-ort45393/wuergassen-rueckbau-noch-2028-3394593.html>, zuletzt aktualisiert am 01.02.2024, zuletzt geprüft am 01.02.2024.

Anthofer; Lippmann; Peise; Voss; Trimis; Hurtado (2013): Lasertechnologie zur Entfernung radioaktiver und chemisch-toxischer Kontaminationen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen 2013. Online verfügbar unter https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/wket/ressourcen/dateien/texte/2013_Anthofer_KONTEC13_Paper.pdf?lang=de, zuletzt geprüft am 04.10.2024.

Bach, Fr.-W.; Redelier, C. F.; Versemann, R. (2003): Entwicklung und Qualifizierung neuer Zerlege- und Dekontaminationstechniken für den Rückbau von Forschungsreaktoren unter dem Gesichtspunkt der Kostenminimierung. Forschungsvorhaben des BMBF.

Bergner, Harald; Berner, Klaus; Bertig, Rudolf; Bracher, Andreas; Bruckner, Heinrich (2016): Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 22. Auflage. Hg. v. Andrej Albert, Klaus-Jürgen Schneider und Alfons Goris. Köln: Bundesanzeiger Verlag.

Berthold; Schreiber, Tanja (Hg.) (2023): Berthold Broschüre LB 124 SCINT Serie. Flyer_LB_124_SCINT-Serie_DC00514PR1_Rev00_300418_SN (1) 2023.

Berthold Technologies GmbH & Co.KG (2021): Kontaminationsmonitore - Berthold Technologies GmbH & Co.KG. Online verfügbar unter <https://www.berthold.com/de/strahlenschutz/produkte/kontaminationsmonitore/>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2023, zuletzt geprüft am 17.04.2023.

Berufsgenossenschaft Holz und Metall (2020): 087 - Gehörschutz. Hg. v. BGHM. Online verfügbar unter <https://www.bghm.de/arbeitsschuetzer/praxishilfen/arbeitsschutz-kompakt/087-gehoerschutz/>, zuletzt aktualisiert am 24.05.2023, zuletzt geprüft am 24.05.2023.

BG Bau (2020): Richtwerte von manuell zu handhabenden Lastgewichten. Online verfügbar unter https://www.bgbau.de/fileadmin/Themen/Arbeitsschutz/Ergonomisches_Arbeiten/Beurteilung_von_Lastgewichten.pdf, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

BG RCI (2020): KB_013_Lärm. Lärm Grundlagen, Auswirkungen, Maßnahmen. Online verfügbar unter https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Downloads/DL_Praevention/kurz_und_buendig/KB_013_L%C3%A4rm_%E2%80%93_Grundlagen__Auswirkungen_Ma%C3%9Fnahmen.pdf, zuletzt geprüft am 08.03.2023.

BMWK (2023): Der Weg zur Energie der Zukunft - sicher, bezahlbar und umweltfreundlich -. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz,. BMWI. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010-beschluesse-juni-2011.html>, zuletzt aktualisiert am 02.01.2023, zuletzt geprüft am 02.01.2023.

Bodi Tools (2023): Diamanttrennscheibe Universal RR - Ø 115 - 230 mm. Online verfügbar unter <https://www.bodi-tools.de/Diamanttrennscheibe-RR-R-115-230-mm>, zuletzt aktualisiert am 29.03.2023, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

Braun; Himmelsbach; Seng; Chaudhry; Heneka; Pfau; Gentes, Sascha (2024): Abschlussbericht Mobiles Anbaugerät ur automatisierten Rissüberfräsun (MAARISS).

Bundesamt für Strahlenschutz (2023): Berufliche Strahlenschutzüberwachung in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/beruf/einfuehrung/einfuehrung_node.html, zuletzt aktualisiert am 20.06.2023, zuletzt geprüft am 20.06.2023.

Bundesministerium für Arbeit und Soziales (01.09.2006): Merkblatt zu der Berufskrankheit Nr. 2108. Bandscheibenbedingte Erkrankungen der Lendenwirbelsäule durch langjähriges Heben oder Tragen schwerer Lasten. Online verfügbar unter <https://www.baua.de/DE/Themen/Praevention/Koerperliche-Gesundheit/Berufskrankheiten/pdf/Merkblatt-2108.html>.

Bundesregierung (2023): AKW: Letzte Kernkraftwerke gingen vom Netz | Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/ausstieg-aus-der-kernkraft-2135796>, zuletzt aktualisiert am 13.08.2024, zuletzt geprüft am 13.08.2024.

Buzer.de (2023): Kapitel 3 StrlSchV Freigabe Strahlenschutzverordnung. Online verfügbar unter <https://www.buzer.de/gesetz/13179/b30034.htm>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2023, zuletzt geprüft am 17.04.2023.

commonswiki (Hg.) (2023): Gaschnitz. Unter Mitarbeit von Tobias Gaschnitz. Online verfügbar unter https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=User:Tobias_Gaschnitz

[~commonswiki&action=edit&redlink=1](#), zuletzt aktualisiert am 04.03.2023, zuletzt geprüft am 04.03.2023.

Contec GmbH (2023): Diamantscheibe für hartem bis sehr hartem Beton / Estrich. Online verfügbar unter https://www.contecgbmh.com/zubehoer-werkzeug/diamantscheibe-fuer-hartem-bis-sehr-hartem-beton-estrich.html?tx_contecproducts_products%5Borigin%5D=519&cHash=c62115cec9e84d9180d6c5e50b6119c1, zuletzt aktualisiert am 14.04.2023, zuletzt geprüft am 14.04.2023.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (2022): DGUV Information 208-033 „Muskel-Skelett-Belastungen - erkennen und beurteilen“. Online verfügbar unter <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/458>, zuletzt geprüft am 18.10.2023.

Enviro (2020): enviro Eckfräse C25. Hg. v. Asup GmbH. Online verfügbar unter <https://asup.info/marken/enviro/enviro-eckfraese-c25>.

Enye (2014): Präsentiert. <https://de-academic.com/pictures/dewiki/115/9c7ee865aecbabd3283168aff5c522ce.png>, https://de-academic.com/pictures/dewiki/107/kkw_mit_dwr.png. Online verfügbar unter <https://www.slideserve.com/enye/p-r-s-e-n-t-i-e-r-t>, zuletzt aktualisiert am 20.06.2023, zuletzt geprüft am 20.06.2023.

Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1 (2006). 34., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2006. Wiesbaden: Teubner (Springer eBook Collection Computer Science & Engineering).

Gabor, Nadine; Gentes, Sascha; Steringer, Anton; Wehrmayer, Gerhard (2019): Definierter Abtrag hochbewehrter Stahlbetonstrukturen (DefAhS). eine Innovation zum fernhantierten Arbeiten in für Menschen gefährlichen Umgebungen. Betonbohrer, Ausgabe 44.

Gentes, Sascha; Aminy, Akramullah; Gabor, Nadine; Reinhardt, Steffen (2015): Internationale Rückbautechniken und Managementmethoden für kerntechnische Anlagen - Eine wissenschaftliche Analyse aufbauend auf dem internationalen Stand der Technik (IRMKA). Abschlussbericht des Forschungsprojekts mit dem Förderkennzeichen: 02S8851. KIT TMB.

Gesundheitsgefahren durch Staub (2023). Online verfügbar unter <https://www.bgbau.de/themen/sicherheit-und-gesundheit/staub/gesundheitsgefahren-durch-staub>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2023, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Hentschel, Sebastian (2014): Bewegungs- und Verschleißverhalten von Hartmetalllamellen bei der Betonbearbeitung. Dissertation. KIT, Karlsruhe.

Heppler, Kurt; Dietrich, Philipp (2022): Getriebelösung für gegenläufige Fräsprozesse. In: *Zeitschrift Antriebstechnik* 2022, 07/2022.

Hilti Deutschland (2023): Exoskelett. Hg. v. Hilti Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.hilti.de/content/hilti/E3/DE/de/business/business/safety/exoskeleton.html>, zuletzt aktualisiert am 24.05.2023, zuletzt geprüft am 24.05.2023.

Hilti Deutschland (2024): Leichter Meißelhammer TE 300-AVR - Meißel- und Abbruchhämmer - Hilti Deutschland. Online verfügbar unter https://www.hilti.de/c/CLS_POWER_TOOLS_7124/CLS_DEMOLITION_HAMMER_BREAKER_SUB_7124/CLS_DEMOLITION_HAMMER_BREAKER_7124/r1038488, zuletzt aktualisiert am 01.02.2024, zuletzt geprüft am 01.02.2024.

Hörenbaum, W.; Müller, H. S.; Herold, G. (2009): Abbruch massiver Betonbauwerke der Energietechnik. Kontec, 2009.

Hübner, Felix; Grone, Georg von; Schultmann, Frank (2017): Technologien zur Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen.

IAEA (2020): Nuclear Power Reactors in the World. 2020 Edition. Vienna: IAEA (Reference Data Series, v.2). Online verfügbar unter https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-40_web.pdf, zuletzt geprüft am 20.06.2023.

Kurt Heppler; Philipp Dietrich; Carla-Olivia Krauß; Alexander Heneka; Shanyao Zhang; Sascha Gentes et al. (2021): Entwicklung neuer Technologien zur Dekontamination von Kanten und Störstellen. KONTEC Posterpräsentation. Kontec. DKM Business Events GmbH. Dresden, 2021.

ME-Meßsysteme (2021): 6-Achsen Kraftsensor K6D80 2kN/100Nm/CG. Hg. v. ME-Meßsysteme.

Metzger, Johannes (2021): Entwicklung eines Verfahrens zur automatisierten Analyse eines Betonabtrags sowie dessen Volumendifferenz mittels Laserscan. Karlsruhe. Masterarbeit.

Milberg, Joachim (1992): Werkzeugmaschinen - Grundlagen. Zerspanetechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerungen. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

NEA Task Group on Decontamination (2020): Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities. Hg. v. Nuclear Energy Agency.

Rentschler, Eric; Gentes, Sascha; Heppler, Kurt; Stemmle, Stefan; Greb, Johannes (2023a): Ekont Abschlussbericht. KIT TMB.

Rentschler, Eric; Villinger, Martin; Gentes, Sascha; Heppler, Kurt; Greb, Johannes; Stemmle, Stefan (2023b): Vorhabensbeschreibung: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen
Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen. Hg. v. KIT TMB, HTWG Konstanz, SAT. Kerntechnik und Contec GmbH.

Riemann, T. (2019): Stilllegung und Abbau von Kernkraftwerken. Auszug Masterthesis Johannes Metzger, S. 18. Entsorgungslogistik. Hg. v. TÜV NORD EnSy GmbH & Co. KG. TÜV NORD EnSy GmbH & Co. KG. Karlsruhe.

Standardabweichung. • Berechnung, Beispiele · [mit Video] (2024). Online verfügbar unter <https://studyflix.de/statistik/standardabweichung-1042>, zuletzt aktualisiert am 22.05.2024, zuletzt geprüft am 22.05.2024.

StrlSchV 2018 (1960): Strahlenschutzverordnung.

Studsvik SINA (2007): BOLERO - Flexibles Dekontaminationssystem für Wände und Decken mit anschließender Kontaminationsmessung.

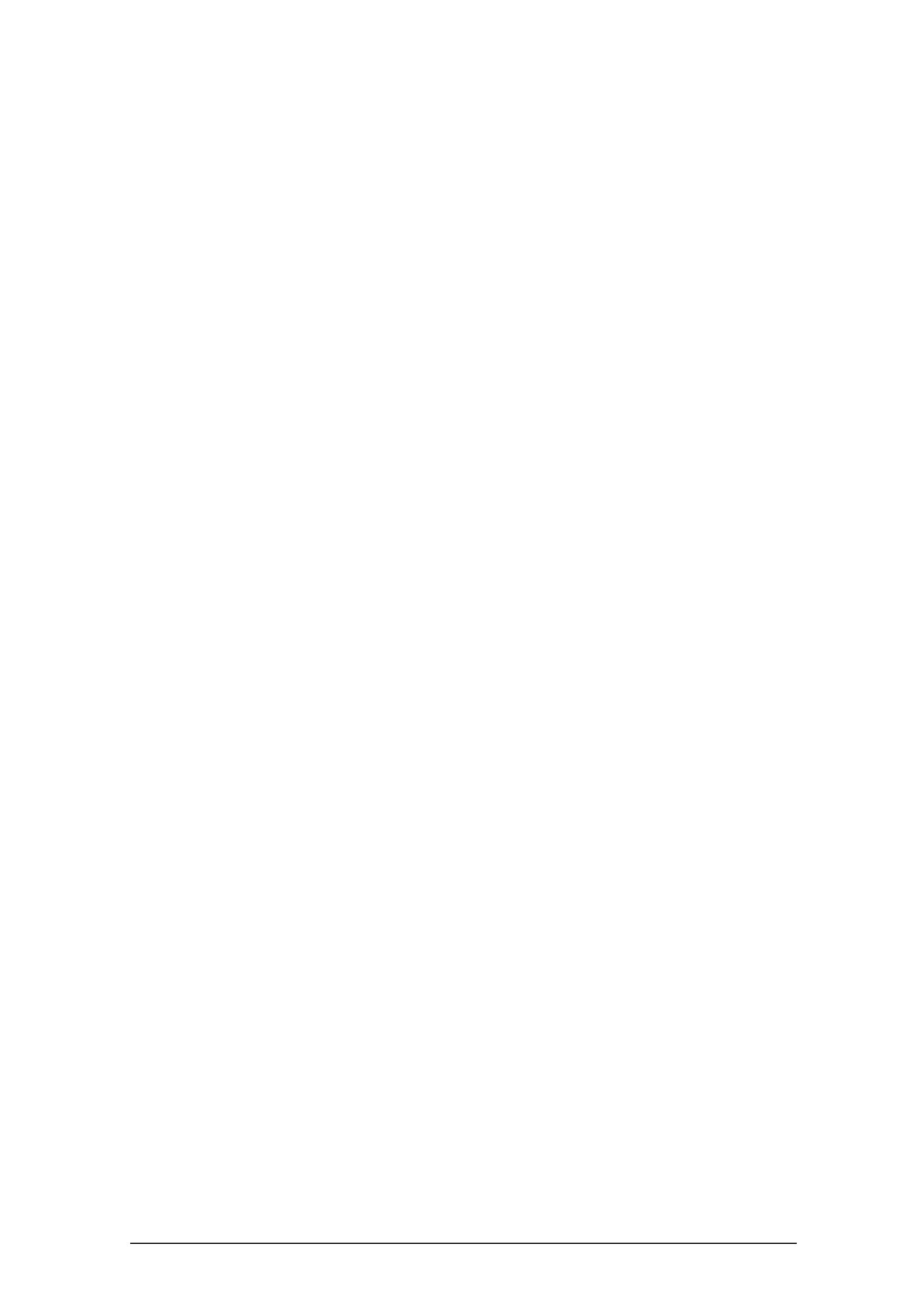
TRLV: TRLV Vibrationen - Teil 1 Beurteilung der Gefährdung durch Vibrationen.

TÜV NORD (2024): Rückbau von Kernkraftwerken TÜV NORD. Online verfügbar unter <https://www.tuev-nord.de/explore/de/entdeckt/rueckbau-von-kernkraftwerken/>, zuletzt aktualisiert am 30.01.2024, zuletzt geprüft am 30.01.2024.

US EPA (2016): Particulate Matter (PM) Basics | US EPA. Online verfügbar unter <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>, zuletzt aktualisiert am 18.07.2022, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

Vibrationen (2023). Online verfügbar unter <https://www.bghm.de/arbeitsschuetzer/fach-themen/laerm-und-vibrationen/vibrationen/>, zuletzt aktualisiert am 28.02.2023, zuletzt geprüft am 28.02.2023.

Vogt, Hans-Gerrit; Schultz, Heinrich (2011): Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. Mit 56 Tabellen und 76 Diagrammen. 6., überarb. Aufl. München, Wien: Hanser.



Anhang

I. Korngrößenmessung Demonstratoren

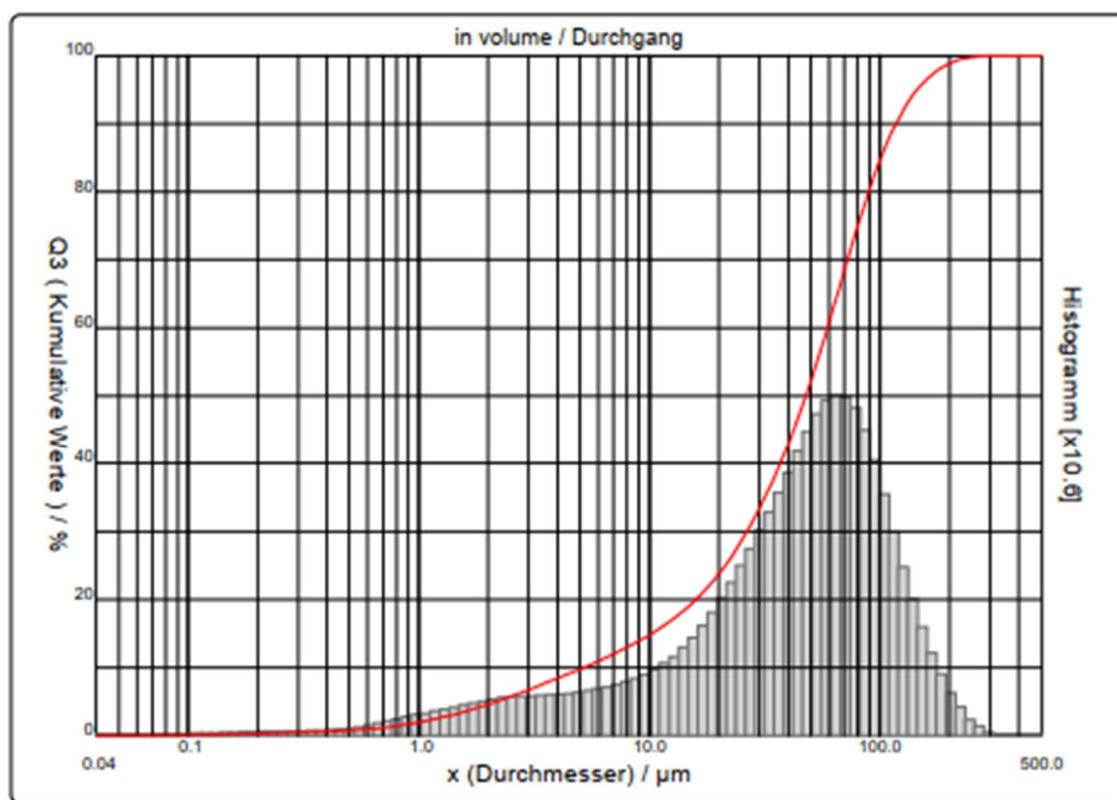
Messung der Korngrößen durchgeführt von der Materialprüfanstalt Karlsruhe

Versuchsreihe Nr. 9, Demonstrator 1, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser										in volume / Durchgang									
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00									
Q3	0.01	0.10	0.79	1.97	4.62	7.17	8.45	10.94	12.97	14.80									
x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0									
Q3	19.15	23.69	35.25	47.53	63.12	88.64	94.35	99.48	100.00	100.00									

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 9, Demonstrator 1, v = 15 mm/s, d = 10 mm

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser					in volume / Durchgang				
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.05	0.10	0.28	0.48	0.64	0.79	0.96	1.17	1.42
q3	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.09	0.12
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.69	1.97	2.25	2.52	2.80	3.07	3.60	4.12	4.62	5.10
q3	0.15	0.18	0.19	0.21	0.23	0.24	0.26	0.29	0.31	0.33
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	5.56	6.00	6.41	6.80	7.17	7.51	7.84	8.15	8.45	8.88
q3	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38	0.37	0.38	0.38	0.39	0.39
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	9.28	9.78	10.14	10.49	10.94	11.48	11.99	12.49	12.97	13.44
q3	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.46	0.48	0.49	0.51
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	13.90	14.80	15.67	16.54	17.41	18.27	19.15	20.04	20.93	21.84
q3	0.53	0.57	0.60	0.66	0.72	0.77	0.85	0.91	0.97	1.05
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	22.76	23.69	24.63	25.58	26.53	28.46	31.37	33.31	35.25	37.17
q3	1.13	1.20	1.28	1.35	1.42	1.53	1.70	1.86	1.99	2.10
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	39.09	40.99	42.87	45.68	47.53	52.09	54.75	57.35	60.70	63.12
q3	2.23	2.33	2.43	2.57	2.70	2.87	3.02	3.13	3.22	3.29
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	65.44	69.10	71.82	74.96	77.81	80.37	82.64	84.67	88.64	91.78
q3	3.30	3.32	3.29	3.22	3.11	2.97	2.78	2.62	2.32	1.89
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	92.74	94.35	95.61	96.61	97.39	98.01	98.50	98.88	99.22	99.48
q3	1.82	1.44	1.21	1.03	0.85	0.72	0.60	0.49	0.39	0.31
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	99.71	99.80	99.96	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.22	0.15	0.09	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

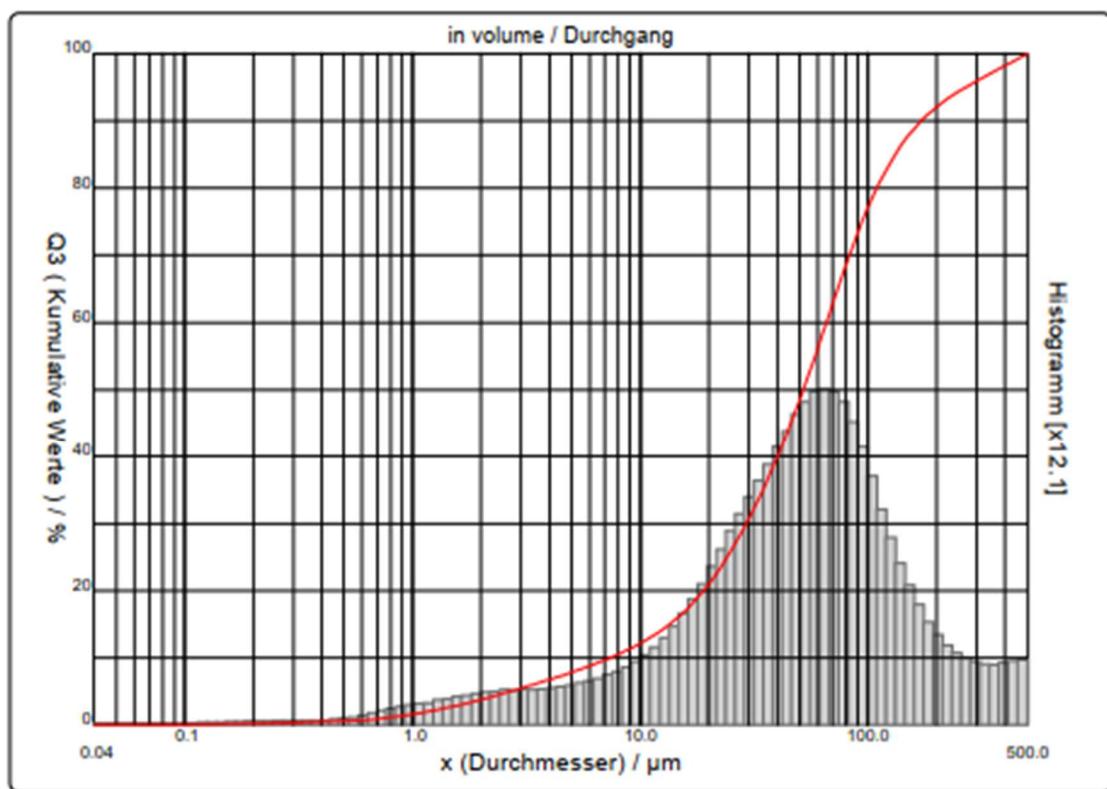
x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

Versuchsreihe Nr. 13, Demonstrator 1, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser											in volume / Durchgang	
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00		
Q3	0.00	0.07	0.60	1.60	3.77	5.78	6.78	8.79	10.52	12.15		
x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0		
Q3	16.35	20.96	32.60	44.27	58.23	80.79	86.35	93.29	96.30	100.00		

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 13, Demonstrator 1, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$

Standarddurchmesser Durchgang

Standarddurchmesser in volume / Durchgang										
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
x	0.00	0.04	0.07	0.21	0.37	0.49	0.60	0.74	0.91	1.13
Q3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.11
q3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.11
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.36	1.60	1.84	2.07	2.29	2.52	2.95	3.37	3.77	4.16
q3	0.13	0.15	0.17	0.18	0.18	0.21	0.21	0.24	0.25	0.27
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	4.52	4.86	5.19	5.49	5.78	6.05	6.30	6.55	6.78	7.12
q3	0.28	0.28	0.30	0.29	0.30	0.30	0.29	0.31	0.30	0.31
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	7.43	7.84	8.13	8.42	8.79	9.24	9.67	10.10	10.52	10.93
q3	0.31	0.33	0.33	0.35	0.36	0.37	0.39	0.42	0.43	0.45
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	11.34	12.15	12.97	13.79	14.63	15.48	16.35	17.24	18.15	19.08
q3	0.48	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76	0.84	0.92	1.00	1.08
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	20.01	20.96	21.92	22.89	23.86	25.82	28.76	30.69	32.60	34.48
q3	1.15	1.23	1.31	1.39	1.45	1.57	1.73	1.86	1.97	2.07
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	36.33	38.14	39.93	42.56	44.27	48.42	50.82	53.13	56.10	58.23
q3	2.16	2.23	2.33	2.42	2.51	2.62	2.74	2.80	2.87	2.91
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	60.26	63.48	65.83	68.57	71.07	73.32	75.34	77.16	80.79	83.76
q3	2.91	2.92	2.88	2.83	2.75	2.62	2.49	2.36	2.13	1.80
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	84.71	86.35	87.72	88.87	89.85	90.69	91.41	92.04	92.71	93.29
q3	1.61	1.47	1.32	1.19	1.08	0.98	0.89	0.82	0.77	0.70
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	93.97	94.35	95.34	95.91	96.30	97.23	98.16	98.65	99.12	100.00
q3	0.66	0.62	0.58	0.55	0.53	0.52	0.52	0.54	0.55	0.56

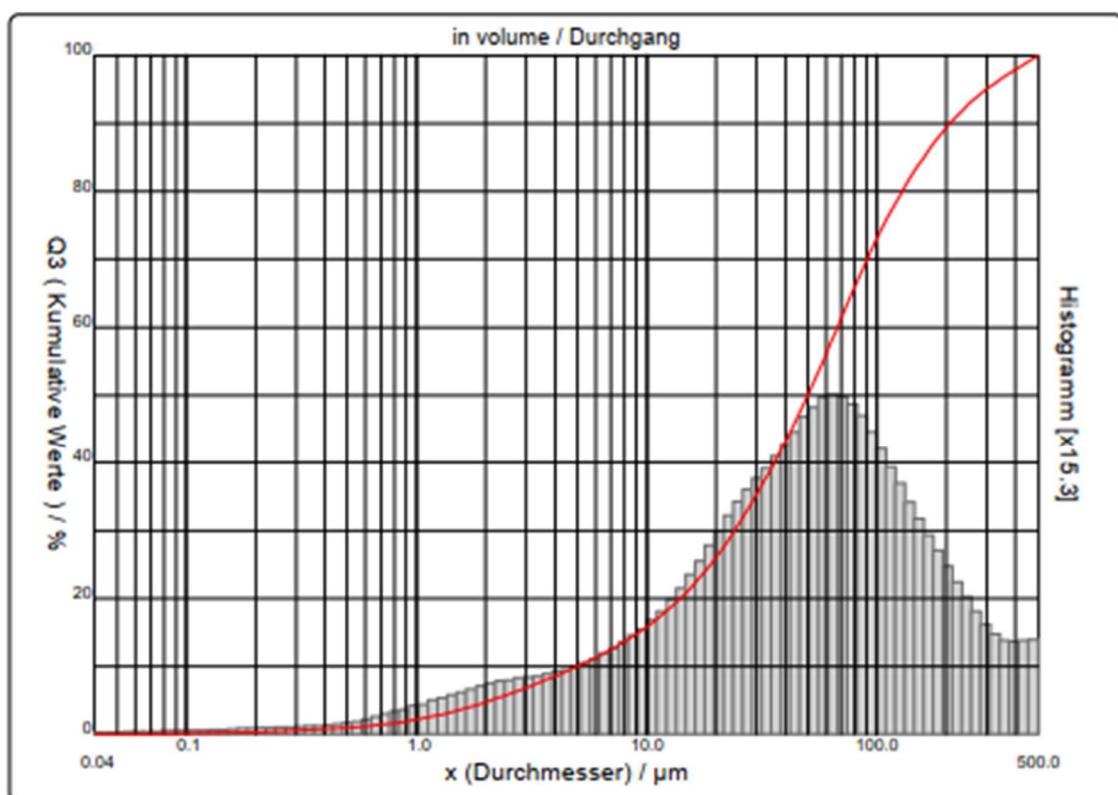
x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

Versuchsreihe Nr. 28, Demonstrator 2, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gegendrehend

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser										in volume / Durchgang	
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00	
Q3	0.00	0.13	0.99	2.18	4.75	7.25	8.56	11.27	13.63	15.83	
x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0	
Q3	21.00	26.01	36.94	46.64	57.74	76.36	82.10	91.23	95.59	100.00	

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 28, Demonstrator 2, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gegendrehend

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser in volume / Durchgang									
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.06	0.13	0.37	0.60	0.80	0.99	1.19	1.41	1.66
q3	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.10	0.13
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.92	2.18	2.45	2.71	2.98	3.24	3.76	4.26	4.75	5.22
q3	0.15	0.17	0.19	0.20	0.23	0.24	0.26	0.29	0.31	0.33
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	5.67	6.10	6.50	6.89	7.25	7.60	7.93	8.25	8.56	9.01
q3	0.35	0.36	0.36	0.38	0.38	0.39	0.39	0.40	0.41	0.42
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	9.44	9.98	10.38	10.77	11.27	11.88	12.48	13.06	13.63	14.19
q3	0.43	0.44	0.46	0.48	0.49	0.51	0.55	0.57	0.60	0.62
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	14.75	15.83	16.89	17.93	18.96	19.99	21.00	22.02	23.02	24.02
q3	0.66	0.69	0.75	0.81	0.87	0.94	0.99	1.07	1.11	1.18
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	25.02	26.01	26.98	27.95	28.91	30.80	33.52	35.26	36.94	38.56
q3	1.25	1.30	1.34	1.41	1.46	1.53	1.62	1.70	1.76	1.80
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	40.12	41.64	43.12	45.26	46.64	49.97	51.88	53.71	56.06	57.74
q3	1.84	1.90	1.95	2.00	2.05	2.13	2.21	2.24	2.30	2.33
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	59.35	61.88	63.76	65.95	67.96	69.82	71.51	73.08	76.36	79.30
q3	2.34	2.34	2.32	2.29	2.24	2.20	2.11	2.07	1.95	1.81
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	80.30	82.10	83.68	85.08	86.33	87.45	88.46	89.38	90.36	91.23
q3	1.72	1.64	1.55	1.46	1.39	1.32	1.26	1.21	1.14	1.07
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	92.26	92.83	94.28	95.07	95.59	96.78	97.89	98.46	99.00	100.00
q3	1.01	0.94	0.86	0.77	0.72	0.67	0.63	0.63	0.64	0.64

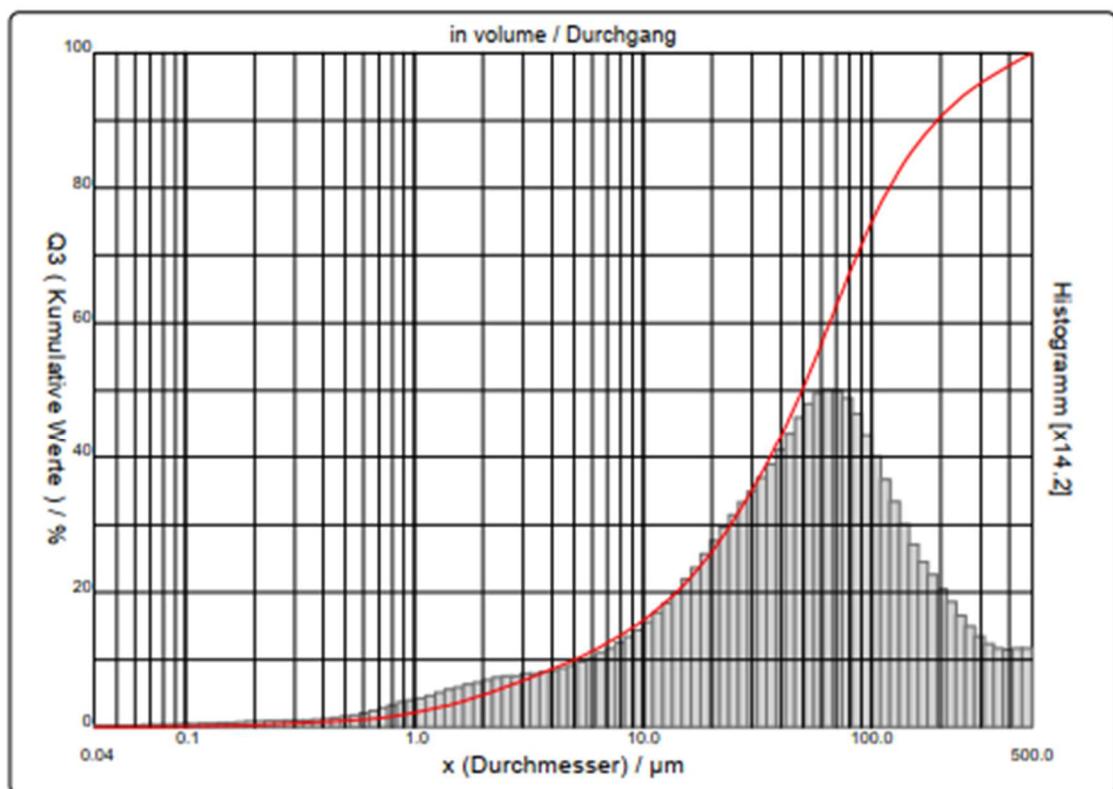
x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

Versuchsreihe Nr. 29, Demonstrator 2, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gegendrehend

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser										in volume / Durchgang		
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00		
Q3	0.01	0.12	0.95	2.17	4.81	7.33	8.64	11.31	13.64	15.83		
x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0		
Q3	20.99	25.97	36.80	46.76	58.57	78.32	83.92	92.17	96.03	100.00		

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 29, Demonstrator 2, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gegendrehend

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser					in volume / Durchgang				
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.06	0.12	0.35	0.58	0.77	0.95	1.15	1.37	1.62
q3	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.05	0.07	0.10	0.13
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.89	2.17	2.45	2.72	2.99	3.26	3.80	4.31	4.81	5.28
q3	0.15	0.18	0.20	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.32	0.33
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	5.74	6.17	6.58	6.96	7.33	7.68	8.01	8.33	8.64	9.08
q3	0.38	0.38	0.37	0.37	0.39	0.39	0.39	0.40	0.41	0.41
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	9.50	10.04	10.43	10.81	11.31	11.91	12.50	13.08	13.64	14.20
q3	0.42	0.44	0.45	0.47	0.49	0.51	0.54	0.57	0.58	0.62
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	14.75	15.83	16.88	17.93	18.96	19.98	20.99	22.00	23.01	24.00
q3	0.65	0.69	0.74	0.81	0.87	0.93	0.99	1.05	1.12	1.17
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	24.99	25.97	26.94	27.90	28.85	30.71	33.40	35.13	36.80	38.43
q3	1.23	1.29	1.34	1.39	1.44	1.50	1.60	1.69	1.74	1.81
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	40.02	41.57	43.09	45.31	46.76	50.26	52.29	54.25	56.76	58.57
q3	1.87	1.93	2.00	2.07	2.15	2.24	2.35	2.40	2.45	2.50
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	60.30	63.02	65.05	67.41	69.57	71.54	73.33	74.96	78.32	81.24
q3	2.51	2.51	2.50	2.46	2.40	2.32	2.23	2.14	2.00	1.79
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	82.21	83.92	85.40	86.68	87.80	88.80	89.71	90.52	91.39	92.17
q3	1.67	1.56	1.45	1.34	1.25	1.18	1.13	1.06	1.01	0.95
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	93.08	93.58	94.86	95.56	96.03	97.09	98.10	98.61	99.10	100.00
q3	0.89	0.83	0.76	0.68	0.65	0.60	0.57	0.57	0.58	0.58

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

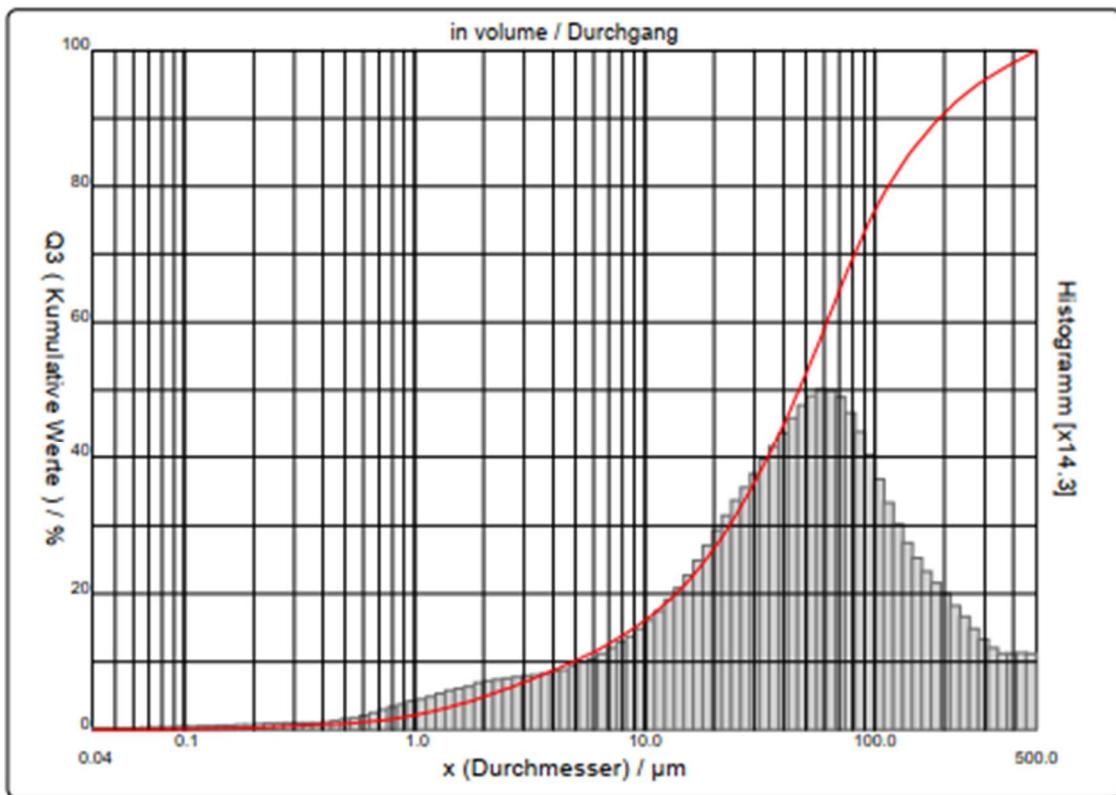
Versuchsreihe Nr. 30, Demonstrator 2, $v = 20 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gegendrehend

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser										in volume / Durchgang	
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00	
Q3	0.01	0.12	0.92	2.16	4.86	7.41	8.72	11.44	13.82	16.05	

x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0	
Q3	21.37	26.57	38.09	48.65	60.74	79.50	84.56	92.36	96.17	100.00	

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 30, Demonstrator 2, $v = 20 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gegendrehend

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser					in volume / Durchgang				
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
x	0.01	0.06	0.12	0.34	0.56	0.75	0.92	1.12	1.34	1.60
Q3	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.05	0.07	0.10	0.13
q3	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.05	0.07	0.10	0.13
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.88	2.16	2.45	2.73	3.01	3.29	3.84	4.36	4.86	5.35
q3	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.25	0.28	0.30	0.32	0.35
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	5.81	6.24	6.65	7.04	7.41	7.76	8.09	8.41	8.72	9.17
q3	0.36	0.36	0.37	0.38	0.39	0.39	0.39	0.40	0.41	0.42
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	9.60	10.14	10.54	10.93	11.44	12.05	12.65	13.24	13.82	14.39
q3	0.43	0.44	0.46	0.48	0.50	0.51	0.55	0.58	0.61	0.63
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	14.95	16.05	17.13	18.20	19.26	20.32	21.37	22.42	23.46	24.50
q3	0.66	0.70	0.76	0.83	0.89	0.96	1.02	1.10	1.15	1.22
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	25.54	26.57	27.60	28.61	29.61	31.59	34.46	36.30	38.09	39.83
q3	1.29	1.35	1.42	1.46	1.51	1.60	1.70	1.80	1.87	1.93
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	41.53	43.18	44.79	47.13	48.65	52.30	54.38	56.38	58.93	60.74
q3	2.00	2.05	2.11	2.18	2.25	2.33	2.40	2.45	2.49	2.50
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	62.47	65.14	67.12	69.38	71.42	73.27	74.94	76.44	79.50	82.14
q3	2.50	2.46	2.43	2.36	2.27	2.18	2.08	1.97	1.82	1.62
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	83.01	84.56	85.91	87.10	88.16	89.11	89.97	90.75	91.60	92.36
q3	1.49	1.41	1.32	1.24	1.18	1.12	1.07	1.02	0.98	0.93
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	93.25	93.75	95.02	95.71	96.17	97.20	98.17	98.67	99.14	100.00
q3	0.87	0.82	0.75	0.67	0.63	0.58	0.55	0.56	0.55	0.55

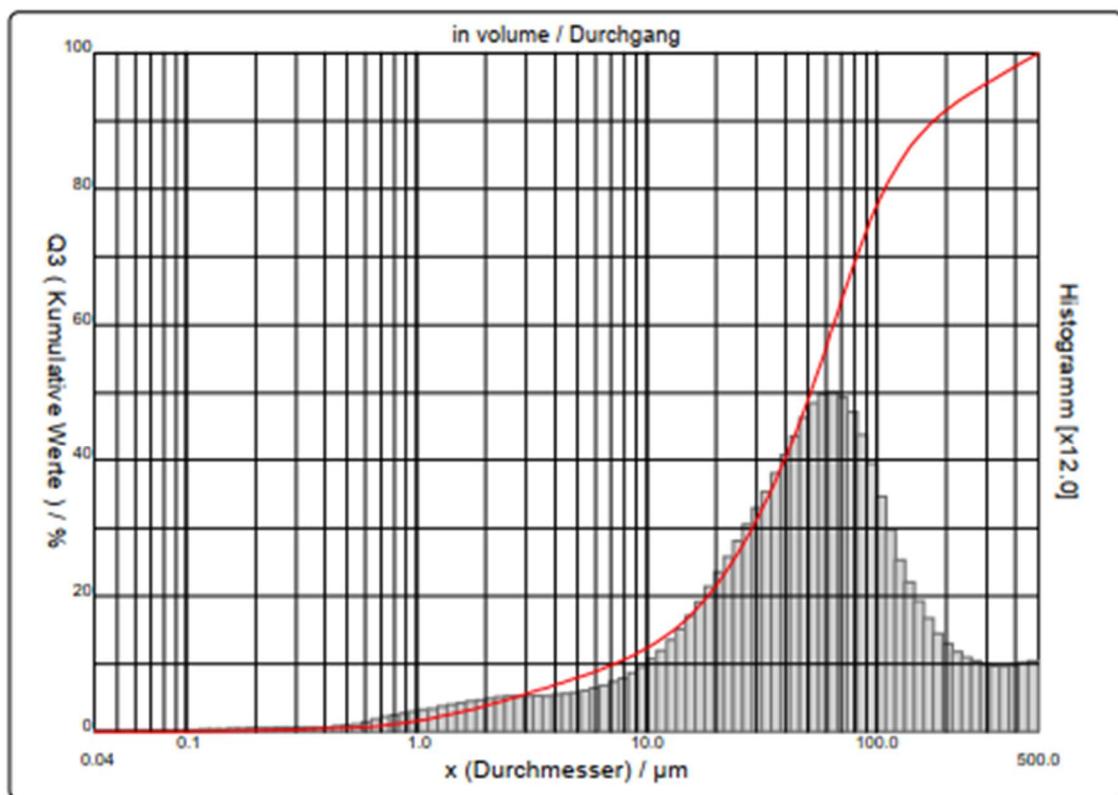
x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

Versuchsreihe Nr. 40, Demonstrator 3, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 11\text{--}12 \text{ mm}$, gleichläufig

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser										in volume / Durchgang	
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00	
Q3	0.00	0.07	0.60	1.62	3.85	5.90	6.91	8.92	10.66	12.32	
x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0	
Q3	16.72	21.50	33.04	44.63	58.81	81.06	86.23	92.83	95.98	100.00	

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 40, Demonstrator 3, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 11\text{--}12 \text{ mm}$, gleichläufig

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser in volume / Durchgang									
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.04	0.07	0.21	0.37	0.49	0.60	0.74	0.91	1.14
q3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.11
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.38	1.62	1.86	2.10	2.33	2.56	3.01	3.44	3.85	4.24
q3	0.14	0.15	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22	0.24	0.26	0.27
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	4.61	4.97	5.30	5.61	5.90	6.17	6.43	6.68	6.91	7.25
q3	0.28	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.30	0.31
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	7.57	7.98	8.27	8.55	8.92	9.37	9.81	10.23	10.66	11.07
q3	0.32	0.33	0.33	0.34	0.36	0.37	0.40	0.41	0.44	0.45
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	11.49	12.32	13.17	14.03	14.91	15.81	16.72	17.65	18.60	19.56
q3	0.49	0.53	0.59	0.66	0.73	0.81	0.88	0.96	1.04	1.12
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	20.52	21.50	22.47	23.45	24.43	26.37	29.26	31.16	33.04	34.88
q3	1.18	1.27	1.33	1.40	1.47	1.55	1.70	1.84	1.94	2.02
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	36.71	38.51	40.29	42.91	44.63	48.84	51.27	53.63	56.65	58.81
q3	2.13	2.22	2.31	2.42	2.52	2.66	2.78	2.86	2.92	2.95
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	60.88	64.10	66.49	69.22	71.69	73.90	75.87	77.62	81.06	83.84
q3	2.97	2.94	2.91	2.82	2.72	2.58	2.43	2.27	2.02	1.69
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	84.71	86.23	87.49	88.57	89.49	90.29	90.98	91.59	92.25	92.83
q3	1.48	1.37	1.22	1.12	1.01	0.93	0.85	0.79	0.76	0.70
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	93.52	93.91	94.96	95.56	95.98	96.99	98.00	98.53	99.04	100.00
q3	0.67	0.64	0.62	0.58	0.57	0.56	0.56	0.58	0.59	0.61

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

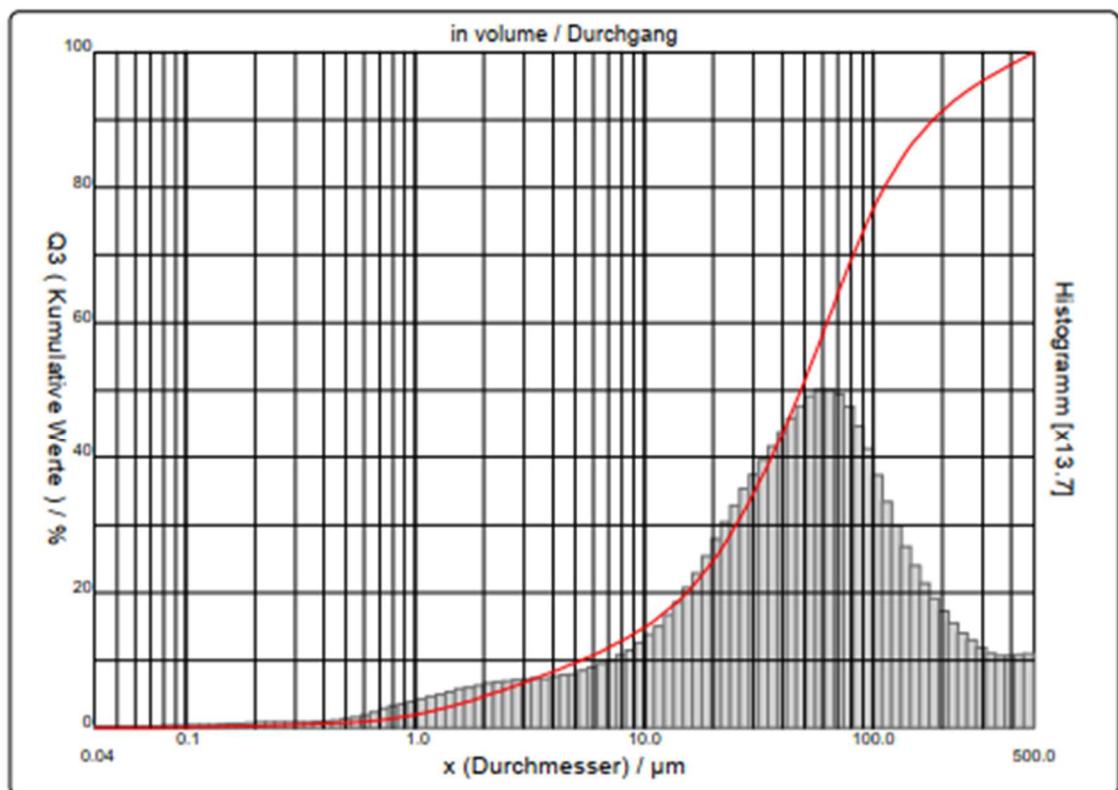
Versuchsreihe Nr. 41, Demonstrator 3, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 11\text{--}12 \text{ mm}$,
gegenläufig

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser										in volume / Durchgang	
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	8.00	8.00	10.00	
Q3	0.01	0.10	0.82	2.03	4.67	7.11	8.34	10.80	12.90	14.85	

x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0	
Q3	19.69	24.70	36.47	47.52	60.16	80.06	85.31	92.74	96.19	100.00	

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 41, Demonstrator 3, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 11\text{--}12 \text{ mm}$,
gegenläufig

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser					in volume / Durchgang				
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.05	0.10	0.30	0.51	0.67	0.82	1.00	1.21	1.47
q3	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.13
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.75	2.03	2.31	2.59	2.87	3.14	3.67	4.19	4.67	5.14
q3	0.16	0.18	0.20	0.22	0.23	0.24	0.27	0.30	0.31	0.33
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	5.58	6.00	6.39	6.76	7.11	7.44	7.76	8.08	8.34	8.76
q3	0.34	0.35	0.35	0.36	0.36	0.37	0.38	0.37	0.37	0.39
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	9.15	9.65	10.00	10.35	10.80	11.35	11.88	12.40	12.90	13.40
q3	0.39	0.40	0.40	0.43	0.44	0.46	0.48	0.51	0.52	0.55
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	13.89	14.85	15.82	16.78	17.74	18.71	19.69	20.68	21.68	22.68
q3	0.58	0.61	0.68	0.74	0.81	0.88	0.95	1.03	1.11	1.18
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	23.69	24.70	25.72	26.73	27.74	29.74	32.69	34.61	36.47	38.29
q3	1.25	1.32	1.40	1.46	1.53	1.61	1.75	1.87	1.94	2.02
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	40.06	41.79	43.47	45.93	47.52	51.34	53.51	55.60	58.27	60.16
q3	2.08	2.15	2.20	2.28	2.35	2.44	2.50	2.55	2.60	2.60
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	61.97	64.78	66.87	69.27	71.45	73.42	75.20	76.81	80.06	82.82
q3	2.61	2.58	2.56	2.50	2.42	2.31	2.21	2.11	1.93	1.69
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	83.72	85.31	86.68	87.86	88.89	89.79	90.59	91.30	92.07	92.74
q3	1.54	1.44	1.33	1.23	1.14	1.06	0.99	0.93	0.89	0.82
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	93.54	93.98	95.12	95.77	96.19	97.19	98.15	98.65	99.12	100.00
q3	0.78	0.72	0.68	0.63	0.58	0.56	0.54	0.55	0.55	0.56

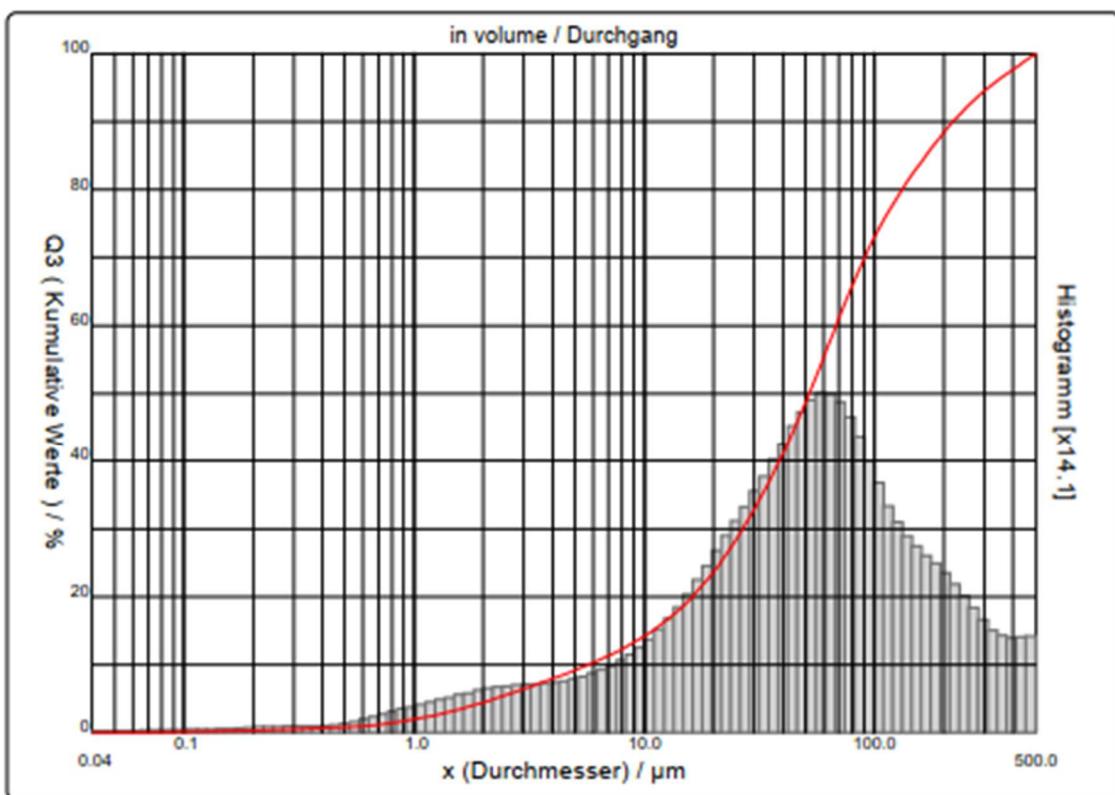
x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

Versuchsreihe Nr. 42, Demonstrator 3, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 11\text{--}12 \text{ mm}$, gleichläufig

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser											in volume / Durchgang										
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00											
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00											
Q3	0.01	0.11	0.83	1.98	4.47	6.80	7.98	10.30	12.29	14.18											
x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0											
Q3	18.89	23.65	34.51	44.89	57.12	76.12	81.36	90.32	95.09	100.00											

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 42, Demonstrator 3, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 11\text{--}12 \text{ mm}$, gleichläufig

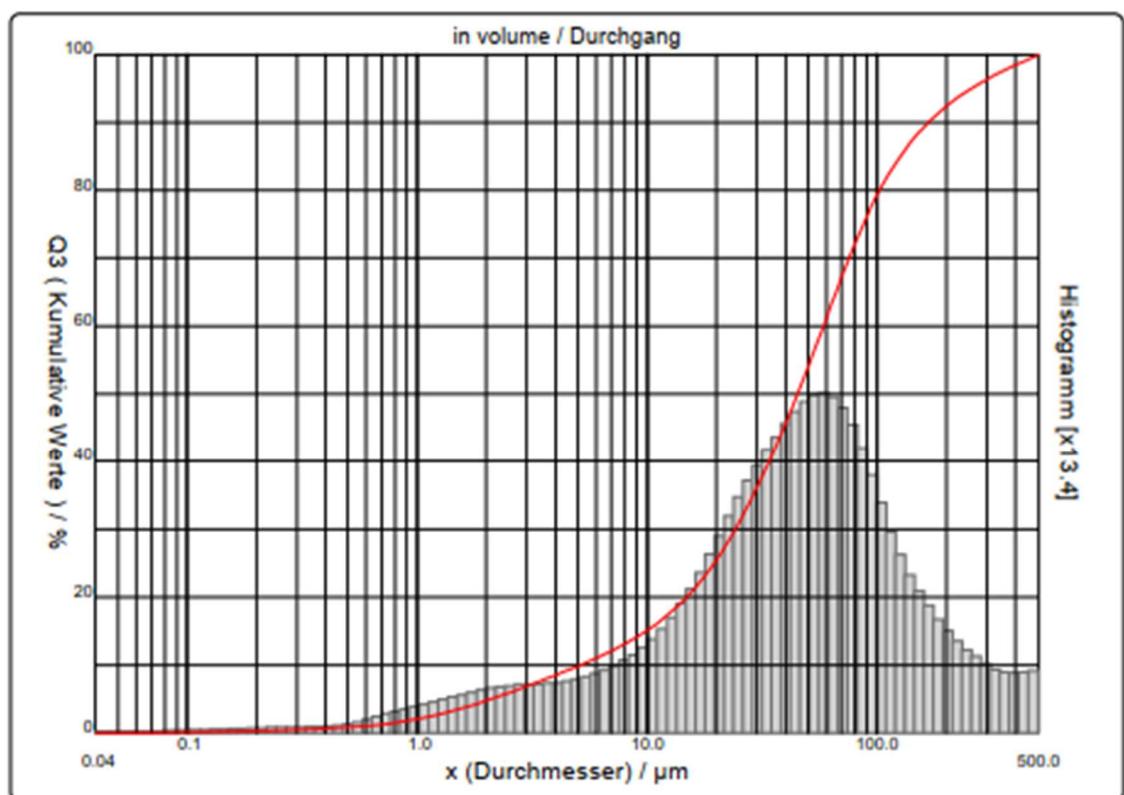
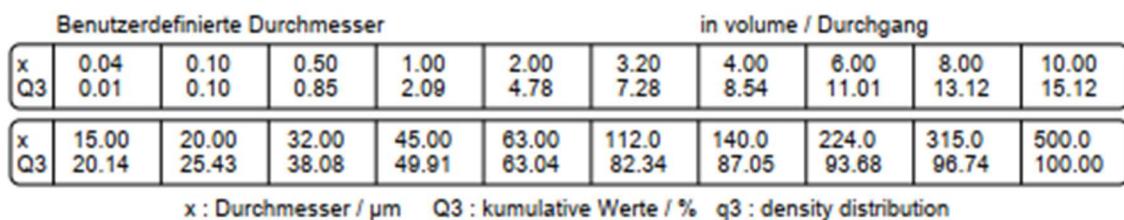
Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser					in volume / Durchgang				
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.05	0.11	0.30	0.51	0.68	0.83	1.00	1.21	1.45
q3	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.09	0.12
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.71	1.98	2.24	2.50	2.76	3.02	3.52	4.01	4.47	4.92
q3	0.15	0.17	0.18	0.20	0.22	0.24	0.25	0.28	0.29	0.32
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	5.34	5.74	6.11	6.47	6.80	7.12	7.42	7.70	7.98	8.37
q3	0.32	0.34	0.34	0.35	0.34	0.35	0.35	0.35	0.37	0.36
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	8.74	9.21	9.55	9.88	10.30	10.82	11.32	11.81	12.29	12.77
q3	0.37	0.38	0.39	0.40	0.41	0.44	0.45	0.48	0.50	0.53
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	13.24	14.18	15.11	16.05	16.99	17.94	18.89	19.84	20.79	21.75
q3	0.55	0.60	0.66	0.73	0.79	0.86	0.93	0.99	1.05	1.13
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	22.70	23.65	24.60	25.54	26.48	28.33	31.04	32.79	34.51	36.20
q3	1.18	1.25	1.31	1.36	1.42	1.49	1.61	1.71	1.79	1.87
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	37.84	39.46	41.05	43.37	44.89	48.56	50.66	52.69	55.28	57.12
q3	1.93	2.01	2.08	2.16	2.25	2.34	2.42	2.48	2.52	2.54
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	58.87	61.59	63.59	65.88	67.95	69.82	71.50	73.01	76.12	78.81
q3	2.53	2.50	2.45	2.39	2.30	2.20	2.09	1.98	1.85	1.65
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	79.72	81.36	82.83	84.15	85.35	86.44	87.45	88.38	89.40	90.32
q3	1.56	1.49	1.43	1.38	1.33	1.28	1.26	1.22	1.18	1.12
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	91.42	92.04	93.63	94.51	95.09	96.41	97.66	98.29	98.89	100.00
q3	1.07	1.02	0.94	0.86	0.80	0.74	0.70	0.70	0.71	0.71

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

Versuchsreihe Nr. 43, Demonstrator 3, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 11\text{--}12 \text{ mm}$,
gegenläufig

Siebkurve



Versuchsreihe Nr. 43, Demonstrator 3, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 11\text{--}12 \text{ mm}$,
gegenläufig

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser						in volume / Durchgang			
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.05	0.10	0.31	0.52	0.69	0.85	1.03	1.25	1.52
q3	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.10	0.14
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.80	2.09	2.38	2.66	2.94	3.22	3.76	4.28	4.78	5.26
q3	0.16	0.18	0.20	0.22	0.23	0.25	0.27	0.30	0.32	0.34
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	5.71	6.14	6.54	6.93	7.28	7.62	7.94	8.24	8.54	8.95
q3	0.35	0.36	0.36	0.38	0.36	0.38	0.38	0.37	0.39	0.38
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	9.35	9.85	10.21	10.56	11.01	11.56	12.09	12.61	13.12	13.63
q3	0.40	0.40	0.41	0.43	0.44	0.46	0.48	0.51	0.53	0.56
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	14.13	15.12	16.11	17.10	18.10	19.11	20.14	21.18	22.23	23.29
q3	0.59	0.63	0.70	0.76	0.84	0.91	1.00	1.08	1.16	1.24
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	24.35	25.43	26.51	27.59	28.67	30.83	34.01	36.07	38.08	40.04
q3	1.31	1.41	1.48	1.56	1.63	1.74	1.88	2.00	2.09	2.17
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	41.95	43.80	45.60	48.22	49.91	53.92	56.20	58.37	61.11	63.04
q3	2.24	2.29	2.35	2.43	2.49	2.55	2.62	2.64	2.66	2.65
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	64.87	67.70	69.77	72.12	74.24	76.13	77.82	79.33	82.34	84.83
q3	2.64	2.60	2.53	2.44	2.34	2.22	2.10	1.97	1.78	1.52
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	85.64	87.05	88.27	89.32	90.24	91.05	91.76	92.40	93.08	93.68
q3	1.38	1.28	1.19	1.09	1.02	0.95	0.88	0.84	0.78	0.73
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	94.39	94.78	95.80	96.36	96.74	97.60	98.43	98.85	99.25	100.00
q3	0.69	0.64	0.60	0.54	0.52	0.48	0.47	0.46	0.47	0.48

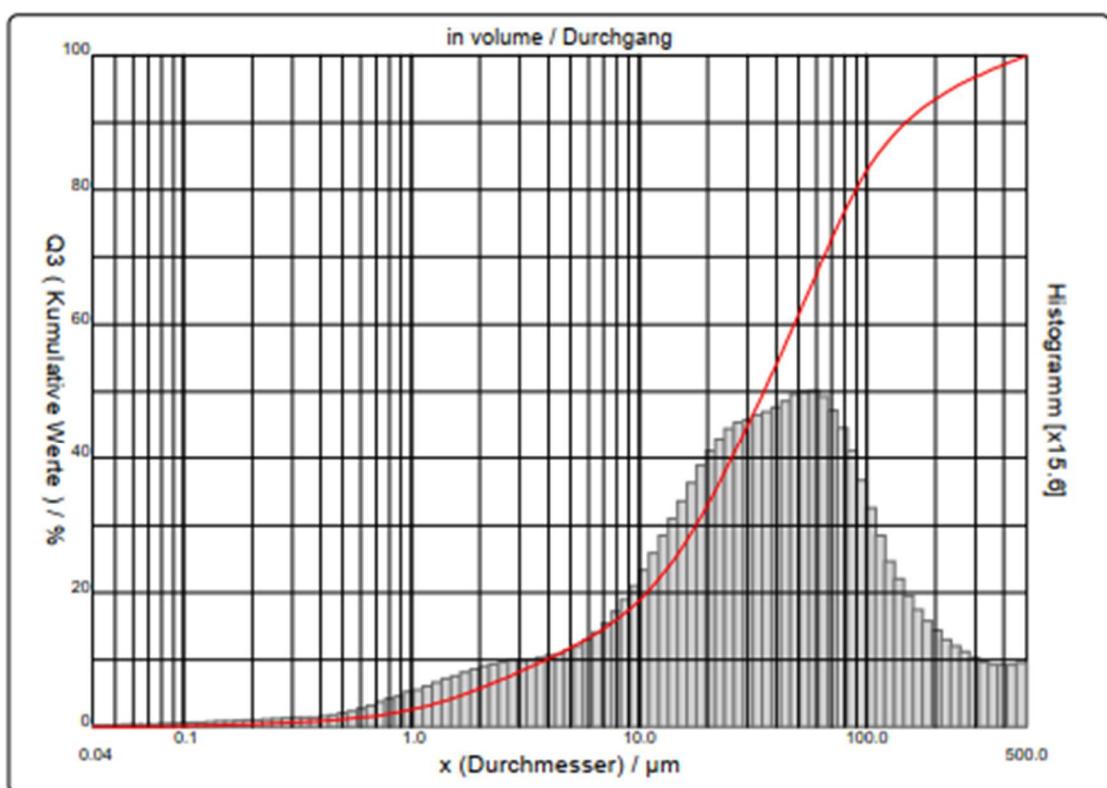
x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

Versuchsreihe Nr. 55, Demonstrator 2, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gleichdrehend

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser											in volume / Durchgang										
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00											
Q3	0.01	0.14	1.15	2.61	5.72	8.69	10.19	13.24	16.01	18.82											
x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0											
Q3	26.03	33.01	46.93	57.83	69.16	85.34	89.18	94.52	97.11	100.00											

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 55, Demonstrator 2, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gleichdrehend

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser					in volume / Durchgang				
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.07	0.14	0.42	0.69	0.93	1.15	1.40	1.67	1.97
q3	0.00	0.01	0.01	0.03	0.05	0.06	0.07	0.09	0.12	0.15
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	2.29	2.61	2.94	3.26	3.58	3.90	4.53	5.13	5.72	6.28
q3	0.18	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.32	0.34	0.38	0.40
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	6.82	7.32	7.80	8.26	8.69	9.09	9.47	9.84	10.19	10.70
q3	0.42	0.42	0.44	0.45	0.45	0.45	0.45	0.46	0.46	0.48
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	11.18	11.79	12.24	12.67	13.24	13.94	14.63	15.32	16.01	16.71
q3	0.48	0.50	0.52	0.53	0.56	0.59	0.63	0.68	0.72	0.78
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	17.41	18.82	20.25	21.69	23.14	24.59	26.03	27.46	28.87	30.27
q3	0.83	0.91	1.02	1.12	1.23	1.32	1.41	1.50	1.57	1.66
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	31.65	33.01	34.34	35.64	36.91	39.36	42.80	44.93	46.93	48.83
q3	1.73	1.79	1.85	1.89	1.93	1.99	2.05	2.09	2.10	2.12
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	50.64	52.36	54.00	56.34	57.83	61.33	63.30	65.16	67.51	69.16
q3	2.14	2.15	2.18	2.19	2.22	2.25	2.29	2.29	2.31	2.29
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	70.72	73.12	74.86	76.85	78.62	80.21	81.61	82.86	85.34	87.38
q3	2.27	2.22	2.15	2.09	1.98	1.88	1.75	1.65	1.48	1.26
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	88.03	89.18	90.16	91.00	91.74	92.38	92.96	93.47	94.03	94.52
q3	1.12	1.05	0.96	0.88	0.83	0.76	0.73	0.67	0.65	0.60
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	95.11	95.44	96.30	96.79	97.11	97.87	98.60	98.98	99.33	100.00
q3	0.58	0.55	0.51	0.48	0.44	0.43	0.41	0.42	0.41	0.43

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

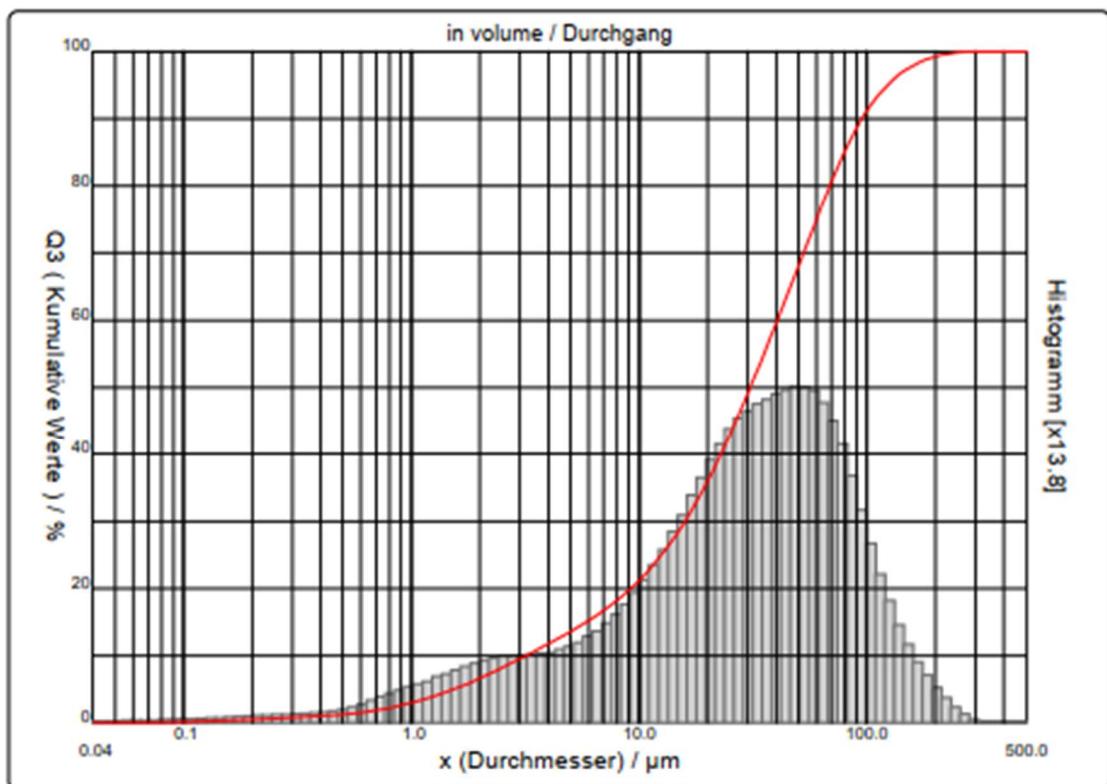
Versuchsreihe Nr. 57, Demonstrator 2, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gleichdrehend

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser										in volume / Durchgang			
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00			
Q3	0.01	0.16	1.29	2.99	6.63	10.06	11.78	15.21	18.25	21.20			

x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0
Q3	28.62	35.94	51.39	64.00	76.83	93.45	98.65	99.62	100.00	100.00

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 57, Demonstrator 2, v = 15 mm/s, d = 10 mm, gleichdrehend

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser					in volume / Durchgang				
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.08	0.16	0.47	0.78	1.04	1.29	1.56	1.87	2.23
q3	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.10	0.14	0.18
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	2.61	2.99	3.38	3.76	4.13	4.51	5.24	5.95	6.63	7.28
q3	0.22	0.24	0.28	0.29	0.31	0.35	0.37	0.41	0.43	0.46
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	7.90	8.49	9.05	9.57	10.06	10.52	10.96	11.38	11.78	12.35
q3	0.48	0.50	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.52	0.53	0.53
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	12.89	13.59	14.09	14.57	15.21	15.99	16.75	17.50	18.25	18.99
q3	0.54	0.57	0.58	0.59	0.63	0.66	0.69	0.73	0.78	0.82
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	19.73	21.20	22.68	24.16	25.65	27.13	28.62	30.10	31.57	33.04
q3	0.87	0.94	1.05	1.15	1.25	1.35	1.46	1.55	1.63	1.73
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	34.50	35.94	37.36	38.77	40.15	42.84	46.69	49.10	51.39	53.58
q3	1.82	1.89	1.96	2.04	2.09	2.17	2.29	2.35	2.39	2.43
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	55.67	57.66	59.56	62.28	64.00	68.02	70.26	72.37	74.99	76.83
q3	2.46	2.48	2.50	2.53	2.55	2.57	2.59	2.58	2.56	2.54
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	78.54	81.16	83.03	85.13	86.97	88.57	89.95	91.16	93.45	95.22
q3	2.48	2.42	2.30	2.19	2.05	1.89	1.72	1.59	1.36	1.09
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	95.76	96.65	97.35	97.91	98.35	98.71	99.00	99.23	99.45	99.62
q3	0.93	0.81	0.68	0.58	0.49	0.42	0.36	0.30	0.25	0.21
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	99.78	99.85	99.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.16	0.12	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

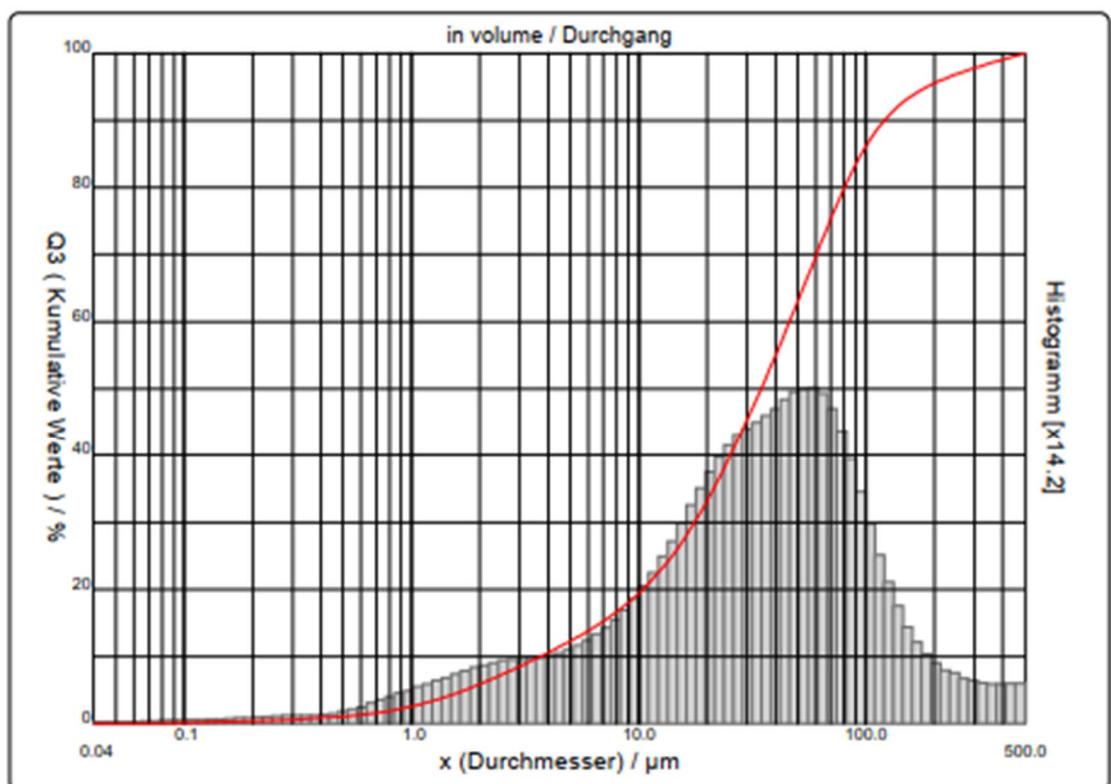
x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

Versuchsreihe Nr. 58, Demonstrator 2, $v = 20 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gleichdrehend

Siebkurve

Benutzerdefinierte Durchmesser										in volume / Durchgang		
x	0.04	0.10	0.50	1.00	2.00	3.20	4.00	6.00	8.00	10.00		
Q3	0.01	0.13	1.08	2.59	5.88	9.02	10.61	13.83	16.68	19.43		
x	15.00	20.00	32.00	45.00	63.00	112.0	140.0	224.0	315.0	500.0		
Q3	26.34	33.17	47.42	59.09	71.49	88.64	92.24	96.26	98.00	100.00		

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution



Versuchsreihe Nr. 58, Demonstrator 2, $v = 20 \text{ mm/s}$, $d = 10 \text{ mm}$, gleichdrehend

Standarddurchmesser Durchgang

	Standarddurchmesser					in volume / Durchgang				
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.01	0.06	0.13	0.39	0.65	0.88	1.08	1.32	1.59	1.91
q3	0.00	0.01	0.01	0.03	0.04	0.05	0.06	0.09	0.12	0.16
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	2.24	2.59	2.93	3.28	3.62	3.96	4.62	5.26	5.88	6.48
q3	0.19	0.22	0.24	0.27	0.29	0.31	0.33	0.37	0.40	0.42
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	7.04	7.58	8.09	8.57	9.02	9.44	9.85	10.24	10.61	11.14
q3	0.43	0.46	0.48	0.47	0.47	0.47	0.48	0.49	0.49	0.49
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	11.65	12.30	12.77	13.23	13.83	14.56	15.28	15.98	16.68	17.37
q3	0.51	0.53	0.54	0.56	0.59	0.62	0.66	0.68	0.73	0.77
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	18.06	19.43	20.81	22.19	23.57	24.96	26.34	27.72	29.10	30.47
q3	0.81	0.88	0.98	1.07	1.16	1.27	1.35	1.44	1.54	1.62
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	31.83	33.17	34.50	35.80	37.08	39.57	43.10	45.32	47.42	49.42
q3	1.70	1.76	1.84	1.89	1.94	2.01	2.10	2.17	2.20	2.23
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	51.34	53.18	54.94	57.47	59.09	62.92	65.07	67.11	69.68	71.49
q3	2.27	2.30	2.31	2.36	2.40	2.45	2.49	2.50	2.51	2.50
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	73.20	75.82	77.72	79.86	81.75	83.42	84.88	86.16	88.64	90.60
q3	2.48	2.42	2.34	2.24	2.10	1.97	1.82	1.68	1.48	1.20
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	91.21	92.24	93.07	93.74	94.30	94.78	95.19	95.55	95.93	96.26
q3	1.05	0.94	0.81	0.70	0.62	0.57	0.51	0.47	0.44	0.40
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	96.65	96.88	97.45	97.78	98.00	98.52	99.03	99.29	99.54	100.00
q3	0.38	0.38	0.34	0.32	0.30	0.29	0.29	0.29	0.30	0.29

x : Durchmesser / μm Q3 : kumulative Werte / % q3 : density distribution

Messung der Korngrößen, durchgeführt von der Materialprüfanstalt Karlsruhe

Versuchsreihe Nr. 18, Betonfräse konventionell, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Messparameter

Messparameter detailliert

Dispergiereinstellungen			
Small Volume Unit verwenden	Nein	Pumpe	Ja
Dispersionsultraschalldauer	0h 02m 00s	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewichtsdauer	-		
Messeinstellungen			
Messzeit	0h 01m 00s	Ultraschall	Ja
Rührergeschwindigkeit	250 rpm	Pumpengeschwindigkeit	120 rpm
Status	Erfolgreich	Lichtabschwächung	5,0 - 15,0%
Spülen	4 Spülzyklen		
Analyse			
Rekonstruktionsmodus	Fraunhofer	Analysemodus	General
Name	Na4P2O7 0,2%-Lösung	Brechungsindex Laser 2	1,3309
Brechungsindex Laser 1	1,3294		

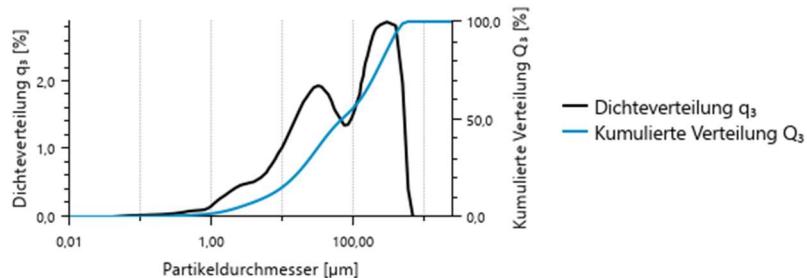
Dispersionsparameter

Ultraschall	Ja	Ultraschalldauer	0h 02m 00s
Pumpe	Ja	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Blasenentfernung	Ja	Gleichgewichtsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewicht	Nein		

D-Werte - Volumen Untergröße

	Volumen
D10 [μm]	5,813
D50 [μm]	69,254
D90 [μm]	348,774
Mittlere Größe [μm]	142,256
Verteilungsbreite	4,952
D[5,3]	209,124 μm

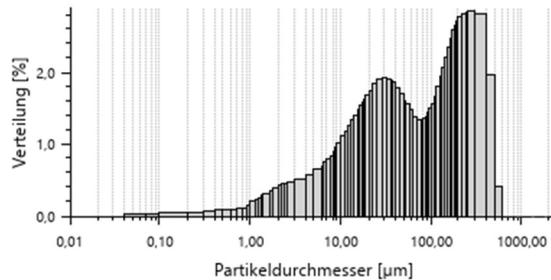
Verteilung (kumuliert) - Volumen Untergröße



Versuchsreihe Nr. 18, Betonfräse konventionell, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Siebkurve

Verteilung - Volumen



Benutzerdefinierte Größenklassen

Größenklasse	Volumen [%]	Oberfläche [%]	Anzahl [%]
0,01 μm - 0,04 μm	0,00	0,00	0,00
0,01 μm - 0,1 μm	0,10	11,98	83,99
0,01 μm - 0,5 μm	0,82	35,28	98,80
0,01 μm - 3,2 μm	6,25	69,07	99,98
0,01 μm - 4 μm	7,51	72,24	99,99
0,01 μm - 6 μm	10,23	77,27	99,99
0,01 μm - 8 μm	12,69	80,72	100,00
0,01 μm - 10 μm	15,09	83,31	100,00
0,01 μm - 20 μm	25,79	90,60	100,00
0,01 μm - 32 μm	35,54	94,27	100,00
0,01 μm - 45 μm	42,60	96,07	100,00
0,01 μm - 63 μm	48,54	97,15	100,00
0,01 μm - 112 μm	57,73	98,22	100,00
0,01 μm - 140 μm	62,52	98,58	100,00
0,01 μm - 224 μm	75,97	99,32	100,00
0,01 μm - 315 μm	86,80	99,70	100,00
0,01 μm - 500 μm	99,20	99,99	100,00
0,01 μm - 1000 μm	100,00	100,00	100,00

Versuchsreihe Nr. 19, Betonfräse konventionell, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Messparameter

Messparameter detailliert

Dispergiereinstellungen

Small Volume Unit verwenden	Nein	Pumpe	Ja
Dispersionsultraschalldauer	0h 02m 00s	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewichtsdauer	-		
Messeinstellungen			
Messzeit	0h 01m 00s	Ultraschall	Ja
Rührergeschwindigkeit	250 rpm	Pumpengeschwindigkeit	120 rpm
Status	Erfolgreich	Lichtabschwächung	5,0 - 15,0%
Spülen	4 Spülzyklen		
Analyse			
Rekonstruktionsmodus	Fraunhofer	Analysemodus	General
Name	Na4P2O7 0,2%-Lösung		
Brechungsindex Laser 1	1,3294	Brechungsindex Laser 2	1,3309

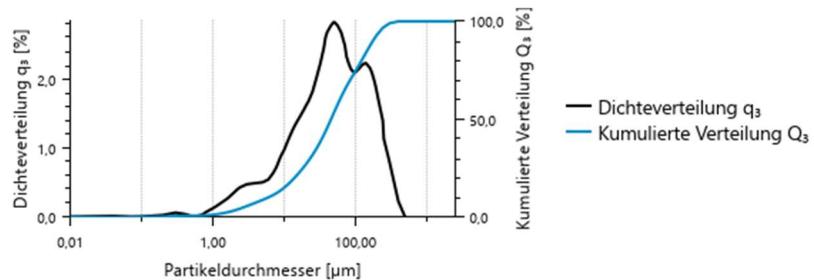
Dispersionsparameter

Ultraschall	Ja	Ultraschalldauer	0h 02m 00s
Pumpe	Ja		
Blasenentfernung	Ja	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewicht	Nein	Gleichgewichtsdauer	0h 00m 05s

D-Werte - Volumen Untergröße

	Volumen
D10 [μm]	5,824
D50 [μm]	45,237
D90 [μm]	174,196
Mittlere Größe [μm]	73,248
Verteilungsbreite	3,722
D[5,3]	104,582 μm

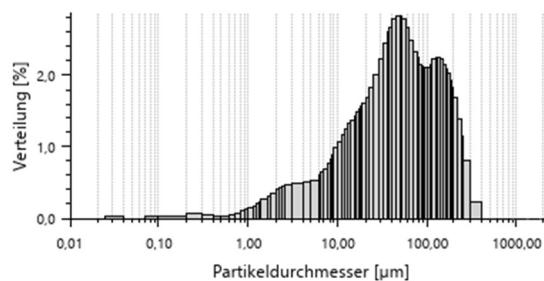
Verteilung (kumuliert) - Volumen Untergröße



Versuchsreihe Nr. 19, Betonfräse konventionell, $v = 10 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Siebkurve

Verteilung - Volumen



Benutzerdefinierte Größenklassen

Größenklasse	Volumen [%]	Oberfläche [%]	Anzahl [%]
0,01 µm - 0,04 µm	0,16	31,37	98,09
0,01 µm - 0,1 µm	0,17	32,06	98,43
0,01 µm - 0,5 µm	0,85	50,76	99,93
0,01 µm - 3,2 µm	6,17	73,34	100,00
0,01 µm - 4 µm	7,55	75,98	100,00
0,01 µm - 6 µm	10,20	79,73	100,00
0,01 µm - 8 µm	12,61	82,28	100,00
0,01 µm - 10 µm	15,17	84,38	100,00
0,01 µm - 20 µm	26,95	90,49	100,00
0,01 µm - 32 µm	38,52	93,77	100,00
0,01 µm - 45 µm	49,81	95,94	100,00
0,01 µm - 63 µm	61,59	97,56	100,00
0,01 µm - 112 µm	77,82	99,02	100,00
0,01 µm - 140 µm	84,09	99,39	100,00
0,01 µm - 224 µm	95,52	99,88	100,00
0,01 µm - 315 µm	99,33	99,99	100,00
0,01 µm - 500 µm	100,00	100,00	100,00
0,01 µm - 1000 µm	100,00	100,00	100,00

Versuchsreihe Nr. 20, Betonfräse konventionell, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Messparameter

Messparameter detailliert

Dispergiereinstellungen

Small Volume Unit verwenden	Nein	Pumpe	Ja
Dispersionsultraschalldauer	0h 02m 00s	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewichtsdauer	-		

Messeinstellungen

Meszeit	0h 01m 00s	Ultraschall	Ja
Rührergeschwindigkeit	250 rpm	Pumpengeschwindigkeit	120 rpm
Status	Erfolgreich	Lichtabschwächung	5,0 - 15,0%
Spülen	4 Spülzyklen		
Analyse			
Rekonstruktionsmodus	Fraunhofer	Analysemodus	General
Name	Na4P2O7 0,2%-Lösung	Brechungsindex Laser 2	1,3309
Brechungsindex Laser 1	1,3294		

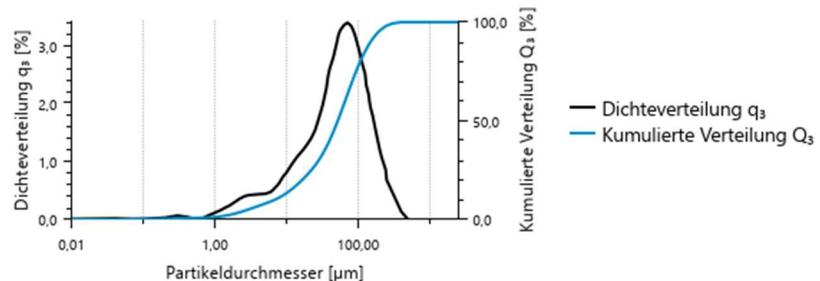
Dispersionsparameter

Ultraschall	Ja	Ultraschalldauer	0h 02m 00s
Pumpe	Ja	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Blasenentfernung	Ja	Gleichgewichtsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewicht	Nein		

D-Werte - Volumen Untergröße

	Volumen
D10 [μm]	6,792
D50 [μm]	51,775
D90 [μm]	147,890
Mittlere Größe [μm]	69,993
Verteilungsbreite	2,725
D[5,3]	94,699 μm

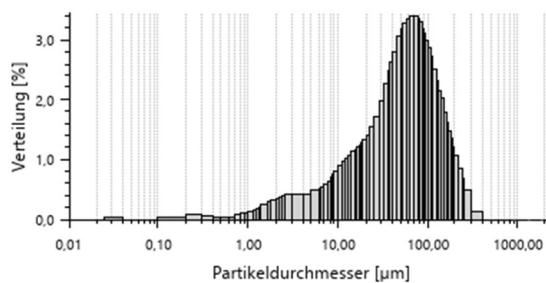
Verteilung (kumuliert) - Volumen Untergröße



Versuchsreihe Nr. 20, Betonfräse konventionell, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Siebkurve

Verteilung - Volumen



Benutzerdefinierte Größenklassen

Größenklasse	Volumen [%]	Oberfläche [%]	Anzahl [%]
0,01 μm - 0,04 μm	0,16	32,63	98,12
0,01 μm - 0,1 μm	0,17	33,28	98,43
0,01 μm - 0,5 μm	0,84	52,83	99,94
0,01 μm - 3,2 μm	5,60	74,10	100,00
0,01 μm - 4 μm	6,83	76,58	100,00
0,01 μm - 6 μm	9,17	80,06	100,00
0,01 μm - 8 μm	11,26	82,39	100,00
0,01 μm - 10 μm	13,43	84,27	100,00
0,01 μm - 20 μm	23,21	89,62	100,00
0,01 μm - 32 μm	33,36	92,63	100,00
0,01 μm - 45 μm	44,46	94,87	100,00
0,01 μm - 63 μm	58,35	96,88	100,00
0,01 μm - 112 μm	81,83	99,10	100,00
0,01 μm - 140 μm	88,61	99,52	100,00
0,01 μm - 224 μm	97,30	99,92	100,00
0,01 μm - 315 μm	99,61	99,99	100,00
0,01 μm - 500 μm	100,00	100,00	100,00
0,01 μm - 1000 μm	100,00	100,00	100,00

Versuchsreihe Nr. 21, Betonfräse konventionell, $v = 20 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Messparameter

Messparameter detailliert

Dispergiereinstellungen

Small Volume Unit verwenden	Nein	Pumpe	Ja
Dispersionsultraschalldauer	0h 02m 00s	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewichtsdauer	-		
Messeinstellungen			
Messzeit	0h 01m 00s	Ultraschall	Ja
Rührergeschwindigkeit	250 rpm	Pumpengeschwindigkeit	120 rpm
Status	Erfolgreich	Lichtabschwächung	5,0 - 15,0%
Spülen	4 Spülzyklen		
Analyse			
Rekonstruktionsmodus	Fraunhofer	Analysemodus	General
Name	Na4P2O7 0,2%-Lösung	Brechungsindex Laser 2	
Brechungsindex Laser 1	1,3294		1,3309

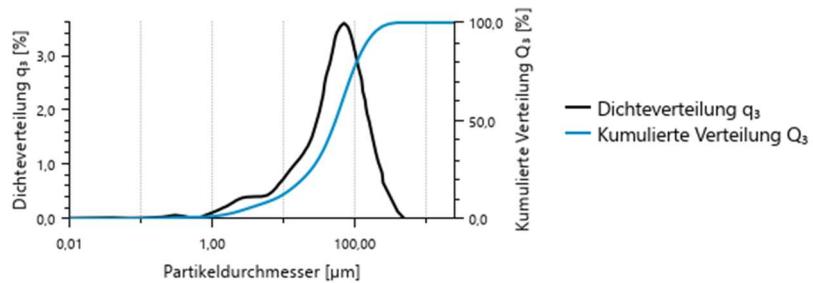
Dispersionsparameter

Ultraschall	Ja	Ultraschalldauer	0h 02m 00s
Pumpe	Ja		
Blasenentfernung	Ja	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewicht	Nein	Gleichgewichtsdauer	0h 00m 05s

D-Werte - Volumen Untergröße

	Volumen
D10 [μm]	7,443
D50 [μm]	53,662
D90 [μm]	147,126
Mittlere Größe [μm]	70,968
Verteilungsbreite	2,603
D[5,3]	94,848 μm

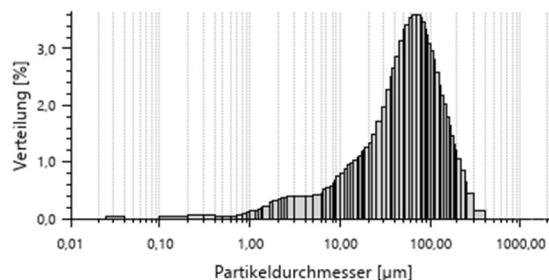
Verteilung (kumuliert) - Volumen Untergröße



Versuchsreihe Nr. 21, Betonfräse konventionell, $v = 20 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Siebkurve

Verteilung - Volumen



Benutzerdefinierte Größenklassen

Größenklasse	Volumen [%]	Oberfläche [%]	Anzahl [%]
0,01 μm - 0,04 μm	0,16	33,09	98,12
0,01 μm - 0,1 μm	0,17	33,75	98,43
0,01 μm - 0,5 μm	0,83	53,56	99,94
0,01 μm - 3,2 μm	5,34	74,40	100,00
0,01 μm - 4 μm	6,48	76,79	100,00
0,01 μm - 6 μm	8,64	80,10	100,00
0,01 μm - 8 μm	10,53	82,28	100,00
0,01 μm - 10 μm	12,49	84,03	100,00
0,01 μm - 20 μm	21,48	89,10	100,00
0,01 μm - 32 μm	31,42	92,14	100,00
0,01 μm - 45 μm	42,69	94,49	100,00
0,01 μm - 63 μm	57,24	96,66	100,00
0,01 μm - 112 μm	81,86	99,07	100,00
0,01 μm - 140 μm	88,73	99,51	100,00
0,01 μm - 224 μm	97,37	99,92	100,00
0,01 μm - 315 μm	99,62	99,99	100,00
0,01 μm - 500 μm	100,00	100,00	100,00
0,01 μm - 1000 μm	100,00	100,00	100,00

Versuchsreihe Nr. 22, Betonfräse konventionell, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Messparameter

Messparameter detailliert

Dispergiereinstellungen

Small Volume Unit verwenden	Nein	Pumpe	Ja
Dispersionsultraschalldauer	0h 02m 00s	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewichtsdauer	-		
Messeinstellungen			
Messzeit	0h 01m 00s	Ultraschall	Ja
Rührergeschwindigkeit	250 rpm	Pumpengeschwindigkeit	120 rpm
Status	Erfolgreich	Lichtabschwächung	5,0 - 15,0%
Spülen	4 Spülzyklen		
Analyse			
Rekonstruktionsmodus	Fraunhofer	Analysemodus	General
Name	Na4P2O7 0,2%-Lösung		
Brechungsindex Laser 1	1,3294	Brechungsindex Laser 2	1,3309

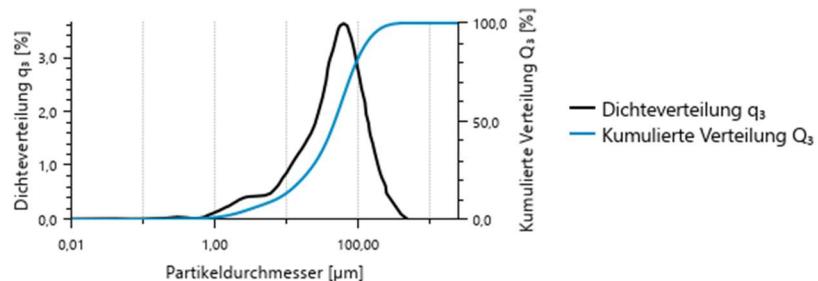
Dispersionsparameter

Ultraschall	Ja	Ultraschalldauer	0h 02m 00s
Pumpe	Ja		
Blasenentfernung	Ja	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewicht	Nein	Gleichgewichtsdauer	0h 00m 05s

D-Werte - Volumen Untergröße

	Volumen
D10 [μm]	6,906
D50 [μm]	47,214
D90 [μm]	131,060
Mittlere Größe [μm]	63,307
Verteilungsbreite	2,630
D[5,3]	85,600 μm

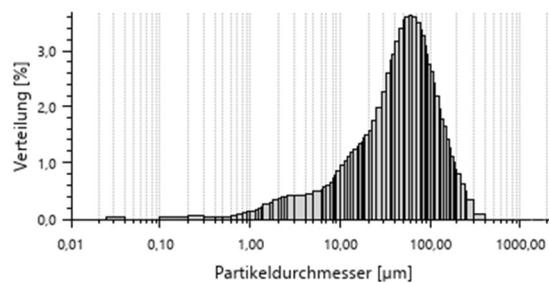
Verteilung (kumuliert) - Volumen Untergröße



Versuchsreihe Nr. 22, Betonfräse konventionell, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Siebkurve

Verteilung - Volumen



Benutzerdefinierte Größenklassen

Größenklasse	Volumen [%]	Oberfläche [%]	Anzahl [%]
0,01 µm - 0,04 µm	0,09	22,96	98,00
0,01 µm - 0,1 µm	0,10	23,26	98,20
0,01 µm - 0,5 µm	0,55	39,02	99,88
0,01 µm - 3,2 µm	5,49	66,89	100,00
0,01 µm - 4 µm	6,70	69,88	100,00
0,01 µm - 6 µm	9,04	74,14	100,00
0,01 µm - 8 µm	11,17	77,06	100,00
0,01 µm - 10 µm	13,43	79,44	100,00
0,01 µm - 20 µm	24,05	86,54	100,00
0,01 µm - 32 µm	35,52	90,72	100,00
0,01 µm - 45 µm	47,93	93,78	100,00
0,01 µm - 63 µm	63,02	96,46	100,00
0,01 µm - 112 µm	85,82	99,13	100,00
0,01 µm - 140 µm	91,50	99,56	100,00
0,01 µm - 224 µm	98,11	99,93	100,00
0,01 µm - 315 µm	99,73	99,99	100,00
0,01 µm - 500 µm	100,00	100,00	100,00
0,01 µm - 1000 µm	100,00	100,00	100,00

Versuchsreihe Nr. 23, Betonfräse konventionell, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Messparameter

Messparameter detailliert

Dispergiereinstellungen

Small Volume Unit verwenden	Nein	Pumpe	Ja
Dispersionsultraschalldauer	0h 02m 00s	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewichtsdauer	-		
Messeinstellungen			
Meszeit	0h 01m 00s	Ultraschall	Ja
Rührergeschwindigkeit	250 rpm	Pumpengeschwindigkeit	120 rpm
Status	Erfolgreich	Lichtabschwächung	5,0 - 15,0%
Spülen	4 Spülzyklen		
Analyse			
Rekonstruktionsmodus	Fraunhofer	Analysemodus	General
Name	Na4P2O7 0,2%-Lösung		
Brechungsindex Laser 1	1,3294	Brechungsindex Laser 2	1,3309

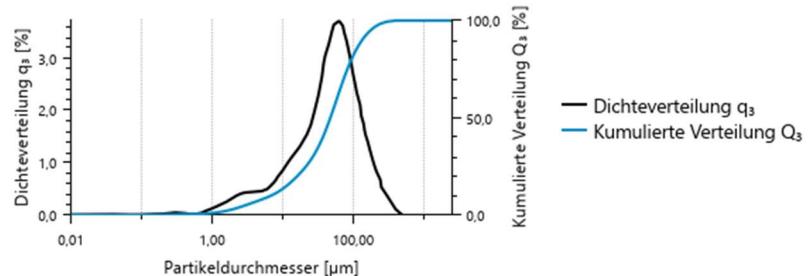
Dispersionsparameter

Ultraschall	Ja	Ultraschalldauer	0h 02m 00s
Pumpe	Ja		
Blasenentfernung	Ja	Blasenentfernungsdauer	0h 00m 05s
Gleichgewicht	Nein	Gleichgewichtsdauer	0h 00m 05s

D-Werte - Volumen Untergröße

	Volumen
D10 [μm]	6,758
D50 [μm]	47,177
D90 [μm]	132,511
Mittlere Größe [μm]	63,705
Verteilungsbreite	2,666
D[5,3]	$86,655 \mu\text{m}$

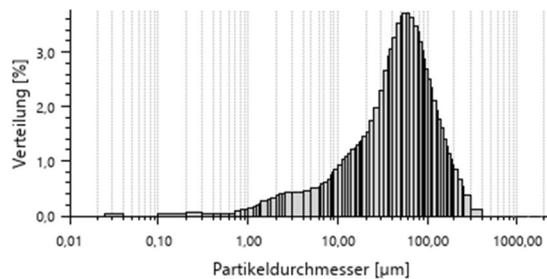
Verteilung (kumuliert) - Volumen Untergröße



Versuchsreihe Nr. 23, Betonfräse konventionell, $v = 15 \text{ mm/s}$, $d = 5 \text{ mm}$,
Wasser

Siebkurve

Verteilung - Volumen



Benutzerdefinierte Größenklassen

Größenklasse	Volumen [%]	Oberfläche [%]	Anzahl [%]
0,01 µm - 0,04 µm	0,10	24,08	98,05
0,01 µm - 0,1 µm	0,10	24,37	98,24
0,01 µm - 0,5 µm	0,58	40,54	99,89
0,01 µm - 3,2 µm	5,54	67,70	100,00
0,01 µm - 4 µm	6,78	70,69	100,00
0,01 µm - 6 µm	9,18	74,95	100,00
0,01 µm - 8 µm	11,34	77,83	100,00
0,01 µm - 10 µm	13,58	80,15	100,00
0,01 µm - 20 µm	23,84	86,84	100,00
0,01 µm - 32 µm	35,14	90,84	100,00
0,01 µm - 45 µm	47,90	93,92	100,00
0,01 µm - 63 µm	63,36	96,59	100,00
0,01 µm - 112 µm	85,72	99,15	100,00
0,01 µm - 140 µm	91,21	99,56	100,00
0,01 µm - 224 µm	97,91	99,93	100,00
0,01 µm - 315 µm	99,69	99,99	100,00
0,01 µm - 500 µm	100,00	100,00	100,00
0,01 µm - 1000 µm	100,00	100,00	100,00

II. Kriterien zur Verfahrensbewertung nach Hörenbaum et al.

Nach (Hörenbaum et al. 2009)

<u>Kriterien zur Verfahrensbewertung:</u>	<u>Wichtung</u>
Gefährdungspotenzial für die Umgebung	3
Unfallrisiko	3
Leistungsfähigkeit	1
Zuverlässigkeit/Störanfälligkeit	2
Trennpräzision und -qualität	2
Flexibilität	2
Wartungsaufwand	2
Anschaffungs- und Betriebskosten	1
Einsatzerfahrungen	2
Fernbedienbarkeit	3
Automatisierbarkeit	3
Abfallproduktion und Reststoffaufkommen	2

Ablauf und Arbeitsschritte

Die Verfahrensbewertung läuft im Wesentlichen in folgenden Schritten ab:

Schritt 1:	Festlegung der Kriterien zur Verfahrensauswahl
Schritt 2:	Quantifizierung der Verfahrenseigenschaften durch Punktevergabe („Benotung“)
Schritt 3:	Berücksichtigung objektspezifischer Randbedingungen durch Festlegung von Wichtungsfaktoren
Schritt 4:	Multiplikation der Benotungspunktzahl mit dem Wichtungsfaktor („Bewertung“)
Schritt 5:	Aufsummierung der Bewertungspunkte

III. Flächenleistung bei Wanddekontaminationssystemen

Angaben aus (Studsvik SINA 2007)

- Klopfer-Roboter-System
- Shaver-Stapler-System
- Shaver-Portalgerüst-System

Klopfer-Roboter-System

Flächenleistung je Arbeitsschritt:

Beton	bei 3 mm Abtrag	ca. 20 – 30 m ² /h
Kalkstein	bei 3 mm Abtrag	ca. 10 – 20 m ² /h
Epoxy	nicht geeignet	

Flächendeckung je Arbeitsschritt: 8 m²

Mit höhenverstellbarer Arbeitsbühne bis zu 15 m Arbeitshöhe möglich

Umrüstzeit für neuen Arbeitsschritt ca. 10 Min.

Shaver-Stapler-System

Flächenleistung je Arbeitsschritt:

Beton	bei 3 mm Abtrag	ca. 15 m ² /h
Kalkstein	bei 3 mm Abtrag	ca. 30 m ² /h
Epoxy	bei 3 mm Abtrag	ca. 20 m ² /h

Flächendeckung:

2 m² (2 x 185 mm x 5,4 m)* je Arbeitsschritt

11,5 m² (2,2 m x 5,4 m)* je Standort

*gabelstaplerspezifisch

Shaver-Portalgerüst-System

Flächenleistung je Arbeitsschritt:

Beton	bei 3 mm Abtrag	ca. 15 m ² /h
Kalkstein	bei 3 mm Abtrag	ca. 30 m ² /h
Epoxy	bei 3 mm Abtrag	ca. 20 m ² /h

Flächendeckung:

2,4 m² (2 x 185 mm x 6,5 m)* je Arbeitsschritt

17,3 m² (2,66 m x 6,5 m)* je Standort

*Nach Bedarf erweiterbar

IV. Übersicht gängiger Verfahren der Dekontamination

Auszug aus „Technologien zur Zerlegung und zur Dekontamination von kerntechnischen Anlagen“ von Felix Hübner et al., 2017.

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Umfeld, in dem Technologie anwendbar	Fernhan-tierter Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Bandsäge		Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schnitttiefe wird durch die Länge des Sägeblattes begrenzt Bei stark kontaminierten Teilen wird trocken gesägt 	<ul style="list-style-type: none"> Sandwich- und komplexe Strukturen gut schneidbar Keine Aerosolsbildung Steuerung aus der Distanz möglich Sehr zuverlässig 	<ul style="list-style-type: none"> Eingeschränkte Schnittführung Geringe Schneidgeschwindigkeit Hoher Anteil an Sekundärabfall (Sägeblätter) Benötigen in manchen Fällen viel Platz 	(Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 34)
Scher-maschine		Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Werden vornehmlich zur Zerlegung von Stäben, Rohren und Blechen eingesetzt Keine Aerosolsbildung 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Rückstellkräfte Es entstehen keine Späne oder Staube 	<ul style="list-style-type: none"> Eingeschränkte Anwendung 	(Kaulard et al., 2010, S. 35)
Fräsen		Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schneidgeschwindigkeit ist beschränkt durch die Dimensionen der Frässcheibe 	<ul style="list-style-type: none"> Präzise Schnittkante möglich Flexible Schnitttugen möglich Keine Aerosolsbildung Steuerung aus der Distanz möglich Große Späne, die gut handhabbar sind Universell einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> Kühlung notwendig Mittlere Schneidgeschwindigkeit Hohe Rückstellkräfte weichen mit entsprechenden Konstruktionen aufgefangen werden müssen Auf Funkenflug ist zu achten 	(Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 34)
Kreissäge		Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schnitttiefe ist abhängig vom Scheibendurchmesser 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Vibration Präzise und glatte Schnitte 	<ul style="list-style-type: none"> Schnitttiefe ist beschränkt Erzeugt Staub/Schlamm als Abfall 	(Kaulard et al., 2010, S. 34)

Mit definiertem Schniediwinkele

Ohne definiertem Schneidwinkel		Diamant-seilsäge		Trenn-schleifer		Wasser-Abrasiv-Injektions-strahlen (WAIS)		Wasser-Abrasiv-Suspension s-strahlen (WASS)	
Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	Einsatz meist nass • Bei stark kontaminierten Teilen wird trocken gesägt	Sandwich- und komplexe Strukturen gut schneidbar • Steuerung aus der Distanz möglich Geignet für besonders große Strukturen Wartungs- und Reparaturzeiten sind relativ kurz	Eingeschränkte Schnittführung • Aufwendige Seilführung Sehr geringe Schnidgeschwindigkeit Hohe Kosten für Diamantsäile Erzeugt Staub/Schlamm als Abfall	(Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 34)	(Bienia, 2015) (Kaulard et al., 2010, S. 35)	(Bienia, 2015) (Europäische Kommission, 2009, S. 50-54)	(Bienia, 2015) (Europäische Kommission, 2009, S. 50-54)
Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	Universell einsetzbar bei geringeren Wanddicken Wird praktisch in allen Rückbauprojekten eingesetzt	Verschiedene Abrasivmittel mit verschiedenen Eigenschaften • Durch Recyceln des Strahlmittels lässt sich die Menge an Sekundärabfällen verringern • Trennstahl besteht aus Luft, Wasser und Strahlmittel	Prazise Schnittführung Großes Angebot an konventionellen Werkzeugen • Präzise Schnittführung • Großes Angebot an konventionellen Werkzeugen • 200-mal mehr Stäube und Aerosole als beim Sägen Hohe Rückstellskräfte und Schwingungen, die bei Fernhanterierung aufgetragen werden müssen	(Kaulard et al., 2010, S. 35)	(Kaulard et al., 2010, S. 35)	(Kaulard et al., 2010, S. 35)	(Kaulard et al., 2010, S. 35)
Metall	Luft, Wasser	Ja		Verschiedene Abrasivmittel mit verschiedenen Eigenschaften • Durch Recyceln des Strahlmittels lässt sich die Menge an Sekundärabfällen verringern • Trennstahl besteht aus Luft, Wasser und Strahlmittel	Sehr kompakter Scheidekopf Kleine Schnittfuge Schniden komplexer Geometrien möglich Keine Aerosolbildung	(Bienia, 2015) (Europäische Kommission, 2009, S. 50-54)	(Bienia, 2015) Sehr geringe Schnidgeschwindigkeit Hoher Anteil an Sekundärabfällen	(Bienia, 2015) Sehr geringe Schnidgeschwindigkeit Hoher Anteil an Sekundärabfällen	(Bienia, 2015) Sehr geringe Schnidgeschwindigkeit Hoher Anteil an Sekundärabfällen
					Geringer Platzbedarf Kleine Schnittfuge erzeugt geringen Abfallmengen Schniden komplexer Geometrien möglich Geringe Rückstellskräfte Höhere Effizienz als WAIS Keine Aerosolbildung Größere Schnitttiefe als WAIS				

Art und Bezeichnung des Verfahrens	Name des Verfahrens	Material, das bearbeitet werden kann	Umfeld, in dem die Technologie anwendbar	Fernhan-tierter Einsatz möglich?	Eigenschaften	Vorteile	Nachteile	Quelle
Autogenes Brennschneiden	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	• Keine Rückstellkräfte • Material wird verbrannt • Insbesondere für große Wandstärken (>30mm)	• Einfach zu handhaben • Keine Vibrationen • Geringer Energieverbrauch • Steuerung aus der Distanz möglich • Hohe Schnittgeschwindigkeit	• Für hochlegierte Metalle nicht geeignet • Langsam beim Schneiden von Beton • Erzeugt viele Aerosole und Brenngase • Sandwich- und Komplexe Konturen schwer schneidbar	(IAEA, 2001, S. 96-100) (Gentes et al., 2015, S. 61-62) (Noynaert, 2012, S. 294-296) (Blenia, 2015)	
Pulver-Brennschneiden	Metall, Beton	Luft	Ja	• Effizienzsteigerung des autogenen Brennschneidens durch Zugabe von Metallpulver	• Bei sehr vielen Materialien einsetzbar	• Erzeugt viele Aerosole und Sekundärabfälle • Benötigt aufwendiges Filtersystem • Wird beim Rückbau selten eingesetzt	(Noynaert, 2012, S. 296-297) (Gentes et al., 2015, S. 62) (Europäische Kommission, 2009, S. 40)	
Sauerstoff-Lanze	Metall, Beton	Luft, Wasser	Nein	• Schlacke wird durch Handbewegungen und Sauerstoff aus der Fuge entfernt	• Geringer Verschleiß • Hohe Prozesssicherheit • Hiermit lassen sich alle gängigen Materialien zerlegen • Ausgereifte Technologie	• Lediglich zum Bohren von Löchern • Beim Rückbau sind die Einsatzmöglichkeiten begrenzt • Erzeugt starke Verschmutzung	(Noynaert, 2012, S. 297) (Europäische Kommission, 2009, S. 40-41)	

Plasma-schneiden	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz bei Edelstählen Schlacke wird durch das Plasmagas aus der Fuge gehoben Unter Wasser sinkt die Schneidleistung mit zunehmender Tiefe 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hohe Schnittgeschwindigkeit (bis zu 500mm/min) und Qualität Geringer Verschleiß Hohe Prozesssicherheit Geringe Prozesskosten Steuerung aus der Distanz möglich Wird auch beim Bohren von Löchern eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> Ist nur in der Lage, elektrisch leitende Werkstücke zu zerlegen Sandwich- und Komplexe Konturen sind schwer schneidbar Erzeugt große Mengen an Aerosolen(bzw. Hydrosolen) 	(Europäische Kommission, 2009, S. 41)
					<ul style="list-style-type: none"> Die Geometrie der Elektrode kann jede Form annehmen 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Prozessgeschwindigkeit 	(Thierfeldt und Schartmann, 2009)
Funken-erosion	Metall	Dielektrikum	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Wird nur eingesetzt, wenn eine hohe Präzision gefragt ist Der Trennprozess ist stark von der Qualität des Dielektrikums abhängig Grundagententechnologie der CAMX-Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> Zerlegt alle elektrisch leitfähigen Materialien Schlacke wird durch eine Wasserdüse aus der Fuge entfernt Elektrode wird verbraucht Schneidgeschwindigkeit: 150mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> In der Entwicklung Erzeugt viele Hydrosole Einsatz nur unter Wasser 	(Europäische Kommission, 2009, S. 43-44)
CAMC (Contact Arc Metal Cutting)	Metall	Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Zerlegt alle elektrisch leitfähigen Materialien Elektrode wird nicht verbraucht Schneidgeschwindigkeit: 4000mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Einschränkung hinsichtlich der Werkstückgeometrie Keine Rückstellkräfte Große Wandstärken schneidbar 	<ul style="list-style-type: none"> Erzeugt viele Hydrosole Einsatz nur unter Wasser 	(Bienia, 2015)
CAMG (Contact Arc Metal Grinding)	Metall	Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Zerlegt alle elektrisch leitfähigen Materialien Elektrode wird nicht verbraucht Schneidgeschwindigkeit: 4000mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> Extrem hohe Schnittgeschwindigkeit Keine Einschränkung hinsichtlich der Werkstückgeometrie Keine Rückstellkräfte Scheibendurchmesser limitiert Schnitttiefe 	<ul style="list-style-type: none"> In der Entwicklung 	(Kaulard et al., 2010, S. 32-33)
CAMD (Contact Arc Metal Drilling)	Metall	Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Bohrt Löcher in alle elektrisch leitfähigen Materialien Elektrode wird verbraucht Schneidgeschwindigkeit: 1000mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Rückstellkräfte 	<ul style="list-style-type: none"> In der Entwicklung 	(Europäische Kommission, 2009, S. 43-44)

Mit elektrischer Energiequelle

	Lichtbogen-Wasserstrahl-schneiden	Metall	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Elektrode wird verbraucht Schlacke wird durch Wasserstrahl entfernt Für das Zerlegen von Werkstücken mittlerer Dicke Schnittgeschwindigkeit: 2700mm/min (bei 2400A) 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Rückstellkräfte 	<ul style="list-style-type: none"> Gerätegewicht wegen der mitgeführten Drahtrolle relativ hoch 	(Kaulard et al., 2010, S. 32-33)
	Lichtbogen-Sauerstoff-schneiden	Metall	Luft, Wasser	Nein	<ul style="list-style-type: none"> Handgeführter Einsatz bei kleineren Aufgaben Schlacke wird mittels Sauerstoff ausgeblassen Einsatz meist unter Wasser Elektrode wird verbraucht Schnittgeschwindigkeit: 100-500mm/min 	<ul style="list-style-type: none"> Vielseitig einsetzbar 	<ul style="list-style-type: none"> Verbreitung im Rückbau ist zurzeit beschränkt Geringe Präzision 	(Kaulard et al., 2010, S. 32-33)
	Laserstrahl-schmelz-schneiden	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schlacke wird durch ein Inertgas (z.B. Stickstoff oder Argon) aus der Fuge getrieben 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Oxidation an der Schnittkante 	<ul style="list-style-type: none"> Es bilden sich Schnitttiefen Schnellprozess ist vom Gasstrom abhängig Hohe Anlagenkosten 	(Europäische Kommission, 2009, S. 44-46)
	Laserstrahl-brenn-schneiden	Metall, Beton	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Als Schneidgeschwindigkeit möglich Sauerstoff eingesetzt, welches mit dem Material exotherm reagiert 	<ul style="list-style-type: none"> Das Schneiden größerer Blechdicken ist möglich Hohe Schnittgeschwindigkeit möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Oxidation an den Schnittkanten (kann bei anschließendem Schweißen zu Schwierigkeiten führen) Hohe Anlagenkosten 	(Europäische Kommission, 2009, S. 44-46)
	Laserstrahl-sublimations-schneiden	Kunststoff, organische Materialien	Luft, Wasser	Ja	<ul style="list-style-type: none"> Schutzgas sorgt dafür, dass der Werkstoff nicht verbrennt 	<ul style="list-style-type: none"> Glatte Schnittkanten 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Laserintensität erforderlich Geringe Schnittgeschwindigkeit Wird selten bei Metallen eingesetzt Hohe Anlagenkosten 	(Europäische Kommission, 2009, S. 44-46)

Laserstrahlschneiden

V. Standardabweichung und Mittelwert, Fehlerbetrachtung

Zur Fehlerbetrachtung wurde die Standardabweichung der durchschnittlichen Y-Reaktionskräfte der jeweiligen Werkzeuge betrachtet. Die Standardabweichungen werden als sehr gering eingestuft. Die Betonfräse konventionell und das Demonstratorwerkzeug 1 weisen eine Standardabweichung von unter 0,01 auf, Demonstratorwerkzeug 2 und 3 bewegen sich im Bereich von ca. 1.

Die Standardabweichung wird im Hinblick auf die Heterogenität des Werkstoffs Beton als gering eingestuft und eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist dargestellt. Im Hinblick auf die Größenordnung der Ergebnisse und die geringe Standardabweichung sind die Ergebnisse reproduzierbar.

Formel der Standardabweichung (Standardabweichung 2024):

$$\sigma = \sqrt{\text{VAR}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \cdot p_i} = \\ = \sqrt{(x_1 - \mu)^2 \cdot p_1 + (x_2 - \mu)^2 \cdot p_2 + \dots + (x_n - \mu)^2 \cdot p_n}$$

- σ ist das Abkürzung für die **Standardabweichung** (der Grundgesamtheit)
- μ ist der **Mittelwert**, bzw. **Erwartungswert**
- x_i ist das einzelne **Ergebnis** des Zufallsexperiments
- $(x_i - \mu)^2$ ist die **quadratische Abweichung**
- $\sum_{i=1}^n$ beschreibt, dass eine Summe der quadrierten Abweichungen vom Mittelwert berechnet wird
- p_i ist der **Gewichtungsfaktor**

Berechnete Standardabweichung:

Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung Versuchsvergleich unter gleichen Eingangsparametern Reaktionskraft in Y-Richtung				
	Versuch A	Versuch B	Mittelwert	Standardabweichung
Betonfräse konventionell	33,47	33,45	33,46	0,01
Demonstratorwerkzeug 1	17,93	17,74	17,835	0,095
Demonstratorwerkzeug 2	14,8	16,92	15,86	1,06
Demonstratorwerkzeug 3	25,42	23,13	24,275	1,145

VI. Vollständige Kraftdiagramme

Kapitel 5.1.1

