

Untersuchung zum Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit spanender Bürste

zur Erlangung des akademischen Grades einer

DOKTOR-INGENIEURIN

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

genehmigte

Dissertation

von

Madeleine Weber, M.Sc.

aus Laufenburg

Tag der mündlichen Prüfung: 04.12.2020

Referent: Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Karlsruhe, 2020

Für meinen Großvater

Kurzfassung

Titel: Untersuchung zum Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit spanender Bürste

Schlagwörter: Bürstspanen, Bürstenanwendung, Bürste, Wärmedämmverbundsysteme, Wärmedämmung, WDVS, Gebäudeabbruch, Gebäudesanierung, EPS, Baggeranbaugerät

Seit den 1970er Jahren werden in Deutschland verstärkt Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) zur außenseitigen Dämmung von Gebäuden eingesetzt und sind auch in Zukunft nicht mehr wegzudenken. So lassen sich aus dem Weltklimagipfel sowie dem EU-Klima- und Energierahmen nationale Ziele ableiten, den Primärenergiebedarf von Gebäuden bis 2050 um rund 80 Prozent gegenüber 2008 zu senken. Die „Energieeffizienzstrategie Gebäude“ der Bundesregierung soll deshalb einen klimaneutralen Gebäudebestand hervorbringen. Richtlinien für Neubauten sind hierfür nicht ausreichend. Eine Erhöhung der Sanierungsrate von Wohn- und Nichtwohngebäuden soll Abhilfe schaffen, die Wärmedämmung ist dabei Mittel zum Zweck. Aktuell bestehen bereits etwa 5,5 Millionen Wohngebäude mit insgesamt 1.121 Quadratkilometern gedämmter Außenwandfläche, von denen in den nächsten 20 Jahren über 50 Prozent der WDVS ihre mittlere Lebensdauer überschreiten und abgebrochen werden müssen.

Jährlich fallen im Bausektor große Mengen an unterschiedlichen Abbruch- und Bauabfällen an. Diese stellen mit über 55 Prozent den größten Anteil am Gesamtaufkommen aller Abfälle in Deutschland dar, Tendenz steigend. Im Sinne der Ressourcenschonung hat es höchste Priorität, die Abbruchabfälle am besten bereits am Ort ihrer Entstehung voneinander zu trennen. Nur so kann eine kreislaufwirtschaftsgerechte Verwertung erfolgen. Doch der Abbruch von WDVS ist aufwändig und kostspielig. Durch den innigen Verbund der Systembestandteile fallen stark gemischte Abfälle an. Aufgrund der in der Vergangenheit verbauten Mengen an WDVS ist ein Anstieg der Problematik sicher. Für einen effizienten Abbruch wird daher nach ökonomisch rentablen Methoden verlangt. Genau in diesem Punkt liegt das Potential eines rückstandslosen Abtrags des WDVS von der mineralischen Außenfassade.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen durchgeführt, um ein neues Verfahren für diesen Zweck zu qualifizieren. Experimentell untersucht werden Bürsten für den Einsatz in einem Baggeranbaugerät mit gleichzeitiger Abförderung anfallender WDVS-Späne. Die Anforderungen an dieses Verfahrens resultieren aus den Nachteilen der gängigen Abbruchmethoden für WDVS. Unter anderem sind dies die Vermischung brennbarer und mineralischer Bestandteile bei maschinellen Methoden, des Weiteren die geringe Leistungsfähigkeit sowie der Mehraufwand des manuellen Abbruchs. Ebenso erfolgen die Arbeitsschritte Trennen und Sammeln in der gängigen Praxis separat. Das Freisetzen von Emissionen wird begünstigt.

Bisher existieren keine wissenschaftlichen Untersuchungen zum Abtrag von WDVS unter Verwendung von Bürstenwerkzeugen. Bürstenhersteller und deren Vertriebsseinheiten können lediglich aufgrund von Erfahrungen üblicher Anwendungsbereiche Empfehlungen zur Werkzeugauswahl sowie den Maschinenparametern aussprechen. Die grundsätzliche Eignung ist allerdings nicht nachgewiesen. Eine wissenschaftliche Untersuchung zur Werkzeugwahl sowie den Maschinenparametern ist daher erforderlich und Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Eine Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Aufbauten von WDVS auf das Abtragsergebnis sowie den Werkzeugverschleiß ist infolge der enormen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten einzelner Systembestandteile ebenso notwendig. Neben der grundsätzlichen Untersuchung des Einsatzes von Bürstenwerkzeugen für den Abtrag von WDVS ist es Zielsetzung der Forschungsarbeit, eine Werkzeugempfehlung inkl. optimaler Maschinenparameter für die kontinuierliche Bearbeitung eines Standard WDVS-Aufbaus auszusprechen. Experimentelle Versuche sowie Literaturrecherchen und Erhebungen bilden die Bewertungsgrundlage.

Abstract

Title: Study on the removal of external thermal insulation composite systems with machine brushes

Keywords: Brush machining, brush applications, brush, external thermal insulation composite systems, thermal insulation, ETICS, building demolition, building renovation, XPS, excavation attachment

Since the 1970s, thermal insulation systems have increasingly been used to insulate facades and will continue to play a vital part in the building industry. National goals have been derived from both the world climate summit as well as the EU's Framework Convention on Climate Change and Energy to reduce the primary energy demand of buildings by 2050 by approx. 80% compared to 2008. The German Federal Government has launched the "Energy Efficiency Strategy for Buildings" initiative to create a stock of climate-neutral buildings. However, the standard regulations for new construction projects do not sufficiently heed these requirements. The remedy is to increase the restructuring rate of residential and non-residential buildings with the use of external thermal insulation composite systems as a means to this end. Currently, approx. 5,5 million residential buildings account for 1.121 sq km of insulated facades of which over 50% will have exceeded their mean lifetime within the next 20 years and will be subject to demolition.

Every year, the building industry is faced with large quantities of various demolition and construction waste types. With over 55% and rising, this waste type represents the largest share of Germany's total waste volume. To save resources, it is vital to separate the different waste types at their place of origin. In this way only, correct and economic recycling can be guaranteed. However, the demolition of external thermal insulation composite systems is costly and complex. Due to the composite materials' nature, the waste is heavily mixed. An increase of this issue is certain because of the extensive use of external thermal insulation composite systems (ETICS) in the past. For this reason, efficient demolition requires economically feasible procedures. Here lies the potential of a residue-free removal of ETICS from mineral facades.

This work provides research to qualify a new procedure for exactly this purpose. Brush tools are used as attachments for excavators which can also transport the resulting chips. The brush tool requirements result from the many disadvantages of common demolition procedures for ETICS: E.g. automated methods mix flammable and mineral constituents, common procedures are inefficient and still require additional manual demolition, to name a few only. In standard practice, the work steps of waste separation and collection are separated from another. Unfortunately, this concept fosters the release of emissions.

To date, no scientific research is available on the removal of external thermal insulation composite systems with brush tools. Brush manufacturers and their sales force can only provide recommendations for tool selection and suitable operation parameter based on their experience in common application areas. However, this does not prove general suitability of the tools in question. For this reason, this work focuses on the scientific analysis required to define suitable tools and machine parameter for the optimum removal of ETICS. Due to the vast number of combinations available for the individual parts that make up external thermal insulation composite systems it is indispensable to analyse the impact those different combinations have on the system's demolition properties as well as the tool wear. It is the aim of this work to provide basic research for the use of brush tools for the demolition of ETICS as well as to give a recommendation for tools and operating parameters suitable for the continuous machining of a standard set-up of an external thermal insulation composite system. The evaluation is based on experiments, literature research, and surveys.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB), an der Professur für Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke, des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes bedanke ich mich für die Übernahme des Hauptreferates und die Betreuung der wissenschaftlichen Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer danke ich für die Übernahme des Korreferates und die stets konstruktiven und vielfältigen Anregungen.

Frau Prof. Dr. Caroline Kramer danke ich für den Gedankenaustausch bei der Datenerhebung und auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Haghsheno sowie Herrn Prof. Dr. rer.pol. Frank Schultmann danke ich für ihr Mitwirken am Promotionsverfahren.

Darüber hinaus möchte ich allen Mitarbeitern des TMB danken, die mir durch Kritik und Diskussionsbereitschaft beim Verfassen der Arbeit behilflich waren. Dieser Dank gilt insbesondere Herrn Alexander Bombeck, Frau Simone Müller, Herrn Patrick Kern, Herrn Martin Brandauer, Herrn Sebastian Friedrich, Herrn Harald Schneider, Herrn Markus Reinhardt, Frau Madeleine Bachmann, Herrn Johannes Lilienkamp und nicht zuletzt Herrn Andrej Bauer. Das Gelingen dieser Arbeit war wesentlich von der technischen Unterstützung der Werkstatt des TMB abhängig. Ich möchte mich daher ganz besonders bei den Werkstattmitarbeitern bedanken. Namentlich erwähnt seien an dieser Stelle Herr Armin Hofmann, Herr Jürgen Hauth, Herr Sven Fuhrmann und Herr Torsten Schuler.

Zu Dank verpflichtet bin ich ebenfalls den beteiligten Unternehmen und Personen, die bereit waren als Ansprechpartner und Experten die Untersuchungen dieser Arbeit zu fördern und zu begleiten. Im Speziellen bedanke ich mich bei den Unternehmen Lessmann GmbH, RSA cutting systems GmbH, Piassavawerke Hermann Wimmer e.K., Weber Bürstensysteme GmbH, Kullen-Koti GmbH sowie allen, die nicht namentlich genannt werden möchten.

Besonderen Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für ihre Geduld, ihr Verständnis sowie ihre moralische Unterstützung über die gesamte Promotion.

Karlsruhe, im Dezember 2020

Madeleine Weber

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	ii
Vorwort	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xii
Nomenklatur	xiv
Abkürzungsverzeichnis	xvi
1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Motivation und Zielsetzung	2
1.3 Forschungsmethode und Aufbau	2
2 Wärmedämmverbundsysteme	4
2.1 Aufbau und Eigenschaften klassischer Wärmedämmverbundsysteme	4
2.1.1 Kleber und Befestigung	5
2.1.2 Wärmedämmstoff	6
2.1.2.1 Expandiertes Polystyrol	8
2.1.2.2 Mineralwolle.....	8
2.1.2.3 Extrudiertes Polystyrol	9
2.1.3 Unterputz, Armierung und Schlussbeschichtung	9
2.2 Marktpotential des Abtrags von Wärmedämmverbundsystemen	9
2.3 Stand der Technik: Abbruch und Entsorgung von Wärmedämmverbundsystemen	12
2.4 Stand der Forschung: Abbruch und Entsorgung von Wärmedämmverbundsystemen	14
2.5 Abgrenzung der vorliegenden Arbeit	16
3 Klassifikation und Wirkungsweise von Bürstenwerkzeugen	17
3.1 Klassifizierung von Bürstenwerkzeugen	17
3.1.1 Ausführungsmöglichkeiten und Einsatz von Bürsten.....	19

3.1.1.1	Besatzmaterial	20
3.1.1.2	Anordnung des Besatzes	20
3.1.1.3	Durchmesser und Länge des Besatzes	22
3.1.1.4	Fixierung im Grundkörper	22
3.1.1.5	Besatzdichte	24
3.2	Stand der Wissenschaft und Technik: Bürstspanen	25
3.3	Wirkungsweise von Bürstenwerkzeugen	26
3.3.1	Begriffsdefinition: Anordnung von Werkzeug und Werkstück	26
3.3.2	Mechanik der Bürstenbearbeitung	27
3.3.3	Werkzeugverschleiß	33
3.3.4	Einordnung nach Fertigungsverfahren	34
4	Experimentelle Untersuchungsmethoden	36
4.1	Systembeschreibung	36
4.1.1	Steuergrößen	38
4.1.1.1	Maschinenparameter	38
4.1.1.2	Werkzeugparameter	39
4.1.1.3	Werkstückparameter	43
4.1.2	Signal- und Störgrößen	45
4.1.2.1	Maschine	45
4.1.2.2	Werkzeug	47
4.1.2.3	Werkstück	47
4.1.3	Zielgrößen: Qualitätsmerkmale	48
4.1.3.1	Abtrag	48
4.1.3.2	Werkzeugverschleiß: Relativer Massenverlust	51
4.2	Aufbau der Versuchsstände und Messtechnik	52
4.2.1	Versuchsstand I (Grundlagenversuche)	52
4.2.2	Versuchsstand II (Hauptversuche)	53
4.2.3	Messtechnik	54
4.3	Versuchsplanung und Durchführung	55
5	Ergebnisse und Auswertung der experimentellen Versuche	58
5.1	Analyse der Grundlagenversuche	59
5.1.1	Einfluss des WDVS-Aufbaus	60
5.1.2	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und der Zustellung	65
5.1.3	Einfluss der Drehbewegung	70
5.1.4	Einfluss der Systembestandteile des WDVS	75

5.1.5	Einfluss des Werkzeugverschleißes	86
5.1.6	Werkzeugvergleich: Stahldrahtbürste gewellt und gezopft	89
5.1.7	Multikriterielle Optimierung	94
5.1.8	Zusammenfassung der Grundlagenversuche	96
5.2	Analyse der Hauptversuche.....	99
5.2.1	Zusammenhang zwischen Zustellung und Anpressung.....	99
5.2.2	Werkzeugvergleich und Werkzeugauswahl	101
5.2.2.1	Werkzeugtyp 110 und 113: Kunststoff mit Schleifmittel	102
5.2.2.2	Werkzeugtyp 104: Kunststoff glatt.....	104
5.2.2.3	Werkzeugtyp 106,107,109 und 111: Stahldraht verseilt.....	106
5.2.2.4	Werkzeugtyp 101 und 103: Stahldraht gewellt.....	109
5.2.2.5	Werkzeugtyp 102, 105, 108, 112: Stahldraht gezopft.....	111
5.2.3	Auswirkung von Verdübelung	114
5.2.4	Langzeitversuche.....	119
6	Zusammenfassung und Ausblick	125
6.1	Zusammenfassung.....	125
6.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	128
	Literaturverzeichnis	130
	Anhang.....	143
A.	Leitfadengestützte Experteninterviews	143
B.	Datenbasis Gebäudebestand	149
C.	Wärmedämmverbundsysteme	155
D.	Statistische Datenanalyse	158
E.	Ergebnisse der experimentellen Versuche.....	161
F.	Praxisversuche	173

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Ablaufdiagramm der Forschungsmethoden	3
Abbildung 2-1	Exemplarischer Aufbau der Systembestandteile eines WDVS	4
Abbildung 2-2	Beispielgebäude mit WDVS (links: Dämmstoff wird an die Fassade geklebt; rechts: Komplettaufbau aus WDVS)	5
Abbildung 2-3	Verfahrensmöglichkeiten des Klebstoffauftrags auf einer Dämmstoffplatte (grauer Kleber auf weißer Platte)	6
Abbildung 2-4	Sto-Thermodübel II UEZ 8/60 (Schraubdübel)	6
Abbildung 2-5	Links: Dämmstoffdicken bei der Außenwanddämmung (alle Dämmstoffarten), nach [15, S. 61]; rechts: Verteilung der Dämmstoffe in den verbauten WDVS, nach [14].....	7
Abbildung 2-6	Stand der Technik: Methoden zum teil-selektiven (a-c) [33] sowie selektiven Abbruch (d,e) von WDVS	13
Abbildung 2-7	Fräse Biber [1]	15
Abbildung 2-8	Darstellung des Baggeranbaugeräts [47]	16
Abbildung 3-1	Aufbau einer Rundbürste, Skizze vgl. [51] [45]	18
Abbildung 3-2	Kombinationsmöglichkeiten der Ausführung von Rundbürsten, in Anlehnung an DIN 68 346 (Januar 1980) sowie [52, S. 17–21], [54, 5-4] und [55, S. 67].....	19
Abbildung 3-3	Klassische Besatzanordnungen von Rundbürsten, Skizzen aus [52, S. 32]	20
Abbildung 3-4	Zopfformen (Skizzen und Bilder), Skizzen aus dem Produktkatalog der Firma Lessmann GmbH 2018 [59, S. 11]	21
Abbildung 3-5	Fixierungsmöglichkeiten des Besatzes	23
Abbildung 3-6	Darstellung der Besatzdichten anhand von Bohrlochabstände im Grundkörper bei gestopfter Fixierung, vgl. [64]	24
Abbildung 3-7	Schematische Darstellung der Maschinenparameter an Werkzeug und Werkstück	27
Abbildung 3-8	Winkel beim Eingriff eines Einzeldrahts bei zylinderförmiger Schneidengeometrie, vgl. [49, 51, 70]	29
Abbildung 3-9	Dynamisches Verhalten eines Einzeldrahts bei der Werkstückbearbeitung, vgl. [76, S. 223], [52, S. 78], [95]	30
Abbildung 3-10	Ausbildung der Schneidengeometrie, nach [51, S. 83, 49, S. 48].....	31
Abbildung 3-11	Änderung der Schneidengeometrie bei zwei Durchbiegungen mit maßgeblicher Beanspruchung, vgl. [49, S. 50].....	32
Abbildung 3-12	Übersicht der Fertigungsverfahren nach DIN 8589-0 (September 2003), vgl. [93]	35
Abbildung 4-1	Parameterdiagramm zur qualitative Systembeschreibung, vgl. [101, S. 148]	36
Abbildung 4-2	Werkzeugtypen der experimentellen Untersuchungen	41
Abbildung 4-3	Bürstenwerkzeuge der experimentellen Untersuchungen	43
Abbildung 4-4	Darstellung des Baggeranbaugeräts [106]	46
Abbildung 4-5	Anwendungsfälle der Untersuchungen, links: WDVS-Aufbau 107&108 und rechts: WDVS-Aufbau 109&110	47
Abbildung 4-6	Abtrags-Kriterien zur Beurteilung der Ergebnisse.....	48

Abbildung 4-7	Veranschaulichung der Messergebnisse des Qualitätsmerkmals Abtrag (Draufsicht)....	50
Abbildung 4-8	Veranschaulichung der Verschleißbewertung anhand des absoluten Massenverlusts der freien Besatzhöhe	51
Abbildung 4-9	Bildliche und schematische Darstellung des Versuchsstands I für die Grundlagenuntersuchungen der Vorversuche	52
Abbildung 4-10	Bildliche Darstellung des Versuchsstands II zur Werkzeugauswahl	54
Abbildung 5-1	Outlier-Boxplot.....	59
Abbildung 5-2	Ergebnisse Versuchsplan I-I: Abtrag [%] und relativer Massenverlust [%] in Abhängigkeit des WDVS-Aufbaus [-] bei Werkzeugtyp 1 / 2, Zustellung 0,5 / 1,0 mm sowie Vorschubgeschwindigkeit 300 / 600 mm/min	64
Abbildung 5-3	Ergebnisse Versuchsplan I-II: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf und WDVS-Aufbau 13 / 15	66
Abbildung 5-4	Versuchsplan I-II: Abtragsergebnisse Werkzeugtyp 1 nach der Vorschubgeschwindigkeit (Draufsicht); (a) Stufe 1500 mm/min, (b-c) Stufe 1800 mm/min, (d) Stufe 2100 mm/min, (e) Stufe 2400 mm/min, (f-g) Stufe 2700 mm/min ..	67
Abbildung 5-5	Ergebnisse Versuchsplan I-II: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf und WDVS-Aufbau 13 / 15	68
Abbildung 5-6	Versuchsplan I-IIIa: Unterfahren der Systembestandteile Putz und Armierung im Gegenlaufbetrieb; (a,c) WDVS-Aufbau nach Versuchsabbruch; (b) Bürstenwerkzeug kurz nach Versuchsabbruch; (d,e) verstopfte Einhausung	71
Abbildung 5-7	Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], Zustellung [mm] und Drehbewegung [-] bei WDVS-Aufbau 17 / 19	73
Abbildung 5-8	Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], Zustellung [mm] und Drehbewegung [-] bei WDVS-Aufbau 17 / 19	74
Abbildung 5-9	Exemplarischer Aufbau der Probekörper für Versuchsstand I	75
Abbildung 5-10	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB: Abtrag [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf	77
Abbildung 5-11	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-III: Relativer Massenverlust [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf.....	77
Abbildung 5-12	Ergebnisse Versuchsplan I-IV: Absoluter Massenverlust [g] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] bei Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf	79
Abbildung 5-13	Ergebnisse Versuchsplan I-V: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf	80
Abbildung 5-14	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-III & I-V: Relativer Massenverlust [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf	80

Abbildung 5-15	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB und Regressionsanalyse: Abtrag [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf	83
Abbildung 5-16	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB und Regressionsanalyse: Relativer Massenverlust [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf	84
Abbildung 5-17	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB und Regressionsanalyse: Abtrag [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf	85
Abbildung 5-18	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB und Regressionsanalyse: Relativer Massenverlust [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf	85
Abbildung 5-19	Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Abtrag [%] nach Durchgang [-] in Abhängigkeit des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Vorschubgeschwindigkeit 300 bis 3000 mm/min und Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf	88
Abbildung 5-20	Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Relativer Massenverlust [%] nach Durchgang [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], Zustellung [mm] und des Werkzeugtyps [-] bei Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf	88
Abbildung 5-21	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-II & I-III: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDVS-Aufbaus [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf	90
Abbildung 5-22	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-II & I-III: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDVS-Aufbaus [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf	90
Abbildung 5-23	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-II bis I-V: Abtrag [%] und Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit des WDVS-Aufbaus [-] bei Drehbewegung Gleichlauf, Vorschubgeschwindigkeit 300 bis 3000 mm/min und Zustellung 0,5 und 1 mm	92
Abbildung 5-24	Paretofront mit optimalen Messwerten	95
Abbildung 5-25	Anpressung [N] nach Werkzeugtyp in Abhängigkeit der Zustellung [mm]	100
Abbildung 5-26	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 110 und 113 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	103
Abbildung 5-27	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 110 und 113 Anwendungsfall 2 (Komplettlaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	103
Abbildung 5-28	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 104 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	104
Abbildung 5-29	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 104 Anwendungsfall 2 (Komplettlaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	105

Abbildung 5-30	Aufnahmen Werkzeugtyp 104: (a) Bürste setzt sich zu; (b) Einzelspitzen vor Versuchsdurchführung; (c) Einzelspitzen nach Versuchsdurchführung	105
Abbildung 5-31	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 106, 107,109 und 111 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	107
Abbildung 5-32	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 106, 107,109 und 111 Anwendungsfall 2 (Komplettaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	107
Abbildung 5-33	Aufnahmen Werkzeugtyp 106, 107, 109 und 111 nach der Versuchsdurchführung (Anwendungsfall 1)	108
Abbildung 5-34	Aufnahmen der Ergebnisse (Anwendungsfall 2) bei Drehzahl 1500 1/min: (a) Werkzeugtyp 109, Zustellung 0 mm; (b) Werkzeugtyp 107, Zustellung 1 mm (c) Werkzeugtyp 109, Zustellung 3 mm; (d) Werkzeugtyp 111, Zustellung 2 mm	108
Abbildung 5-35	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 101 und 103 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	110
Abbildung 5-36	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 101 und 103 Anwendungsfall 2 (Komplettaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	110
Abbildung 5-37	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 102, 105, 108 und 112 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	112
Abbildung 5-38	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 102, 105, 108 und 112 Anwendungsfall 2 (Komplettaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]	112
Abbildung 5-39	Aufnahmen der Ergebnisse Werkzeugtyp 108 (Anwendungsfall 2) (a) Zustellung 0 mm, Drehzahl 1500 1/min; (b) Zustellung 0,5 mm, Drehzahl 1125 1/min; (c) : Zustellung 2 mm, Drehzahl 1125 1/min; (d) Zustellung 3 mm, Drehzahl 2440 1/min.....	113
Abbildung 5-40	links: Schneide, rechts: Versuchsstand II mit vorgelagertem Schneidwerkzeug (WDVS-Aufbau 102).....	115
Abbildung 5-41	Darstellung des geplanten Baggeranbaugeräts (Stand: November 2017) [131]	116
Abbildung 5-42	Exemplarische Aufnahmen der Abtragsergebnisse mit einem Schneidwerkzeug, entstanden in Zusammenarbeit mit [132]	116
Abbildung 5-43	Exemplarische Aufnahmen der Abtragsergebnisse des Bürstentyps 101 bei mehrfacher Überfahrt des WDVS-Aufbaus 101 (Dämmstoff EPS inkl. Verdübelung), entstanden in Zusammenarbeit mit [132]	118
Abbildung 5-44	Aufnahmen der Verdübelung nach der Praxisanwendung des Baggeranbaugeräts	118
Abbildung 5-45	Ergebnisse Langzeitversuche Bürstentyp 101: Relativer Massenverlust [%], Abtrag [%] und Rückstände EPS und MW [%] nach Drehzahl [1/min] in Abhängigkeit der Bearbeitungsfläche [m ²]	121
Abbildung 5-46	Ergebnisse Langzeitversuche Bürstentyp 105 und 12: Relativer Massenverlust [%], Abtrag [%] und Rückstände EPS und MW [%] nach Drehzahl [1/min] in Abhängigkeit der Bearbeitungsfläche [m ²]	122
Abbildung 5-47	Exemplarische Aufnahmen Werkzeugtyp 101, 105 und 112 vor (Bild links) und nach (Bilder rechts) der Versuchsdurchführung.....	123

Abbildung B-1	Produktionsverteilung deutsche Transportbetonindustrie [9]	154
Abbildung E-1	Ergebnisse Versuchsplan I-I: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit des WDVS-Aufbaus [-], der Zustellung [mm] und Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] .	161
Abbildung E-2	Ergebnisse Versuchsplan I-I: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit des WDVS-Aufbaus [-], der Zustellung [mm] und Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	162
Abbildung E-3	Ergebnisse Versuchsplan I-II: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDVS-Aufbaus [-] und der Zustellung [mm]	163
Abbildung E-4	Ergebnisse Versuchsplan I-II: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDVS-Aufbaus und der Zustellung [mm]	164
Abbildung E-5	Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], der Drehbewegung [-], der Zustellung [mm] und des WDVS-Aufbaus [-]	165
Abbildung E-6	Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], der Drehbewegung [-], der Zustellung [mm] und des WDVS-Aufbaus [-].....	166
Abbildung E-7	Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Abtrag [%] nach Zustellung [mm] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Werkzeugnummer [-] nach Versuchsdurchgang [-].....	167
Abbildung E-8	Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Relativer Massenverlust [%] nach Zustellung [mm] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Werkzeugnummer [-] überlagert nach Versuchsdurchgang [-]	168
Abbildung E-9	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-III als Punktwolken: Abtrag [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf.....	169
Abbildung E-10	Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-III als Punktwolken: Relativer Massenverlust [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf	169
Abbildung E-11	Ergebnisse Versuchsplan I-IV: Absoluter Massenverlust [g] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDVS-Aufbaus [-] und der Drehbewegung [mm] bei Zustellung -2 mm.....	171
Abbildung E-12	Ergebnisse Versuchsplan I-V: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], der Drehbewegung [-] und der Zustellung [mm]	171
Abbildung E-13	Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 101 und 112 mit und ohne Verdübelung: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit des WDVS-Aufbaus [-] und der Verdübelung [-] bei WDVS-Aufbau 101 bis 106	172
Abbildung F-1	Wandaufbau Praxisversuche (grau: Dämmstoff EPS; gelb: Dämmstoff MW).....	173
Abbildung F-2	Exemplarische Aufnahmen der Praxisversuche.....	174

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Rohdichte und Baustoffklasse von Wärmedämmstoffen, vgl. [1, 14, 11]	7
Tabelle 2	Vor- und Nachteile der Abbruchmethoden von WDVS	14
Tabelle 3	Steuergrößen: Ordnungsschema Parameter	37
Tabelle 4	Abmessung und Kenngrößen der Versuchswerkzeuge	40
Tabelle 5	Herstellerempfehlungen zu den Maschinenparametern	42
Tabelle 6	Übersicht der WDVS-Aufbauten der experimentellen Untersuchungen	44
Tabelle 7	Zielgrößen und Messmittel der experimentellen Untersuchungen	55
Tabelle 8	Versuchsstand I: Gesamtheit der Faktoren und Stufenwerte aller Versuchspläne	56
Tabelle 9	Versuchsstand II: Gesamtheit der Faktoren und Stufenwerte aller Versuchspläne	56
Tabelle 10	Zuordnung der Forschungsfragen zu den Einzelversuchsplänen bzw. der Ergebnisdarstellung	58
Tabelle 11	Faktoren und Stufen Versuchsplan I-I	60
Tabelle 12	Aufbau einer ANOVA Tabelle	62
Tabelle 13	Versuchsplan I-I: ANOVA Tabelle Abtrag	62
Tabelle 14	Versuchsplan I-I: ANOVA Tabelle Relativer Massenverlust	63
Tabelle 15	Faktoren und Stufen Versuchsplan I-II	65
Tabelle 16	Analyseergebnisse relativer Massenverlust Versuchsplan I-II für Werkzeugtyp 2	69
Tabelle 17	Faktoren und Stufen Versuchsplan I-III Ausführung A	71
Tabelle 18	Faktoren und Stufen Versuchsplan I-III Ausführung B	72
Tabelle 19	Faktoren und Stufen Versuchsplan I-IV	78
Tabelle 20	Faktoren und Stufen Versuchsplan I-V	79
Tabelle 21	Bivariate nichtlineare Funktionen mit Linearisierungen, nach [122, S. 105]	81
Tabelle 22	Werkzeugverteilung der Grundlagenversuche bei Versuchsplan I-I bis I-V	87
Tabelle 23	Analyseergebnisse Abtrag Versuchsplan I-II bis I-IIIB	91
Tabelle 24	Analyseergebnisse relativer Massenverlust Versuchsplan I-II bis I-V	91
Tabelle 25	Analyseergebnisse Abtrag Versuchsplan I-IIIB nach Vorschubgeschwindigkeit bei Zustellung 1 mm	93
Tabelle 26	Parameter der pareto-optimalen Punkte	95
Tabelle 27	Schnittstellen der Grundlagen- und Hauptversuche	97
Tabelle 28	Versuchsstand II: Bewertung der Ergebnisse nach Werkzeugtyp	101
Tabelle 29	Faktoren und Stufen Versuchsplan II-I	102
Tabelle 30	Faktoren und Stufen Versuchsplan II-II	104
Tabelle 31	Faktoren und Stufen Versuchsplan II-III	106
Tabelle 32	Faktoren und Stufen Versuchsplan II-IV	109
Tabelle 33	Faktoren und Stufen Versuchsplan II-V	111
Tabelle 34	Faktoren und Stufen Versuchsplan II-VI	114

Tabelle 35	Faktoren und Stufen Versuchsplan II-VII.....	120
Tabelle 36	Beschreibung der befragten Experten und Zuweisung des anonymisierten Kürzels	147
Tabelle 37	Zusammenfassung der Ergebnisse der Leitfadengestützten Experteninterviews sowie die Werkzeugempfehlung (rot: keine Antwort erhalten; grün: Antwort erhalten).....	148
Tabelle 38	Deutscher Wohngebäudebestand: Hochrechnung gedämmter Außenwand Flächenanteile und Wohngebäude, vgl. [22, 10, 24, 135–137].....	151
Tabelle 39	Anzahl Wärme gedämmter Gebäude und summierter Fläche des Außenwandtyps „Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau“, erstellt in Anlehnung an [135, 24, 26, 22, 10, 15, 137, 136].....	153
Tabelle 40	Produktionsverteilung deutsche Transportbetonindustrie, vgl. [138–141]	154
Tabelle 41	Merkmale der Betonrezeptur	155
Tabelle 42	Systembestandteil 1: Klebstoffe und Befestigung	155
Tabelle 43	Systembestandteil 2: Dämmstoffe	156
Tabelle 44	Systembestandteil 3 Unterputz	156
Tabelle 45	Systembestandteil 4: Armierung.....	157
Tabelle 46	Systembestandteil 5: Zwischen- und Schlussbeschichtung	157
Tabelle 47	Versuchsplan I-I: Ergebnisse Varianzhomogenität für das Qualitätsmerkmal Abtrag .	159
Tabelle 48	Versuchsplan I-I: Ergebnisse Varianzhomogenität für das Qualitätsmerkmal Absoluter Massenverlust	159
Tabelle 49	Versuchsplan I-I: Ergebnisse Varianzhomogenität für das Qualitätsmerkmal Relativer Massenverlust	159
Tabelle 50	Versuchsplan I-I: Ergebnisse Shapiro-Wilk-Test für die Qualitätsmerkmale Abtrag und Massenverlust	160
Tabelle 51	Vergleich unterschiedlicher Funktionsansätze für das Qualitätsmerkmal Abtrag anhand des einfachen Bestimmtheitsmaß R^2	170
Tabelle 52	Vergleich unterschiedlicher Funktionsansätze für das Qualitätsmerkmal Massenverlust anhand des einfachen Bestimmtheitsmaß R^2	170
Tabelle 53	Faktoren und Stufen Praxisversuche.....	173

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a_e	[mm]	Zustellung
b_0, b_1, \dots, b_n	[-]	Regressionsparameter
b_A	[mm]	Arbeitsbreite Werkzeug
d_B	[mm]	Besatzdurchmesser
d_D	[mm]	Schichtdicke WDVS
d_K	[mm]	Körperdurchmesser
D_{kj}	[-]	Differenz der Mittelwerte
d_R	[mm]	Rohrdurchmesser
d_W	[mm]	Bürstendurchmesser
F	[-]	Wahrscheinlichkeitsverteilung
F_a	[N]	Anpressung
F_0	[-]	Normalverteilung
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
g	[-]	Anzahl unabhängiger Stichproben
H_0	[-]	Nullhypothese
H_1	[-]	Alternativhypothese
k	[-]	Gruppennummer
l_B	[mm]	Freie Besatzlänge
m	[kg]	Masse
n	[-]	Summand
N_B	[-]	Anzahl der Einzeldrähte pro Bürste
n_B	[1/min]	Drehzahl
n_k	[-]	Anzahl von Gruppenwerten
p	[-]	p-Wert (Überschreitungswahrscheinlichkeit)
q	[-]	Theoretische Quantile
r	[mm]	Werkzeugradius
$2r$	[mm]	Werkzeugdurchmesser

Zeichen	Einheit	Bedeutung
R^2	[-]	Einfaches Bestimmtheitsmaß
s	[mm]	Bürstenweg / zurückgelegte Strecke des Werkzeugs auf dem Werkstück
v_c	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit
v_{ftc}	[mm/min]	Vorschubgeschwindigkeit
w	[-]	Teststatistik
x	[-]	Stichprobenwert
\bar{X}	[-]	Globaler arithmetischer Mittelwert
X_{kj}	[-]	Messwert j der Gruppe k
\bar{X}_k	[-]	Arithmetische Mittelwert der Gruppe k
\hat{y}	[-]	Geschätzter Wert der Zielgröße
\bar{y}	[-]	Globaler Mittelwert
y_i	[-]	Tatsächlicher Messwert
z	[-]	Zufallsvariablen

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	[-]	Wahrscheinlichkeit für Fehler 1. Ordnung
α_n	[°]	Freiwinkel
β_n	[°]	Keilwinkel
γ_n	[°]	Spanwinkel
δ_n	[°]	Schnittwinkel
μ	[-]	Erwartungswert der Grundgesamtheit
π	[-]	Kreiszahl PI
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[-]	Standardabweichung der Grundgesamtheit
σ^2	[-]	Varianz der Grundgesamtheit
σ_B	[N/mm ²]	Zugfestigkeit des Besatzes

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of variance, einfaktorische Varianzanalyse
BaDA	Universelles Baggeranbaugerät zum gezielten Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit integrierter pneumatischer Abförderung
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
DoE	Design of Experiments, statistische Versuchsplanung
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPS	Expandiertes Polystyrol
HBCD	Hexabromcyclododecan
IWU	Institut für Wohnen und Umwelt
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MW	Mineralwolle
POP	Persistente organische Schadstoffe
SSB	Sum of Squares Between (Quadratsumme zwischen den Gruppen)
SSE	Sum of Squares Error (Fehlerquadratsumme, Quadratsumme innerhalb einer Gruppe)
sse	Summe der quadrierten Residue
SSTO	Sum of Squares Total (Totalen Quadratsumme)
ssto	Summe der quadrierten Abweichung
TMB	Institut für Technologie und Management im Baubetrieb
TRGS	Technischen Regeln für Gefahrstoffe
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WSV _o	Wärmeschutzverordnung
XPS	Extrudiertes Polystyrol
ZIM	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand
⊥	Orthogonal
	Parallel

1 Einführung

Oftmals wird die Verwertung von Abbruchabfällen durch die Vermischung verbauter Materialien erschwert. Infolge neuer Bauweisen und Baustoffe ergeben sich zunehmend Probleme bei der Entsorgung. Stetig steigende Forderung nach immer aufwendigerem Wärmeschutz widersprechen den Grundsätzen einer entsorgungsfreundlichen Konstruktion. Die Dämmung der Fassade ist dabei ein zentrales Element, wobei die höchsten Einsparungen durch Maßnahmen an der Außenwand erreicht werden [1]. Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) werden deshalb zur außenseitigen Dämmung aufgebracht. Neben der Energieeinsparung stellen allerdings ebenfalls Ressourceneffizienz, Abfallvermeidung sowie Umweltschutz intensiv diskutierte Themen dar. Die vorliegende Arbeit leistet dazu einen Beitrag.

1.1 Ausgangssituation

Seit den 1970er Jahren werden in Deutschland große Mengen an WDVS verbaut. Dabei werden Dämmplatten – mit über 80 Prozent Marktanteil überwiegend expandiertes Polystyrol (EPS) – direkt auf die Außenwand geklebt und/oder gedübelt und anschließend verputzt. Da diese Systeme die zurzeit kostengünstigste Variante der Fassadendämmung darstellen, ist auch in Zukunft von einem vermehrten Verbau von WDVS mit dem Dämmstoff EPS auszugehen. Stetig steigende Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden tragen zudem zu einer Erhöhung der verbauten Dämmstoffstärken bei. Aktuell ist die Rückbaurrate noch gering. In den nächsten 20 Jahren werden allerdings über 50 Prozent der Systeme ihre mittlere Lebensdauer überschreiten. Laut Fraunhofer IBP ist bis zum Jahr 2050 mit einem Anstieg der anfallenden Abfallmassen an EPS von derzeit unter 10 auf über 50 Kilotonnen¹ pro Jahr zu rechnen [2]. Der Rückbau wird folglich zunehmend an Bedeutung gewinnen. Hinzu kommt, dass bei heute zurückgebauten WDVS mit EPS, in der Regel das seit August 2015 verbotene Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) enthalten ist. Ein rückstandsloser sowie emissionsarmer Abtrag des Dämmstoffs von der mineralischen Außenfassade hat somit Priorität. Europarechtskonforme Alternativen zur thermischen Behandlung dieser Abfälle bestehen hingegen nicht [3]. Eine Trennung einzelner Systembestandteile des WDVS ist somit nicht vorrangig.

Der Abbruch des WDVS ist jedoch aufwändig und kostspielig. Steht der Erhalt der Bausubstanz im Vordergrund, so wird durch den manuellen selektiven Abbruch das WDVS zurückgebaut und entsorgt. Jedoch ist dies mit einem hohen Zeitaufwand sowie Personalkosten verbunden. Beim Gebäudeabbruch hingegen repräsentiert der maschinelle teil-selektive Abbruch den Stand der Technik, wobei das WDVS mit dem Baggerlöffel oder dem Sortiergreifer abgeschält wird [4]. Dieses Vorgehen ist im Vergleich zu allen handwerklichen Methoden bedeutend schneller, allerdings verbleiben Reste von Dämmmaterial und weiterer Systembestandteile an der Außenfassade. Diese müssen entweder im Nachgang aufwendig von Hand entfernt oder mit entsorgt werden. Unabhängig von der Abbruchmethode erfolgen die Arbeitsschritte Trennen und Sammeln separat, was die Ausbreitung von Emissionen fördert.

Aus den Defiziten gängiger Methoden resultiert der Bedarf nach einem maschinellen selektiven Abbruch von WDVS. Im Rahmen dieser Arbeit werden deshalb wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt, um ein neues Verfahren für diesen Zweck zu qualifizieren. Zum Einsatz kommen Bürstenwerkzeuge in einem Baggeranbaugerät, welches zeitgleich im Rahmen eines ZIM Projektes am Institut für Technologie

¹ Eine Kilotonne entspricht 1000 Tonnen.

und Management im Baubetrieb gemeinsam mit dem Unternehmen WIMAG GmbH entwickelt wurde. Anfallende Späne können dabei am Entstehungsort abgesaugt werden, weshalb keine Emissionen in die Umwelt gelangen.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Der zu erwartende Anstieg notwendiger Rückbaumaßnahmen von WDVS in den nächsten Jahren, fehlende Techniken im Bereich des maschinellen selektiven Abbruchs, sowie das Vermeiden von Emissionen auf der Baustelle bilden somit die Motivation der vorliegenden Arbeit. Zusätzlich ergeben sich weitere Vorteile eines maschinellen selektiven Abbruchs. So lassen sich die anfallenden Entsorgungskosten durch eine Erhöhung der Trennschärfe im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) deutlich reduzieren und die Ressourceneffizienz steigern.

Da Bürstenwerkzeuge in der Praxis nicht zum Abtrag von WDVS eingesetzt werden, existieren zum Zeitpunkt der Anfertigung der Arbeit keine Untersuchungen dazu. Hier setzt die vorliegende Arbeit an, indem Werkzeuge mithilfe wissenschaftlicher Methoden getestet und bewertet werden. Die Vielfalt der zu variierenden Größen erlaubt jedoch keine umfassende Klärung aller möglichen offenen Fragestellungen. Innerhalb dieser Arbeit wird daher das Ziel verfolgt, eine Werkzeugempfehlung inkl. optimaler Maschinenparameter für die kontinuierliche Bearbeitung eines Standard WDVS-Aufbaus auszusprechen. Davon ausgehend lassen sich die drei Forschungsfragen ableiten:

1. Welchen Einfluss haben der Aufbau des WDVS sowie die einzelnen Systembestandteile auf das Abtragungsergebnis sowie den Werkzeugverschleiß?
2. Welches Bürstenwerkzeug ist für den rückstandslosen und kontinuierlichen Abtrag eines Standard-WDVS am besten geeignet, unter dem Gesichtspunkt der Verschleißoptimierung?
3. Wie sind werkzeugabhängig die Maschinenparameter (Anstellung, Vorschubgeschwindigkeit, Drehbewegung und Drehzahl) zu wählen, um den Abtrag zu maximieren sowie den Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust zu minimieren?

Die Bewertung der Funktionserfüllung der experimentellen Versuche erfolgt durch die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust, wobei Ersteres möglichst maximiert und Letzteres minimiert werden soll. Eine Beschreibung der Qualitätsmerkmale gibt Abschnitt 4.1.3 wieder.

1.3 Forschungsmethode und Aufbau

Der Abtrag von WDVS mit Bürstenwerkzeugen stellt noch kein erprobtes Anwendungsfeld dar und soll deshalb anhand der in Abbildung 1-1 dargestellten Forschungsmethoden genauer untersucht werden. Neben Literaturrecherchen dienen dabei leitfadengestützte Experteninterviews als Mittel der qualitativen Datenerhebung. Diese bilden den Ausgangspunkt der experimentellen Untersuchungen und sind ebenso ein Alleinstellungsmerkmal der Arbeit. Ermöglicht wird dadurch primär die Werkzeugauswahl sowie die Eingrenzung des Faktorraums für die Optimierung der Maschinenparameter. Des Weiteren fördern die Gespräche mit Personengruppen aus den Bereichen Bürstenherstellung, Vertrieb, Anwendung sowie Forschung und Entwicklung den Erfahrungsaustausch, die Thesendiskussion, eine Vereinheitlichung des Sprachgebrauchs und die Vermeidung von Doppelforschung.

Der dazu entwickelte Leitfaden sowie eine Beschreibung der befragten Experten und deren Werkzeugempfehlung sind dem Anhang A zu entnehmen. Die Ergebnisse der Experteninterviews werden in den entsprechenden Kapiteln vorgestellt. Anzumerken ist, dass der fachliche Austausch mit den Experten während der gesamten wissenschaftlichen Untersuchungen stattgefunden hat. Somit konnten ebenfalls die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen, sowie mögliche (Werkzeug-) Anpassungen diskutiert werden. Insgesamt haben 17 Experten aus 12 Unternehmen mitgewirkt.

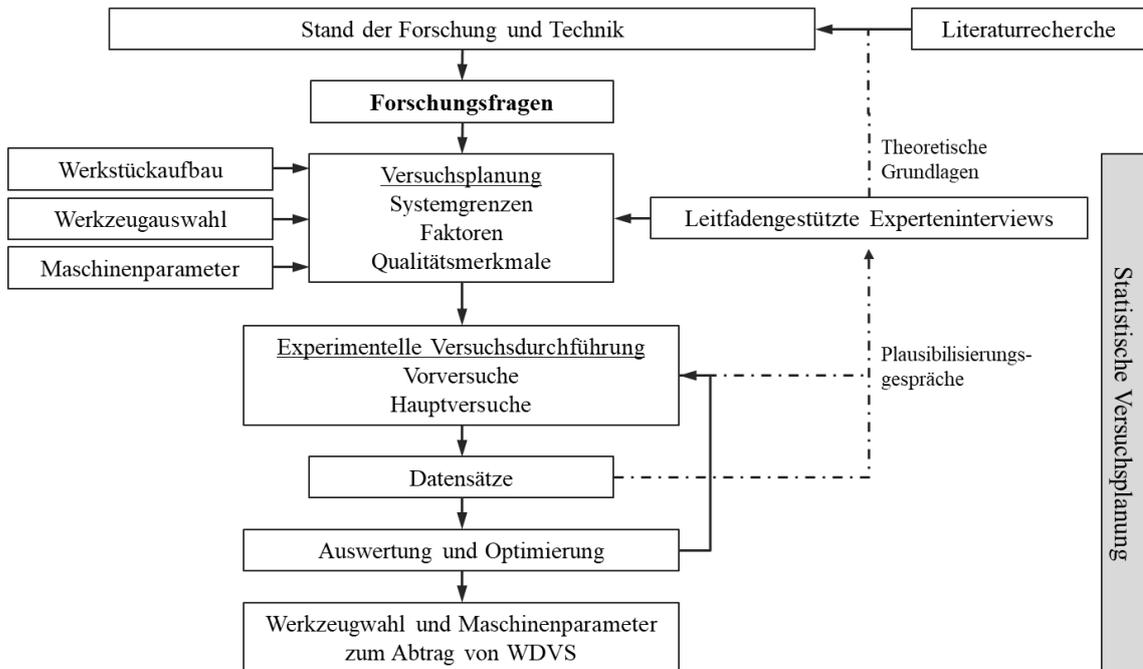


Abbildung 1-1 Ablaufdiagramm der Forschungsmethoden

Der Aufbau der Arbeit lehnt sich an die durchgeführten Forschungsarbeiten an. Das Wissen über die einzelnen Systembestandteile von WDVS sowie Ausführungsmöglichkeiten von Bürstenwerkzeugen ist bei der Interaktion zwischen Werkzeug und Werkstück entscheidend. Daher werden in Kapitel 2 die bei Abbruchvorhaben zu erwartenden WDVS-Aufbauten, speziell in Anlehnung meistverbauter Systemkombinationen, näher beschrieben. Ausführungsmöglichkeiten von Rundbürsten sowie die damit zusammenhängenden, bei der Bearbeitung von Werkstücken auftretenden Kräfte, werden in Kapitel 3 erläutert. Die Experteninterviews sowie Literaturrecherchen bilden dabei eine wichtige Datenbasis.

Auf die experimentellen Untersuchungsmethoden wird in Kapitel 4 eingegangen. Es erfolgt eine Beschreibung der Versuchsstände inkl. Messtechnik. Zusätzlich werden unter Einhaltung gängiger Methoden der statistischen Versuchsplanung die Systemgrenzen, inklusive Steuergrößen, Zielgrößen sowie Qualitätsmerkmale definiert.

Resultierende Annahmen und Schlussfolgerungen werden durch praktische Versuche bewertet und verglichen (siehe Kapitel 5). Anhand der Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust können anschließend aus den Datensätzen geeignete Werkzeuge und Maschineneinstellungen identifiziert und mittels weiterer Versuchsreihen sowie Langzeitversuchen ein Optimum abgeleitet werden. Klassische statistische Verfahren dienen der Ermittlung signifikanter Effekte sowie der Beschreibung von Zusammenhängen unterschiedlicher Variablen. Zusammenfassung und Ausblick bilden den Abschluss der Arbeit (siehe Kapitel 6).

2 Wärmedämmverbundsysteme

Nach dem Ende des 2. Weltkriegs waren in Deutschland etwa 4,8 Millionen Wohnungen zerstört oder beschädigt [5]. Darauf folgte eine Phase des Wiederaufbaus, aus der ein Großteil der noch heute bestehenden Gebäude hervorgegangen sind [6]. Und obgleich die Phase des Wiederaufbaus bereits in den 1960er Jahren abgeschlossen war, wurden jene Gebäude ausgehend von den Ölkrisen und darauffolgenden Wärmeschutzverordnungen (WSVo) – später Energieeinsparverordnungen (EnEV) – im Laufe der 1970er Jahre energetisch saniert. WDVS wurden dabei zur außenseitigen Dämmung von Gebäuden aufgebracht. Ein Großteil der damals errichteten Gebäude und/oder deren WDVS haben mittlerweile das Ende ihres Lebenszykluses erreicht und müssen nun abgebrochen werden.

Durch eine Analyse verbauter WDVS findet nachfolgend eine Charakterisierung der Werkstücke statt, welche eine Basis für die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit darstellen. Da der vorhandene Gebäudebestand über die Jahrzehnte in der Baupraxis unterschiedlichste Bauweisen und Bautechniken aufweist, können keine Pauschalaussagen über die Systembestandteile verbauter WDVS getroffen werden. Infolge der Vielfalt an Kombinationsmöglichkeiten liegen daher die meistverbauten Systeme im Schwerpunkt der Betrachtung. Das Marktpotential für den Abbruch ergibt sich aus der Menge verbauter WDVS. Hochrechnungen anhand statistischer Daten ermöglichen eine Abschätzung. Die Wirtschaftlichkeit hingegen wird von der Abbruchmethode geprägt.

2.1 Aufbau und Eigenschaften klassischer Wärmedämmverbundsysteme

Das Wärmedämmverbundsystem stellt einen Multikomponentenaufbau dar und wird umgangssprachlich auch als Vollwärmeschutzsystem oder Thermohautsystem bezeichnet. Wie der Name impliziert, handelt es sich um Verbundwerkstoffe mit baustoffchemisch unterschiedlichsten Eigenschaften, die nur als Komplettsystem eines Systemanbieters mit bauaufsichtlicher Zulassung verwendet werden dürfen [1]. Die Komponenten werden dabei schichtweise hintereinander angebracht. Gemäß DIN 55699 (Februar 2005, überarbeitet August 2017) umfasst ein WDVS die in Abbildung 2-1 dargestellten Bestandteile [7, 8].



Abbildung 2-1 Exemplarischer Aufbau der Systembestandteile eines WDVS

Bei der Verarbeitung von WDVS gilt es nationale bautechnische Vorschriften, Verarbeitungsrichtlinien der Hersteller, europäische Regelwerke sowie Festlegungen der Landesbauordnung und die aktuell gültige Energieeinsparverordnung zu beachten. Exemplarische Aufnahmen eines mit WDVS versehenen Mehrfamilienhauses zeigt Abbildung 2-2.



Abbildung 2-2 Beispielgebäude mit WDVS (links: Dämmstoff wird an die Fassade geklebt; rechts: Komplettaufbau aus WDVS)

Auf die einzelnen Systembestandteile eines WDVS und deren Häufigkeiten wird in den Abschnitten 2.1.1 bis 2.1.3 weiter eingegangen. Doch zuvor ist eine Beschreibung des Außenwandtyps erforderlich. Innerhalb dieser Arbeit wird ausschließlich Beton der Festigkeitsklasse C25/30 als Untergrund betrachtet. Dies begründet sich einerseits auf den Angaben des Bundesverbands der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. [9], wonach in Deutschland mit einer Häufigkeit von etwa 40 Prozent Betone der Druckfestigkeitsklasse C25/30 überwiegen (vgl. Anhang B Tabelle 40 und Tabelle 41). Andererseits sind – entsprechend einer Erhebung des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) aus dem Jahr 2018 – beim Außenwandtyp „Betonfertigteile, Großtafelbauweise, Plattenbau“ insgesamt etwa 79,4 Prozent der Außenwandfläche wärmedämmend. Davon wiederum 83 Prozent durch eine außenliegende Dämmung. Damit sind Bauteilflächen des Außenwandtyps „Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau“ gegenüber anderer Außenwandtypen am ehesten mit einem WDVS versehen [10, S. 55].

2.1.1 Kleber und Befestigung

Die Fixierung des WDVS auf dem Untergrund kann nach DIN 55699 (August 2017) entweder ausschließlich geklebt, geklebt und gedübelt oder über Schienen, Profilverankerungen, sowie anderen Befestigungsmitteln erfolgen [8]. Letzteres hat bei üblichen Untergründen nur einen geringen Marktanteil. Entscheidend ist die Beschaffenheit der Oberfläche sowie die Windbelastung. Bei geklebten Systemen stellt der Kleber die einzige Verbindung zwischen Dämmstoff und Wandkonstruktion dar und wird nach Neumann [11, S. 58] als Hauptverankerungsart der Platten bezeichnet. Nach Albrecht und Schwitalla [2] entfallen 80 Prozent der verbauten Bestandteile auf mineralische Kleber, 18 Prozent auf Dispersionskleber sowie 2 Prozent auf mechanische Befestigung. Zusätzlich Dübel als Befestigungsmittel weisen 60 Prozent der geklebten Systeme auf. Betrachtet werden WDVS mit dem Dämmstoff EPS [2, S. 35].

Der Kleber wird dabei entweder auf die Wand oder den Dämmstoff aufgebracht. Neben einem vollflächigen Auftrag ist alternativ das Randwulst-Punkt-Verfahren, das am häufigsten angewandte Klebeverfahren, sowie das Wulstverfahren möglich. Das Wulstverfahren findet vor allem bei Platten aus EPS, unter Verwendung eines einkomponenten Polyurethan-Klebeschaums, Anwendung. Abbildung 2-3 zeigt skizzenhaft die Aufbringmöglichkeiten an der Dämmstoffpatte [8].

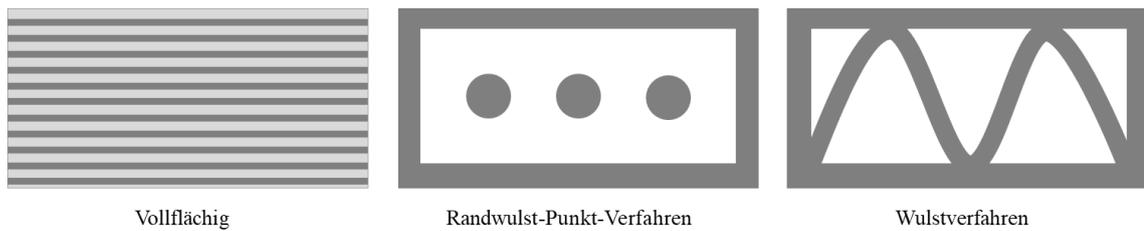


Abbildung 2-3 Verfahrensmöglichkeiten des Klebstoffauftrags auf einer Dämmstoffplatte (grauer Kleber auf weißer Platte)

Gemäß der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für geklebtes WDVS muss die Haftzugfestigkeit mindestens 0,08 Newton pro Quadratmillimeter betragen. Je nach Windlast (-sog) oder verwendetem Dämmstoff ist eine zusätzliche Verdübelung notwendig. Die Art und Anzahl der Dübel sind auf den Untergrund, den Dämmstoff sowie seine Dicke, die Gebäudehöhe und vorkommende Lasten abzustimmen.

Der klassische Dübel besitzt einen Dübelstift beziehungsweise eine Dübelschraube, gefertigt aus galvanisch verzinktem Stahl oder rostfreiem Edelstahl, sowie eine Dübelhülse in Verbund mit dem Dübelteller, bestehend aus Polyethylen oder Polyamid [12, S. 106–107]. Konstruktive und statische Verdübelungen gilt es zu differenzieren. Eine konstruktive Verdübelung dient als Montagehilfe und trägt das System, während der Kleber aushärtet, wohingegen eine statische Verdübelung primär für das Ableiten von Windlasten angesetzt wird [11, S. 186, 13, S. 28]. Mineralwolle-Platten müssen auf allen Untergründen zusätzlich statisch gedübelt werden [12]. Je nach Anwendungsspektrum stehen unterschiedliche Dübeltypen zur Verfügung. Unterschieden werden Schraubdübel, Setzdübel (Schießdübel), Schlagdübel und der Bohrdübel. Aufgrund seines großen Anwendungsspektrums hat sich der Schraubdübel als Universallösung etabliert [11, S. 189] (vgl. Abbildung 2-4).



Abbildung 2-4 Sto-Thermodübel II UEZ 8/60

Je nach Befestigungsmethode können bei der Befestigung Unebenheiten des Untergrunds unterschiedlicher Größenordnung ausgeglichen werden. Bei geklebten Systemen beträgt die zulässige Einheitsabweichung bis zu einem Zentimeter pro Meter. Unter Verwendung von Dübeln verdoppelt sich dieser Wert auf zwei Zentimeter pro Meter. Die größte Einheitsabweichung erlaubt die Schienenbefestigung mit drei Zentimeter pro Meter [13, S. 25].

2.1.2 Wärmedämmstoff

Das Energieeinsparpotential in Form einer Außenwanddämmung wird wesentlich von den wärmeschutztechnischen Eigenschaften und der Dicke des plattenförmigen Dämmstoffs bestimmt [1]. Die Rohdichte ist dabei entscheidend. Die Wärmeleitfähigkeit steigt mit zunehmender Rohdichte, ebenso wie die mechanischen Eigenschaften des Systems, die wiederum die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit beeinflussen [14, S. 79]. Es gilt einen Mittelweg zu finden. Ein Vergleich der unterschiedlichen Dämmstoffe anhand von Rohdichte und Baustoffklasse ist Tabelle 1 zu entnehmen. Diese sind von der Zusammensetzung sowie dem Einbauort abhängig. Generell bestimmen die Dämmstoffe im WDVS einen Großteil des Volumens bei vergleichsweise geringem Gewicht.

2.1 Aufbau und Eigenschaften klassischer Wärmedämmverbundsysteme

Tabelle 1 Rohdichte und Baustoffklasse von Wärmedämmstoffen, vgl. [1, 14, 11]

Dämmstoff			Rohdichte [kg/m ³]	Baustoff- klasse
anorganische Materialien	synthetisch	Mineralwolle (MW)	10-200	A1, A2
		Mineralschaum /Aerosol	115-300	A1, A2
		Aerogel	90-170	B1, B2
organische Materialien	synthetisch	Polystyrol expandiert (EPS)	15-30	B1, B2
		Polystyrol extrudiert (XPS)	20-60	B1, B2
		Polyurethan-Hartschaum	30-100	B1, B2
		Phenolharzschaum	35-40	B1, B2
	natürlich	Holzfaserweichplatten	25-600	B1, B2
		Hanfwole	24-100	B1, B2

Steigende Anforderungen an den Wärmeschutz treiben den Anstieg der Dämmstoffdicken voran, unabhängig vom Dämmmaterial selbst. Sind bei Altbauten mit einem Baualter bis 1979 mehr als 25 Prozent mit maximal fünf Zentimeter gedämmt, treten bei neueren Gebäuden (ab 2005) höhere Dämmstoffstärken häufiger auf. Dort sind Materialstärken mit 14 Zentimeter und mehr mit einem Anteil von fast 50 Prozent vertreten. Äquivalent ist im Zuge von Modernisierungsmaßnahmen von Altbauten eine Verschiebung der Verteilung zu höheren Dämmstoffdicken hin erkennbar. Wird nicht nach Baualter differenziert, so überwiegen Dämmstoffdicken im Bereich der Stärke sechs bis neun Zentimeter [15, S. 61].

Seit der Entwicklung von WDVS haben sich Polystyrol-Hartschaum sowie Mineralwolle-Systeme bewährt. Diese sind in DIN EN 13499 (Dezember 2003) [16] sowie DIN EN 13500 (Dezember 2003) [17] beschrieben. Knapp 80 Prozent der verbauten WDVS weisen nach Angaben des Fachverbands Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (Jahr 2013) einen Dämmstoff aus expandiertem Polystyrol auf, den Rest bilden hauptsächlich Mineralwolle-Dämmstoffe, aber auch extrudiertes Polystyrol und andere wie Kork, Holzfaser, Polyurethan. Die Verteilung der Dämmstoffdicken sowie der verwendeten Dämmstoffe liefert Abbildung 2-5. Letztere werden in den nachfolgenden Abschnitten behandelt.

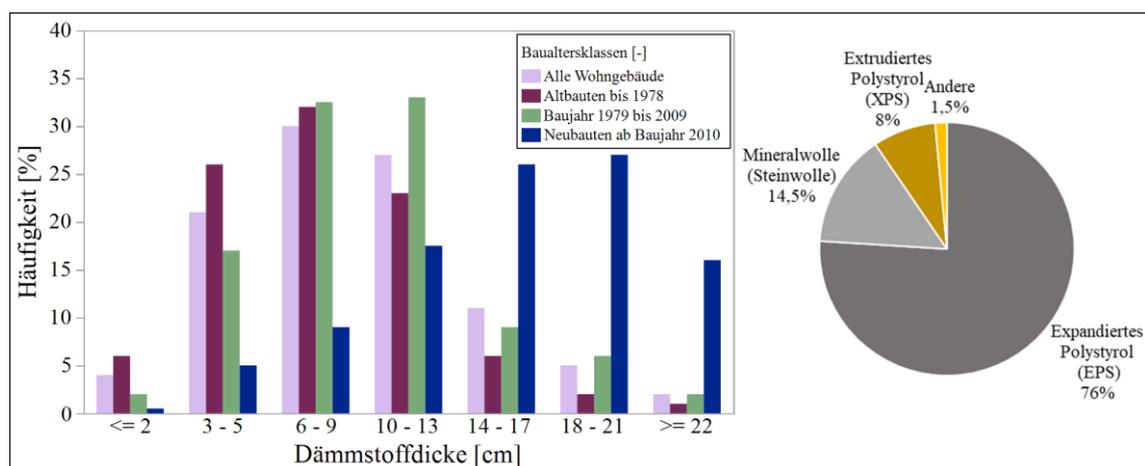


Abbildung 2-5 Links: Dämmstoffdicken bei der Außenwanddämmung (alle Dämmstoffarten), nach [15, S. 61]; rechts: Verteilung der Dämmstoffe in den verbauten WDVS, nach [14]

2.1.2.1 Expandiertes Polystyrol

Bei der Außenwanddämmung nimmt der Dämmstoff aus expandiertem Polystyrol (EPS) die Vorreiterrolle ein, bestehend aus Polystyrol, Treibmittel und Additiven zum Flammenschutz. Als Grund sind das Preis-Leistungsverhältnis, die mechanischen Eigenschaften und die einfache Verarbeitung zu nennen. Wegen des hohen Porengehalts weist der thermoplastische Kunststoff eine geringe Rohdichte auf [1].

Als Maßnahme des Brandschutzes bei WDVS sind unter anderem Flammschutzmittel zu nennen, insbesondere das in der Vergangenheit in Kombination mit Polystyrol wirtschaftlich wichtigste Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) [2]. Auch wenn im Zuge der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit kein Einfluss des Flammschutzmittels zu erwarten ist, hat dieses für den emissionsarmen Rückbau aktuell gedämmter Außenfassaden, die Trennschärfe sowie die Entsorgungskosten Relevanz. Denn im Mai 2013 ist HBCD als persistenter – schwer abbaubarer – organischer Schadstoff identifiziert worden, worauf ein weltweites Handels- und Verwertungsverbot folgte. Restbestände an Dämmstoffen mit HBCD durften noch bis in das Jahr 2016 verkauft werden [18]. Nach der POP-Abfall-Überwachungs-Verordnung sind mit HBCD belastete Platten dauerhaft als nicht gefährlicher Abfall zu bewerten, allerdings dennoch überwachungsbedürftig. Da es keine Positivkennzeichnung HBCD haltiger EPS-Dämmplatten gibt, ist davon auszugehen, dass dies in nahezu allen Systemen enthalten ist. Zur Unterscheidung HBCD-freier und HBCD-haltiger Platten existiert nach Angaben des Umweltbundesamts ein Schnelltest [18].

Neben dem Einsatz von Flammschutzmitteln bestehen weitere Anforderungen an den Brandschutz, denn EPS ist – wie der Großteil der heutzutage verbauten Dämmmaterialien – der Baustoffklasse B zuzuordnen, Verhalten im Brandfall: brennbar [19]. Seit 2006 (sowie mit weiteren Ergänzungen im Januar 2016) gelten daher für die bauaufsichtliche Zulassung weitere Brandschutzmaßnahmen für die Fassadendämmung, sogenannte Brandriegel. Es handelt sich dabei um einen Materialwechsel des Dämmstoffs im WDVS. Die Anforderungen an den Brandschutz unterscheidet sich je nach Gebäudetyp und Ausführung des Dämmsystems. Generell sind Brandriegel in jedem zweiten Geschoss anzubringen. Diese müssen aus nichtbrennbarer Mineralwolle bestehen und mindestens 200 Millimeter hoch sein. Bei Dämmsystemen, welche vor dem Jahr 2006 bzw. 2016 angebracht wurden, gilt der Bestandsschutz. Ein Nachrüsten wird nicht erforderlich [1, 20]. Demnach ist bei Rückbauprojekten in nächster Zeit nicht mit dem Auftreten von Brandriegeln zu rechnen.

2.1.2.2 Mineralwolle

Nach EPS besitzt Mineralwolle (MW) den zweitgrößten Absatz. Alle weiteren möglichen Dämmstoffarten spielen mengenmäßig eine untergeordnete Rolle. MW ist im Gegensatz zu anderen Dämmstoffen der Baustoffklasse A – nicht brennbar – zuzuordnen und wird seit Beginn der 1980er Jahre in WDVS eingesetzt. Dabei handelt es sich in erster Linie um Glas- und Steinwolle, wobei nahezu ausschließlich Steinwolle in Form von WDVS Anwendung findet. Durch das Schmelzen und Zerfasern verschiedener Gesteinsarten erfolgt die Herstellung. So besteht Steinwolle zu fast 96 Prozent aus geschmolzenen Steinen. Hinzu kommen Kunstharze als Bindemittel und Mineralöle zur Imprägnierung und Staubbinding [21].

Bei Produkten, deren Einbau vor 1996 erfolgte, ist nach den „Technische Regeln für Gefahrstoffe“ TRGS 905 aufgrund feiner, lungengängiger Fasern, die nicht biologisch abbaubar sind, von einem Krebsverdacht auszugehen. Seit Juni 2000 dürfen diese sogenannten alten Mineralwollen deshalb nicht mehr verwendet werden. Neue Mineralwolle ist durch eine entsprechende Kennzeichnung, dem RAL Gütezeichen, kenntlich gemacht [21].

2.1.2.3 Extrudiertes Polystyrol

Extrudierter Polystyrolschaumstoff (XPS) ist ein geschlossenzelliger harter Dämmstoff mit hoher Druckfestigkeit und äußerst geringer Wasseraufnahme. Hergestellt wird XPS aus Treibmittel, Farbstoffen und Flammschutzmitteln. Aufgrund seiner Eigenschaften findet XPS seinen Einsatz als Perimeterdämmung [2]. Darunter wird die außenseitige Dämmung erdberührter Teile verstanden, bspw. die außenseitige Dämmung der Kellerwand oder auch die erdseitige Dämmung von Bodenplatten. Demnach wird XPS innerhalb dieser Arbeit nicht als Dämmstoff berücksichtigt.

2.1.3 Unterputz, Armierung und Schlussbeschichtung

Nach dem Aushärten des Klebers wird auf den Dämmstoff eine Armierungsschicht bestehend aus einem Unterputz mit eingebettetem Gewebe in Gitterform aufgebracht. In den meisten Fällen ist dies ein Bewehrungsgewebe, auch Armierung genannt, aus Glasfasern. Alternativ können auch Metall- oder Kunststoffgewebe verwendet werden [12, S. 130]. Die Maschenweite ist auf das Größtkorn des Unterputzes abzustimmen und liegt üblicherweise in einem Bereich von drei bis zehn Millimetern [11, S. 78]. Während der Unterputz vor allem durch lückenloses Auftragen eine wasserabweisende, dampfdurchlässige Funktion erfüllt, zeichnet sich die Armierung durch ihre hohe Reißfestigkeit aus. Bei den Unterputzen wird grundsätzlich zwischen mineralischen sowie dispersionsgebundenen Putzen unterschieden. Der größte Marktanteil mit 76 Prozent ist dem mineralischen Unterputz zuzuschreiben [11, S. 71]. Solange der Unterputz noch nicht abgebunden ist, wird das Bewehrungsgewebe überlappend eingebettet. Alle erforderlichen Kenngrößen wie Auftragsmenge, Auftragsweise, erforderliche Dicke und Oberflächenbeschaffenheit können den Systemzulassungen der Hersteller entnommen werden.

Darauf folgt – nach Aushärten der Armierungsschicht – eine Schlussbeschichtung, welche das System vor äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit schützt. Diese besteht neben Natursteinplatten, Fliesen und sonstigen keramischen Belägen überwiegend aus mineralisch oder organisch gebundenen Putzen. Je nach Region weist in Deutschland der Oberputz als Schlussbeschichtung einen Anteil von 60 bis 95 Prozent auf. Mineralische Oberputze, Dispersionssilikatputze, Silikonharzputze und Kunstharzputze sind zu unterscheiden, wobei dünnlagige mineralische Oberputze die größte Produktgruppe darstellen [11, S. 82]. Nach Albrecht und Schwitalla [2] sind 65 Prozent der Oberputze der Gruppe mineralisch zuzuordnen, 35 Prozent hingegen der Kategorie der pastösen Oberputze. Die Hauptbestandteile des Mineralputzes sind vor allem Kalk und/oder Zement (meist Weißzement), mineralische Zuschläge (Marmorsand, Calcit oder Muskovit) und verschiedene Additive. Das Bindemittel ist dabei maßgebend für die Festigkeit und Elastizität des Putzes [12, S. 131].

2.2 Marktpotential des Abtrags von Wärmedämmverbundsystemen

Eine Notwendigkeit zur Untersuchung des Abtrags von WDVS setzt voraus, dass einerseits eine Vielzahl von gedämmten Gebäuden vorhanden ist, andererseits, dass Altbestände abgetragen werden müssen. Nachfolgend wird daher der deutsche Wohngebäudebestand identifiziert und der Marktbestand an gedämmten Außenfassaden abgeschätzt, bevor dann auf das Potential zukünftig zu erwartender Abfallströme aus diesem Bereich eingegangen wird. Die entsprechende Hochrechnung anhand statistischer Daten ist dem Anhang B zu entnehmen. An dieser Stelle sollen lediglich die Ergebnisse vorgestellt werden.

Für die Identifikation des Marktpotentials gilt es folgende Fragen zu klären:

- *Wie viele gedämmte Wohngebäude gibt es in Deutschland?*

Statistische Daten des Wohngebäudebestands in Deutschland liegen bis einschließlich 2016 vor [22, 10, 23, 24]. Demnach lässt sich ein Bestand von 5,5 Millionen außenseitig gedämmter Wohngebäude ermitteln.

Ein Abgleich der Hochrechnung mit vorhandener Literatur bestätigt die Plausibilität dieser: Innerhalb eines Forschungsbericht des Fraunhofer IFAM wurde im Sinne einer Aufdopplung der Bestand an gedämmten Wohngebäuden ermittelt (vgl. [25, S. 46]), wonach bis Ende 2014 von 5,12 Millionen Gebäuden auszugehen ist. Die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) prognostiziert einen Anstieg der Neubaurate um 0,55 Prozent pro Jahr (abzüglich Gebäudeabriss), was etwa 105.000 Wohngebäuden entspricht [22, S. 15]. Ebenso konnte für den Zeitraum 2005 bis 2008 eine Sanierungsrate von 1,1 Prozent in Bezug auf den Altbaubestand (Baualtersklasse bis 1978) bzw. 0,8 Prozent für alle Wohngebäude identifiziert werden [22].

- *Wie viele Quadratmeter Wandflächen von Wohngebäuden sind mit WDVS gedämmt?*

Je nach Baualtersklasse und Gebäudetyp liegen in Deutschland Zahlenwerte für die Außenwandflächen in Quadratmetern bis einschließlich 2009 vor. Daraus lässt sich ermitteln, dass ca. 1.121 Millionen Quadratmeter Außenwand-Flächenanteile gedämmt wurden.

Das Fraunhofer IFAM [25, S. 43] liefert eine geringere Abschätzung. Aufgrund von Marktdaten des Fachverbands Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. ergeben sich bis Ende 2015 ca. 1.032,8 Millionen Quadratmeter Außenwandfläche an Wohn- und Nichtwohngebäuden, die mit WDVS gedämmt wurden.

Die Ursache der Diskrepanz der ermittelten Daten ist nicht genau bezifferbar. Der zeitliche Bezugspunkt könnte jedoch ein prägender Einfluss sein. Eventuell lässt sich diese auf die Abrissdynamik in Ostdeutschland zurückführen. Im Rahmen des Programms „Stadtumbau Ost – für lebenswerte Städte und attraktives Wohnen“ wurde ab 2002 dort der Abriss großer, überwiegend industriell gefertigte Wohngebäudebestände und maroder Altbauten gefördert [26].

- *Bei wie viel Wandfläche bzw. Gebäuden ist ein Abbruch des Dämmsystems zu erwarten?*

Wie auch Gebäuden wird WDVS eine Lebensdauer zugeschrieben. Dabei gilt es diese von der mittleren Lebensdauer – auch Nutzungsdauer genannt – zu differenzieren. Denn auch wenn die Funktion des Systems noch erfüllt sein kann, wird es nicht allen Anforderungen gerecht. Beispielsweise infolge optischer oder energetischer Gesichtspunkte werden dann Maßnahmen ergriffen. Aufgrund ständiger Änderungen von Gesetzen und Verordnungen gestaltet sich eine Abschätzung der mittleren Lebensdauer schwierig. Die Europäischen Leitlinien für Technische Zulassung (ETAG 004) sehen für außenseitige WDVS mit Putzschicht eine Nutzungsdauer von mindestens 25 Jahren vor [27]. Begutachtungen von zwölf mehrgeschossigen Wohngebäuden mit verschiedenen WDVS durch das Fraunhofer IBP ergaben keine technischen Mängel in einem Zeitraum von 14 bis 29 Jahren. Der abgeschätzte Mittelwert der Renovierungshäufigkeit liegt bei 22 Jahren [28]. Der Leitfaden für nachhaltiges Bauen ordnet WDVS eine Haltbarkeit von 25 bis 45 Jahren und eine mittlere Haltbarkeit von 30 Jahren zu [29]. Das Fraunhofer IBP [2] prognostizieren eine Gesamtlebensdauer von mehr als 50 Jahren.

Wird nun WDVS eine mittlere Lebensdauer von 35-40 Jahren zugeschrieben, so ist in Bezug auf den Bericht [25, S. 44] des Fraunhofer IFAM aus dem Jahr 2016 mit folgenden Angaben verbauter Quadratmeter zu rechnen: Unter Einbezug aller mit WDVS gedämmten Wandflächen in Deutschland vor dem Jahr 1981 haben aktuell fünf Prozent der Wohngebäude, entspricht 51,64 Millionen Quadratmetern, das Ende Ihres Lebenszykluses erreicht und müssen abgetragen werden. Dennoch werden innerhalb der nächsten 20 Jahre voraussichtlich über 50 Prozent der verbauten Systeme ihre mittlere Lebensdauer überschreiten.

Eine Hochrechnung anhand des innerhalb dieser Arbeit zusammengestellten Datenbestands ist nur bedingt möglich, da diesem lediglich die Anzahl der gedämmten Gebäude und Flächen nach Baualtersklasse zu entnehmen ist, ohne einen Bezug auf den Zeitpunkt des Aufbringens der Dämmung. Der Versuch einer Abschätzung wird dennoch unter dem Ansatz der Gebäudenutzungsdauer unternommen: Das Bewertungsgesetz [30] schreibt den Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Mehrfamilienhäusern eine wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer von 70 Jahre zu. Nach diesem Kriterium haben gegenwärtig 26 Prozent der außenwandgedämmten Wohngebäude (Baualtersklasse bis 1948) das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht. Das entspricht etwa 1,3 Millionen Gebäuden mit 127 Millionen Quadratmetern gedämmter Außenwand-Flächenanteile. In den nächsten 20 Jahren wird dies voraussichtlich auf knapp 50 Prozent des derzeitigen gedämmten Gebäudebestands zutreffen.

– *Welcher Anteil des gedämmten Gebäudebestandes weist eine unzureichende Dämmung auf?*

Um den Anforderungen eines klimaneutralen Gebäudebestandes gerecht zu werden, ist eine „einfache“ Wärmedämmung oftmals nicht ausreichend. Das Energieeinsparpotential hängt wesentlich von den wärmeschutztechnischen Eigenschaften des Materials und der Dämmschichtdicke ab. Der Bericht [25, S. 82] des Fraunhofer IFAM prognostiziert mittelfristig eine notwendige Dämmschichtdicke von mindestens 10 Zentimetern. Damit haben zum Bezugsjahr 2009 bereits „53,5 % der Außenwände von Wohngebäuden, die eine Dämmschicht haben, [...] einen perspektivisch unzureichenden Wärmeschutz“ [25, S. 45]. Diese bieten das Potential eines Abtrags mit darauffolgender Neudämmung.

– *Mit welchen Abfallströmen aus Wärmedämmverbundsystemen ist zu rechnen?*

Auch wenn mittlerweile belegt werden konnte, dass in Zukunft keine „Müllberge so hoch wie die Alpen“ [2] in Form von WDVS zu erwarten sind, ist dennoch mit einem Anstieg des Abfallaufkommens zu rechnen. Eine verlässliche Zahlenbasis gibt es bislang nicht, weshalb nur Prognosen aufgeführt werden können. Unter Annahme einer mittleren Lebensdauer von 40 Jahren ist laut Fraunhofer IBP von einem Anstieg der anfallenden Abfallmassen EPS von derzeit unter 10 auf über 50 Kilotonnen pro Jahr bis zum Jahr 2050 auszugehen [2].

Das entspräche in etwa der zu erwartenden Jahresproduktionsmenge an EPS für WDVS [1]. Dabei gilt, dass die Masse an anfallenden Baumischabfällen sehr viel höher liegen wird als die genannten Zahlen, da neben dem Dämmstoff EPS noch die Systembestandteile Schlussbeschichtung, Armierung, Unterputz und Klebstoff zu berücksichtigen sind. Ein Massenverhältnis von eins zu zehn ist realistisch [2, S. 63]. Ebenfalls zu beachten ist, dass die Studie des Fraunhofer IBP sich explizit nur auf WDVS mit EPS als Dämmstoff bezieht. Obwohl EPS mit einem Marktanteil von knapp 80 Prozent den am häufigsten verbauten Dämmstoff in WDVS darstellt, ist das Marktpotenzial wiederum höher.

2.3 Stand der Technik: Abbruch und Entsorgung von Wärmedämmverbundsystemen

Der Abbruch von WDVS an Außenfassaden kann aus verschiedenen Notwendigkeiten hervorgehen, z.B. infolge einer Sanierung oder des Gebäudeabbruchs. Die Wirkursache sowie örtliche Gegebenheiten bestimmen das Vorgehen, die Auswahl an mechanischen und manuellen Verfahren ist überschaubar. Problematisch ist der innige Verbund der einzelnen Komponenten, da dieser die Trennung erschwert. Konkrete gesetzliche Vorgaben zu Abbruch und Entsorgung von WDVS sowie Grenzwerte für Verunreinigungen durch Wärmedämmung in mineralischen Substanzen gibt es nicht. Ungeachtet dessen bietet eine saubere Trennung der Bestandteile Vorteile und ist im Sinne des KrWG.

Grundsätzlich sind die Methoden des konventionellen und selektiven Abbruchs zu unterscheiden [4, S. 24]. Die Zwischenstufe bildet der teil-selektive Abbruch [2]. Die Begriffe sind nicht bauteilspezifisch definiert und bedürfen für den Abbruch von WDVS eine Abgrenzung. Der Begriff Abtrag (als Bewertungskriterium dieser Arbeit) wird dabei als ein Bestandteil der Methode des selektiven Abbruchs verwendet.

Durch den Verbund des Dämmstoffs mit der Gebäudeaußenfassade fallen beim **konventionellen Abbruch**¹ stark gemischte Abfälle an. Diese sind in der Entsorgung sehr teuer, oftmals mit Schad- und Störstoffen² verunreinigt und nicht recycelfähig. Eine Alternative stellt der **manuelle selektive Abbruch**³ des WDVS dar. Unter Einsatz handwerklicher Methoden können WDVS zurückgebaut werden. Steht ein Erhalt der Bausubstanz im Vordergrund oder ist der Einsatz von Großgeräten nicht möglich, wird das WDVS händisch mit Stoßeisen, Spaten und Spachteln von der Gebäudefassade gelöst. Eine weitere Trennung der Systembestandteile Unter- und Oberputz inkl. Armierung von der Dämmung ist nicht ausgeschlossen: Durch das Einschneiden des Putzsystems in schmalen Bahnen kann ein Abziehen des Putzes inkl. Armierung ohne größere Anhaftungen von Dämmstoff an der Fassade erreicht werden. Der Dämmstoff wird dann in einem weiteren Arbeitsgang mit einem Spaten oder Spachtel entfernt. Bei Vorhandensein von Dübeln werden diese ebenfalls einzeln manuell entfernt [2, 31]. Insgesamt ist der selektive Abbruch mit hohem Zeitaufwand und Personalkosten verbunden. Eine weitere Option ist der **maschinelle teil-selektive Abbruch**⁴, wobei das WDVS mit dem Löffel eines Baggers oder dem Sortiergreifer abgeschält wird [4]. Diese Vorgehensweise ist im Vergleich zu allen handwerklichen Methoden bedeutend schneller, allerdings verbleiben Reste von Dämmmaterial und weiterer Systembestandteile an der Außenfassade. Diese werden entweder im Nachgang aufwendig von Hand entfernt oder mit entsorgt. Die maschinelle Methode des Abbruchs ist – sollte das Gebäude im Anschluss nicht saniert werden – von den Unternehmen favorisiert und repräsentiert den aktuellen Stand der Technik [32, S. 13]. Ein maschineller selektiver Abbruch hingegen ist derzeit aufgrund fehlender Techniken nicht möglich [32].

¹ Dabei wird die Bausubstanz ohne vorangehende Entrümpelung und Entkernung zerstört. Für den Umgang mit WDVS an einer Gebäudefassade bedeutet dies, dass kein Versuch der Trennung der einzelnen Systembestandteile des WDVS oder aber des WDVS von der mineralischen Außenfassade unternommen wird.

² Bei Schadstoffen handelt es sich um gefährliche Stoffe sowie biologische Arbeitsstoffe, wohingegen Störstoffe dadurch definiert sind, dass durch diese die Verwertung von Abfällen erschwert, behindert oder verhindert wird [4, S. 26].

³ Unter selektivem Abbruch wird der Abbruch mit vorangehender Beräumung, unter Berücksichtigung von Forderungen zum sortenspezifischen Erfassen und Entsorgen des Abbruchmaterials, verstanden. Überträgt man dies auf den Abtrag von WDVS lautet die Definition wie folgt: Beim selektiven Abbruch eines WDVS wird dieses von der Außenfassade abgetragen. Es verbleiben keine Rückstände brennbarer Bestandteile bspw. in Form von geklebtem Dämmmaterial an der Außenfassade, eine Trennung einzelner Systembestandteile ist ebenfalls denkbar aber innerhalb der vorgenommenen Definition nicht notwendig.

⁴ Als teil-selektiv wird der Abbruch eines Gebäudes mit vorhergehender Entrümpelung und Entkernung bezeichnet. Sollten daher beim Abtrag von WDVS Reste an der Außenfassade verbleiben, so wird der Terminus teil-selektiv verwendet.

Praxisbeispiele des teil-selektiven sowie selektiven Abbruchs zeigt Abbildung 2-6. Der konventionelle Abbruch wurde dabei außen vor gelassen, repräsentiert er nicht die vorherrschende Methode auf deutschen Abbruchbaustellen. In Tabelle 2 sind Vor- und Nachteile der einzelnen Abbruchmethoden nochmals gegenübergestellt. Unabhängig von der Abbruchmethode erfolgen die Arbeitsschritte Trennen und Sammeln separat. Dies bedeutet, dass das abgetragene Gut manuell (ggf. mit maschineller Unterstützung) gesammelt wird, was die Ausbreitung von Emissionen in Form von Spänen und Stäuben fördert.

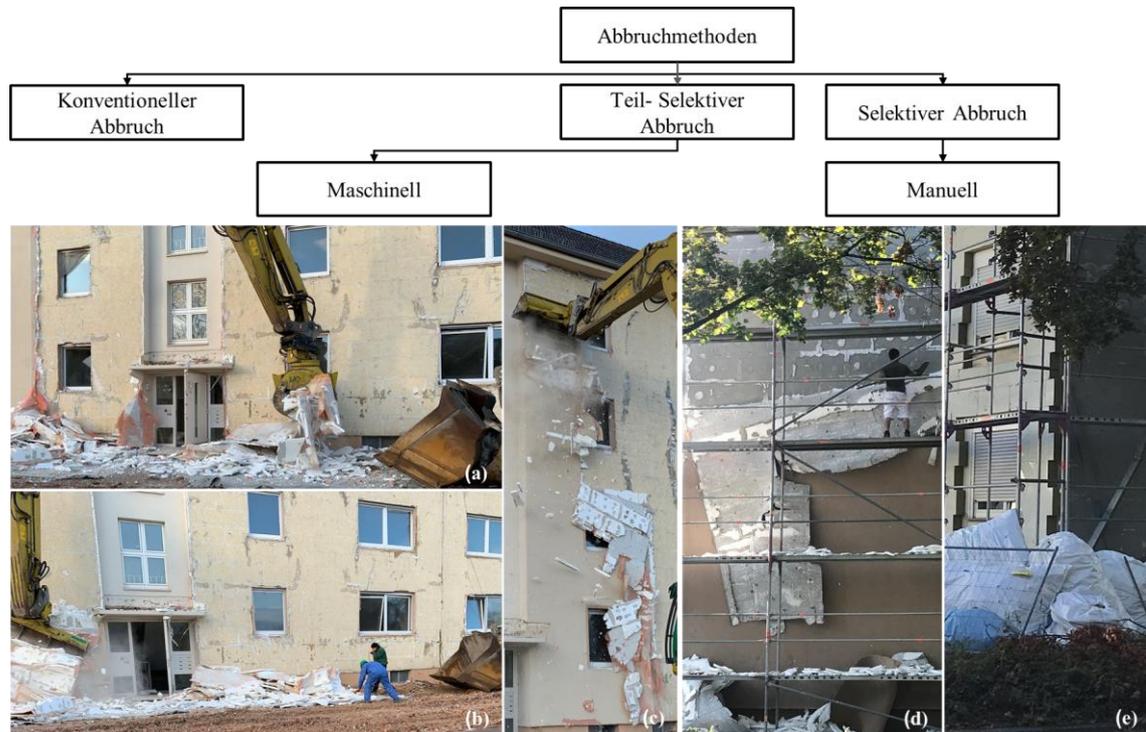


Abbildung 2-6 Stand der Technik: Methoden zum teil-selektiven (a-c) [33] sowie selektiven Abbruch (d,e) von WDVS

Obgleich HBCD, das als Flammschutzmittel in EPS Anwendung fand, mittlerweile als besonders besorgniserregend einzustufen ist, sind beim Abbruch oder der Entsorgung keine Sicherheits- oder Personenschutzmaßnahmen erforderlich [34]. Emissionen sind dennoch zu vermeiden. Beim Umgang mit alten Mineralwollen hingegen muss die Freisetzung von Faserstäuben soweit verringert werden, wie dies technisch möglich ist [35]. Ausgebaute Wolle muss sofort in reißfeste und staubdichte Säcke oder verschließbare Container verpackt werden [36].

Unabhängig von der gewählten Methode des Abbruchs erfolgt im Anschluss – nach der Zerkleinerung – eine thermische Verwertung des rückgebauten Gemischs aus Kleber, EPS-Dämmstoff sowie Unter- und Oberputz inkl. Armierung als Abfall in Müllverbrennungsanlagen. Nur so kann das Zerstörungsgebot für POPs umgesetzt und das HBCD zerstört werden [2]. Da die Dämmstoffplatten aufgrund ihres hohen Heizwertes jedoch nicht als Monofraktion in Müllverbrennungsanlagen verbrannt werden können, ist eine vorherige Mischung mit anderen Abfällen erforderlich [3]. Durch die Verbrennung in kommunalen Müllverbrennungsanlagen lassen sich kurze Transportwege von der Abbruch- zur Verwertungsstelle realisieren. Zudem sind die Anforderungen an die Sauberkeit und den Feststoffanteil der Abfälle relativ gering. Für Mineralwolle hingegen besteht die Möglichkeit der thermischen Verwertung nicht. Reste von neuer Mineralwolle bzw. Steinwolle können recycelt werden. Bei alter Mineralwolle hingegen erfolgt eine Deponierung als gefährlicher Abfall [21].

Tabelle 2 Vor- und Nachteile der Abbruchmethoden von WDVS

	Vorteile	Nachteile
Konventioneller Abbruch	<ul style="list-style-type: none"> – Schneller Arbeitsfortschritt – Geringer Arbeits- und Personalaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> – Vermischung einzelner Abfallfraktionen, die ggf. Schad- und Störstoffe enthalten – Trennung und Aufbereitung der Fraktionen im Nachgang erforderlich – Sehr hohe Entsorgungskosten – Arbeitsschritte Trennen und Sammeln separat, Emissionen in die Umwelt möglich
Teil-Selektiver Abbruch (maschinell)	<ul style="list-style-type: none"> – Einzelne Fraktionen werden auf der Baustelle vorselektiert – Geringere Personalkosten als beim selektiven Rückbau – Geringere Entsorgungskosten als beim konventionellen Abbruch 	<ul style="list-style-type: none"> – Brennbare Bestandteile verbleiben an der Außenfassade – Geringfügig langsamerer Arbeitsfortschritt als beim konventionellen Rückbau – Arbeitsschritte Trennen und Sammeln separat, Emissionen in die Umwelt möglich
Selektiver Abbruch (manuell)	<ul style="list-style-type: none"> – Einzelne Fraktionen werden auf der Baustelle vorselektiert – Geringere Entsorgungskosten als beim teil-selektiven und konventionellen Abbruch 	<ul style="list-style-type: none"> – Deutlich langsamerer Arbeitsfortschritt als beim konventionellen oder teil-selektiven Rückbau – Evtl. mehrere Arbeitsschritte notwendig – Vorarbeit erforderlich, z.B. Aufstellen eines Gerüsts – Hohe Personalkosten, mehr Personal notwendig – Arbeitsschritte Trennen und Sammeln separat, Emissionen in die Umwelt möglich

2.4 Stand der Forschung: Abbruch und Entsorgung von Wärmedämmverbundsystemen

Aufgrund der Tatsache, dass über 60 Prozent des derzeitigen Gebäudebestands vor 1979 erbaut wurde (vgl. Anhang B), ist mit einer zunehmenden Anzahl an Abbruchprojekten in den nächsten Jahren zu rechnen. Diesbezüglich steigt das Interesse an einem nachhaltigen Umgang der verbauten Ressourcen.

Das Fraunhofer IBP zeigt in einer Studie [2] im Auftrag des Fachverbands Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. die Vor- und Nachteile einzelner Varianten des selektiven Rückbaus auf, die den aktuellen Stand der Technik repräsentieren. Betrachtet werden manuelles und maschinelles Abschälen, thermisches Entschichten sowie das Abfräsen. Der Fokus liegt auf dem Nachweis der möglichen Trennung einzelner Systembestandteile des WDVS. Neuartige Systementwicklungen werden nicht vorgestellt, ebenso wenig wird eine Handlungsempfehlung für den Rückbau ausgesprochen. Stattdessen wird im Sinne der Abfallvermeidung eine Aufdopplung bestehender Systeme als Methode mit dem geringsten Abfallaufkommen empfohlen, um die Nutzungs- bzw. Lebensdauer von insgesamt 40 bis 120 Jahre zu verlängern. Im Falle einer Aufdopplung wird auf ein bestehendes WDVS ein weiteres komplettes System aufgebracht. Der Rückbau wird damit allerdings lediglich in die Zukunft verschoben. Die Entwicklung rückbaufreundlicher Befestigungssysteme sowie fortgeschrittener Techniken, Maschinen und Werkzeuge für den selektiven Rückbau wird hingegen angeregt. Weitere Informationen zum Thema Nachdämmung mittels „Aufdopplung“ alter WDVS können einem Bericht des Fraunhofer IFAM [25] entnommen werden.



Abbildung 2-7 Fräse Biber [1]

Die Studie [2] des Fraunhofer IBP ist dabei nicht die erste, welche sich mit dem Abfräsen von Putzschichten beschäftigt. Zu nennen ist ebenfalls eine deutlich ältere Erfindung der Berliner Firma GPS (Groh, Prischmann & Schulz GmbH & Co. Kg), die sogenannte „Fassadenfräse Biber“. Im Vergleich zu den Versuchen des Fraunhofer IBP [2] mit einem handelsüblichen manuellen Gerät stand eine maschinelle Neuentwicklung im Vordergrund. Die Abbildung 2-1 zeigt ein Bild der Fräse aus dem Jahr 1998, welche zur Bearbeitung außenseitiger Putzschichten ausgelegt wurde. Die aktuellsten Angaben zu dieser Entwicklung sind dem Bericht [2, S. 54] aus dem Jahr 2014 zu entnehmen. Demnach war nach Aussagen von Mitarbeitern der Firma Austrotherm und BauMit ein vollständiger Abtrag von Putzen mit dem System nicht möglich, ein manuelles Nacharbeiten somit erforderlich. Huber [37, S. 27] hingegen spricht 2013 von einem Versuch zum Rückbau verklebter WDVS, wobei das WDVS mit Dämmstoffdicken bis fünf Zentimetern abgetrennt und beinahe vollständig von der Bausubstanz entfernt werden konnte. Für größere Dämmstoffstärken müsste eine Modifizierung durchgeführt werden (vgl. Morgenbesser [38]). Im Rahmen der Initiative „Abfallvermeidung in Wien“ wurde 2003 vom Einsatz des Systems in einer Pilotanlage berichtet, wobei ein „langsameres Entfernen des Putzes an der Fassade bis auf das Mauerwerk mittels einer hydraulisch-mechanischen Fräse“ möglich war, wenngleich das System nur bei großflächigen Sanierungen ab 300 Quadratmetern wirtschaftlich ist [39, S. 18]. Für das Abfräsen von 330 Quadratmetern WDVS benötigte die Fassadenfräse inklusive Baustellen Ein- und Abrüstung drei Tage [40]. Nach Aussagen des Fraunhofer IBP [2] hat sich das System auf dem Markt nicht durchgesetzt.

Im Kontext Entsorgung umfasst der Stand der Forschung weitere Methoden zur Verwertung von WDVS. Zu nennen ist dabei das CreaSolv®-Verfahren zur „selektiven Extraktion“. Dabei wird der Polystyrol-Dämmstoff mit Hilfe organischer Lösungsmittel rohstofflich verwertet und enthaltene Flammschutzmittel wie möglicherweise HBCD separiert. Allerdings dürfen Störstoffe nur in geringem Maße vorhanden sein [41, S. 454]. Nach Graubner und Clanget-Hulin [31] verbleiben aber selbst beim manuellen selektiven Abbruch redundante Anhaftungen von Unter- und Oberputz inkl. Armierung auf dem Dämmstoff und Methoden zur nachträglichen Reinigung fehlen [31, S. 73]. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist bislang auch aufgrund zu geringen Abfallaufkommens nicht möglich [1, S. 18]. Neben der stofflichen Verwertung werden ebenso alternative Methoden der energetischen Verwertung erforscht. Dabei können brennbare Reststoffe oder Abfälle zur Energieerzeugung genutzt werden, wobei nach KrWG entscheidend ist, dass durch die Verbrennung mehr Energie zurückgewonnen als verbraucht wird [2]. Die Studienergebnisse zum Thema „energetische Verwertung“ gehen auf einen Großversuch der Verbände PlasticsEurope und EXIBA zur Verbrennung von Polystyrolschaum (EPS und XPS) gemeinsam mit festem Restmüll zurück. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die in den Dämmstoffen enthaltene Energie zurückgewonnen und das enthaltene Flammschutzmittel zerstört werden kann [42]. Eine stoffliche Verwertung der Abfallmassen wird derzeit von der FH Münster untersucht. Das Projekt „RESSOURCE.WDVS – Ressourceneffiziente Nutzung von qualitätsgesichertem Sekundär-EPS sowie der mineralischen Fraktionen aus WDVS“ hat u.a. eine effiziente mechanische Aufbereitungstechnik zur Trennung der Systembestandteile des WDVS zum Ziel [43]. Die grundsätzliche Eignung unterschiedlicher Aufbereitungstechniken konnte in Versuchen gezeigt werden [44]. Dennoch wird für alle benannten Möglichkeiten der Verwertung der Abtrag des WDVS von der Gebäudeaußenfassade vorausgesetzt.

2.5 Abgrenzung der vorliegenden Arbeit

Der Stand der Technik hat den Bedarf nach einer maschinellen selektiven Abbruchmethode aufgezeigt. Im Rahmen dieser Arbeit werden dazu erstmals Bürstenwerkzeuge für den Abtrag von WDVS wissenschaftlich untersucht. Diese sind aufgrund ihrer Flexibilität gegenüber anderen Werkzeugen besonders geeigneten, die mineralische Außenfassade von Schad- und Störstoffen zu befreien, ohne diese ebenfalls abzutragen. Als ein möglicher Einsatzort des Bürstenwerkzeuges dient ein Baggeranbaugerät (vgl. Abbildung 2-8), welches parallel zu dieser Arbeit innerhalb eines ZIM Kooperationsprojektes entwickelt wurde. Eine detaillierte Beschreibung dessen liefert Abschnitt 4.1.2.

Der Abtragsprozess gestaltet sich dabei wie folgt: Das Baggeranbaugerät wird durch den Baggerfahrer entlang der mit WDVS versehenen Gebäudeaußenfassade von unten nach oben geführt, wobei die Bestandteile Unter- und Oberputz inkl. Armierung und ein Teil des Wärmedämmstoffs über ein Fräswerkzeug gespant und abgesaugt werden. Der Arbeitsfortschritt ähnelt dabei dem Abschälen mit dem Baggerlöffel oder Sortiergreifer (vgl. Abschnitt 2.3). Die an der Außenfassade verbleibenden Systembestandteile in Form von geklebtem Dämmmaterial werden daraufhin von einem nachgelagerten Bürstenwerkzeug abgetragen und ebenfalls abgefördert. Dies geschieht emissionsarm und in einem Arbeitsgang.

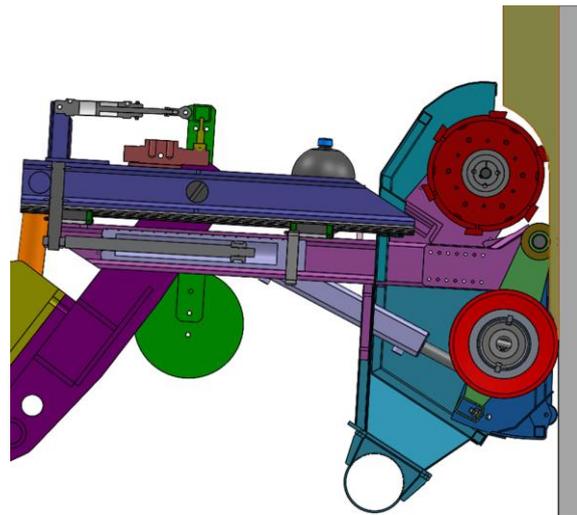


Abbildung 2-8 Darstellung des Baggeranbaugeräts [47]

Die Entwicklung des Baggeranbaugeräts selbst sowie die Untersuchung des vorgelagerten Fräswerkzeugs sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Vielmehr soll auf Basis wissenschaftlicher Untersuchungen eine Empfehlung für ein Bürstenwerkzeug inkl. optimaler Maschinenparameter ausgesprochen werden, welche die kontinuierliche Bearbeitung eines Standard WDVS-Aufbaus ermöglicht.

Die Untersuchung zum Abbruch von WDVS mit Bürstenwerkzeugen steht dabei nicht in Konkurrenz derzeitiger Forschungsentwicklungen. Bisher verfolgt keine der wissenschaftlichen Vorhaben das Ziel einer Trennung des WDVS an der Außenfassade. Es findet keine tiefgehende Werkzeuguntersuchung oder Neuentwicklung statt. Vielmehr bieten sich Zusammenschlüsse der Forschungsansätze an. So könnte beispielsweise ein maschineller selektiver Abbruch an der Gebäudefassade als Grundlage für die störstoffarme Beschickung der CreaSolv®-Anlage dienen.

Eine stoffliche Verwertung des abgetragenen WDVS, anstelle einer thermischen oder energetischen Verwertung, existiert aktuell nicht in einem kommerziell nutzbaren Rahmen. Dennoch haben steigende Anforderungen an die Qualität des Abfalls Auswirkungen auf den Abbruch und den dort angewandten Verfahren. Emissionsarme Verfahren mit hoher Trennschärfe sind deshalb erstrebenswert. Für den innerhalb dieser Arbeit untersuchten Abtrag von WDVS liegt der Schwerpunkt folglich nicht bei einer Trennung aller einzelnen Systembestandteile. Vielmehr wird der Abtrag brennbarer Bestandteile von der nicht brennbaren mineralischen Gebäudeaußenfassade fokussiert.

Bevor eine Beschreibung der experimentellen Untersuchungsmethode in Kapitel 4 erfolgen kann, gilt es nachfolgend in Kapitel 3 eine Klassifikation von Bürstenwerkzeugen vorzunehmen sowie deren Wirkungsweisen zu erläutern.

3 Klassifikation und Wirkungsweise von Bürstenwerkzeugen

Das Liefersortiment von Bürstenherstellern zeigt eine große Bandbreite möglicher Werkzeuge. Es sind unterschiedliche Arten, Formen und Größen aufzufinden, in vielen Fällen handelt es sich um Sonderanfertigungen. Nachfolgend werden die – für den Abtrag von WDVS – denkbaren Werkzeugausführungen benannt und beschrieben. Die Erfahrungen der in leitfadengestützten Experteninterviews befragten Bürstenhersteller und -anbieter fließt mit ein. Abschließend gilt es die mechanischen Zusammenhänge bei der Werkstückbearbeitung mit Bürstenwerkzeugen vorzustellen.

3.1 Klassifizierung von Bürstenwerkzeugen

Der Einsatz von Bürstenwerkzeugen bzw. kraftbetriebenen Bürsten wird im Normwesen zwar behandelt, jedoch wird keine Unterscheidung hinsichtlich Ausführung und Anwendung gemacht. Ebenso stellen WDVS an Gebädefassaden ein bisher nicht benanntes Werkstück dar, weshalb vorab Begrifflichkeiten festgelegt werden müssen.

In Anlehnung an DIN 1083 Teil 1 (Juli 1997) [45] sowie Bock [46] kann der Aufbau einer Rundbürste wie folgt definiert werden: Unter **Bürste** wird eine Einheit aus Bürstenkörper inkl. Innenrohr sowie Besatz verstanden. Der **Bürstenkörper** aus Metall, Holz oder Kunststoff hält mittels Befestigung den Besatz zusammen, wobei das Innenrohr als Aufnahmeeinheit des Antriebs dient. Als **Besatz** – auch Besteckung genannt – werden sowohl die einzelnen als auch die Gesamtheit der auf dem Bürstenkörper einer Bürste herausragenden Drähte, Fäden, Haare, Borsten oder Fasern aus unterschiedlichsten Materialien bezeichnet. Der Besatz bildet den Arbeitsteil der Bürste. Als **Besatzmaterialien** können nach DIN 68 346 (Januar 1980) Metalle, Synthetische Fasern, Pflanzenfasern, Tierhaare und -borsten oder auch eine Mischung der genannten Werkstoffe zum Einsatz kommen [47]. Da für die vorliegende Arbeit Metalle und Kunststoffe als Besatzmaterialien untersucht werden, wird zur Beschreibung der Wirkungsweise sowie der Abnutzung eines einzelnen Besatzes die Bezeichnung **Einzeldraht** verwendet.

Die freie **Besatzlänge** l_B , auch Schnittlänge genannt, bezeichnet den Arbeitsteil der Bürste, vom Umfang des Bürstenkörpers bis zur Spitze [Experte 3.1.7.13, Experte 2.2.2.4]. Dem gegenüber steht der **Durchmesser des Besatzes**, oftmals als Besatzstärke oder Besatzdicke bezeichnet. Die **Arbeitsbreite** b_A charakterisiert die mit Besatz versehene Breite der Bürstenoberfläche. Innerhalb der experimentellen Versuchsdurchführung entspricht die Arbeitsbreite etwa der Breite des Werkzeugeingriffs senkrecht zum Werkstück [48, S. 281]. Die **Besatzdichte** – in der Literatur auch oftmals als Packungsdichte bezeichnet – kennzeichnet das Verhältnis zwischen der Anzahl der Einzelspitzen bzw. Besatzenden je Oberflächeneinheit. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird die Anzahl der Einzelspitzen pro Quadratzentimeter benannt. Befinden sich alle Einzeldrähte im Eingriff und wird ein seitliches Ausbrechen unterbunden, so ist die Besatzdichte ebenfalls ein Indiz für die Besatzquerschnittsflächen der auf einer definierten Arbeitsfläche wirkenden Einzelspitzen [49, S. 16].

Die benannten Begrifflichkeiten werden in Abbildung 3-1 veranschaulicht. Diese stehen teilweise im Widerspruch zur DIN 8589-8 (September 2003) sowie DIN 68 346 (Januar 1980). DIN 8589-8 benennt bspw. den einzelnen Besatz als Drahtstift [50], wohingegen DIN 68 346 die Gesamtheit der Drähte, Borsten usw. als Besteckung bezeichnet [47].

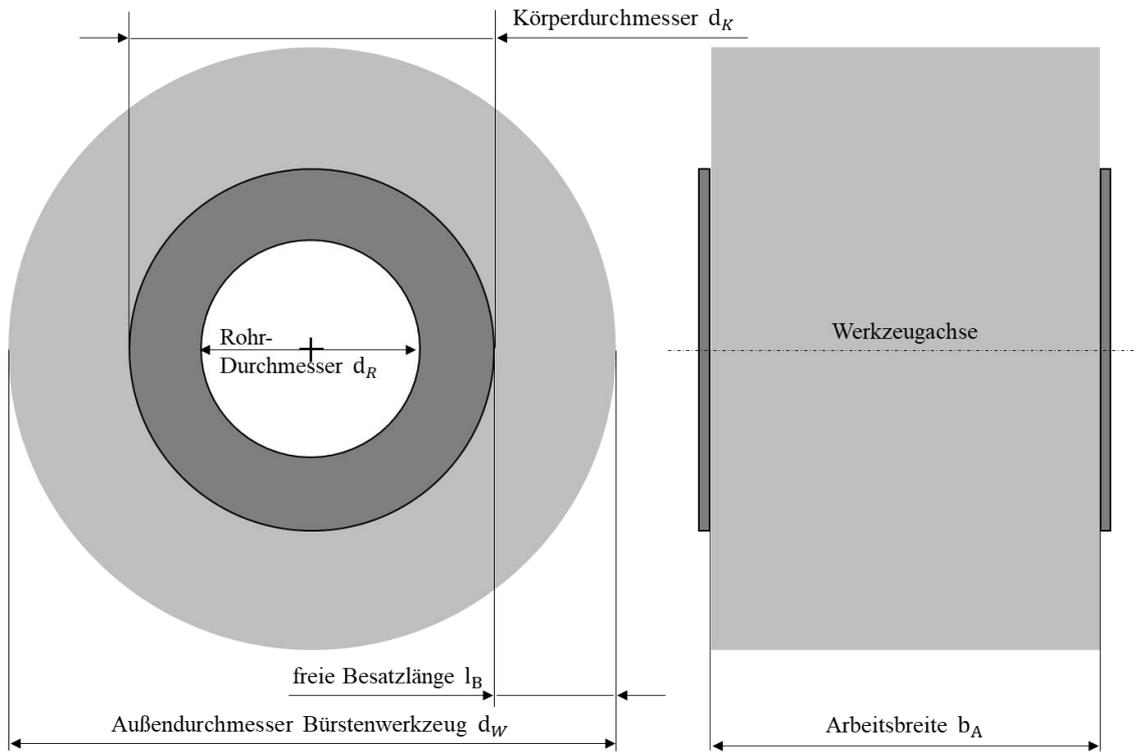


Abbildung 3-1 Aufbau einer Rundbürste, Skizze vgl. [51] [45]

3.1.1 Ausführungsmöglichkeiten und Einsatz von Bürsten

Ausgehend von der geplanten Praxisanwendung der Bürstenwerkzeuge in einem Baggeranbaugerät werden für den Abtrag von WDVS Rund- bzw. Scheibenbürsten sowie Walzenbürsten¹ mit radialer Besatzanordnung betrachtet, wobei Rundbürste als Überbegriff verwendet wird. Der Einsatz von Bürstenwerkzeugen ist dabei eine weit verbreitete Technik in der Oberflächenbearbeitung. Zu den Anwendungsbereichen, bei welchen aufgrund der Werkzeug- oder Werkstoffausführung Parallelen zum Abtrag von WDVS zu erwarten sind, zählen: Entgraten, Abtragen, Reinigen sowie Strukturieren als Bestandteil der Oberflächentechnik.

Die Krafteinbringung einer Rundbürste auf das Werkstück bei der Anwendung wird maßgeblich von der Ausführung bestimmt. Allein das Unternehmen KULLEN-KOTI GmbH hat 141.000 unterschiedliche Bürsten im Sortiment [53, S. 18]. Die enorme Diversität der Möglichkeiten einer Werkzeugausführung veranschaulicht Abbildung 3-2. Diese Merkmale ermöglichen eine Klassifikation von Bürstenwerkzeugen aus denen die Einteilung der nächsten Abschnitte hervorgeht. Dabei findet eine Eingrenzung der Werkzeugausführungen für die experimentellen Untersuchungen statt, welche dann in Abschnitt 4.1.1.2 beschrieben werden.

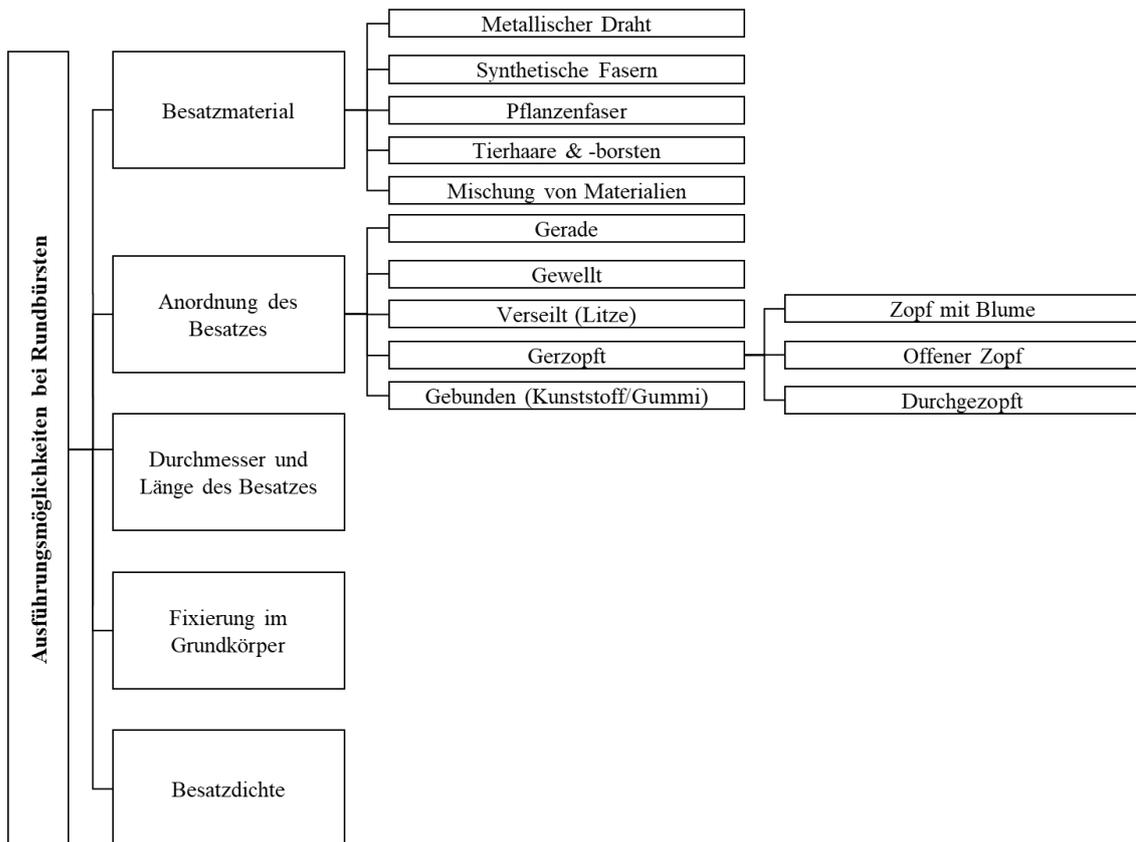


Abbildung 3-2 Kombinationsmöglichkeiten der Ausführung von Rundbürsten, in Anlehnung an DIN 68 346 (Januar 1980) sowie [52, S. 17–21], [54, 5-4] und [55, S. 67]

¹ Rund- und Walzenbürsten unterscheiden sich durch das Verhältnis von Werkzeugdurchmesser zu -breite [46, S. 41]. Eine Walzenbürste kann durch Kombination mehrerer Rundbürsten zusammengestellt werden, eine konkrete Abgrenzung zwischen den Bürstentypen ist nicht definiert. In der Literatur wird eine Rundbürste auch oftmals als Scheibenbürste bezeichnet [52, S. 18].

3.1.1.1 Besatzmaterial

Hauptunterscheidungsmerkmal bildet das Besatzmaterial, oftmals auch als Besatzwerkstoff bezeichnet, sowie die Anordnung des Besatzes. Die Wahl des Besatzmaterials ist von dem zu bearbeitenden Werkstoff sowie dem gewünschten Ergebnis abhängig. Nach DIN 68 346 (Januar 1980) [47] können dabei Metalle, Synthetische Fasern, Pflanzenfasern, Tierhaare und -borsten oder auch eine Mischung der genannten Materialien zum Einsatz kommen. Besatz, der gegen Korrosion geschützt sein muss, ist aus vermessingtem oder rostfreiem Stahldraht hergestellt [56, S. 167]. Innerhalb dieser Arbeit werden – in leitfadengestützten Experteninterviews mit Bürstenherstellern konkretisiert – die Besatzmaterialien „Metallischer Draht“ und „Synthetische Fasern“ genauer untersucht. Denn nur von diesen ist die für den Abtrag von WDVS notwendige Steifigkeit zu erwarten.

3.1.1.2 Anordnung des Besatzes

Als weiteres Merkmal für die Wirkungsweise sowie den Verschleiß eines Bürstenwerkzeugs ist die Anordnung des Besatzes, auch Versteifungsart genannt, entscheidend. Gemäß DIN 1083-1 sowie in Anlehnung an Przyklenk [52] ist grundsätzlich zu differenzieren, ob das Besatzmaterial gerade, gewellt, verseilt, verzopft oder gebunden ist. In der genannten Reihenfolge (vgl. Abbildung 3-3) nimmt die Steifigkeit des Werkzeugs zu.

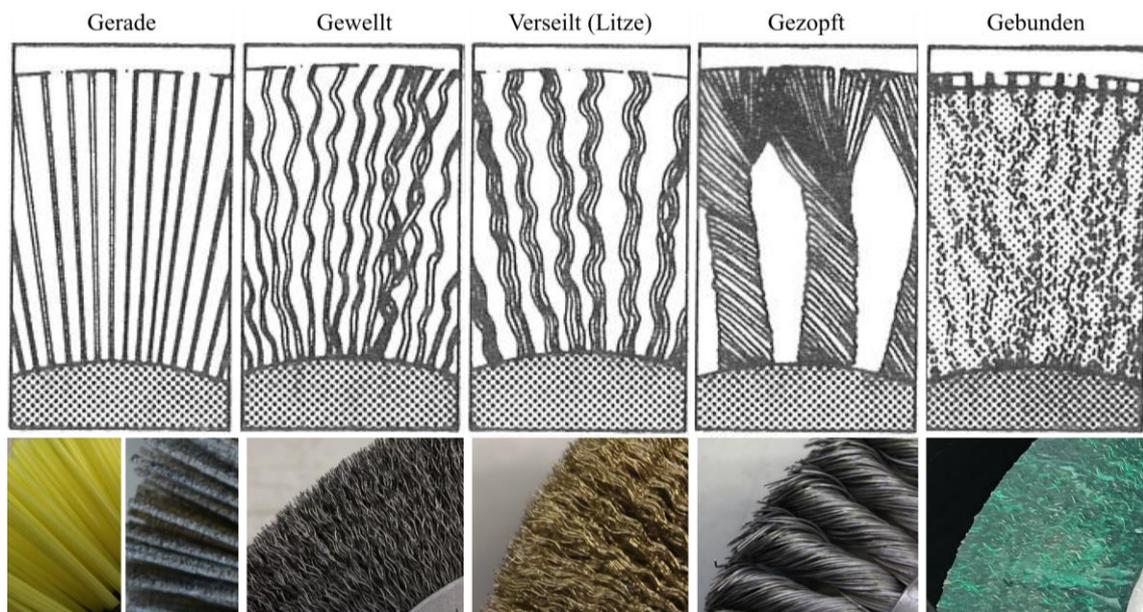


Abbildung 3-3 Klassische Besatzanordnungen von Rundbürsten, Skizzen aus [52, S. 32]

Eine Ausnahme bildet dabei das gerade Besatzmaterial mit Schleifmittel, wobei synthetische Fasern als Trägermaterial dienen und mit einem Schleifkorn durchsetzt sind. Die Bearbeitung erfolgt dabei primär durch die in die Filamente eingebetteten Schleifkörner [57, S. 472]. Infolgedessen kann die Bürste nicht nur mit den Spitzen sondern rein theoretisch auch mit den Seitenflächen arbeiten [56, S. 168]. Neben der Wahl der Kunststoffmatrix spielen dort in erster Linie ebenfalls die Kornladung, die den Massenanteil der Körnung angibt, sowie die Körnung selbst (Größe und Werkstoff) eine entscheidende Rolle.

Unter **geradem** Besatzmaterial sind überwiegend metallische Drähte oder synthetische Fasern zu verstehen, welche vor der Verwendung an der Bürste nicht gewellt werden. Im Gegensatz dazu werden **gewellte** Materialien in einem Räderwerk oder einer anderen Kräusel-Vorrichtung in eine sinusähnliche Form

gebracht. Dadurch wird bei der Werkstückbearbeitung eine Federwirkung erzeugt, die ein Umlegen des Besatzes aufgrund plastischer Verformung verzögert und die Standzeit erhöht [Experte 3.2.2.5]. Je größer die Wellung des Besatzes, desto weniger Material kann in einer Bürste untergebracht werden. Bei **Litzendraht**, auch Multicord genannt, handelt es sich um eine Seilkonstruktion aus 3 bis 7 Einzeldrähten, wobei unterschiedliche Durchmesser möglich sind. Der verseilte Draht ist kompakt und biegesteif mit vielen Einzelspitzen [Experte 2.2.3.15, Experte 1.2.2.3].

Bei **verzopften** Anordnungen werden einzelne Drähte zu einem Zopf verdreht. Dadurch wird der Besatz zusätzlich versteift. Im Falle einer Belastung wird ein Ausweichen verringert [Experte 2.2.6.12]. Dabei sind sowohl links- als auch rechtsgedrehte Zopfungen sowie eine Mischform beider Drehrichtungen innerhalb einer Bürste möglich. Je nach Krafteinwirkung ist dies für ein Öffnen bzw. Aufdrehen oder Schließen des Zopfes durch die Anwendung entscheidend. Dies wiederum bestimmt den Wirkungsgrad des Werkzeugs. Je geschlossener die Zopfform desto größer ist der Effekt [46, S. 41]. Bei Rundbürsten ergeben sich – bedingt durch die Krafteinwirkung orthogonal der Besatzlänge – allerdings keine Vorteile einer Drehrichtung. Es findet jeweils ein Öffnen und Schließen des Zopfes statt. Weitere Variationsmöglichkeiten resultieren aus der Ausführung des Zopfes. Es werden offene und geschlossene Verzopfungen unterschieden [58, S. 99]. Die Firma Lessmann GmbH differenziert dabei zwischen einem Zopf mit Blume, einem offenen Zopf und einer durchgezopften Form (vgl. Abbildung 3-4). Neben Unterschieden in den Herstellungskosten beeinflussen diese Zopfformen die Oberflächengüte. Ein Zopf mit Blume – auch Röschenzopf oder Rosenzopf genannt – weist eine großflächige offene Struktur auf, welche gut in weiches Material eingreifen kann. Der Draht geht an den Spitzen flächig in die Breite. Dies wiederum hat eine schlechtere Krafteinwirkung zur Folge [Experte 2.2.3.7]. Die Zopfart kann ebenfalls als Abstandshalter zwischen den Lochscheiben dienen, verhältnismäßig wenig Zöpfe können eine große Oberfläche abdecken. Der klassische offene Zopf wird nicht so stark verdreht. Im Vergleich zum Zopf mit Blume sind die Drahtspitzen bei der Bearbeitung im Einsatz und können sich leicht öffnen. Durchgezopfte bzw. ausgezopfte Formen werden beispielsweise für die Fugbearbeitung verwendet. Es wird eine steife Zopfung innerhalb enger Bereiche benötigt. Die Standzeit dieser Zopf Ausführung ist im Vergleich vorangegangener Ausführungen geringer [Experte 2.2.3.7]. Alle genannten Zopfformen werden innerhalb der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit getestet.

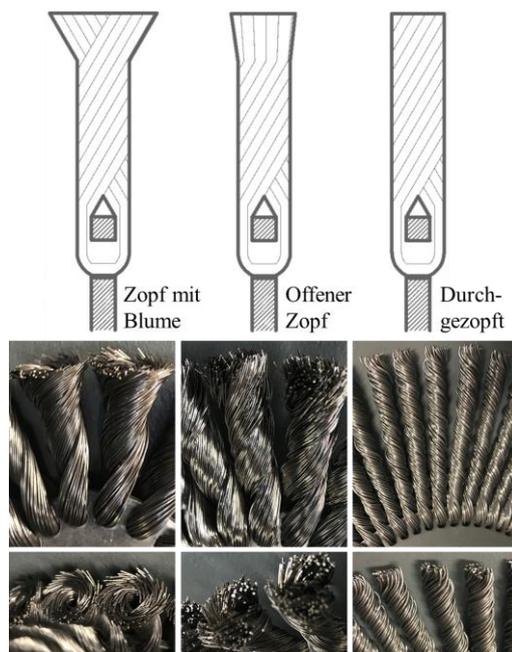


Abbildung 3-4 Zopfarten (Skizzen und Bilder), Skizzen aus dem Produktkatalog der Firma Lessmann GmbH 2018 [59, S. 11]

Bürsten mit in Kunststoff **gebundenem** Besatz, wobei dieser vollständig von Kunststoff umschlossen ist, bilden eine Mischform aus Bürste und Schleifscheibe. Der stets kurze Besatz beschreibt die Besonderheit dieser Anordnung, wobei jede Drahtspitze an der Bearbeitungsfläche durch die Füllmasse stabilisiert wird. Im Zuge dessen hat der Einzeldraht an seiner Arbeitsfläche eine geringe Flexibilität und dadurch wiederum eine hohe Schneidwirkung [60]. Der Einzeldraht kann bei der Bearbeitung nicht ausweichen und arbeitet folglich mit der Spitze. Dabei gehen alle bürstentypischen Eigenschaften wie die Flexibilität und Nachgiebigkeit bzw. Anpassungsfähigkeit der Bürste an die Oberfläche weitgehend verloren [51, S. 24], weshalb diese Anordnung für die experimentelle Versuchsdurchführung missachtet wird.

3.1.1.3 Durchmesser und Länge des Besatzes

Die Biegesteifigkeit des Besatzes wird neben der Anordnung und dem Material wesentlich von dessen Länge und Durchmesser bestimmt. Physikalisch gesehen kann ein einzelner am Bürstenkörper fixierter Draht als fest eingespannter Balken mit freiem Ende angesehen werden, der beim Kontakt mit dem Werkstück eine Durchbiegung erfährt [61]. Je dicker und kürzer der Besatz, desto steifer wirkt dieser, desto geringer ist die Durchbiegung, desto größer ist die Zerspanungsleistung und desto schlechter ist die Oberflächengüte [52, S. 56–58]. Da die Anzahl der Schneiden am Umfang des Werkzeugs mit größer werdendem Durchmesser des Besatzes geringer wird, muss nach Schweer und Koch [62] eine geringere Lebensdauer erwartet werden. Begrenzt wird die freie Besatzlänge durch den gewünschten Außendurchmesser bezogen auf den notwendigen Körperdurchmesser, der wiederum vom Grundkörper und der Antriebseinheit abhängt. Der Besatzdurchmesser hingegen wird maßgeblich von dem zu bearbeitenden Material und vom Einsatzzweck bestimmt. Bei empfindlichen Werkstücken gilt es ein dünnes Besatzmaterial zu wählen [63].

Lediglich bei Besatzmaterial mit Schleifkorn kommt eine weitere Facette hinzu: Eine Erhöhung der Kornladung steigert die Anzahl der Schneiden im Werkzeug, gleichzeitig wird aber auch die Biegesteifigkeit herabgesetzt [51, S. 59]. Neben einer Verringerung der Biegesteifigkeit kommt es bei hohen Kornladungen ebenfalls zu einer Begünstigung der Faserverkürzung aufgrund schlechterer Korneinbindungen [51, S. 88], wobei neben der Kornladung die Körnung selbst ebenfalls das Ergebnis beeinträchtigt. Für empfindliche Werkstückoberflächen ist folglich ein feines Korn zu wählen [63]. Ebenso beeinflusst die Kunststoffmatrix die Korneinbindung und somit die Biegesteifigkeit [51, S. 60].

Für die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit wird der Außendurchmesser der Bürstenwerkzeuge sowie der Rohrdurchmesser durch die geplante Praxisanwendung im Baggeranbaugerät vorgegeben. Einer Variation der freien Besatzlänge sind demnach Grenzen gesetzt, wohingegen der Durchmesser des Besatzes nur den fertigungstechnischen Möglichkeiten der Bürstenhersteller unterliegt.

3.1.1.4 Fixierung im Grundkörper

Das Prinzip der Fixierung des Besatzes im Werkzeuggrundkörper ist nicht bei allen Rundbürsten identisch. Grundsätzlich lassen sich fertigungstechnisch die Befestigungsprinzipien Gießen und Stopfen sowie das Einbinden in Spiralen, Kreisringe und Lochscheiben unterscheiden. Abbildung 3-5 sind exemplarische Aufnahmen der in dieser Arbeit untersuchten Fertigungstechniken zu entnehmen.

Gießen beinhaltet das Umspritzen des Besatzmaterials mit Kunststoff bzw. das Eingießen eines Endes in eine flüssige Formmasse aus Kunststoff, die nach dem Aushärten den Bürstenkörper bildet. Ein Vorteil besteht darin, dass sich die Arbeitsbreite genau definieren lässt. Gegossene Anordnungen haben sich allerdings bei rotierenden Werkzeugbürsten bislang nicht durchgesetzt [51, S. 35].

Beim sogenannten **Stopfen**, umgangssprachlich auch als Stanzen bezeichnet, wird das Besatzmaterial aus überwiegend synthetischen Fasern und metallischen Drähten als Bündel in ein Bohrloch des Grundkörpers eingebracht und mit einem Ring, Anker oder einer gebogenen Klammer fixiert. Ein Vorteil gestopfter und

gegossener Bürsten bildet die Möglichkeit der flexiblen Anordnung des Besatzmaterials. Ebenso sind Schrägstellungen des Besatzes – auch Schränkung oder Spielstellung genannt – möglich. Anwendung findet eine Schrägstellung quer der Rotationsebene beispielsweise bei Straßenkehrmaschinen, um die Kehrbreite zu erhöhen. Eine Schrägstellung längs der Rotationsebene führt zu einer höheren Steifigkeit des Werkzeugs, aber auch zu größeren Verschleißerscheinungen [Experte 3.1.7.13]. Inwieweit sich dadurch Vorteile für den Abtrag von WDVS ergeben können, wird innerhalb dieser Arbeit analysiert, indem ein Bürstenwerkzeug mit einer Schrägstellung des Besatzes längs der Rotationsebene experimentell untersucht wird. Der Besatz erfährt im Zuge dessen weniger eine Beanspruchung auf Zug beim Kontakt mit dem Werkstück, sondern wird vielmehr auf Druck belastet [Experte 3.1.7.13]. Gestopfte Bürsten finden überwiegend in belastungsarmen Bereichen Anwendung, beispielsweise für Reinigungs- und Transportaufgaben. Ein Ausfallen des Besatzes tritt verglichen mit anderen Fertigungsarten bereits bei geringeren Drehzahlen und daraus resultierenden Zentrifugalkräften auf [Experte 1.2.8.14].

Spiralbürsten können theoretisch in endloser Länge hergestellt werden. Die Fertigungsmaschine bestimmt die aufwickelbare Länge. Dabei wird der Besatz durch einen Kerndraht in einem Metallband festgeklemmt und dieses dann zusammengedrückt. Der Kerndraht sichert den Halt des Besatzes [Experte 2.2.3.15]. Das mit Besatz versehene Band wird dann um ein Innenrohr gewickelt und verschweißt. Spiralwalzenbürsten sind in beliebiger Länge mit verschiedenen Bandbreiten erhältlich. Diese einfache Art der Fertigung macht das „Endlosband“ zum schnellsten und günstigsten Befestigungsprinzip [Experte 1.2.8.14, Experte 2.1.4.8]. Des Weiteren sind durch eine enge Wicklung und/oder kleine Radien große Besatzdichten möglich [Experte 2.2.6.12].

Bei den Rundbürsten aus mehreren **Kreisringen** werden, nachdem der Besatz um den Außenring gebogen und in den Innenring eingepasst worden ist, in der Seitenbefestigung die beiden Deckscheiben sowie die Distanzscheiben durch Punktschweißen gefügt. Durch die beim Punktschweißen notwendige Presskraft in Achsrichtung der Bürste wird der Besatz verdichtet [51, S. 36]. Eine Sonderform stellt die **Lochscheibe** für eine gezopfte Rundbürste dar, wobei das Besatzmaterial eines Zopfes jeweils durch einen Ring hindurchgeführt wird [Experte 1.2.3.6].



Abbildung 3-5 Fixierungsmöglichkeiten des Besatzes

Für die experimentelle Versuchsdurchführung dieser Arbeit zu beachten gilt: Nicht alle Variationen von Besatzanordnungen können fertigungstechnisch in den genannten Befestigungsprinzipien eingebracht werden. Ein Zopf beispielsweise kann nur über eine Lochscheibe gefertigt werden. Gewellte oder verlitzte Drahtbürsten werden meist über Spiralen oder Scheiben hergestellt. Dennoch gilt es die Fixierung im Grundkörper für die Werkzeugauswahl zu berücksichtigen, da diese maßgeblich die möglichen Drehzahlen und Werkzeug-Steifigkeiten bestimmt.

3.1.1.5 Besatzdichte

Die Steifigkeit des Besatzes sowie die Anzahl an Einzeldrähten beeinflussen die Werkstückbearbeitung. Die Besatzdichte hat Einfluss auf beide genannten Punkte. Die notwendige hohe Steifigkeit von Bürstenwerkzeugen entsteht – neben der Eigensteifigkeit des Besatzes – auch durch die Stützwirkung benachbarter Einzeldrähte. Laut Przyklenk [52] ändert sich beispielsweise die optimale Besatzlänge zur Bearbeitung eines Werkstoffes in Abhängigkeit der vorliegenden Abstützungsmöglichkeiten. Je stärker sich der Besatz abstützen kann, desto steifer ist das Verhalten im Eingriffsfall. Deshalb ist bei mehr Abstützung ein längerer Besatz zu wählen.

Innerhalb dieser Forschungsarbeit ist die Besatzdichte als Anzahl der Einzelspitzen pro Flächeneinheit definiert. In der Praxis umfasst der Begriff hingegen vielerlei Stellgrößen. So dient die Besatzdichte in der Bürstenfertigung der Beschreibung des Füllgrads einer Bürste [Experte 3.2.2.5]. Bürstenhersteller verwenden betriebsintern dazu unterschiedliche Definitionen, je nach der Fixierung im Grundkörper. Normen und Richtlinien für einen einheitlichen Sprachgebrauch existieren nicht. Unterschieden wird dabei oftmals eine hohe, mittlere und niedrige Besatzdichte sowie der Begriff Vollbesatz. Bei gestopften Bürsten bezeichnet dies in der Regel die Anzahl der Bohrungen pro Fläche und dadurch die eingebrachte Materialmenge. Abbildung 3-6 veranschaulicht dies skizzenhaft. Unter Vollbesatz wird dann die maximal mögliche Anzahl an Bohrlochern im Grundkörper verstanden, wobei die Bohrlochstärke mit dem Durchmesser des Besatzes zusammenhängt [Experte 1.2.8.14]. Die Anzahl möglicher Bohrungen hingegen bestimmt der Durchmesser des Grundkörpers sowie das Material [Experte 2.2.6.12]. Die Füllmenge innerhalb eines Bohrlochs ist allerdings immer maximal [Experte 2.2.6.12].



Abbildung 3-6 Darstellung der Besatzdichten anhand von Bohrlochabständen im Grundkörper bei gestopfter Fixierung, vgl. [64]

Wird die Bürste hingegen in einer Spiralausführung gefertigt, so wird das pro laufenden Meter untergebrachte Materialgewicht auf dem Streifen betrachtet. Dabei besteht immer noch die Möglichkeit die Spirale dichter – je nach Durchmesser des Rohrs – oder mit größeren Abständen auf dem Rohr aufzurollen [Experte 1.1.1.2]. Bei gezopften Bürsten dagegen ist das innerhalb einer Lochscheibe untergebrachte Material entscheidend. Unter Vollbesatz ist dann der maximal unterzubringende Querschnitt gemeint [Experte 3.2.2.5]. Eventuelle Distanzstücke zwischen den Scheiben werden dabei nicht berücksichtigt. Bei Einzelringbürsten ähnelt die Einteilung je nach Hersteller der Spiralbürste oder der gezopften Bürste: Betrachtet wird die pro Scheibe untergebrachte Materialmenge oder aber der Füllgrad des Kreisringquerschnitts [Experte 2.1.4.8, Experte 3.2.2.5].

Daraus resultiert, dass Bürstenwerkzeuge nur in bestimmten Abmessungen hergestellt werden können. Für die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit bedeutet dies, dass Werkzeuge unterschiedlicher Besatzdichten für den Abtrag von WDVS experimentell untersucht werden. Da die Spitzen für die Werkstückbearbeitung maßgeblich sind, ist von Werkzeugen mit mehr Einzelspitzen im Eingriff ein besseres Abtragsergebnis zu erwarten [Experte 2.2.5.9].

3.2 Stand der Wissenschaft und Technik: Bürstspanen

Verglichen mit „klassischen“ Fertigungsverfahren, wie dem Fräsen oder Schleifen, liegen für das Bürstspanen kaum Informationen zum Einfluss der innerhalb dieser Arbeit untersuchten Parametereinstellungen vor [51, S. 2]. Die Vorschubbewegungen werden beispielsweise noch häufig manuell ausgeführt, was nicht oder nur unzureichend reproduzierbare Ergebnisse zur Folge hat. Ebenso stellen WDVS ein bisher nicht betrachtetes Anwendungsfeld dar. Dennoch wird der Vergleich mit vorhandener Literatur gesucht. Im deutschsprachigen Raum sind insbesondere Wolf [49, 65, 66], Przyklenk [52, 67–69, 56, 70, 58] und Landenberger [51, 55, 71] zu nennen. Im Gegensatz zur im Vorfeld genannten Literatur, in welcher metallischer Besatz untersucht wird, stehen bei Landenberger Besatzmaterialien mit Schleifmittel im Fokus.

Wolf hat im Rahmen des Forschungsprogramms „Humanisierung des Arbeitslebens“ im Jahr 1981 das Fertigungsverfahren Nadelfräsen erstmals untersucht [66, 49]. Das Werkzeug ist in seiner Grundform ein Ring aus einer Vielzahl von hochelastischen, radial angeordneten Stahlnadeln [49, S. 67]. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit sind vor allem die Untersuchung der Kinematik des Nadelfräsens sowie die Ermittlung der Verfahrenskenngrößen auf einer entsprechend umgerüsteten Fräsmaschine von Belangen. Dies beinhaltet die Aufarbeitung der Wirkprinzipien der zylindrischen Schneide sowie die Ausbildung einer Schneidengeometrie während der Bearbeitung. Die Ergebnisse mit dem Nadelfräser sind nur begrenzt auf konventionelle Bürsten übertragbar, da bei diesem Werkzeug eine wesentlich höhere Besatzdichte vorliegt, verbunden mit einem größeren Abstützeffekt.

Przyklenk hat von Ende der 1970er bis in die 1980er eine Reihe von Schriftstücken zum Verhalten von Bürsten veröffentlicht, die 1985 in seiner Dissertation [52] kulminieren. In den darauffolgenden Jahren hat er bei weiteren Veröffentlichungen zu dieser Thematik, wie bspw. dem Buch „Entgrattechnik“ [56], mitgewirkt. In seinen Untersuchungen befasst sich Przyklenk mit Stahldrahtbürsten. Forschungsgegenstand ist das Verhalten des Einzeldrahts, wobei die Wirkungsweise bei der Oberflächenbearbeitung erstmals ausführlich phänomenologisch untersucht und erklärt wird. Dies ermöglicht ihm die Analyse des Verschleißverhaltens an der Spitze des Einzeldrahts. Die im Zusammenhang mit dieser Arbeit zu nennenden Erkenntnisse sind, dass plastische Verformungen an der Einzelspitze die Eingriffsbedingungen verändern und das ein Abbrechen des Besatzes zu frühzeitigem Verschleiß führen kann. Das beschriebene Verhalten ist umso ausgeprägter je kürzer die Besatzlänge und je größer die Zustellung ist [52, S. 38–39].

Landenberger behandelt innerhalb der Dissertation [51] mit dem Titel „Flexible Feinbearbeitung für die Refabrikation von Automobilkomponenten“ aus dem Jahr 2007 den Einfluss der Prozessparameter auf die Feingestaltung von Werkstücken, die technischen Grenzen des Bürstspanens und die Abhängigkeit der Bearbeitungsergebnisse von der Bearbeitungs- bzw. Schnittzeit. In Bezug auf diese Arbeit ist vor allem die Eingruppierung in die Fertigungsverfahren sowie die Abgrenzung des Bürstspanens nach DIN 8589-8 [50] von Interesse.

In der nationalen wie auch internationalen Forschung liegt der Fokus der Untersuchung von Rundbürsten auf der Metallbearbeitung, insbesondere dem Entgraten sowie der Oberflächenbearbeitung. Der Amerikaner Robert J. Stango [72–82] ist zu nennen, welcher sich u.a. mit der Kinematik des Bürstens sowie den Auswirkungen auf den Besatz und der Kraftverteilung in der Kontaktzone mit dem Werkstück beschäftigt. Aufgrund der Vielzahl vorhandener Veröffentlichungen und der bedingten Übertragbarkeit der Ergebnisse im Sinne dieser Arbeit werden diese nicht einzeln gelistet.

Im Bereich Forschung und Entwicklung von Bürsten zur Oberflächenbearbeitung sind in neuester Zeit primär die Projekte und Forschungsarbeiten der Technischen Universität Berlin [57, 83, 61, 84–88] sowie der Hochschule Reutlingen [89] aufzuführen, wobei Besatzmaterial mit Schleifmittel dort untersucht wird.

Neben Forschungseinrichtungen verfügen ebenfalls einige Bürstenhersteller über Forschungs- und Entwicklungsabteilungen. Dadurch besteht die Möglichkeit einer Werkzeugauswahl und Prüfung für den Anwendungsfall des Kunden, ebenso können unter Laborbedingungen Prognosen der zu erwartenden Standzeit erstellt werden, unter dem Gesichtspunkt der Ergebnisreproduzierbarkeit. Letzteres gilt es in der endgültigen Maschine zu validieren. Des Weiteren dienen experimentelle Untersuchungen der Neu- und Weiterentwicklung von Bürstenwerkzeugen. Auf vorhandene Erfahrungen vergleichbarer Anwendungsfälle kann – als Zugewinn für diese Arbeit – für die Eingrenzung der experimentellen Versuche zurückgegriffen werden. Ermöglicht wird dies durch die Experteninterviews (vgl. Anhang A).

Auf weitere Veröffentlichungen wird – im betreffenden Abschnitt dieser Arbeit – Bezug genommen. Es gilt zu prüfen, inwieweit vorhandene Axiome mit denen dieser Arbeit übereinstimmen.

3.3 Wirkungsweise von Bürstenwerkzeugen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Wirkungsweise von Bürstenwerkzeugen vorgestellt, um diese für den Abtrag von WDVS anzuwenden, bevor dann im weiteren Verlauf der Arbeit die Methoden der Versuchsdurchführung näher beschrieben werden. Die grundlegenden Begriffe zu den Bewegungen beim Vorgang des Spanens sind genormt. In der Normung wird jedoch nicht auf die speziellen Bedingungen beim Abtrag von WDVS durch Bürsten eingegangen. Für eine Beschreibung der Vorgänge im Sinne dieser Arbeit ist demnach anfänglich eine Begriffsdefinition notwendig. Abschließend wird eine Einordnung des Trennprozesses in die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (September 2003) vorgenommen.

3.3.1 Begriffsdefinition: Anordnung von Werkzeug und Werkstück

In Anlehnung an DIN 6580 (Oktober 1985) [90] sowie Denkena [48] werden für die Beschreibung der Bewegung zwischen Werkzeug und Werkstück folgende – schematisch in Abbildung 3-7 dargestellten – Begrifflichkeiten verwendet: Die **Vorschubgeschwindigkeit** v_{ft} ist als diejenige Geschwindigkeit definiert, mit der das Werkzeug gegenüber dem (starrten) Werkstück längs verschoben wird. Zusammen mit der Schnittgeschwindigkeit bewirkt sie u.a. die Spanabnahme am Werkstück. Beim Bürstspanen wird in der Regel die **Umfangsgeschwindigkeit** v_c , auch Umlaufgeschwindigkeit oder Umdrehungsgeschwindigkeit genannt, als Schnittgeschwindigkeit angegeben. Die tatsächliche Schnittgeschwindigkeit fällt dabei etwas kleiner aus, da durch die zunehmende Verformung des Besatzes während der Spanabnahme eine geringfügige Verlangsamung eintritt [49, S. 21]. Die Umfangsgeschwindigkeit v_c berechnet sich aus dem maximalen Kontaktdurchmesser $2r_{max}$ und der Werkzeugdrehzahl² n_B der Bürste [48, S. 7] zu

$$v_c = 2\pi * r_{max} * n_B \quad (3.1)$$

Unter **Zustellung** a_e ist der Abstand der Werkzeugausrichtung zur Bearbeitungsoberfläche zu verstehen. Die Zustellung bestimmt daher das Maß, um welches sich die Werkzeugmittelachse der Werkstückoberfläche nähert und verläuft senkrecht zur Vorschubrichtung. Das WDVS, welches auf der Betonoberfläche aufgebracht ist, wird in diese Abgrenzung aufgrund der vergleichsweise geringen Festigkeiten nicht einbezogen. Die Betonoberfläche bildet die Bearbeitungsoberfläche, auch wenn die Gesamtheit aus WDVS und Betonoberfläche das Werkstück repräsentiert. Wird von Zustellung gesprochen, so handelt es sich in der Praxis üblicherweise um ein starres Aufhängungskonzept des

² Um ein Herauslösen des Besatzes und somit sicherheitstechnische Risiken zu vermeiden geben Hersteller kraftgetriebener Bürstenwerkzeuge unter Verwendung der DIN EN 1083 Teil 2 (Juli 1997) [91] maximal zulässige Drehzahlen an.

Werkzeugs. Beide Versuchsstände ermöglichen dieses Konzept (vgl. Abschnitt 4.2). Eine elastische Aufhängung hingegen, bei den experimentellen Versuchen an Versuchsstand II durch einen Seilzug mit Gewichten umgesetzt, erlaubt eine gleichbleibende Anpressung auch bei auftretenden Verschleißerscheinungen des Werkzeugs. Zustellung und Anpressung werden innerhalb dieser Arbeit unter dem Begriff Werkzeuganstellung zusammengefasst. Die **Anpressung** (bzw. Anpresskraft) F_a entspricht dabei dem Produkt aus Masse m und Erdbeschleunigung g ,

$$F_a = m * g \quad (3.2)$$

Wobei für die Erdbeschleunigung der Näherungswert 9,81 Meter pro Sekunde-Quadrat verwendet wird [92]. Die Masse ergibt sich aus der Differenz der Gegengewichte zum Werkzeug inkl. Einhausung und Antriebseinheit.

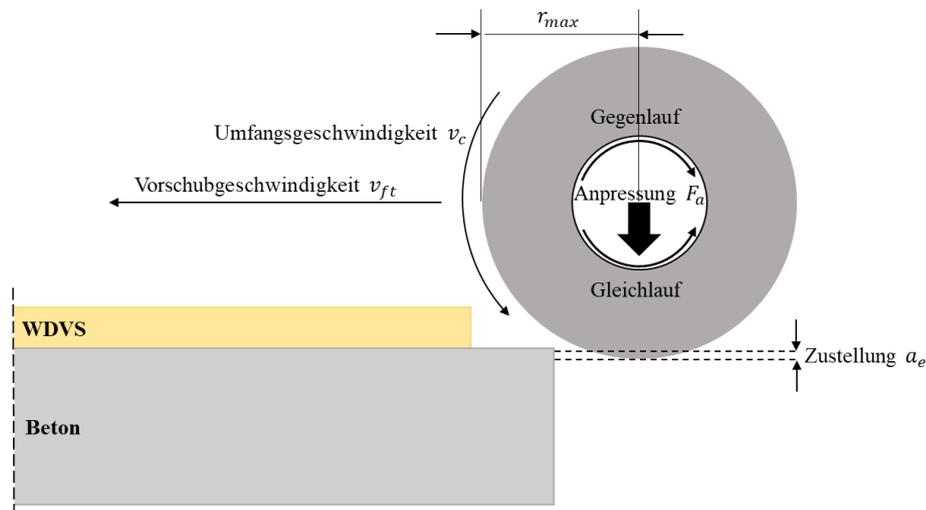


Abbildung 3-7 Schematische Darstellung der Maschinenparameter an Werkzeug und Werkstück

Ist die Werkzeugdrehrichtung entgegengerichtet der Vorschubrichtung wird im Sinne der DIN 8589-0 (September 2003) [93] von gegenläufiger Drehbewegung bzw. **Gegenlaufbetrieb** gesprochen, sind diese gleichgerichtet dementsprechend von gleichläufiger Drehbewegung bzw. **Gleichlaufbetrieb**. Die DIN 8589-8 (September 2003) [50] zur Thematik des Bürstspanens nimmt keine Unterteilung diesbezüglich vor. Sollte in der nachfolgenden Ergebnisdarstellung die Drehbewegung nicht explizit erwähnt werden, so ist von einem Gleichlaufbetrieb auszugehen.

3.3.2 Mechanik der Bürstenbearbeitung

Bürstenwerkzeuge bestehen aus radial angeordneten Einzelspitzen des Besatzes. Jede Einzelspitze stellt eine Werkzeugschneide dar, sodass die Mantelfläche der zylindrischen Drehkörper aus einer Vielzahl von Mikroschneiden gebildet wird. Führt das drehende Werkzeug eine Vorschubbewegung aus und trifft auf das Werkstück, biegt sich der Besatz soweit durch, bis ein Gleichgewicht zwischen den Bearbeitungskräften und den Reaktionskräften an den Schneiden herrscht, welche durch die Biegesteifigkeit des Besatzes und die Stützwirkung benachbarter Einzeldrähte entsteht [94]. Die Biegesteifigkeit des einzelnen Besatzes wiederum bestimmen Besatzmaterial, -anordnung, -durchmesser und -länge, wohingegen die Besatzdichte – abhängig der Fixierung des Besatzmaterials im Grundkörper – die Stützeffekte prägt. Przyklenk [52] beschreibt die Bewegung anhand eines Einzeldrahts auf der Werkstückoberfläche als einen Zwangsdurchlauf mit drehwinkelabhängiger Beanspruchung. Nach dem

Prinzip des kleinsten Zwangs weicht der Besatz entweder seitlich oder in der Rotationsebene aus, wobei in erster Linie die Biegung innerhalb der Rotationsebene den gewünschten Abtrag erbringt. Mit größer werdender Zustellung stützt sich der Besatz dabei verstärkt gegenseitig ab. Bei den zu empfehlenden Zustellwerten³ kommt dieser Effekt allerdings nicht zum Tragen [52, S. 36]. Bestätigt wird dies durch Schweer und Koch. Bei Untersuchungen zur Thematik Nadelfräsen ist nachgewiesen, dass „[...] trotz der beträchtlichen Kräfte, die vom Ende der Nadel aufgenommen werden müssen, die Beanspruchung durch das Mittragen der benachbarten Nadeln sehr gering [...]“ ist [62]. Auch wenn ein Nadelfräser aufgrund seiner vergleichsweise deutlich höheren Anzahl an Einzeldrähten und dadurch größeren Besatzdichte nicht direkt mit den in dieser Arbeit untersuchten Werkzeugen gleichzusetzen ist, so weisen dennoch Besatzmaterialien, -durchmesser und -längen sowie die Werkzeuganstellung ähnliche Dimensionen auf. Dies ermöglicht im Nachgang eine Beschreibung der Wirkprinzipien von Bürstenwerkzeugen, indem nur der Einzeldraht betrachtet und Stützeffekte vernachlässigt werden.

Infolge der – je nach Werkzeugsteifigkeit und Anstellung mehr oder minder großen – Durchbiegung⁴ des Besatzes bildet sich die Schneidengeometrie, mit einem (abhängig von der Werkstückoberfläche) überwiegend negativen Spanwinkel und einem betragsmäßig ebenso großen Freiwinkel. Der Keilwinkel wird dabei maximal dem Schnittwinkel entsprechen, wenn der Besatz komplett auf der Oberfläche des Werkstücks aufliegt. Der Spanwinkel ist positiv, wenn die durch den betrachteten Schneidenpunkt gelegte Bezugsebene außerhalb des Werkzeugs liegt. In Abbildung 3-8 ist er folglich negativ, wie überwiegend beim Bürstspanen mit geometrisch bestimmten und unbestimmten Schneiden. Przyklenk [52] bezeichnet diesen negativen Spanwinkel als ungünstige Eingriffsbedingung für den Einzeldraht als Schneide. „Im Extremfall [...] kann der Spanwinkel minus 90 Grad betragen, wobei keine Schneiden mehr zum Eingriff kommen“ [52, S. 36].

Lediglich bei mit Schleifmittel besetztem Besatz ist ein großer Spanwinkel vorteilhaft. Diesbezüglich konnte nach Landenberger [51] beobachtet werden, dass bei nachgiebigem Besatz die Unterschiede bei verschiedenen Anstellwinkeln geringer sind als bei steifem Besatz, weshalb ein besonders steifer Besatz gewählt werden sollte. Der Eingriff eines Schleifkorns ist mit dem Schneideneingriff beim Schleifen vergleichbar, wo von Spanwinkeln bis zu minus 80 Grad ausgegangen wird. Die Spanabnahme bei der Bearbeitung wird dabei primär durch Schleifkörner durchgeführt, die in die aus Kunststoff bestehenden Filamente eingebettet sind. Während der Bearbeitung weichen die elastischen Filamente aus, passen sich so der Form der Werkstückgeometrie an und vollziehen danach eine streifende bis schlagende Bewegung über die Werkstückoberfläche [85]. Als Schleifkornwerkstoff wird typischerweise Siliziumcarbid, Aluminiumoxid, kubisch kristallines Bornitrid oder Diamant verwendet [86].

Innerhalb der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit kann durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eine Durchbiegung des Besatzes beim Auftreffen auf die Betonoberfläche (Zustand I) beobachtet werden. Aufgrund der Versuchsanordnung ist ein Sichten auftretender Spanwinkel beim Auftreffen der Einzelspitzen auf die Deckschicht des WDVS – bestehend aus Armierungsgewebe sowie Unter- und Oberputz – jedoch nicht möglich (Zustand II). Dennoch konnte innerhalb der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit ein nicht zu vernachlässigender Einfluss dieser Systembestandteile auf den Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust nachgewiesen werden (vgl. Abschnitt 5.1.4). Von einer – wenn auch geringeren – Durchbiegung ist folglich auszugehen (vgl. Abbildung 3-8). Eine Beeinträchtigung des Werkzeugverschleißes durch den Dämmstoff EPS sowie der verwendeten Klebstoffe ist hingegen nicht nachzuweisen, eine Vergrößerung des Spanwinkels durch diese Systembestandteile daher unwahrscheinlich. Anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ist außerdem zu erkennen, dass der

³ Die Literatur zur Anwendung Entgraten empfiehlt für Stahldrahtbürsten je nach Anordnung des Besatzes Zustelltiefen von 0,2 bis 2,0 Millimeter, für Kunststoffbesatz mit Schleifmittel etwa 1,0 Millimeter [56, S. 170].

⁴ Durchbiegung bezeichnet den Versatz des Einzeldrahtes, welcher durch die Biegebelastung längs der Rotationsebene entsteht.

3.3 Wirkungsweise von Bürstenwerkzeugen

Einzeldraht sich scheinbar aufgerichtet hat, bevor es zu einem Auftreffen auf die Betonoberfläche kommt. Eine Verringerung der Krafteinwirkung infolge Zustand II ist dennoch nicht auszuschließen.

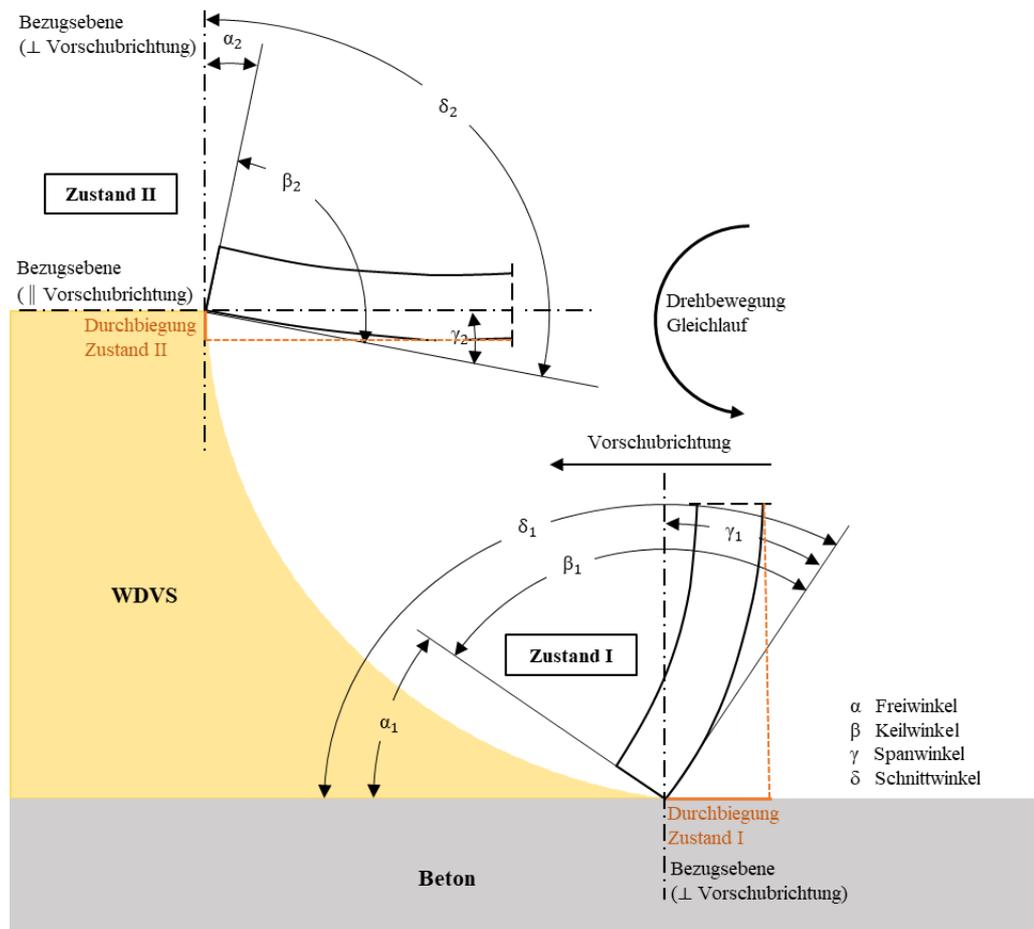


Abbildung 3-8 Winkel beim Eingriff eines Einzeldrahts bei zylinderförmiger Schneidengeometrie, vgl. [49, 51, 70]

Nach Stöferle und Müller-Gerbes [94] bestimmt die Durchbiegung beim Bürstspanen die auftretenden Bearbeitungskräfte. Mit Verweis auf Schweer und Koch [62] ist für die richtige Betriebsweise eine gewisse – wenn auch geringe – Durchbiegung für die Bildung eines negativen Spanwinkels notwendig. Steifigkeit und Anpressung ergeben in den Untersuchungen die Ausrichtung des Werkzeugs gegen die Werkstückoberfläche und bestimmen das Maß des Versatzes. Nachgewiesen wird, dass es ein Optimum für die Werkzeuganstellung gibt, bei dem eine maximale Spanabnahme auftritt, weitere Erhöhungen der Anpressung sind hingegen nicht zielführend. Als Werkstück dient eine Stahlprobe. Das Optimum aus Anstellung und Spanabnahme ist dabei für verschiedene Werkzeugausführungen unterschiedlich. Bestätigt wird dies von Wolf [49], wobei ein Spanwinkel für die Bearbeitung notwendig ist, da dadurch erst die für die Zerspanung erforderlichen Spanräume gebildet werden [49, S. 35]. Przyklenk führt auf, dass bei höheren Zustellungen – das Optimum gilt demnach als überschritten – die Durchbiegung des Besatzes zunimmt, was ungünstige Schnittbedingungen verursacht [52, S. 36]. Im Umkehrschluss empfiehlt es sich, Bürstenwerkzeuge nicht mehr als notwendig gegenüber dem Werkstück anzustellen. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bestätigen dies (vgl. Abschnitt 5.1.2). Wurde die optimale Anstellung einmal ermittelt, so ist der Abtrag an einem definierten Werkstück von folgenden Eigenschaften abhängig: Der Drehzahl und daraus resultierenden Schnittgeschwindigkeit, der Vorschubgeschwindigkeit und der Werkzeugausführung.

Nachgewiesen ist, dass bei der Oberflächenbearbeitung Schwingungen in der Rotationsebene auftreten. Bei Betrachtung eines Einzeldrahts ist ein unregelmäßiges Aufkommen der Spitze innerhalb eines Durchlaufs auf der Werkstückoberfläche zu verzeichnen. Daraus folgt, dass das Werkstück nicht auf der gesamten Länge des Werkzeugeingriffs berührt wird [52, S. 77–79]. Bei einer Betrachtung des Bürstenwerkzeugs als Ganzes ist aufgrund der Vielzahl im Eingriff befindender Schneiden nicht die Länge des Eingriffsbereichs von Interesse. Vielmehr kann es für den Abtrag von WDVS förderlich sein, dass der Besatz nicht über die Werkstückoberfläche gleitet, sondern springt [56, S. 157], denn bei jedem Auftreffen des Besatzes auf dem Werkstück wird kinetische Energie in Form eines Impulses übertragen. Interessant ist das dynamische Verhalten des Besatzes: Dieser bewegt sich nicht mit gleichbleibender Geschwindigkeit über das Werkstück, sondern wird permanent beschleunigt und abgebremst [52, S. 79]. Der prozentuale Anteil der Aufsetzer steigt für kleine Besatzlängen, große Besatzdurchmesser, große Keilwinkel und hohe Drehzahlen an, denn eine kurze Besatzlänge bewirkt im Eingriff mit dem Werkstück höher frequente Schwingungen [56, S. 157]. Daraus bedingt sich eine – für den Abtrag förderliche – kurze Besatzlänge oder besser noch ein größerer Durchmesser des Besatzes, da eine kurze Besatzlänge die Lebensdauer der Bürste senkt. Bei der Werkzeugauswahl dieser Forschungsarbeit gilt es dies zu berücksichtigen.

Das dynamische Verhalten eines Einzeldrahts bei der Werkstückbearbeitung zeigt Abbildung 3-9. Nach Stango [76] sind entlang der Kontaktzone erhebliche Variationen der Krafteinwirkungen zu verzeichnen. Dabei steigt die Krafteinwirkung auf das Werkstück beim Eintritt des Einzeldrahts in die Kontaktzone schnell an und erreicht ein Maximum in der Nähe des Eintrittspunktes der gebürsteten Region. Der größte Materialabtrag erfolgt in räumlicher Nähe der maximalen Krafteinwirkung. Für den Abtrag von WDVS im Speziellen ist von einer abnehmenden Krafteinwirkung des nachfolgend durchlaufenden Zustands auszugehen. Je nach Drehbewegung ist ein mehr oder minder starkes Abbremsen des Einzeldrahts aufgrund des vorangehenden Zustands zu erwarten. Da ein Abtrag des WDVS – und nicht der Betonoberfläche – vordergründig ist, gilt es eine gleichläufige Drehbewegung vorzuziehen.

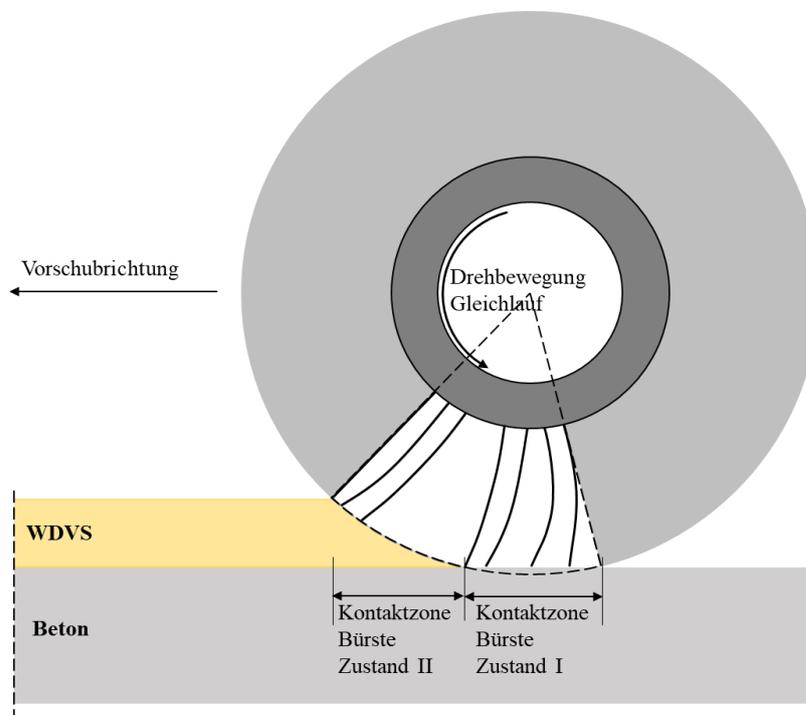


Abbildung 3-9 Dynamisches Verhalten eines Einzeldrahts bei der Werkstückbearbeitung, vgl. [76, S. 223], [52, S. 78], [95]

Abbildung 3-8 zeigt eine zylinderförmige Schneidengeometrie, wie Bürstenwerkzeuge sie nach der Fertigung gewöhnlich aufweisen. Infolge der Durchbiegung kommt es bedingt durch elastische Verformungen zu einer Veränderung der Schneide. Die Eingriffsbedingungen des Besatzes ändern sich bei der Werkstückbearbeitung zwar andauernd, dennoch pendelt sich nach kurzer Bearbeitungsdauer eine Schneidengeometrie an den Spitzen des Besatzes ein [52]. Die Form der Schneide wird neben der Länge des Besatzes, der Anstellung und dem Besatzmaterial maßgeblich von der Härte des Werkstoffs bestimmt. Weiche Materialien wie Messing ermöglichen einen Eingriff metallischer Drähte, die Schneidengeometrie bildet sich flach aus. Härtere Werkstoffe wie Stahl erlauben kein Eindringen der Spitzen. Hier überwiegt die Belastung der Kante beim Schlag, wodurch diese an Material verliert. Ein steiles ellipsenförmiges Profil entsteht und führt zu einer Verringerung des Abtrags [52, S. 63–65].

Innerhalb der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit ist eine ellipsenförmige Schneidengeometrie bereits nach einem Versuchsdurchgang ausgeprägt und steht somit nicht im Fokus. Abbildung 3-10 veranschaulicht diese skizzenhaft. Ausgehend vom Neuzustand des Einzeldrahtes zeigt sich der Verschleiß primär als ein Anpassen der Schneidengeometrie bis diese dem Spanwinkel entspricht. Die Geometrie ändert sich daraufhin nicht mehr, der Besatz wird nur noch kürzer. Es ergeben sich gleichbleibende Zerspanungsbedingungen. Der ganze Besatzquerschnitt ist davon betroffen. Eine Abnutzung des Besatzes tritt in diesem Zusammenhang sowohl an der Einlauf- als auch an der Auslaufseite auf. Für die Schneidwirkung bei der Werkstückbearbeitung ist die Einlaufseite entscheidend [51, S. 83]. Auch wenn die Abschrägung an den Spitzen der Einzeldrähte sich über den gesamten Besatzquerschnitt erstreckt, ist noch eine Zerspanung möglich [65]. In der Literatur wird dies als unerwünschte Verschleißerscheinung betrachtet [49]. Innerhalb dieser Arbeit handelt es sich um eine nicht zu beeinflussende Größe und ist demnach nicht zum Werkzeugverschleiß zu zählen. Vielmehr werden die untersuchten Bürstenwerkzeuge vor der erstmaligen Anwendung eingeschliffen.

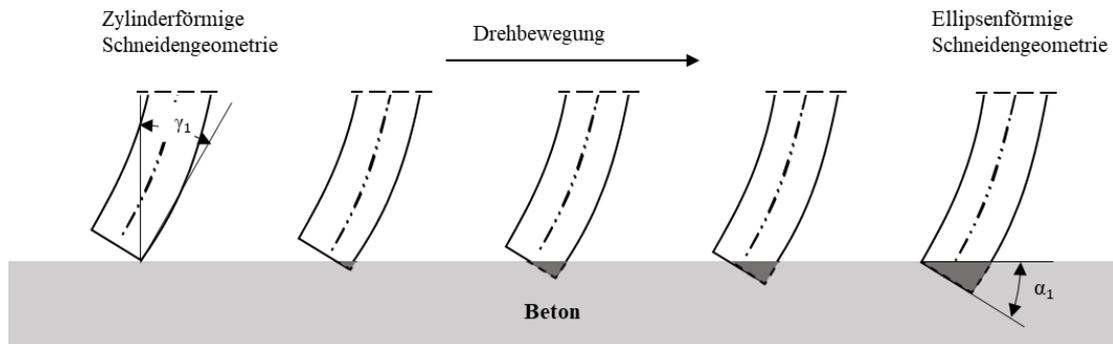


Abbildung 3-10 Ausbildung der Schneidengeometrie, nach [51, S. 83, 49, S. 48]

Bei der Bearbeitung von WDVS trifft die Werkzeugschneide vereinfacht dargestellt innerhalb eines Umlaufs zweimal auf. Zuerst auf die Deckschicht des WDVS (Zustand II), dann durchläuft der Besatz das Dämmmaterial – welches nachweislich (vgl. Abschnitt 5.1.4) keinen signifikanten Einfluss auf den Verschleiß hat – und trifft auf die Betonoberfläche (Zustand I) auf. Wird der Werkzeugverschleiß verglichen, so ist eine Bildung des Spanwinkels wesentlich durch die Betonoberfläche anzunehmen. Die dabei ausgebildete Schneidengeometrie trifft beim darauffolgenden Durchlauf auf die Deckschicht des WDVS und prägt die Trennwirkung, wobei eine Verringerung der Schneidwirkung mit größerem Spanwinkel infolge höherer Durchbiegung einhergeht. Die Werkzeuganstellung verursacht die Durchbiegung auf der Betonoberfläche. Vorhandene Literatur liefert die Basis getroffener Annahmen: Bekannt ist nach Wolf [49], dass bei Werkzeugen, die zunächst unter großer Durchbiegung des Besatzes im Einsatz sind, im Anschluss bei einer Bearbeitung mit geringerer Durchbiegung keine gute Trennwirkung festzustellen ist. Denn die bei hoher Durchbiegung und folglich großem Spanwinkel entstandene Kante

wird infolge der darauffolgenden geringen Durchbiegung zur neuen Schneidkante. Dadurch wird der ohnehin schon negative Spanwinkel noch wesentlich kleiner und es kommt zur Materialverquetschung. Ein solches Verhalten erzeugt zwei Freiflächen an der Werkzeugschneide, sofern bei einem Durchgang nicht so viel Material abgetragen wird, dass die Freifläche infolge des Freiwinkels α_1 gänzlich abgearbeitet werden kann. Vielmehr ergibt sich das in Abbildung 3-11 dargestellte Bild. Diese Schneidengeometrie konnte allerdings in den experimentellen Untersuchungen nicht beobachtet werden.

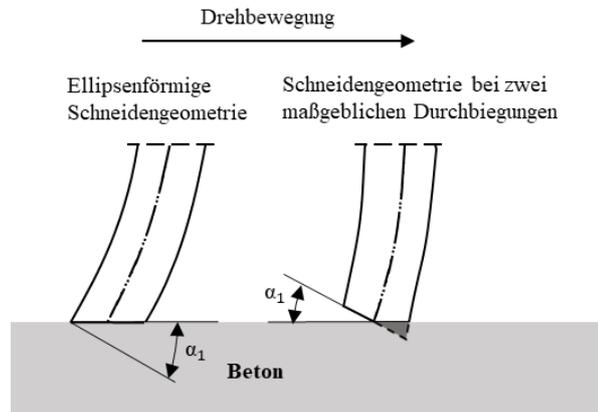


Abbildung 3-11 Änderung der Schneidengeometrie bei zwei Durchbiegungen mit maßgeblicher Beanspruchung, vgl. [49, S. 50]

Vorhandene Literatur rät – wie auch Experte 1.2.8.14 und Experte 1.2.6.11 – durch eine Umkehr der Drehbewegung oder der Vorschubrichtung Auslauf und Einlaufseite zu tauschen. Dadurch soll sich wieder eine scharfe Kante bilden, von einem Selbstschärfungseffekt wird gesprochen [49, S. 47]. Da eine Änderung der Vorschubrichtung für die geplante Anwendung des Abtrags von WDVS nicht möglich ist und eine Umkehr der Drehbewegung nicht dem Konzept einer gleichmäßigen Absaugung anfallenden Spanguts entspricht, ist letztlich lediglich eine manuelle Drehung durch Ausbau und Wiedereinbau des Werkzeugs möglich. Anhand der Versuchsergebnisse, wonach sich die Schneidengeometrie bereits nach einem Versuchsdurchgang einstellt, ist die übliche Praxis zur Nachschärfung nur begrenzt tauglich. Die Schneidengeometrie verändert sich also zu Beginn des Bürstvorgangs schnell, bis sie nach einer bestimmten Anzahl von Eingriffen fast gleich bleibt [70]. Eine Drehrichtungsumkehr kann aufgrund des zeitigen Einstellens der Schneidengeometrie für den Abtrag von WDVS keine brauchbaren scharfen Kanten erzeugen, hingegen wäre verglichen mit Abbildung 3-11 ein weiterer Freiwinkel zu erwarten. Der Besatz sitzt also zeitweise annähernd flächig auf der Werkstück auf, was sich nach [56, S. 155–156] erwartungsgemäß ungünstig auf das Abtragsverhalten auswirkt. Dieser Ansatz wird daher für die experimentellen Untersuchungen nicht weiter verfolgt.

Wie auch bei vergleichbaren klassischen Fertigungsverfahren, etwa Fräsen oder Schleifen, ist eine Drehbewegung im Gleich- und Gegenlauf möglich. Wolf [49] schildert den Vorgang bei der Bearbeitung metallischer Oberflächen durch Nadelfräsen wie folgt: Im Gegenlauf wird die Oberfläche durch diejenigen Einzeldrähte erzeugt, die nach einer Werkzeugumdrehung erneut in das Werkstück eindringen. Die Einzeldrähte bewegen sich dann an der Oberfläche entlang, stauchen einen Span vor sich auf, wobei Kraft und Temperatur an der Einzelspitze zunehmen und ein Abarbeiten des Besatzes bewirken. Da aber mehrere hintereinanderliegende Spitzen im Eingriff sind, wird der von den sich länger im Eingriff befindlichen Einzeldrähten erzeugte Abrieb sofort von den nachfolgenden Schneiden wieder abgetragen. Diese Verhältnisse kehren sich um, wenn im Gleichlauf gearbeitet wird. Die aus der Zerspanungszone auslaufenden Spitzen bearbeiten die entstehende Oberfläche zuletzt, der Abrieb bleibt liegen [49, S. 53]. Zum Einfluss der Drehbewegung auf den Abtrag oder Werkzeugverschleiß werden keine Angaben gemacht, Untersuchungen dazu erfolgen daher innerhalb dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 5.1.3).

3.3.3 Werkzeugverschleiß

Nach Czichos und Habig [96] ist Verschleiß als der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers zu sehen, hervorgerufen durch tribologische Beanspruchung [96, S. 127]. Er äußert sich durch das Loslösen kleiner Teilchen sowie in Stoff- und Formänderung. Im Sprachgebrauch wird der Begriff Verschleiß sowohl für den Vorgang, der zum Verschleiß führt, als auch für dessen Ergebnis verwendet. Innerhalb dieser Arbeit steht der ergebnisorientierte Verschleiß direkter Messgrößen im Vordergrund. Der Begriff Verschleiß wird demnach als Überbegriff verwendet [97].

Als Verschleißursachen definiert Landenberger [51] beim Bürstspanen im Wesentlichen eine Beschädigung der Schneide durch mechanische Überanspruchung, Reibungs-, Adhäsions-, Diffusions- und (thermo-) chemischer Verschleiß. Beim Bürstspanen überwiegen der Reibungsverschleiß sowie der Verschleiß durch mechanische Überbeanspruchung, weshalb diese Verschleißursachen im Nachgang genauer beschrieben werden. Durch die Flexibilität des Besatzes und die im Vergleich mit anderen spanenden Fertigungsverfahren geringen Schnittkräfte entsteht kein nennenswerter Adhäsionsverschleiß. Ausgehend von Vorgaben zur Temperaturbeständigkeit des Besatzmaterials sind Temperaturen von 100 °C (Synthetische Fasern: Polyamid) bis 300°C (metallische Drähte: Stahldraht) möglich. Aus diesem Grund tritt praktisch kein Diffusionsverschleiß auf. Verzundern oder chemischer Verschleiß sind ebenfalls von untergeordneter Bedeutung [51, S. 82].

Idealerweise arbeitet sich der Besatz nach Einstellung einer Schneidengeometrie entlang der freien Höhe ab (Reibungsverschleiß). Heutzutage wird von einem schuppenförmigen Abarbeiten des Besatzes gesprochen, nachdem sich dieser durch sehr kurzes Abbrechen an der Spitze selber schärft [56, S. 167]. Anhand der Durchbiegung des Besatzes beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche können zusätzlich elastische und plastische Verformungen hervorgerufen werden. Letztere sind der mechanischen Überbeanspruchung zuzuordnen. Bei großen Zustellungen und kurzen Besatzlängen treten plastische Verformungen erwartungsgemäß im Bereich der Einspannung in den Grundkörper auf [70]. Grund hierfür ist das Überschreiten der zulässigen Biegespannung [52, S. 39]. Plastische Verformungen führen zu einer dauerhaften Veränderung der Eingriffsbedingungen – der Besatz legt sich quer – und zu frühzeitigem Ausbrechen der Einzeldrähte aufgrund vorzeitiger Materialermüdung [49, S. 45]. Entscheidenden Einfluss auf den Bruch des Besatzes haben die Beanspruchung durch die Biegung und die daraus resultierende Änderung der Stoffeigenschaften sowie die Beanspruchung durch die Zentrifugalkraft.

In der Praxis gilt die Werkzeugstandzeit als erreicht, beziehungsweise die Bürste als verschlissen, wenn der gewünschte Effekt nicht mehr in der dafür vorgesehenen Zeit erbracht werden kann [Experte 3.2.2.5, Experte 2.2.5.9, Experte 2.2.3.15]. Ein Querlegen des Besatzes hingegen sowie das Ausbrechen sprechen für eine fehlerhafte Anwendung und/oder unpassende Werkzeugwahl [Experte 1.2.8.14, Experte 1.2.6.11, Experte 2.1.4.8, Experte 2.2.5.9].

Die benannten Verschleißursachen bildet die Grundlage der Verschleißbewertung von Bürsten für den Abtrag von WDVS. Eine Definition des Qualitätsmerkmals Werkzeugverschleiß sowie die entsprechenden Messmethoden dieser Arbeit sind in Abschnitt 4.1.3.2 beschrieben.

3.3.4 Einordnung nach Fertigungsverfahren

Ausgehend von der Tatsache, dass Bürstenwerkzeuge bisher nicht für den Abtrag von WDVS eingesetzt worden sind, ist eine Einordnung nach Fertigungsverfahren notwendig. Denn nur so kann eine Charakterisierung des Bearbeitungsprozesses erfolgen sowie ein Vergleich gesucht werden.

Die trennenden Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (September 2003) lassen sich in die sechs Gruppen Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmten und unbestimmten Schneiden, Abtragen, Zerlegen und Reinigen einteilen [98]. Kongruent mit Hofmann und Spindler [99, S. 40] wird das Verfahren zum Abtrag von WDVS dem Spanen zugeordnet. Ausgehend von der Tatsache des Zerspanungsvorgangs und von der Art der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück – rotatorisches Werkzeug mit nicht ständig im Eingriff befindlichen Schneiden – eröffnen sich laut Wolf [65] die zwei Möglichkeiten, entweder von einer Fräs- oder von einer Schleifbearbeitung zu sprechen. Beim Fräsen erzeugen starre Werkzeuge mit definierter Schneidengeometrie, beim Schleifen starre Werkzeuge mit stochastischer Schneidengeometrie den Abtrag am Werkstück. Bürstenwerkzeuge hingegen sind nicht direkt einzuordnen. Der wesentliche Unterschied zu einem herkömmlichen Fräswerkzeug besteht nach Wolf [49, S. 12] in der hohen Elastizität des Besatzes, wodurch sich der wirksame Spanwinkel erst während der Bearbeitung einstellt, dann aber bei unveränderten Randbedingungen mit großer Gleichmäßigkeit auftritt. Dies rechtfertigt nach Warnecke und Przyklenk [70] die Zuordnung zu den Verfahren, die mit geometrisch bestimmten Schneiden arbeiten. Eine Zuordnung unter diesem Aspekt gestaltet sich – für die innerhalb dieser Arbeit verwendeten flexiblen Werkzeuge – schwierig. Übereinstimmend mit Landenberger [51, S. 8] ist eine Zuordnung des Fertigungsverfahrens Bürstspanen – ergänzend der Gruppierung nach DIN 8589 Teil 8 (September 2003) – sowohl zum Spanen mit geometrisch bestimmten als auch mit geometrisch unbestimmten Schneiden denkbar [50]. Entscheidend ist die Ausführung des Werkzeugs sowie die Maschineneinstellungen. Nach Betrachtung der einzelnen Gruppen und in den Versuchen getesteten Werkzeugen sowie den Maschinenparametern, wird das Verfahren zum Abtrag von WDVS – nach finaler Werkzeugwahl – aufgrund höherer Anzahl übereinstimmender Merkmale der Gruppe 3.3 „Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide“ zugeordnet. Die vorgenommene Einteilung wird durch die leitfadengestützten Experteninterviews bestärkt.

Begründet wird dies folgendermaßen:

- Die Form des Besatzes ist zwar je nach Fertigung mehr oder weniger definiert [Experte 2.2.5.10]. Durchmesser, Länge sowie Anordnung werden im Vorhinein festgelegt, verändern sich allerdings bereits während der ersten Versuchsdurchführung. Ein negativer Spanwinkel bildet sich aus.
- Die Anzahl der Einzelspitzen unterliegt einer fertigungstechnischen Toleranz. Die Anordnung des Besatzes ist nicht genau bestimmt, eine stochastische Verteilung der einzelnen Spitzen liegt vor.
- Die Schneidengeometrie ist während der Bearbeitung nicht zu bestimmen. Das Bürstenwerkzeug ist bahngebunden. Allerdings existiert aufgrund der Flexibilität des Besatzes eine unvorhersehbare Kraftstreuung [Experte 2.2.5.10], welche die Wiederholbarkeit der Ergebnisse beeinflusst.
- Im Vergleich zum Fertigungsverfahren Fräsen wird das abzutragende Material nicht von der Oberfläche des Werkstücks abgehoben [56, S. 155]. Eher ist mit Scher- oder Reißspanen zu rechnen [52, S. 36].

Dementsprechend erfolgt keine Zuordnung der Untergruppe 3.2.8 „Bürstspanen“, wonach das Bürstspanen ausschließlich dem Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden zugeordnet ist [50]. Vielmehr bestehen Parallelen der Untergruppe 3.3.1 „Schleifen mit rotierenden Werkzeugen“. Die Zuordnung wird in der nachfolgenden Abbildung 3-12 veranschaulicht.

3.3 Wirkungsweise von Bürstenwerkzeugen

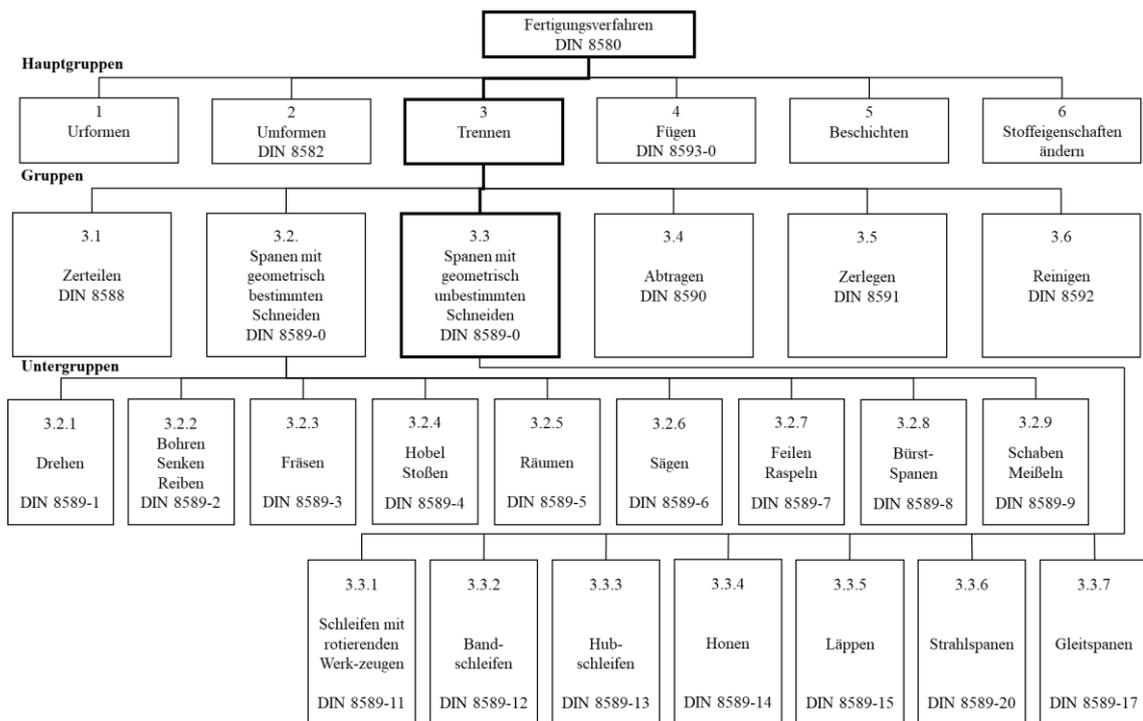


Abbildung 3-12 Übersicht der Fertigungsverfahren nach DIN 8589-0 (September 2003), vgl. [93]

Dennoch besteht nicht in allen Punkten eine Übereinstimmung zum Schleifen. Im Gegensatz zur Schleifscheibe ändern sich bei den untersuchten Bürstenwerkzeugen mit der Zustellung die Eingriffsbedingungen. Die Bürste ist im Millimeterbereich flexibel, während sich die Schleifscheibe nahezu starr verhält. Außerdem ist die Anzahl der Einzelspitzen einer Bürste verhältnismäßig einfach zu bestimmen, während der Anteil der einzelnen aktiven Spitzen am Zerspanungsvorgang schwierig zu erfassen ist [52, S. 24]. Des Weiteren können nach Schweer und Koch [62] im Gegensatz zum Schleifen keine harten Werkstoffe abgetragen werden, sondern nur solche geringerer Festigkeit als der Besatz. Außerdem ist die Energie, die notwendig ist, um eine Werkstoffmenge zu zerspanen, beim Schleifen und Nadelfräsen annähernd gleich, allerdings sind die Zerspanungskräfte (Andrückkräfte und Umfangkräfte) entsprechend den wesentlich geringeren Schnittgeschwindigkeiten viel größer als beim Schleifen.

Die Frage der Eingruppierung ergibt sich bei mit Schleifmittel besetztem Besatz nicht. Landenberger [51] merkt an, dass: „Werden zur Veränderung der Oberfläche [...] Borsten aus Polyamid mit eingelagerten Hartstoffkörnern [...] genutzt, muss das Verfahren dem Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden zugeordnet werden, da zwar die Anzahl der einzelnen Borsten bestimmt ist, die Anzahl der eingelagerten Hartstoffkörner, die als Schneide fungieren, jedoch nicht“ [51, S. 18].

Eine Einordnung in die Gruppe 3.6 „Reinigen“ wäre ebenfalls denkbar gewesen, sofern das zu entfernende Dämmsystem als Verunreinigung betrachtet würde. Da allerdings beim Abtrag von WDVS mittels eines Bürstenwerkzeugs die Oberflächenstruktur – im konkreten Fall sowohl das WDVS als auch die Gebäudeaußenwand – unweigerlich beeinträchtigt wird, wodurch wiederum Späne entstehen, wird von einer Zuordnung in diese Gruppe abgesehen. Der konkrete Abtrag von Material ist ebenso kein Merkmal des Reinigens. DIN 8590 (September 2003) hingegen gilt für den Abtrag als Fertigungsverfahren der Hauptgruppe Trennen und lässt sich in thermisches, chemisches und elektronisches Abtragen unterteilen [100]. Das Abtrennen von Stoffteilchen auf mechanischem Weg ist nicht Bestandteil der Gruppe.

4 Experimentelle Untersuchungsmethoden

In Kapitel 3 werden Ausführungsmöglichkeiten von Bürstenwerkzeugen sowie die Mechanik bei der Oberflächenbearbeitung beschrieben. Markthäufige Systembestandteile verbauter WDVS hingegen behandelt Kapitel 2. Daraus ergeben sich die Anforderungen an den repräsentativen Versuchsaufbau inkl. Messtechnik und eines Versuchsprogramms, welche in diesem Kapitel vorgestellt werden. Neben einer Abgrenzung der Systemgrenzen und Beschreibung der Eingangsgrößen umfasst dies die Definition der Zielgrößen und Bewertungskriterien. Der Versuchsaufbau an zwei Versuchsständen erfolgt am Karlsruher Institut für Technologie in der Werkstatt des Instituts für Technologie und Management im Baubetrieb.

4.1 Systembeschreibung

Da die experimentellen Versuche im wissenschaftlichen Umfeld den Kernpunkt der Arbeit bilden, gilt es im Vorfeld in der Parameteranalyse¹ alle beteiligten, relevanten Parameter zu identifizieren sowie die Systemgrenzen zu definieren, denn nur für zugehörige Größen kann im Rahmen der Untersuchungen eine optimale Einstellung gefunden werden [101, S. 3]. Um einen systematischen Überblick zu ermöglichen wird in Abbildung 4-1 eine schematische Darstellung des Untersuchungssystems gegeben. Zum Verständnis erfolgt im Anschluss eine kurze Begriffserläuterung.

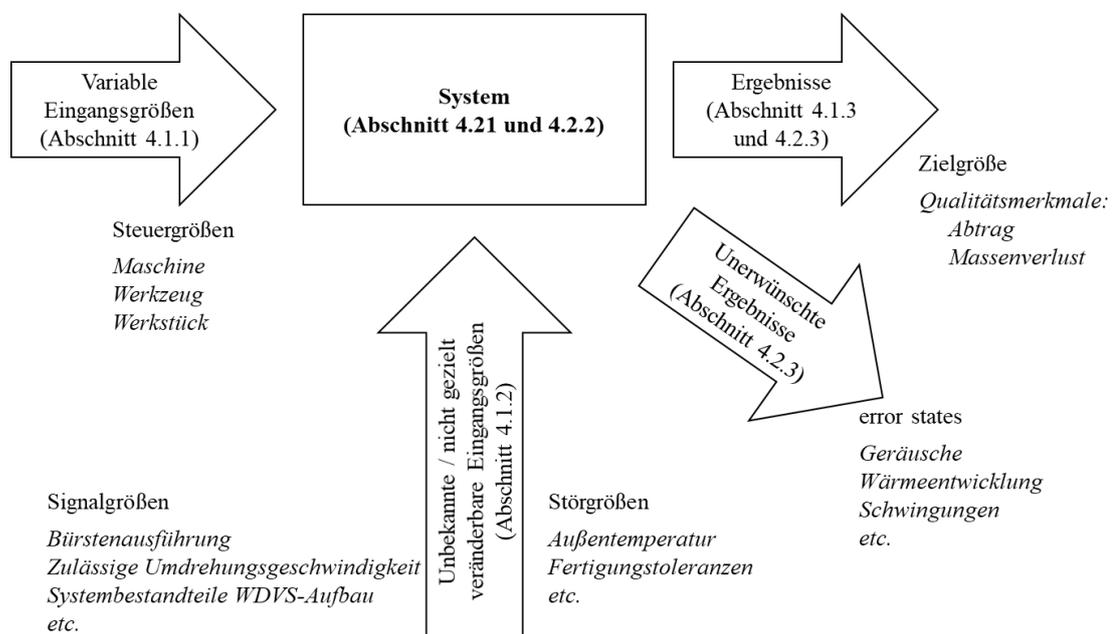


Abbildung 4-1 Parameterdiagramm zur qualitative Systembeschreibung, vgl. [101, S. 148]

¹ Die Menge aller Eingangsgrößen wird Parameter genannt. Die im Versuchsplan enthaltenen Parameter werden als Faktoren bezeichnet. Sie repräsentieren eine ausgewählte Teilmenge aller variablen Einstellgrößen.

Beeinflussbare Konstruktionsparameter werden Steuergrößen genannt. Innerhalb der experimentellen Versuchsdurchführung bilden sie die variablen Eingangsgrößen des Systems. Nicht oder nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand beeinflussbare Größen lassen sich in die Gruppen der Signal- und Störgrößen aufteilen. Signalgrößen stecken den Betriebsbereich des Systems ab, während Störgrößen die in der Praxis unkontrollierbaren Einwirkungen auf das System beschreiben. Die Versuchsstände repräsentieren dabei das betrachtete System. Außer den gewünschten Ergebnissen werden auch die unerwünschten Ergebnisse betrachtet, die sogenannten „error states“. Die Ergebnisse der Versuche werden als Zielgrößen bezeichnet. Ein Bestandteil davon bilden die Qualitätsmerkmale, diese ermöglichen die Bewertung der Funktionserfüllung [101, S. 148].

Im Rahmen der experimentellen Versuche dienen die Zielgrößen Abtrag und Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust als Qualitätsmerkmale, welche es für eine Systemoptimierung zu maximieren bzw. minimieren gilt. Sie hängen maßgeblich von den Steuergrößen ab, welche den drei Parametergruppen Maschine, Werkzeug und Werkstück zugeordnet werden können. Diese fließen als reproduzierbare Faktoren mehrerer Stufen² vereinzelt in die jeweiligen Versuchspläne mit ein. Daraus bildet sich folgendes Schema (vgl. Tabelle 3), aus dem die Einteilung der weiteren Abschnitte hervorgeht. Die Parametereinstellungen der Gruppe Maschine werden dabei innerhalb der Untersuchungen durch die Versuchsstände umgesetzt, in der Praxis übernimmt dies das Baggeranbaugerät. Unter der Parametergruppe Werkzeug sind verschiedene Ausführungsmöglichkeiten von Bürstenwerkzeugen zu verstehen, die Gruppe Werkstück hingegen repräsentiert unterschiedliche Aufbauten von Systembestandteilen zu einem WDVS.

Tabelle 3 Steuergrößen: Ordnungsschema Parameter

Parameter		
Maschine	Werkzeug	Werkstück
– Werkzeuanstellung	– Besatzmaterial	– Kleber, ggf. mechanische Befestigung
– Vorschubgeschwindigkeit	– Anordnung des Besatzes	– Wärmedämmstoff
– Drehbewegung	– Durchmesser und Länge des Besatzes	– Unterputz
– Drehzahl	– Fixierung im Grundkörper	– Bewehrung / Armierung
	– Besatzdichte	– Schlussbeschichtung (bspw. Oberputz)

Um aus der Fülle der Parameter die Faktoren der experimentellen Versuche auszuwählen, ist es ratsam, ein zweistufiges Vorgehen zu wählen. Im Rahmen von Grundlagenversuchen wird daher eine große Bandbreite an Faktoren sowie Faktorstufen der Kategorien Werkstück und Maschine kombiniert – große Systemgrenzen werden gewählt. Bei den aufwändigeren Hauptversuchen hingegen werden diese Faktoren möglichst konstant gehalten und gezielt der Einfluss der Werkzeugausführung in Zusammenspiel mit den Maschinenparametern untersucht. Dadurch können viele Faktoren einem Screening³ unterzogen und dann wenige Faktoren im Detail untersucht werden [101]. Dies hat den Vorteil, dass kein Parameter missachtet wird, der dann vielleicht doch einen großen Einfluss gehabt hätte, denn eine Extrapolation der Ergebnisse über den untersuchten Bereich hinaus ist nicht zulässig [101, S. 4].

² Die Einstellung der Faktoren wird als Stufen bezeichnet. Durch die maximale bzw. minimale Stufe eines Faktors wird der Versuchsbereich, auch Faktorraum genannt, eingeschränkt

³ Der Begriff Screening wird in der statistischen Versuchsplanung oftmals mit den Worten „sichten und ausdünnen“ beschrieben, wobei auf große Kontraste hingearbeitet wird. Zunächst sollten möglichst viele Parameter als Faktoren in den Versuchsplan aufgenommen sowie möglichst weite Stufenabstände gewählt werden.

4.1.1 Steuergrößen

In den kommenden Abschnitten erfolgt anfänglich eine Beschreibung der variablen Maschinenparameter. Im Anschluss daran werden Werkzeug- sowie Werkstückparameter vorgestellt. Dabei wird nach Vorstellung der Parameter jeweils eine Eingrenzung der Faktorräume vorgenommen. Signalgrößen werden – wenn auch nicht immer explizit aufgeführt – als Randbedingungen berücksichtigt.

4.1.1.1 Maschinenparameter

Da klassische Rundbürsten – ausgenommen Besatzmaterial mit Schleifmittel – lediglich mit den Spitzen arbeiten, gilt es die Werkzeuganstellung möglichst gering zu halten. Konkrete Vorgaben oder Richtwerte der Hersteller jedoch fehlen [63, 102, S. 9, 103, S. 9, 53, S. 22]. Die Literatur zur Anwendung Entgraten empfiehlt für Stahldrahtbürsten je nach Anordnung des Besatzes Zustelltiefen von 0,2 bis 2,0 Millimeter, für Kunststoffbesatz mit Schleifmittel etwa 1,0 Millimeter [56, S. 170]. Neben einer Erhöhung der Kraftkomponente auf das Werkstück ermöglicht die Werkzeugzustellung den Ausgleich von Unebenheiten. Bei Thiel und Przyklenk [69] erlauben Bürstenwerkzeuge vergleichbarer Ausführung bei einem Außendurchmesser von 200 Millimeter einen Ausgleich von Unebenheit im Bereich von 0,5 bis 1,5 Millimeter [69, S. 295]. Innerhalb der leitfadengestützten Experteninterviews wurden zur Werkzeuganstellung folgende Angaben gemacht, um nur einige Beispiele zu nennen:

- Bei allen Bürstenausführungen gilt als Faustformel: Die optimale Eintauchtiefe liegt bei etwa dem 1,5-fachen Durchmesser des Besatzes [Experte 1.2.8.14].
- Die Zustellung ist so „gering wie möglich und so hoch wie nötig“ zu wählen. Wenn die Bürste nur leicht mit den Drahtspitzen an das zu bearbeitende Teil zugestellt wird, verschleiben die Einzelspitzen schuppenartig und brechen nicht lang ab [Experte 1.2.6.11].
- „Die Zustelltiefe sollte nicht mehr als ein Zehntel der Besatzlänge betragen“ [Experte 2.2.5.9].
- Die Zustellung sollte im Bereich von 1 bis 2 Millimeter geregelt werden [Experte 2.2.3.15].
- Ein Richtwert ist, dass $\frac{2}{3}$ der Besatzhöhe als frei verbleiben sollten, um dem Besatz die Möglichkeit des Ausweichens und der Verformung zu ermöglichen [Experte 2.2.3.7].
- „Das Arbeiten funktioniert nur über die Spitze. Je mehr Druck zugegeben wird, desto mehr wird über die Flanke gearbeitet, was die Bürste zerstört“ [Experte 1.2.2.3].
- „Für das Entgraten von Metallen geht man auf maximal 3-fache Drahtstärke“ [Experte 1.2.12.17].
- Eine Kraftanstellung des Werkzeugs ist in der Praxis unüblich. Es besteht die Gefahr das Werkzeug zu stark zuzustellen. Ein Anschlagpunkt ist zu empfehlen [Experte 1.2.8.14].

Für die Einstellung der Drehzahl der experimentellen Versuche gilt ähnliches. Sollte der rückstandslose Abtrag mit niedrigen Stufeneinstellungen erreicht werden, so ist es für die Standzeit des Werkzeugs förderlich, diese nicht unnötig zu erhöhen [56, S. 170]. In der Praxis hingegen gibt die Antriebsmaschine oftmals die Werkzeugdrehzahl vor und ist nicht variabel [Experte 3.2.2.5].

Die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst die Wirtschaftlichkeit des Abtrags von WDVS in der Praxis. Gemeinsam mit der Werkzeug-Arbeitsbreite bestimmt der Faktor den Flächenabtrag pro Zeiteinheit. Die Dicke des WDVS-Aufbaus hingegen ist gemäß der geplanten Anwendung im Baggeranbaugerät nur für das Absaugsystem von Bedeutung. Geschwindigkeiten von etwa drei Meter pro Minute entsprechen den Möglichkeiten des Baggeranbaugeräts (vgl. Abschnitt 4.1.2.1). Der Stand der Technik des maschinellen

teil-selektiven Abbruchs von WDVS mit dem Löffel eines Baggers oder eines Sortiergreifers bewegt sich ebenfalls in diesem Rahmen. Dies geht aus einer Befragungen des Abbruchunternehmens Oettinger GmbH [104] sowie einer Studie des Fraunhofer IBP [2, S. 56] hervor. Örtliche Gegebenheiten, sowie die Fähigkeiten des Baggerführers und der Maschine selbst stellen entscheidende Randbedingungen dar und machen es nicht möglich den Stand der Technik auf einen festen Wert zu reduzieren. In den Hauptversuchen wird zur Werkzeugauswahl und Optimierung eine Vorschubgeschwindigkeit von drei Metern pro Minute vorausgesetzt und konstant gehalten. Zuvor sind dennoch grundlegende Untersuchungen zum Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit in kleinerem Spektrum notwendig.

Eine Abschätzung des Einflusses der Drehbewegung auf die Zielgrößen ist im Vorfeld der Untersuchungen nicht möglich. Obgleich aufgrund von Literaturrecherchen [65, 52] und den Experteninterviews nicht von einer Bedeutung auf die Zielgrößen auszugehen ist, repräsentiert der Abtrag von WDVS dennoch ein bisher nicht berücksichtigtes Anwendungsgebiet von Bürsten. Zu einer Eingrenzung kommt es demnach nicht.

Zusätzlich werden Empfehlungen für die Maschinenparametern jeder Werkzeugausführung von den Herstellern eingeholt. Diese sind aus Gründen der Übersichtlichkeit in Zusammenhang mit dem jeweiligen Werkzeugtyp im nachfolgendem Abschnitt 4.1.1.2 (vgl. Tabelle 5) wiedergegeben.

4.1.1.2 Werkzeugparameter

Die Auswahl von Bürstenwerkzeugen für die Versuchsdurchführung stellt aufgrund der enormen Anzahl möglicher Ausführungen eine Herausforderung dar. Weiter überlagern Sonderanfertigungen das Warenprogramm vieler Hersteller. Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten der Bürstenauswahl: Der Anwender gibt den Werkzeugaufbau vor, oder Bürstenhersteller empfehlen aus Erfahrungen heraus einen Werkzeugtyp.

Im Vergleich zur Außenfassade aus Beton weist WDVS eine geringe Festigkeit auf. Demnach ist eine Werkzeugausführung zu identifizieren, welche die Systembestandteile abzutragen vermag, aber dennoch flexibel genug ist, um Unregelmäßigkeiten der Fassade oder Schwankungen des Baggeranbaugeräts auszugleichen. Die Betonoberfläche soll nicht abgetragen werden, ebenso ist die Bürste so flexibel auszuführen, dass es aufgrund des Kontaktes mit dem Beton nicht zu übermäßigen Verschleiß kommt.

Auf Basis von Recherchen (vgl. Kapitel 3) sowie den Experteninterviews (vgl. Anhang A) wurden 16 Werkzeugtypen zwölf führender Hersteller technischer Bürsten für die experimentellen Untersuchungen identifiziert. Neben dem Besatzmaterial ist vor allem die Anordnung des Besatzes von Interesse, bestimmt diese maßgeblich die Werkzeugsteifigkeit. Um diesen Einfluss beschreiben zu können, werden vier Besatzanordnungen variiert, wobei Besatzmaterial mit Schleifmittel als eine Sonderform der geraden Anordnung angesehen wird. Aus Tabelle 4 kann eine Klassifikation der Versuchswerkzeuge nach Besatzanordnung entnommen werden, welche in Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 veranschaulicht sind. Einstellige Nummerierungen der Werkzeugtypen sind den Grundlagenversuchen an Versuchsstand I zuzuordnen. Die Werkzeugtypen 101 bis 113 hingegen ermöglichen bei den Hauptversuchen die Werkzeugauswahl für die potentielle Praxisanwendung im Baggeranbaugerät und werden in Versuchsstand II getestet. Überwiegend experimentell untersucht werden Werkzeugdurchmesser von 250 Millimetern. Dies entspricht einem Standardmaß, welches von einer Vielzahl von Unternehmen gefertigt werden kann. Acht der bei Versuchsstand II verwendeten Werkzeuge entsprechen Sonderanfertigungen und wurden speziell für die Untersuchung dieser Arbeit hergestellt. Es handelt sich dabei um die Werkzeugtypen 104, 105, 107 bis 110 sowie 112 und 113.

Tabelle 4 Abmessung und Kenngrößen der Versuchswerkzeuge

An- ordnung [-]	Werkzeug- typ [-]	Besatzmaterial** [-]	Besatz- durch- messer d_B [mm]	Freie Besatz- länge l_B [mm]	Bürsten- durch- messer d_W [mm]	Arbeits- breite b_A [mm]	Anzahl der Spitzen [-]	Besatz- dichte [1/cm ²]	Gewicht freie Besatz- länge [g]	Werkzeug- gewicht [g]	
Verzopt	2	Stahldraht hochfest (STH), Offener Zopf	0,63	32 - 33,5	135 - 138 135*	100	36858	87	1511 - 1764	3666 - 3919	
	102	Stahldraht (ST), Zopf mit Blume	0,5	41	238 250*	10*16	54000	45	5713	15933	
	105	Stahldraht Hochfest (STH), Durchgezopft	0,8	70,7	280	160	65023	46	14976	24180	
	108	Hochleistungs- stahldraht (HLS), Offener Zopf	0,35	60	252 250*	160	67200	53	7219	12370	
	112	Stahldraht (ST), Offener Zopf	0,8	50	252 250*	3*60	64388	45	9126	17454	
Versellt	106	vermessingter Stahldraht (STM), große Besatzdichte	0,38	60	253 250*	108	68932	80	3060	6507	
	107	Corddraht, Schrägstellung 5° gegen Laufrichtung	1	31	251 250*	160	8640	7	1782	7217	
	109	vermessingter Stahldraht (STM)	0,38	60	251 250*	160	129588	103	5990	11552	
	111	vermessingter Stahldraht (STM)	0,27	60,7	252 250*	55	44405	102	1609	3469	
Gewellt	1	Stahldraht (ST), glatt, unlegiert	0,3	27,5 - 28	130 - 131 130*	100	35515	87	1044 - 1107	2554 - 2617	
	101	Stahldraht (ST)	0,5	50	237 250*	2*80	80220	62	4506	10690	
	103	Stahldraht (ST), Vollbesatz	0,7	85	256 250*	220	12095	7	1151	4197	
Gerade	Glatt	3	Polyamid PA6	0,5	32,3	130	100	22441	55	772	1266
		104	Polypropylen	3	62,3	250	160	1760	1	558	1858
	Mit Schleifmittel	110	Schleifborsten SIC K 80	1,2	75	250	160	25358	20	870	3335
		113	Polyamid 6.12 SIC K46, maximaldicht	2	66,6	255 250*	160	3336	3	1119	2608

* Herstellerangaben, Unterschiede bei den Angaben ergeben sich aus den gemessenen Werten zur Versuchsdurchführung

** Herstellerangaben, Unterschiede bei der Abkürzung ergibt sich aus der Herstellerbezeichnung

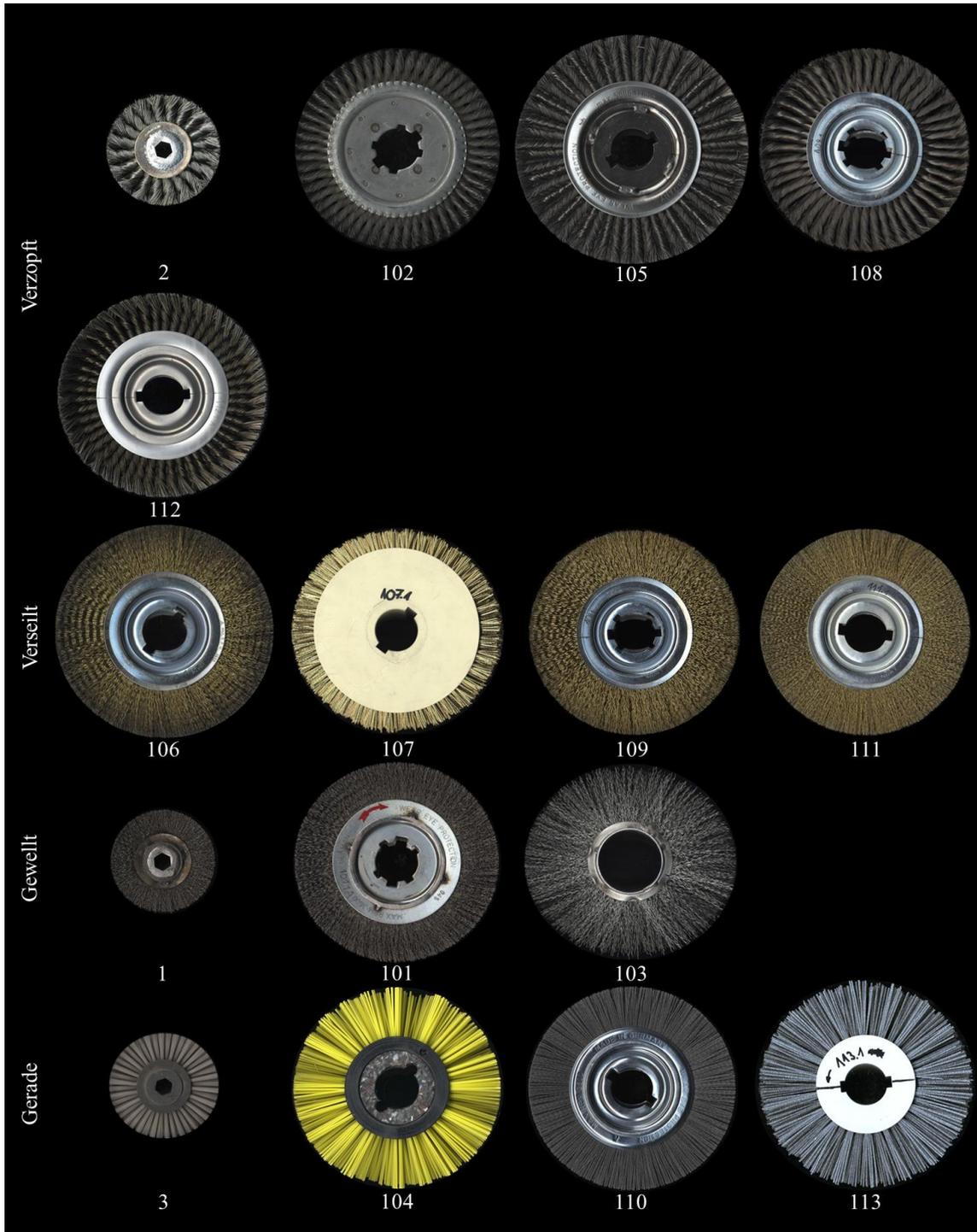


Abbildung 4-2 Werkzeugtypen der experimentellen Untersuchungen

Neben Werkzeugempfehlungen werden von den Experten Empfehlungen der Maschinenparameter für den Abtrag von WDVS vorgegeben (vgl. Tabelle 5). Es handelt es sich dabei um Prognosen aufgrund von Erfahrungen. Des Weiteren gilt es in den experimentellen Untersuchungen die maximal zulässige Drehzahl nicht zu überschreiten.

Tabelle 5 Herstellerempfehlungen zu den Maschinenparametern

Anordnung [-]	Werkzeug-typ [-]	Experte [Anonymisiertes Kürzel]	Empfohlene Zustellung [mm]	Empfohlene Umfangsgeschwindigkeit [m/s]	Max. zulässige Drehzahl [1/min]	Fixierung im Grundkörper	Standard Anwendungsgebiet	
Verzopft	2	1.3.9.15	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe	Lochscheibe	Polieren und Reinigen von Oberflächen, Entfernen von leichtem Rost	
	102	2.2.5.10 / 1.2.8.14	0 - 2	26 - 44	4500	Lochscheibe	Schwere Bürstarbeiten, z. B. Entgratarbeiten	
	105	1.2.2.3 / 2.2.3.15	≤ 2, am besten 0	12 - 20	5000	Lochscheibe	schweres Entgraten	
	108	1.2.3.6 / 1.2.8.14	0 - 2	5 - 15	3600	Lochscheibe		
	112	1.2.12.17	≤ 1,5	Keine Angabe	3600	Lochscheibe	Entfernung von Beschichtungen	
Versellt	106	1.2.6.11 / 2.2.3.7	≥ 1	ca. 40 / 15 - 20	3600	Kreisring	Entgraten	
	107	2.1.4.8	Keine Angabe	3 - 10	ca. 1150	Stopfen		
	109	1.2.3.6 / 1.2.8.14 / 2.2.3.7	0 - 2	15 - 20	3600	Lochscheibe	Entgraten	
	111	1.2.6.11	Keine Angabe	Keine Angabe	3600	Lochscheibe	Entgraten	
Gewellt	1	1.3.9.15	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe	Kreisring	Polieren und Reinigen von Oberflächen, Entfernen von leichtem Rost	
	101	2.2.5.10	Keine Angabe	24 - 36	3600	Kreisring	Entgraten von Röhren, Schnittkanten und Kleinteilen auf stationären Maschinen	
	103	1.1.1.1 / 1.1.1.2	Die Spitzen sollen nur aufsitzen	2,6 - 4	1000	Spirale	Betonindustrie, überflüssiger loser Beton wird (bspw. von der Schalung) abgekehrt	
Gerade Mit Schleifmittel	Glatt	3	1.3.9.15	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe	Stopfen	Reinigungsarbeiten auf unterschiedlichen Materialien
		104	3.1.7.13	Keine Angabe	Keine Angabe	500	Stopfen	Einsatz in Kehrmaschinen
	110	2.2.2.4	maximal 2 - 3	16 - 18	3600	Kreisring	Entgraten	
	113	2.2.6.12	möglichst gering	12	1500	Stopfen	Strukturierung von Weichholz, Oberflächenveredlung von Betonsteinen	



Abbildung 4-3 Bürstenwerkzeuge der experimentellen Untersuchungen

4.1.1.3 Werkstückparameter

Aus der Analyse verbauter WDVS (vgl. Kapitel 2) sowie der Rücksprache mit Herstellern – im Speziellen den Empfehlungen des Marktführers für die Herstellung von WDVS Sto SE & Co. KGaA⁴ [105] – gehen die Prüfkörperaufbauten der experimentellen Untersuchungen hervor (vgl. Tabelle 6). Die in der Praxis an Außenfassaden angebrachten Systeme sollen dabei möglichst umfangreich abgebildet werden. Unterschieden wird nach den Grundlagenversuchen sowie den Hauptversuchen bzw. Versuchsstand I und II. Entsprechende Überschneidungen bestehen bei den Aufbauten 13 und 106, 15 und 109 sowie 19 und 107. Als tragfähiger Untergrund dient Beton der Festigkeitsklasse C25/30, im Weiteren auch als WDVS-Aufbau 0 bezeichnet. Angaben zum Umgang und zur Zusammensetzung der Produkte sind den Datenblättern der Hersteller zu entnehmen. Eine Zusammenfassung liefert Anhang C. Für die Werkzeugauswahl sind hauptsächlich Kleber und Dämmstoff entscheidend. Die weiteren Systembestandteile werden bei einem Einsatz von Bürstenwerkzeugen im Baggeranbaugerät von einem vorangegangenen Fräswerkzeug entfernt. Die Nummerierungen 17 bis 20 sowie 107 und 108 bilden diesen Zustand (Teilaufbauten) ab. Da allerdings beim Einsatz des Baggeranbaugeräts an Gesamtaufbauten geringer Dicke (bis 3cm) nicht ausgeschlossen werden kann, dass Reste an Unterputz, Armierung sowie Zwischen- und Schlussbeschichtung trotz vorgelagertem Werkzeug verbleiben, gilt es dennoch Komplettaufbauten an WDVS zu untersuchen (vgl. Abschnitt 4.1.2.1). Anzumerken ist, dass der Klebstoff immer vollflächig auf den Dämmstoff aufgetragen wird. Dies ermöglicht einerseits die Bewertung des Messergebnisses Abtrag, andererseits ist davon auszugehen, dass eine Entfernung des WDVS mit geringerem beklebtem Flächenanteil ebenfalls – wenn nicht sogar besser – möglich ist, sofern dies bereits bei einer vollflächigen Verklebung erreicht werden kann.

Im Speziellen zu nennen ist die Verdübelung, als ein mechanisches Befestigungsmittel. Für eine entsprechende Untersuchung der Auswirkung einer Verdübelung werden die WDVS-Aufbauten 101 bis 106 erstellt, mit einer notwendigen Dämmstoffstärke von zehn Zentimetern. Ein vorgelagertes Werkzeug reduzierte den Dämmstoffaufbau im Versuchsstand II für die Bürstenwerkzeuge auf zwei Zentimeter (vgl. Abschnitt 5.2.3) und bildet somit die Praxis unter Verwendung des Baggeranbaugeräts ab.

Alle WDVS-Aufbauten werden entsprechend den anerkannten Regeln der Technik, geltenden Normen, Gesetze, Fachregeln und Richtlinien sachgemäß erstellt. Weitere Komponenten werden nicht untersucht.

⁴ Identifiziert werden sollten die meistverkauften Systembestandteile. Auch wenn keine konkreten Absatzzahlen herausgegeben wurden, hat dennoch eine Benennung typischer Komplettaufbauten stattgefunden. Zusammengefasst bestand im Vergleich mit vorhandenen Häufigkeitsangaben in der Literatur eine Übereinstimmung verwendeter Produktzuordnungen: Die Dämmplatten aus EPS und Mineralwolle werden überwiegend mineralisch verklebt, darauf wird in einem organischen oder mineralischen Unterputz ein Armierungsgewebe eingebettet. Die Schlussbeschichtung bildet ein organischer oder mineralischer Oberputz.

Tabelle 6 Übersicht der WDVS-Aufbauten der experimentellen Untersuchungen

WDVS-Aufbau	Kurzbeschreibung	Kleber und ggf. Befestigung				Wärmedämmstoff				Unterputz		Armierung	Zwischen- und Schlussbeschichtung		
		Sto Baukleber (Mineralisch)	StoLevel Uni (Mineralisch)	Sto Turbofix Mini (Klebschaum)	Sto Thermodübel (Schraubdübel)	Sto Dämmplatte Top 32 (EPS)	Sto Dämmplatte Hartschaum (EPS)	Sto Steinwolleplatte (Mineralwolle)	Dämmstoffdicke [cm]	StoLevel Classic (Dispersionsgebunden)	StoLevel Uni (Mineralisch)	Glasfasergitter-Gewebe (Maschenweite 6mm)	Sto-Putzgrund	StoLotusan K (Silikonharzputz)	StoSilico K (Silikonharzputz)
<i>Grundlagenversuche (Versuchsstand I)</i>															
0	Betonoberfläche C25/30														
1	Sto Therm Classic	X				X			2	X		X		X	
2	Sto Therm Classic	X				X			4	X		X		X	
3	Sto Therm Classic	X					X		2	X		X		X	
4	Sto Therm Classic	X					X		4	X		X		X	
5	Sto Therm Vario	X				X			2		X	X	X	X	
6	Sto Therm Vario	X				X			4		X	X	X	X	
7	Sto Therm Vario	X					X		2		X	X	X	X	
8	Sto Therm Vario	X					X		4		X	X	X	X	
9	Sto Therm Vario		X			X			2		X	X	X	X	
10	Sto Therm Vario		X			X			4		X	X	X	X	
11	Sto Therm Vario		X				X		2		X	X	X	X	
12	Sto Therm Vario		X				X		4		X	X	X	X	
13	Sto Therm Classic			X		X			2	X		X			X
14	Sto Therm Classic			X		X			4	X		X			X
15	Sto Therm Classic	X				X			2	X		X			X
16	Sto Therm Classic	X				X			4	X		X			X
17	Teilaufbau			X		X			2						
18	Teilaufbau			X		X			4						
19	Teilaufbau	X				X			2						
20	Teilaufbau	X				X			4						
<i>Hauptversuche (Versuchsstand II)</i>															
101	Sto Therm Classic			X	X	X			2 (10)	X		X			X
102	Sto Therm Mineral	X			X			X	2 (10)		X	X			X
103	Sto Therm Classic			X	X	X		X	2 (10)	X		X			X
104	Sto Therm Mineral	X						X	2 (10)		X	X			X
105	Sto Therm Classic			X		X		X	2 (10)	X		X			X
106	Sto Therm Classic			X		X			2 (10)	X		X			X
107	Teilaufbau	X				X			2						
108	Teilaufbau	X						X	2						
109	Sto Therm Classic	X				X			2	X		X			X
110	Sto Therm Mineral	X						X	2	X		X			X

4.1.2 Signal- und Störgrößen

Signalgrößen legen die Randbedingungen der experimentellen Versuchsdurchführung fest und sind in Zusammenspiel mit den Steuergrößen ebenfalls den Parametergruppen Maschine, Werkzeug sowie Werkstück zuzuordnen, wobei es vereinzelt zu Überschneidungen kommt. Die geplante Praxisanwendung der Bürstenwerkzeuge in einem Baggeranbaugerät definiert den Betriebsbereich maßgeblich. Inwieweit diese Signalgrößen durch Steuergrößen in die Vorbereitung und Durchführung der experimentellen Versuche mit eingeflossen sind, soll anhand der Gruppeneinteilung nachfolgend erläutert werden.

Für ein möglichst robustes System gilt es Störgrößen zu minimieren. Durch Versuche in der Werkstatt des Instituts TMB können atmosphärische Bedingungen wie Feuchtigkeits- und Temperatureinflüsse konstant gehalten werden. Die durch andere mögliche Störgrößen – wie Werkzeugenerwärmung und fertigungstechnische Unterschiede der Bürsten – hervorgerufene Streuung der Messwerte kann nicht verhindert werden. Um zuverlässige Aussagen über die Qualitätsmerkmale treffen zu können, werden die einzelnen Werte immer aus mehreren Messungen bestimmt und statistisch ausgewertet. Die dabei verwendeten Methoden werden in Kapitel 5 beschrieben.

4.1.2.1 Maschine

Da Bürstenwerkzeuge in der Praxis bisher nicht zum Abtrag von WDVS eingesetzt werden, existieren zum Zeitpunkt der Anfertigung der Arbeit keine auf dem Markt erhältlichen flexiblen Trägersysteme. Das Kooperationsprojekt BaDA⁵ lieferte den Betriebsbereich: Vorschub- und Umfangsgeschwindigkeiten sowie die Anpressung und Drehbewegung sind variabel und können auf der Baustelle eingestellt werden. Sie unterliegen lediglich einem Einstellbereich, der im Weiteren näher beschrieben wird.

Abbildung 4-4 zeigt den Aufbau des Baggeranbaugeräts, welches parallel zu dieser Arbeit innerhalb des Forschungsprojektes entwickelt wurde und die Positionierung von Bürstenwerkzeugen ermöglicht. Zu erkennen sind die zwei Trennwerkzeuge, ein Bürstenwerkzeug sowie eine vorgelagerte Fräse. Beide Werkzeuge sind von einer Einhausung umgeben, in welcher anfallende Späne gesammelt und abgesaugt werden können. Innerhalb des Forschungsprojektes konnte die Brauchbarkeit des Fräswerkzeugs für die Entfernung der Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung sowie Wärmedämmstoff von der WIMAG GmbH nachgewiesen werden, weshalb dies nicht Forschungsgegenstand dieser Arbeit ist. Die Entwicklung des Baggeranbaugerätes steht ebenso wenig im Fokus. Dennoch ist es aufgrund der experimentellen Untersuchungsergebnisse zu Anpassungen der ursprünglich geplanten Ausführung des Baggeranbaugerätes gekommen. Die Untersuchungen dieser Forschungsarbeit sowie die Entwicklungen im Forschungsprojekt sind als iterativ ablaufende Prozesse anzusehen. Da diese Anpassungen dennoch den Verlauf der experimentellen Versuchsdurchführung zum Abtrag von WDVS mit Bürstenwerkzeugen mitbestimmen, wird an entsprechender Stelle darauf Bezug genommen. Zu einer maßgeblichen Veränderung der Signalgrößen ist es allerdings nicht gekommen.

Die Abschätzung einer durchschnittlichen oder auch maximal möglichen Vorschubgeschwindigkeit, mit welcher das Bürstenwerkzeug durch das Baggeranbaugerät entlang dem Werkstück bewegt werden kann, gestaltet sich schwierig. Erfahrungswerte auf Basis von mehrfachem Einsatz auf Abbruchbaustellen bestehen nicht. Eine im Vergleich zum Stand der Technik wirtschaftliche Vorschubgeschwindigkeit von drei Metern pro Minute ist allerdings möglich und konnte in Versuchen bestätigt werden.

⁵ Das im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ vom BMWI geförderte Projekt („Universelles Baggeranbaugerät zum gezielten Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit integrierter pneumatischer Abförderung“) zwischen dem Unternehmen WIMAG GmbH und dem Forschungsinstitut TMB wurde im Juni 2019 abgeschlossen.

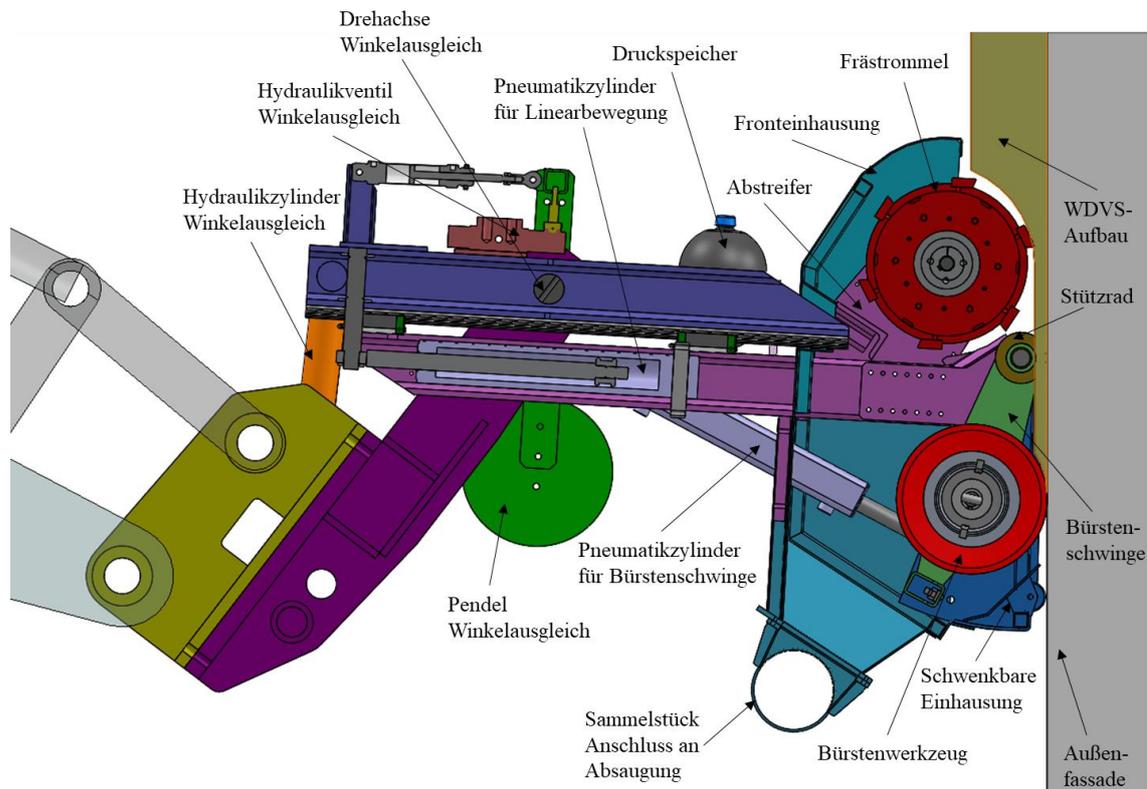


Abbildung 4-4 Darstellung des Baggeranbaugeräts [106]

Die Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs regelt der Maschinenführer, begrenzt wird diese durch die Baggerhydraulik. Denn mit einer Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs bei gleichbleibender Anstellung (größer null) geht eine Erhöhung der notwendigen Motorleistung einher. Aufgrund der Leistungsmessung der experimentellen Versuche ist bei branchenüblichen Abbruchbaggern allerdings nicht annähernd mit einer Erreichung der Leistungsgrenze zu rechnen. Nach Boser [107, S. 75] besitzen mit knapp 80 Prozent die meisten Abbruchunternehmen Hydraulikbagger der Dienstgewichtsklasse „ab 15 Tonnen“ und „ab 25 Tonnen“. Innerhalb der Praxisversuche ermöglichte bereits der Kompaktbagger E85 von Bobcat mit einem Betriebsgewicht von knapp über 8,5 Tonnen ausreichende Drehzahlen von 800 Umdrehungen pro Minute für das Bürstenwerkzeug sowie 400 Umdrehungen pro Minute des Fräasers.

Die pneumatische Anpressung des Baggeranbaugeräts über eine Linearführung erzeugt eine Vorspannkraft des Gesamtsystems von 4500 Newton, bei einer Arbeitsbreite des Bürstenwerkzeugs von 780 Millimetern. Die Anpressung des Gesamtsystems lässt sich allerdings nicht beliebig reduzieren. Allein durch das Werkzeuggewicht sowie der Antriebseinheit, durch die Auslenkung des Schwerpunkts und die Hebelverhältnisse in der Schwinge ergibt sich eine Mindestanpressung von etwa 450 Newton [106]. Daraus lässt sich für die innerhalb der experimentellen Untersuchungen getesteten Werkzeuge mit überwiegend 160 Millimeter Arbeitsbreite ein Einstellbereich von 92 bis 821 Newton errechnen.

Zusammengefasst werden den Signalgrößen der Parametergruppe Maschine keine Grenzen durch das Baggeranbaugerät vorgegeben. Diese ermöglicht eine Einstellung der Parameter Anstellung, Vorschubgeschwindigkeit, Drehbewegung und Drehzahl, welche mindestens denen des Versuchsstands II entsprechen. Vielmehr ergeben sich Begrenzungen der experimentellen Versuche durch den Aufbau des Versuchsstands II. Weitere Informationen zum Aufbau der Versuchsstände finden sich in Abschnitt 4.2.

4.1.2.2 Werkzeug

In Abschnitt 3.1.1 wurde bereits darauf hingewiesen, dass nicht alle Kombinationsmöglichkeiten der Ausführung von Rundbürsten fertigungstechnisch in einer Bürste untergebracht werden können, weshalb auf diese Begrenzung der Werkzeugausführung nicht weiter eingegangen wird. Vielmehr hat das Trägersystem in Form des Baggeranbaugeräts einen Einfluss auf die Werkzeugwahl. Bürsten eines Außendurchmessers von 250 Millimeter können dort optimal aufgenommen werden, wobei aufgrund der Einhausung ein Herunterfahren des Besatzes bis auf einen Werkzeugdurchmesser von 215 Millimeter möglich ist. Da Bürsten auf Kundenwunsch gefertigt werden, sind Anpassungen der Antriebswelle und der Arbeitsbreite, auch unter Einsatz von Stecksystemen, realisierbar. Infolgedessen ergeben sich keine Einschränkungen der experimentellen Versuche. Versuchsstand II ermöglicht eine Untersuchung von Bürsten eines Außendurchmessers bis 280 Millimetern – ein Mindestdurchmesser von 210 Millimetern ist notwendig – und gewährleistet dadurch einen Vergleich mit der Anwendung im Baggeranbaugerät.

Da Versuchsstand I mit möglichen Bürstendurchmessern von 115 bis 140 Millimetern der Grundlagenuntersuchung des Verhaltens von Bürstenwerkzeugen dient und nicht die Werkzeugwahl für die Praxisanwendung bestimmt, ist diesbezüglich keine direkte Werkzeugübertragung vorgesehen.

4.1.2.3 Werkstück

Eine Eingrenzung des Faktorraums Werkstück ergibt sich durch den Aufbau des Baggeranbaugeräts. Wird dieses vom Baggerfahrer von unten nach oben entlang der mit WDVS versehenen Gebäudeaußenfassade geführt, so werden die Bestandteile Schlussbeschichtung, Armierung, Unterputz und ein Teil des Dämmmaterials über ein Fräs Werkzeug gespant und anschließend abgesaugt. Die an der Außenfassade verbleibenden Systembestandteile – geklebtes Dämmmaterial – werden daraufhin von einem nachgelagerten Bürstenwerkzeug abgetragen und ebenfalls abgefördert. Dies geschieht in einem Arbeitsgang. Je nach Anstellwinkel ergibt sich dabei eine verbleibende Materialstärke von 15 bis 30 Millimetern hinter dem Fräs Werkzeug. Bei horizontal angestelltem Werkzeug greift das Fräs Werkzeug ab 22 Millimetern. Daraus leitet sich Anwendungsfall 1 (vgl. Abbildung 4-5) ab. Die Prüfkörper bzw. Werkstücke sind so aufzubauen, dass Bürstenwerkzeuge unterschiedlichster Ausführung auf den Abtrag von geklebtem Dämmmaterial (EPS und MW) untersucht und die Maschinenparameter optimiert werden können.

Die Dicken des Dämmstoffs im WDVS-Aufbau entscheiden dabei maßgeblich den Trennprozess. Weisen Neubauten häufig eine Dämmstoffdicke von 14 Zentimetern und mehr auf, so ist bei Altbauten mit einer geringeren Dämmstoffdicke zu rechnen. Wird nicht nach Baualter differenziert, so weisen etwa vier Prozent der außenwandgedämmten Wohngebäude in Deutschland eine Dämmstoffdicke von kleiner gleich zwei Zentimetern auf [15, S. 61]. Daraus ergibt sich Anwendungsfall 2: Ein Abtrag der Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung und ein Teil des Dämmmaterials durch das Fräs Werkzeug kann bei dieser Ausgangssituation nicht gewährleistet werden, das Bürstenwerkzeug muss in der Lage sein alle Systembestandteile eines WDVS abtragen. Für die experimentellen Versuche müssen demnach ebenfalls Werkstücke mit Komplettaufbauten aller Systembestandteile von WDVS erstellt werden.



Abbildung 4-5 Anwendungsfälle der Untersuchungen, links: WDVS-Aufbau 107&108 und rechts: WDVS-Aufbau 109&110

Dient Anwendungsfall 1 – mit dem Dämmstoff EPS – der Optimierung der Maschinenparameter unterschiedlicher Werkzeuge, so stellt die Bewältigung von Anwendungsfall 2 ein Ausschlusskriterium dar. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass Werkzeuge, welche nur in der Lage sind Anwendungsfall 1 zu erfüllen, dennoch als ungeeignet für den Abtrag von WDVS einzustufen sind. Hintergrund stellt die im Sinne einer kundenfreundlichen Nutzung des Baggeranbaugeräts entstandene Anforderung dar, dass ein Werkzeugwechsel möglichst auf ein Minimum zu begrenzen ist. Für einen Wechsel der Bürstenwerkzeuge im Baggeranbaugeräts ist nach Angaben der WIMAG GmbH mit Stillstandszeiten von ein bis zwei Stunden zu rechnen [106]. Ein Spektrum unterschiedlichster Ausführungsarten von Werkzeugen für jeden möglichen Anwendungsfall widerspricht diesem Kriterium. Ein Bürstenwerkzeug mit großem Anwendungsspektrum steht im Vordergrund.

4.1.3 Zielgrößen: Qualitätsmerkmale

Neben der Identifikation von Eingangsgrößen ist die Wahl von Zielgrößen für eine statistische Versuchsplanung der experimentellen Untersuchung von entscheidender Bedeutung. Diese ermöglichen in Form von Qualitätsmerkmalen die Bewertung der Ergebnisse [101]. Nachfolgend wird auf die Wahl der Qualitätsmerkmale sowie deren Abgrenzung und Messbarkeit eingegangen. Alle erfassten Zielgrößen können Abschnitt 4.2.3 entnommen werden. Sogenannte „error states“ werden ebenfalls beobachtet.

4.1.3.1 Abtrag

Bei der Bürstenbearbeitung metallischer Werkstücke wird unter Abtrag nach Wolf [49] und Przyklenk [52] die Dicke der tatsächlich am Werkstück abgetragenen Schicht verstanden. Diese Definition soll nicht übernommen werden. Vielmehr steht für eine sortenreine Entsorgung der mineralischen Fassade beim Abbruch – aber auch im Falle einer Gebäudesanierung – die Entfernung aller Systembestandteile des WDVS im Vordergrund. Es gilt die mineralische Außenfassade von WDVS – insbesondere von brennbaren Bestandteilen wie EPS sowie weiteren nicht mineralischen Fraktionen – zu separieren. Die Trennung der einzelnen Systembestandteile des WDVS ist hingegen nicht vorrangig, erfolgt heutzutage meist eine thermische Verwertung. Daraus lassen sich für die experimentellen Untersuchungen zwei Abtrags-Kriterien ableiten (vgl. Abbildung 4-6).

Je besser die Trennung der Abfallfraktionen, desto größer das Einsparpotential. Weisen die Vielzahl der auf dem Markt erhältlichen Klebstoffe eine mineralische Basis (überwiegend Zement) auf, so verhindern vor allem die übrigen Systembestandteile des WDVS eine Entsorgung der mineralischen Außenfassade als sortenreiner Abfall. Rückstände an Wärmedämmstoff oder sogar weiteren Deckschichten führen folglich zu einem Ausschluss der untersuchten Bürstenwerkzeuge. Wohingegen Rückstände an Kleber möglichst zu vermeiden sind. Die untersuchten Werkzeuge werden deshalb anhand des Abtragsergebnisses Kleber bewertet, wengleich ebenfalls die Kontinuität der erbrachten Ergebnisse von Belangen ist. Wird bei der Ergebnisdarstellung der Terminus Abtrag verwendet, so ist darunter der Abtrag des Klebers zu verstehen.

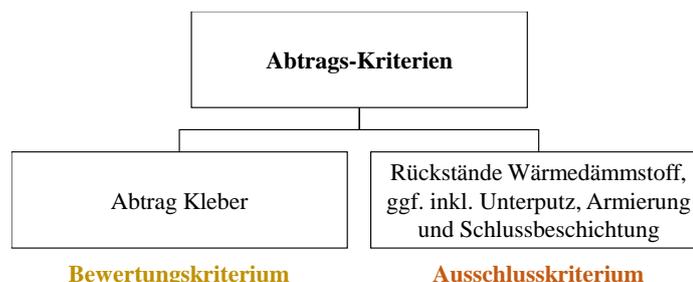


Abbildung 4-6 Abtrags-Kriterien zur Beurteilung der Ergebnisse

Eine Messung des erreichten Abtrags ist notwendig, um die Ergebnisse unterschiedlicher Parametereinstellungen zu vergleichen und zu beurteilen. Dazu wurde ein Verfahren zur visuell optischen Auswertung entwickelt. Als Messgröße dient der flächenmäßige Rückstand der Systembestandteile des WDVS. Unterschieden wird zwischen Abtrag Kleber und Rückständen an Dämmstoff, gegebenenfalls inkl. Unterputz, Armierung und Schlussbeschichtung. Mit einem Verbleib von Dämmstoff geht aufgrund der vollflächigen Verklebung auch immer ein nicht Abtrag an Kleber mindestens gleicher Fläche einher. Die Abweichung der Abtragsmessung von der im Prozess angestrebten Idealform von 100 Prozent Abtrag (keinerlei Rückstände) kennzeichnet die Qualität des vom Werkzeug unter Einstellung bestimmter Maschinenparameter erreichten Ergebnisses. Methodische Unterschiede je nach Versuchsstand und Werkstück der experimentellen Untersuchungen bestehen nicht.

Für die Messung des Abtrags wird in einem ersten Schritt der Kleber, ausgenommen der in den Versuchen verwendete und von Haus aus gelbe Kleber auf Kunststoffbasis (Sto Turbofix mini), mit Pigmenten⁶ eingefärbt. Dies ermöglicht bei der Auswertung eine Differenzierung des sonst grauen Klebers von der ebenso grauen Betonoberfläche. In einem zweiten Schritt wird das Werkstück, der mit WDVS versehene Betonuntergrund, vor und nach der Versuchsdurchführung bildlich festgehalten. Zur Auswertung des Bildmaterials wird das Programm Gimp 2.8 verwendet, wobei wie folgt vorgegangen wird: Nachdem das Bild im Programm geladen wurde, wird die Farbsättigung erhöht, sodass eine klare Trennung der einzelnen Bestandteile des Werkstücks besteht. Die Funktion „Farben vertauschen“ ermöglicht eine weitere Abgrenzung der Rückstände von der grauen Betonoberfläche. Als Zielfarbe wird eine – sich vom Grau der Betonwand gut zu unterscheidende – Farbe gewählt, im vorliegenden Fall Grün. Als Quellfarbe ist die mit Pigmenten eingefärbte Klebefläche zu wählen. Um nun das Verhältnis von Rückständen zu abgetragenen Bereich ermitteln zu können, müssen die Farben zusätzlich geglättet werden. Grund dafür ist, dass die grünen Flächen meist immer noch in leicht unterschiedlichen Grüntönen dargestellt werden. Dies erfolgt in zwei Stufen, wobei zuerst die Helligkeit (minimal) und der Kontrast (maximal) eingestellt werden. Danach wird die Farbzahl festgelegt, wodurch dann das Bild nur noch aus zwei Farbtönen besteht. Um nun das Verhältnis der Flächen zueinander bestimmen zu können, muss noch die Anzahl grüner und schwarzer Pixel ermittelt werden. Rückstände weiterer Systembestandteile lassen sich äquivalent ermitteln.

Um die Aussagekraft der Auswertung sowie die Fehleranfälligkeit der Messmethode zu prüfen, wurde ein Versuchsdurchgang exemplarisch fünfmal ausgewertet, wobei ebenfalls Helligkeiten, Schwellenwerte und Kontraste unterschiedlichen Einstellungen unterlagen. Bei einem Mittelwert des Abtrags von 87,7 Prozent betrug die Varianz der Ergebnisse 0,28 Prozent, woraus sich eine Standardabweichung von 0,53 Prozent ergibt. Für alle weiteren experimentellen Versuche werden die Einstellungen identisch gewählt.

Die infolgedessen erhaltenen Bilder sind, bei gleicher Größenskala und nach der Größe Abtrag bzw. Rückständen weiterer Systembestandteile geordnet, in der folgenden Abbildung 4-7 exemplarisch zusammengestellt. Grüne Felder stellen dabei Bereiche dar, in welchem kein Abtrag stattgefunden hat und gegebenenfalls Rückstände weiterer Systembestandteile verblieben sind, wohingegen schwarz hinterlegte Bereiche die Betonoberfläche abdecken. Da das dargestellte Werkstück mit den WDVS-Aufbauten 107 (Dämmstoff EPS) und 108 (Dämmstoff MW) versehen ist, gilt es zwischen Abtrag EPS und Abtrag MW zu differenzieren. Bereiche, welche vom Werkzeug nicht abgedeckt wurden, gibt es innerhalb des Bildausschnittes nicht.

⁶ Zum Anrühren des Klebstoffs mit Wasser werden vier Gewichtsprozent des Klebers als Pigmente der Farbe Magenta zugeführt. Die Wahl der Pigmente sowie das Mischungsverhältnis wurden zuvor mit der Johannes GERSTAECKER Verlag GmbH, einem Handel für Künstlerbedarf, abgesprochen. Diese können auf Erfahrungen im Bereich „Einfärben von Betonen“ zurückgreifen, wobei bezogen auf den Zementanteil vier bis fünf Prozent Pigmente als unbedenklich für die Festigkeit einzustufen sind [108]. Ein Unterschied der experimentellen Ergebnisse bei Verwendung von Kleber mit und ohne Zusatz an Pigmenten konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Von einem Einfluss der Pigmente auf die Festigkeit des Klebers ist demnach nicht auszugehen.

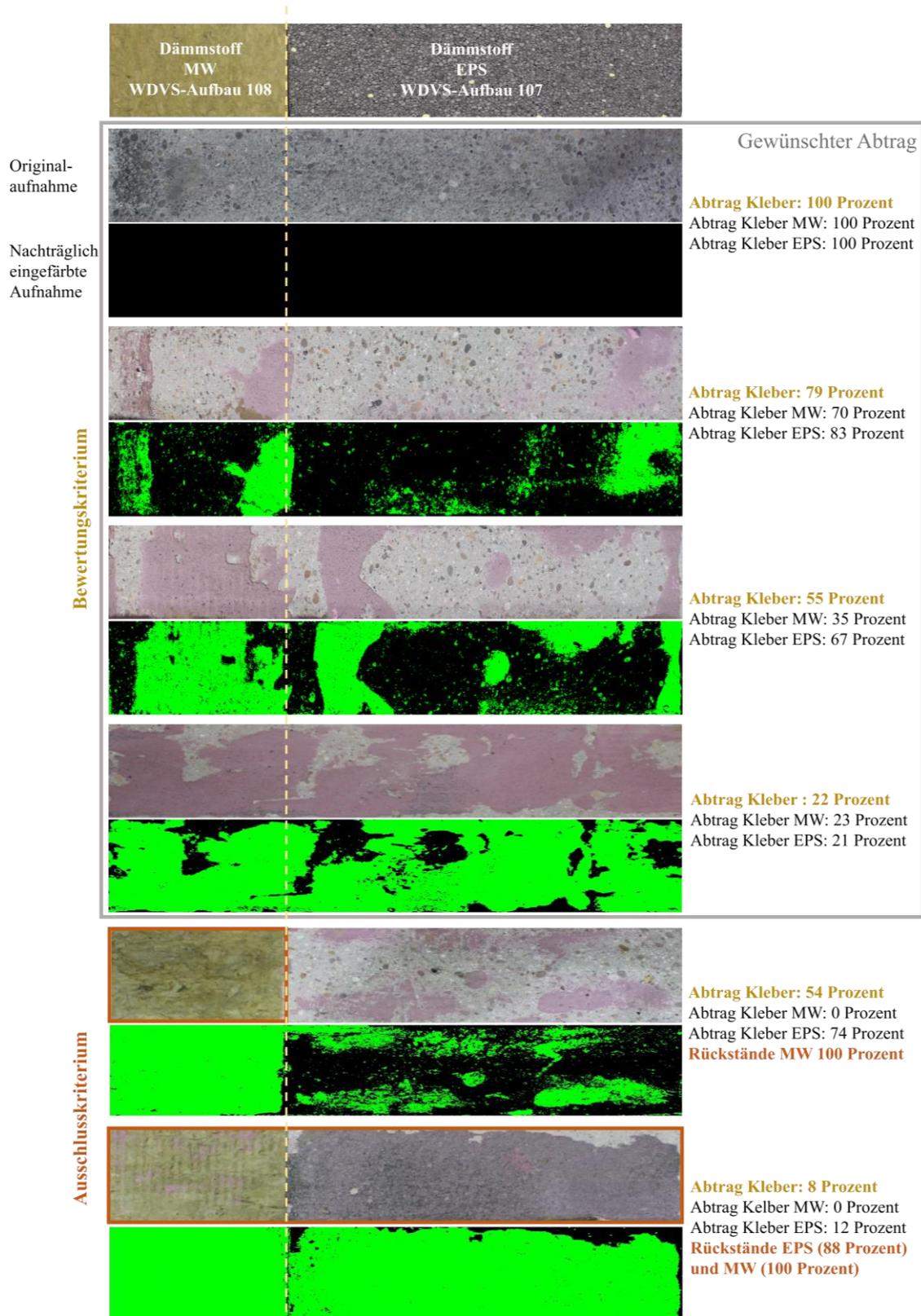


Abbildung 4-7 Veranschaulichung der Messergebnisse des Qualitätsmerkmals Abtrag (Draufsicht)

Im weiteren Verlauf wird bei der Ergebnissbewertung der Terminus „gewünschter Abtrag“ verwendet, worunter die rückstandslose Entfernung aller Systembestandteile bis hin zum Dämmmaterial verstanden wird. Kleberrückstände hingegen werden aufgrund ihrer häufig mineralischen Basis geduldet. Sollte es sich dennoch um kunststoffhaltigen Kleber handeln, so sind die Volumenanteile bei der Entsorgung vergleichsweise gering. Erhebliche Auswirkungen auf die Entsorgungskosten demnach nicht zu erwarten.

4.1.3.2 Werkzeugverschleiß: Relativer Massenverlust

Durch das Auftreffen des Besatzes auf dem Werkstück wird Verschleiß hervorgerufen. Beim Bürstspanen überwiegen der Reibungverschleiß sowie der Verschleiß durch mechanische Überbeanspruchung (vgl. Abschnitt 3.3.3). Bei Ersterem arbeitet sich der Besatz entlang seiner freien Höhe ab [56, S. 167]. Über eine Messung der Durchmesseränderung des Werkzeugs lässt sich diese Größe erfassen. Ein Querlegen des Besatzes als Resultat plastischer Verformung sowie das Ausbrechen von Einzeldrähten hingegen sprechen für eine fehlerhafte Anwendung und/oder unpassende Betriebsparameter und lassen sich nur optisch ermitteln. Nichtsdestotrotz kann ebensolche Überbeanspruchung aufgrund des neuartigen Einsatzes von Bürsten zum Abtrag von WDVS nicht ausgeschlossen werden. Eine Verschleißbewertung anhand der Änderung des Werkzeugdurchmessers ist somit nicht zweckdienlich. Hinzu kommt, dass – aufgrund von Zentrifugalkräften – ein Aufrichten des Besatzes im Laufe der Versuchsdurchführung möglich ist. Zur Verschleißbewertung wird daher der Massenverlust als messbare Größe herangezogen. Die massenmäßige Verschleißbetrachtung erfolgt durch Wägung vor und nach jedem Einzelversuch. Je nach Werkzeugtyp und Masse sind unterschiedliche Waagen im Einsatz (vgl. Abschnitt 4.2). Die Gewichtserfassung der Werkzeuge erfolgt sowohl vor als auch nach deren Säuberung mit Druckluft, sodass der Einfluss von Materialrückständen weitestgehend reduziert ist. Um eine Vergleichbarkeit der Werkzeugausführungen untereinander zu schaffen, dient der relative Massenverlust als Bewertungskriterium. Die Massenänderung des Bürstenwerkzeugs während eines Versuchsdurchgangs wird auf die Gesamtmasse der freien Besatzhöhe bezogen. Der absolute Massenverlust gibt folglich die Änderung – resultierend aus einem Versuch – wieder. Abbildung 4-8 veranschaulicht dies bildlich. Der Abnutzungsbereich der freien Besatzlänge zweier Werkzeugtypen des Versuchsstands I ist ersichtlich.

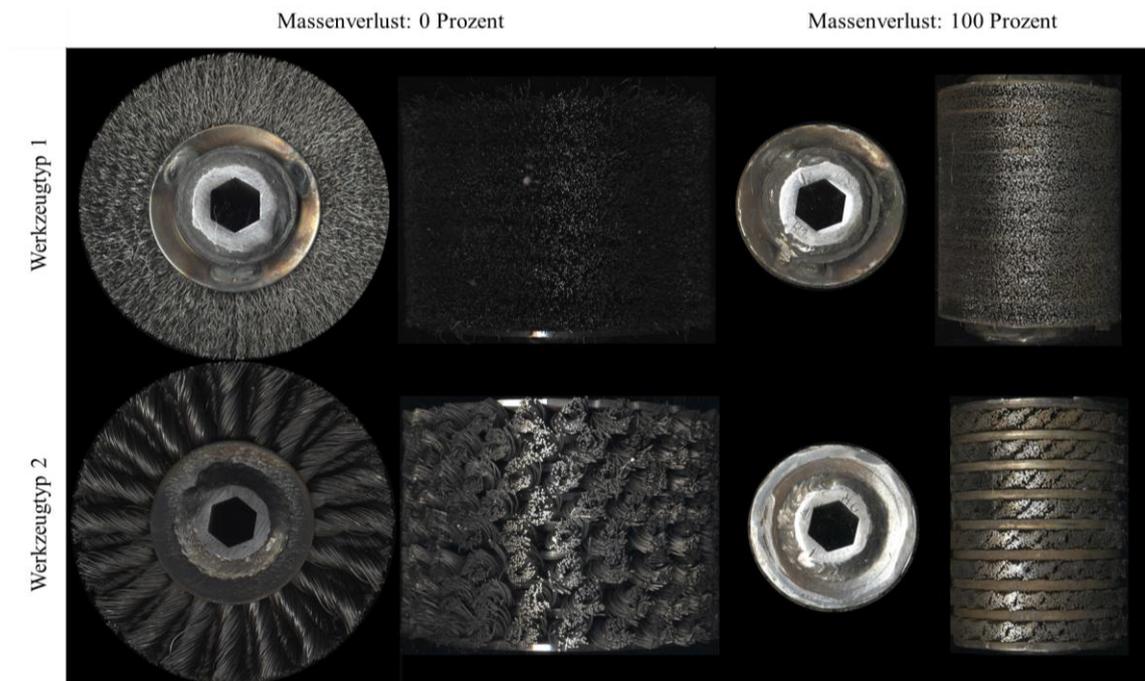


Abbildung 4-8 Veranschaulichung der Verschleißbewertung anhand des absoluten Massenverlusts der freien Besatzhöhe

4.2 Aufbau der Versuchsstände und Messtechnik

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt die Beschreibung der Versuchsstände. Es werden zudem Messmethoden vorgestellt, bevor dann in Abschnitt 4.3 auf die Versuchsplanung sowie die einzelnen Versuchspläne eingegangen wird.

Alle Rundbürsten benötigen eine Rotationsbewegung, um den Besatz zum Eingriff zu bringen. Für einen Ausgleich der Änderung des Werkzeugdurchmessers – infolge der Abnutzung des Besatzmaterials – genügt im einfachsten Fall eine starre Verstellmöglichkeit der Bürstenausrichtung gegenüber dem Werkstück (Versuchsstand I) oder aber eine Kraft-Anstellung (Versuchsstand II). Anders als bei konventionellen Bürstenanwendungen in Durchlaufanlagen wird für den Abtrag von WDVS nicht das Werkstück, sondern das Werkzeug bewegt. Bei den experimentellen Versuchen wird dieses über das Werkstück geführt. Es tritt dabei erst die Bürste kurzzeitig in Kontakt mit der Betonoberfläche bevor sie dann in den WDVS-Aufbau eindringt. Hierbei wird grundsätzlich das Ziel verfolgt, bei möglichst geringem Verschleiß in kürzester Zeit ein möglichst sortenreines Trennergebnis – den gewünschten Abtrag – zu erzielen. Die Verwendung von Kühlmittel während der Versuchsdurchführung ist dabei nicht notwendig.

4.2.1 Versuchsstand I (Grundlagenversuche)

Eine Grundlagenuntersuchung der Maschinen- und Werkstückparameter erfolgt an Versuchsstand I (vgl. Abbildung 4-9). Eine angepasste Flächenbearbeitungsmaschine vom Typ FR200 der Firma Von Arx AG ermöglicht den Werkzeugantrieb, wobei das vorhandene Trägersystem demontiert wurde. Dadurch können Werkzeuge mit einer Arbeitsbreite bis 200 Millimeter sowie einem Durchmesser von 115 bis 140 Millimeter untersucht werden. Die Leistung des Werkzeug-Hauptantriebs beträgt 2,2 Kilowatt. Es steht eine Drehzahl von 1636 Umdrehungen pro Minute zur Verfügung, welche nicht verstellbar ist.

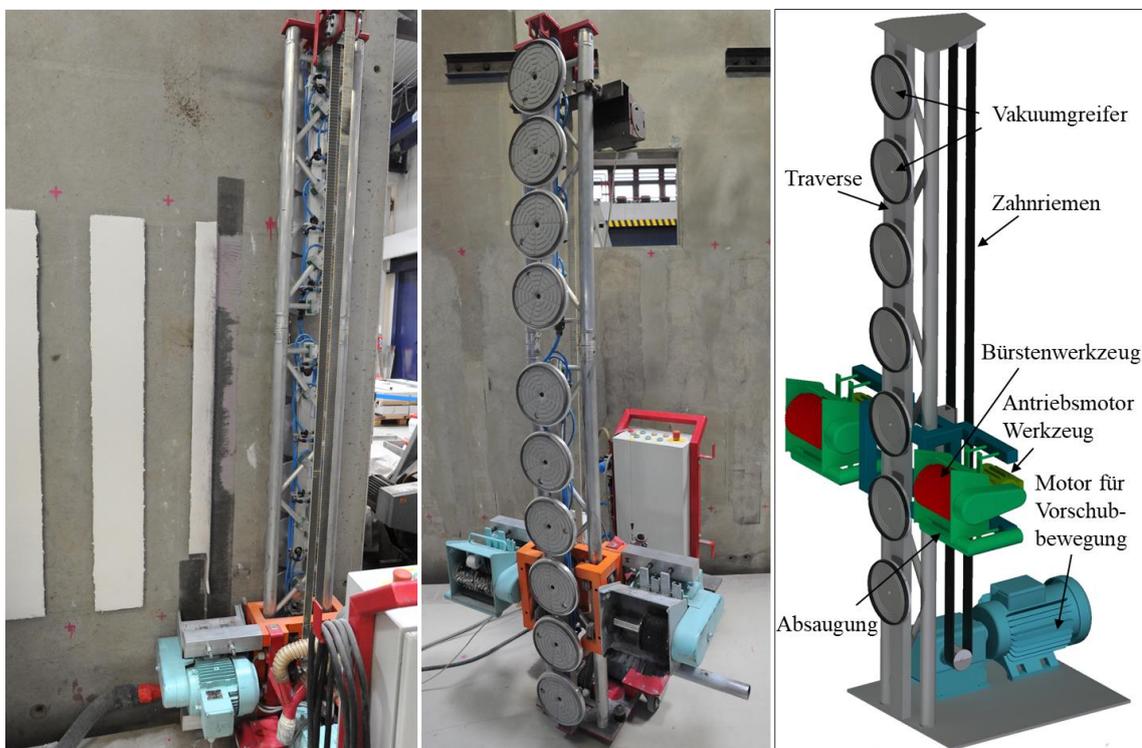


Abbildung 4-9 Bildliche und schematische Darstellung des Versuchsstands I für die Grundlagenuntersuchungen der Vorversuche

Entlang einer Traverse (Typ: Naxpro-Truss FD 32, Strecke 2500 Millimeter) kann das Werkzeug parallel zur Bearbeitungsfläche verfahren werden. Mehrere gleichmäßig entlang der Traversenhöhe verteilte Vakuumsaugplatten dienen der Aussteifung des Systems und gewährleisten eine gleichmäßige Zustellung des Werkzeugs zur Betonoberfläche während der Versuchsdurchführung. Die Werkzeugzustellung ist dabei stufenlos über Schraubgewinde einstellbar, wobei innerhalb der Vorversuche an Versuchsstand I dreistufig variiert wird. Ein weiterer Motor erlaubt unter Verwendung eines Zahnriementriebs eine lineare Bewegung mit einstellbaren Vorschubgeschwindigkeiten. Der Stellbereich für die Vorschubgeschwindigkeit liegt zwischen 0 und 3000 Millimeter pro Minute.

Als Absaugeinheit dient ein Nass-/Trockensauger der Firma Kärcher (Typ: NT 55/2 Tact² Me I) mit einer Leistung von 2,4 Kilowatt. Der Saugschlauch wird über eine Verrohrung an die bestehende Einhausung des Werkzeugantriebs angeschlossen. Die Temperatur in der Werkstatt liegt im Mittel bei 22 Grad Celsius. Bei den Prüfkörperaufbauten des Versuchsstand I handelt es sich um WDVS-Streifen der Maße 1450 x 200 Millimeter. Diese sind auf einer Betonwand der Festigkeitsklasse C25/30 aufgebracht. Pro Streifen sind zwei Versuche möglich.

Sobald der Versuchsstand gegenüber dem Werkstück ausgerichtet ist, erfolgt die Ansaugung der Traverse über die Vakuumsaugplatten. Erst nach erfolgreicher Ausrichtung und Ansaugung des Systems ist eine Zustellung des Werkzeugs möglich. Die Parameter Drehbewegung und Vorschubgeschwindigkeit sind am Schaltschrank einstellbar. Während eines Versuchs wird das Werkzeug von unten nach oben durch den WDVS-Aufbau bewegt. Nach Durchlaufen des obersten Punkts gilt der Versuch als beendet. Das Werkzeug wird angehalten, von der Betonwand abgelöst, ohne weiteren Kontakt zum Werkstück heruntergefahren und ausgebaut sowie vermessen. Des Weiteren erfolgt eine Erfassung des Abtragsergebnisses sowie der Temperaturen am Werkzeug und Werkstück.

4.2.2 Versuchsstand II (Hauptversuche)

Der Versuchsstand II, mit deutlich komplexerem Versuchsablauf, dient hauptsächlich dem Werkzeugvergleich bzw. der Werkzeugauswahl inkl. verschleißoptimaler Maschinenparameter. Dazu wird eine umgebaute Bodenfräse (Typ: CT 320, Leistung des Werkzeugantriebs 18,5 Kilowatt) der Firma CONTEC GmbH verwendet. Das Maschinengehäuse der Bodenfräse wurde ebenfalls adaptiert. Zur automatisierten Führung der Maschine kommt ein Trägersystem, bestehend aus Stahlprofilen und Linearachsen, zum Einsatz. Abbildung 4-10 stellt den Versuchsstand in mehreren Bildern dar, wobei die sonst als Einhausung fungierenden Makrolonplatten für eine bessere Darstellung entfernt wurden. Die Werkzeugeinheit wird während eines Versuchs entlang der Traverse über den Werkstückaufbau geführt. WDVS-Aufbauten der Fläche 1000 x 160 Millimeter werden durchfahren, als Untergrund dient ein Betonkörper der Festigkeitsklasse C25/30.

Die Vorschubbewegung übernimmt ein Elektromotor, welcher eine Kugelumlaufspindel antreibt. Der Stellbereich für die Vorschubgeschwindigkeit liegt zwischen 0 und 10000 Millimeter pro Minute. Eine Steuerung ist in 50 Stufen mit jeweils einem Abstand von 200 Millimetern pro Minute möglich. Die vertikale Verstellung der Werkzeuggrommel inklusive Maschinengehäuse innerhalb der Einhausung geschieht manuell mit Hilfe einer Lineareinheit. Die Werkzeuganstellung gegenüber dem Werkstück hingegen erfolgt über ein elastisches Aufhängungskonzept: Maschinengehäuse inklusive Motor werden orthogonal zum Werkstück über einen Seilzug mit Gegengewichten ausschließlich durch das Eigengewicht auf das Werkstück gepresst. Ein Kippgelenk zwischen der starren Aufhängung und dem Gehäuse ermöglicht dies. Alternativ ist eine Zustellung – vergleichbar mit Versuchsstand I – möglich.

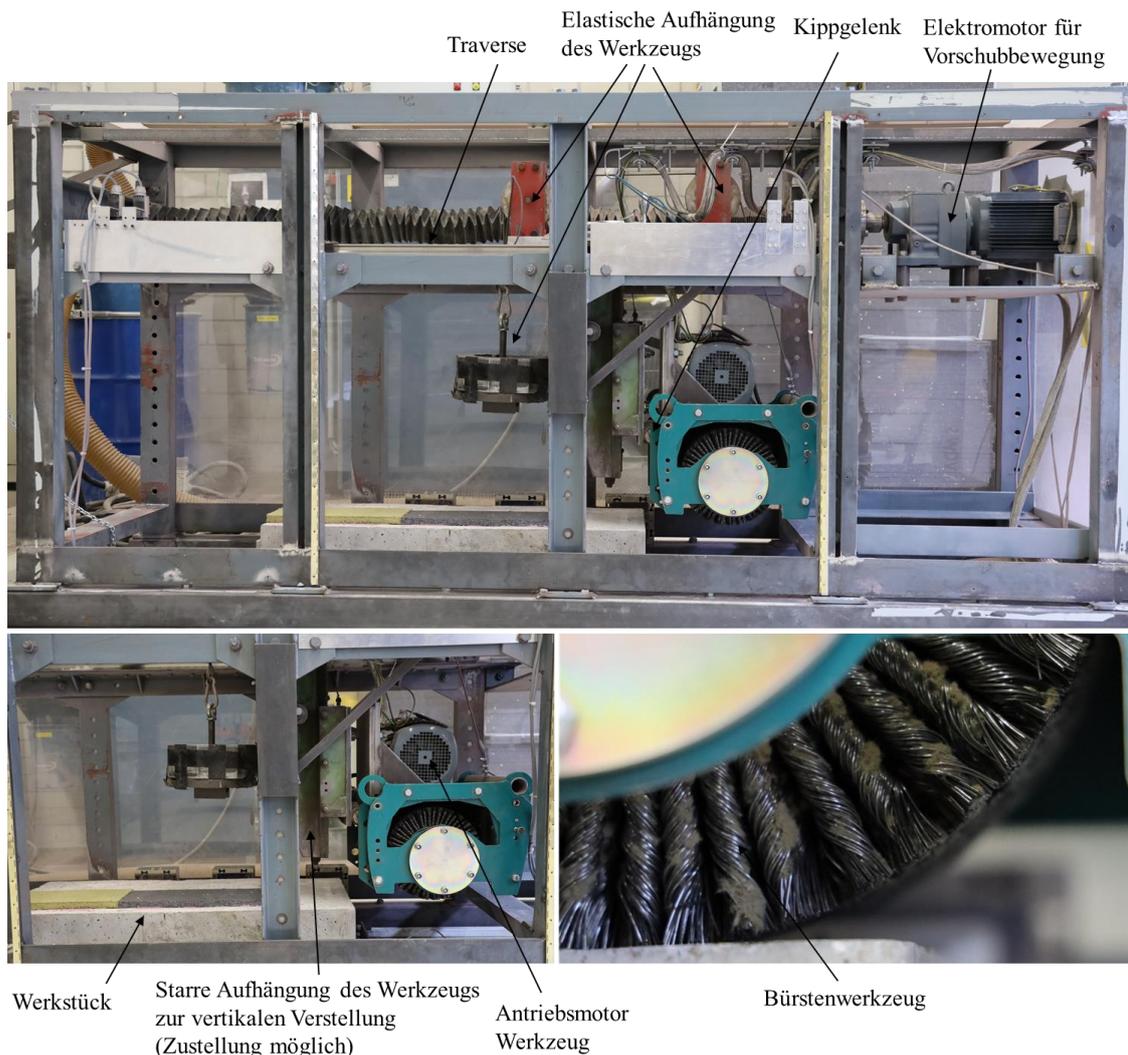


Abbildung 4-10 Bildliche Darstellung des Versuchsstands II zur Werkzeugauswahl

Zur Drehzahlsteuerung der Werkzeugtrommel und der Vorschubbewegung werden zwei Frequenzumrichter (Typ: Hitachi WJ200-075 H und Hitachi WJ200-0110 HF) eingesetzt. Die Werkzeugdrehzahl lässt sich zwischen 0 und 2440 Umdrehungen pro Minute in 100 Stufen einstellen und wurde mithilfe eines Drehzahlmessers bestimmt. Neben der Drehzahl ist ebenfalls die Drehbewegung einstellbar. Zur Reduktion der Staubimmission wird während der Versuche das Abtragsgut abgesaugt.

4.2.3 Messtechnik

Das Vorgehen zur Messdatenaufnahme an den Versuchsstände ist grundsätzlich identisch. Lediglich Versuchsstand II ermöglicht über Sensoren die Erfassung weiterer Zielgrößen, wie der Motorleistung (über einen der beiden Frequenzumrichter) sowie auftretende Kräfte am Prüfkörper. Letzteres überprüft die Kraftanstellung des Werkzeugs und gestattet somit die Regelung des elastischen Aufhängungskonzepts. Alle zur Verfügung stehenden Messdaten werden während eines Versuchsablaufs kontinuierlich aufgezeichnet. Zusammengefasst können die in Tabelle 7 aufgeführten Zielgrößen erfasst werden.

4.3 Versuchsplanung und Durchführung

Tabelle 7 Zielgrößen und Messmittel der experimentellen Untersuchungen

Zielgrößen	Einheit	Messmittel	Auflösung	Genauigkeit
Qualitätsmerkmal Abtrag	[%]	Fotoauswertung, Messschieber	Vgl. Abschnitt 4.1.3.1	0,529 %
Qualitätsmerkmal Massenverlust	[g]	Präzisionswaage ATP Messtechnik KB-10K-0.5N, Tischwaage Soehnle S 20 2760	bis 10100 g bis 20000 g	0,05 g* 1 g*
Durchmesseränderung Werkzeug	[mm]	Digital Messschieber, Messschieber, Fotoauswertung	0 – 150 mm 0 – 300 mm -	0,03 mm* 0,05 mm* -
Plastische Verformung des Besatzes	[mm] [mm] [-]	Digital Messschieber, Messschieber, Fotoauswertung	0 – 150 mm 0 – 300 mm -	0,03 mm* 0,05 mm* -
Versuchsbeschreibung	[-]	Fotoauswertung, Videoaufzeichnung, Versuchsprotokoll	- - -	- - -
Temperaturoentwicklung an Werkzeug und Werkstück	[°C]	Wärmebildkamera FLIR Systems (Typ: 1558790)	0 ... 300 °C	± 2 %*
Motorleistung	[kW]	Frequenzumrichter Hitachi WJ200-0110 HF	0-400 Hz	± 0,5 %*
Kraftverlauf Prüfkörper/ Messung der Rotationskräfte	[kg]	4 Kraftmesssensoren KD40s ME-Meßsysteme, verschraubt auf einer Stahlplatte (S235) unter dem Werkstück	bis 1000 N	± 0,1 %*

*Herstellerangaben

4.3 Versuchsplanung und Durchführung

Die beschriebenen Versuchsstände und die Messtechnik erlauben die gezielte Untersuchung von Einflussfaktoren der Parametergruppen Maschine, Werkzeug und Werkstück. Versuchsdurchführungen sind aber immer auch mit Fehlern und Störungen behaftet, bedingt durch zufällige Abweichungen, so etwa infolge nicht gezielt veränderbarer Eingangsgrößen. Daher führt die Wiederholung eines einzelnen Versuchs auch unter scheinbar gleichen Bedingungen zu oftmals unterschiedlich streuenden Ergebnissen. Demzufolge ist es von großer Bedeutung, Versuche auf einer mathematisch-statistischen Grundlage durchzuführen, was durch eine statistische Versuchsplanung gewährleistet werden kann [109]. Zur Erstellung entsprechender Versuchspläne vor der Versuchsdurchführung kommt das kommerzielle Softwareprogramm JMP des SAS Institute zur Anwendung. Es bietet ein sehr umfangreiches Modul zur Anfertigung von Versuchsplänen, mithilfe derer die tatsächlichen Einstellungen dokumentiert und später ausgewertet werden können [110]. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die bedeutendsten Einflussgrößen und die dabei ermittelten Faktoren können anschließend verbessert und verändert werden.

Die Prinzipien der Randomisierung⁷, Versuchswiederholung⁸ und Blockbildung⁹ finden bei der Erstellung der Versuchspläne Anwendung. Insgesamt wurden im Zuge der Anfertigung dieser Arbeit mehrere Versuchspläne erstellt und über 1500 Versuche durchgeführt. In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind alle Faktoren und die zu untersuchenden Stufenwerte nach Versuchsstand aufgelistet. Eine konkrete Beschreibung der Einzelpläne sowie des Vorgehens bei der Versuchsdurchführung ist – im Zuge der Ergebnisdarstellung – Kapitel 5 zu entnehmen. Unterschiedliche Modellierungstypen der Faktoren beeinflussen dabei die Datenanalyse: Experimentell zu untersuchende kategorielle¹⁰ Faktoren stellen in dieser Arbeit der WDVS-Aufbau, der Werkzeugtyp und die Drehbewegung dar. Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl hingegen werden der Gruppe der stetigen¹¹ Faktoren zugeordnet. Die Ergebnisverläufe stetiger Faktorstufenänderungen erlauben eine Interpolation [101].

Tabelle 8 Versuchsstand I: Gesamtheit der Faktoren und Stufenwerte aller Versuchspläne

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriell (nominal)	0 / 1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 7 / 8 / 9 / 10 / 11 / 12 / 13 / 14 / 15 / 16 / 17 / 18 / 19 / 20
Werkzeugtyp	[-]	kategoriell (nominal)	1 / 2 / 3
Zustellung	[mm]	stetig	-2 / 0 / 0,5 / 1
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	300 / 600 / 900 / 1200 / 1500 / 1800 / 2100 / 2400 / 2700 / 3000
Drehbewegung	[-]	kategoriell (nominal)	Gleichlauf / Gegenlauf

Tabelle 9 Versuchsstand II: Gesamtheit der Faktoren und Stufenwerte aller Versuchspläne

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriell (nominal)	0 / 101 / 102 / 103 / 104 / 105 / 106 / 107 / 108 / 109 / 110
Werkzeugtyp	[-]	kategoriell (nominal)	101 / 102 / 103 / 104 / 105 / 106 / 107 / 108 / 109 / 110 / 111 / 112 / 113
Zustellung	[mm]	stetig	-6 / -4 / -2 / 0 / 0,5 / 1 / 2 / 3 / 4 / 6 / 8
Anpressung	[N]	stetig	186 / 208 / 325 / 394 / 502
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	3000 / 4000 / 5000 / 6000 / 7000
Drehbewegung	[-]	kategoriell (nominal)	Gleichlauf
Drehzahl	[1/min]	stetig	250 / 375 / 500 / 750 / 1000 / 1125 / 1500 / 2440

⁷ Unter Randomisierung wird die zufällige Anreihung von Einzelversuchen innerhalb eines Blocks verstanden. Die Reihenfolge ist jedoch nicht beliebig, sie wird während der Versuchsplanung durch Zufallszahlen festgelegt und darf während der Ausführung der Versuche nicht verändert werden. Mögliche auftretende Störeffekte gehen dadurch in die Versuchsstreuung statt in die Effekte der Faktoren mit ein. Somit kommt es zu keiner ungewollten Verfälschung der Haupteffekte.

⁸ Bei der Wiederholung handelt es sich um die Mehrfachrealisierung von Versuchspunkten. Dies ermöglicht Aussagen über die Versuchsstreuung und Versuchsfehler.

⁹ Die Blockbildung ist die Einteilung von Einzelversuchen in unterschiedliche Gruppen. Dadurch können möglicherweise auftretende Differenzen zwischen den Blöcken erkannt werden.

¹⁰ Kategorielle Faktoren können durch keine Messskala bestimmt werden. Diese Faktoren sind nur durch eine Beschreibung oder Bezeichnung auszudrücken. Weiterhin kann zwischen nominal oder ordinal unterschieden werden, wobei innerhalb dieser Arbeit alle kategoriellen Faktoren nominal skaliert werden, sie weisen demnach keine Rangfolge auf.

¹¹ Stetige Größen sind all die Faktoren, die messbar sind. Der Faktor kann innerhalb eines gewählten Stufenabstandes theoretisch jeden Zwischenwert annehmen, wobei diese Zwischenwerte bei der Versuchsdurchführung einstellbar und steuerbar sind.

Es ist davon auszugehen, dass die ausgewählten Einflussgrößen einen nichtlinearen Zusammenhang besitzen. Um diesen quantifizieren zu können, werden stetige Faktoren in die Mindestzahl von drei Stufen unterteilt [110], wobei die Steigung der Werte möglichst linear erfolgt. Somit stellt die mittlere Stufe die Hälfte der Differenz der kleinsten Stufe dar.

Für die Grundlagenversuche bzw. Vorversuche an Versuchsstand I werden wegen der überschaubaren Anzahl an Faktoren mehrere vollfaktorielle¹² sowie ausgewogene¹³ Versuchspläne erstellt. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass der Einfluss auf die Zielgrößen dem jeweiligen Faktor zugeschrieben werden kann. Neben Haupteffekten¹⁴ werden auch Wechselwirkungseffekte¹⁵ erkannt. Diese spielen in fast allen technischen Systemen eine Rolle. Dennoch sind sich Scheffler [111] und Klein [112] einig, dass für praktische Problemstellungen bereits zweifach-Wechselwirkungen geringere Auswirkungen auf das System haben als die wesentlichen Haupteffekte. Die Informationen über die Drei-Faktor-Wechselwirkungen sind schließlich so klein, dass sich deren Effekte in der Regel nicht von der Versuchsstreuung unterscheiden und somit vernachlässigt werden können. Demnach kann auf die Untersuchung höherer Wechselwirkungen verzichtet werden. Der Nachteil eines ausgewogenen vollfaktoriellen Versuchsplans liegt in der Anzahl der benötigten Versuche, wobei durch Erstellung mehrerer Versuchspläne mit unterschiedlich großen Faktorräumen eine Reduktion der Versuchsanzahl vorgenommen werden kann. Durch die ausgewogene Abdeckung der Parameterbereiche werden außerdem, durch mehrfache Nutzung der Ergebnisse, Effekte besser erfasst [110].

Bei den Hauptversuchen an Versuchsstand II wird abhängig von der Werkzeugausführung jeweils ein herkömmlicher Versuchsplan aufgestellt, ein sogenannter „one-factor-at-a-time“ Plan, wobei die untersuchten Faktoren der einzelnen Werkzeugtypen identisch sind, lediglich bei den Faktorstufen der Gruppe Maschine müssen Anpassungen vorgenommen werden. Dabei wird jeweils ein Faktor variiert und daraufhin das Ergebnis beobachtet. Die hinsichtlich der Qualitätsmerkmale sinnvollere Einstellung wird beibehalten und anschließend der nächste Faktor untersucht. Sollte eine bessere Einstellung eines Faktors ermittelt werden, so wird diese für die weiteren Versuche angepasst. Im Speziellen werden die Faktoren Zustellung und Drehzahl in ihren Stufen schrittweise soweit erhöht, bis entweder der gewünschte Abtrag erbracht oder aber die maximal zulässige Drehzahl und/oder sinnvolle Zustellung erreicht sind. Somit findet – auch auf Basis der Ergebnisse der Grundlagenversuche – eine Optimierung des Qualitätsmerkmals Massenverlust statt, da eine Erhöhung der Zustellung sowie der Drehzahl immer auch mit einem Anstieg der zu minimierenden Zielgröße verbunden ist. Dieses iterative Vorgehen birgt dennoch die Gefahr, dass eine Vielzahl von Versuchen zur Optimierung der einzelnen Qualitätsmerkmale notwendig ist. Ebenso ist bei diesem Vorgehen kritisch zu betrachten, dass nur ein Ausgangspunkt – normalerweise eine Ecke im Faktorraum – im Einstellbereich eines Faktorraums ausgewählt wird, wobei sich schließlich alle Variationen auf diesen Ausgangspunkt beziehen. Den genannten Punkten kann mittels der empirischen Datenerhebung entgegengewirkt werden (vgl. Abschnitt 4.1.1.1 und Abschnitt 4.1.1.2), wodurch eine Abgrenzung der Faktorräume ermöglicht wird. Des Weiteren dienen die Grundlagenversuche an Versuchsstand I – sowie die multikriterielle Optimierung der Untersuchungsergebnisse – der plausiblen Zuordnung des Einstellbereichs im Faktorraum.

¹² Die vollständig faktoriellen Versuchspläne beruhen auf dem Prinzip, dass alle Faktoren gleichzeitig in ihren Stufen variieren. Der Versuchsaufwand resultiert schließlich aus der Anzahl der Faktoren und der Anzahl der Stufen.

¹³ Ausgewogen ist ein Versuchsplan dann, wenn für die Faktorstufen jedes beliebigen Faktors die Einstellung der anderen Faktoren gleichmäßig aufgeteilt ist. Bspw. wurden die Versuche unterschiedlicher Bürstentypen in identischen Faktorkombinationen der Faktorbereiche Maschine und Werkstück gleich oft gefahren.

¹⁴ Der Effekt quantifiziert die mittlere registrierte Veränderung der Zielgröße, beim Wechsel der Faktoreinstellungen und beschreibt somit die Wirkung eines Faktors auf das System.

¹⁵ Wenn der Effekt eines Faktors von der Einstellung eines anderen Faktors abhängt, so wird dies als Wechselwirkung bezeichnet. Liegt dieser Fall vor, so müssen diese beiden Faktoren immer gemeinsam betrachtet werden [111].

5 Ergebnisse und Auswertung der experimentellen Versuche

Nachdem der Aufbau des Untersuchungssystems, der Versuchsstände inkl. Messtechnik sowie die statistische Versuchsplanung in dem vorherigen Kapitel erklärt wurden, wird nachfolgend auf den experimentellen Forschungsbeitrag der Arbeit eingegangen. Es werden die Einzelversuchspläne, das Vorgehen bei der Versuchsdurchführung und die Ergebnisse präsentiert. Unter Verwendung der Datenanalysesoftware JMP werden die Ergebnisse statistisch analysiert. Der Bewertung dienen die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust.

Dadurch können die drei in Abschnitt 1.3 definierten Forschungsfragen – siehe auch Tabelle 10 – beantwortet werden. Aufgrund möglicher Wechselwirkungseffekte ist es dabei nicht möglich, jede Forschungsfrage getrennt nach einem Versuchsplan zu beantworten. Vielmehr werden die Faktoren und Faktorstufen eines Versuchsplans durch die vorangegangenen Versuche mitbestimmt und gegebenenfalls nochmals bestätigt. Somit ergibt sich die in Tabelle 10 aufgeführte Zuordnung.

Zusammengefasst kann anhand der Grundlagenversuche Forschungsfrage 1 beantwortet werden. Lediglich für die Untersuchung des Einflusses einer Verdübelung sind Versuche in größerem Maßstab an Versuchsstand II (Hauptversuche) notwendig. Des Weiteren ermöglichen die Grundlagenversuche eine Eingrenzung des Faktorraums für die darauffolgenden Hauptversuche. In den Hauptversuchen können dann die Forschungsfragen 2 und 3 beantwortet werden. Letzteres erfolgt werkzeughabhängig. Dieses Vorgehen begründet sich damit, dass die Versuchspläne der Grundlagenversuche sich hauptsächlich durch den Faktor WDVS-Aufbau differenzieren, somit kann durch einen Abgleich der Einfluss der unterschiedlichen Systembestandteile identifiziert werden. In den Hauptversuchen hingegen unterscheiden sich die Versuchspläne – ausgenommen Versuchsplan I-VI und I-VII – durch den Faktor Werkzeugtyp.

Tabelle 10 Zuordnung der Forschungsfragen zu den Einzelversuchsplänen bzw. der Ergebnisdarstellung

Forschungsfragen	Grundlagenversuche	Hauptversuche
1. Welchen Einfluss haben der Aufbau des WDVS sowie die einzelnen Systembestandteile auf das Abtragsergebnis sowie den Werkzeugverschleiß?	Abschnitt 5.1.1 (Versuchsplan I-I) Abschnitt 5.1.4 (Versuchsplan I-I bis I-V)	Abschnitt 5.2.3 (Versuchsplan II-VI)
2. Welches Bürstenwerkzeug ist für den rückstandslosen und kontinuierlichen Abtrag eines Standard-WDVS am besten geeignet, unter dem Gesichtspunkt der Verschleißoptimierung?	Abschnitt 5.1.5 (Versuchsplan I-IIIB) Abschnitt 5.1.6 (Versuchsplan I-II bis I-V)	Abschnitt 5.2.2 (Versuchsplan II-I bis II-V)
3. Wie sind werkzeughabhängig die Maschinenparameter (Anstellung, Vorschubgeschwindigkeit, Drehbewegung und Drehzahl) zu wählen, um den Abtrag zu maximieren sowie den Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust zu minimieren?	Abschnitt 5.1.2 (Versuchsplan I-II) Abschnitt 5.1.3 (Versuchsplan I-IIIA und I-IIIB) Abschnitt 5.1.7 (Versuchsplan I-IIIB)	Abschnitt 5.2.4 (Versuchsplan II-VII)

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

Unter allen Steuergrößen weist der WDVS-Aufbau neben dem Werkzeugtyp die größtmögliche Vielfalt an Faktorstufen auf. Aufgrund der enormen Diversität verbauter Systeme würde ein signifikanter Einfluss eine Vielzahl an Versuchen mit sich bringen. Diesen Einfluss gilt es vorrangig zu analysieren. Differenziert werden die zuvor in Abschnitt 4.1.1.3 beschriebenen Aufbauten. Des Weiteren gilt es den Einfluss der Maschinenparameter Vorschubgeschwindigkeit, Zustellung und Drehbewegung auf die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß zu ermitteln. Eine Untersuchung des Faktors Werkzeugtyp geschieht innerhalb der Grundlagenversuche in zwei Stufen, einer gewellten sowie einer gezopften Stahldrahtbürste. Diese Werkzeugausführungen decken nach Angaben des Bürstenherstellers Lessmann GmbH mit etwa 65 Prozent den Großteil der von ihnen gefertigten Anordnungen ab [113]. Ursprünglich sollte der Faktor Werkzeugtyp mit einer glatten Kunststoffbürste (Werkzeugtyp 3) eine weitere Stufe umfassen. Das Werkzeug musste nach ersten Versuchen allerdings ausgeschlossen werden, da ein Durchtrennen der oberen Beschichtung des WDVS-Aufbaus aus Ober- und Unterputz inkl. Armierung nicht möglich war. In weiteren Versuchen konnte an einem Teilaufbau ebenso wenig EPS oder Kleber abgetragen werden. Die Einstellungen der Steuergrößen werden in Abschnitt 4.1.1.1 und Abschnitt 4.1.1.2 erläutert. Innerhalb aller Grundlagenversuche erfahren die Werkzeuge 1636 Umdrehungen pro Minute. Die dabei erreichten Umfangsgeschwindigkeiten zwischen 10 und 12 Metern pro Sekunde umfassen den von Bürstenherstellern für den Abtrag von WDVS empfohlenen Einstellbereich. In den Hauptversuchen wird dieser Faktor – ebenso wie der Faktor Werkzeugtyp – in seinen Stufen erweitert.

Um den Effekt der genannten Faktoreinstellungen aufzuzeigen, werden alle experimentell gewonnenen Versuchsergebnisse dargestellt, diskutiert und wenn möglich mit den in Kapitel 3 vorgestellten Grundlagen in Beziehung gesetzt. Zuletzt werden die Ergebnisse verschiedener Versuchspläne verglichen, sowie die Auswirkungen der Zielgrößen anhand einer multikriteriellen Optimierung erläutert. Faktoren, deren Einstellungen anhand einer statistischen Analyse kein signifikanter Einfluss auf die Qualitätsmerkmale nachzuweisen ist, werden dabei zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse gegebenenfalls zusammengefasst. In Anhang E sind die Ergebnisse aller möglichen Einstellungen je nach Versuchsplan graphische dargestellt.

Für die Diskussion werden die Ergebnisse der Versuche einheitlich visualisiert. Vertikale Outlier-Boxplots¹ werden als Darstellungselement genutzt (vgl. Abbildung 5-1). Die Länge einer Box entspricht dabei dem Interquartilsabstand². Der Median ist durch eine Linie im Innern der Box gekennzeichnet und das arithmetische Mittel ist als geometrisches Symbol illustriert, je nach Überlagerungswert. Sollte der Begriff Mittelwert verwendet werden, so ist damit der arithmetische Mittelwert bezeichnet. Zwei weitere Linien kennzeichnen die Whisker Spannweite³ der Stichprobe. Sie gehen vom oberen Ende der Box bis zum Maximum bzw. vom unteren Ende der Box bis zum Minimum des Datensatzes. Werden innerhalb eines Datensatzes keine potentiellen Ausreißer identifiziert, so entspricht die Whisker Spannweite der Spannweite und deckt den gesamten Wertebereich des Datensatzes ab.

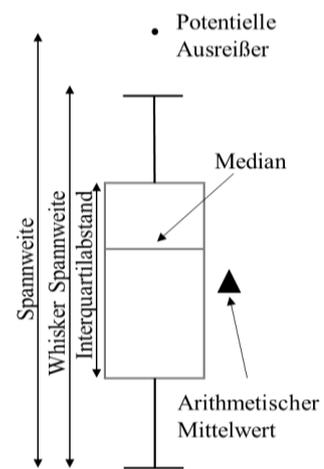


Abbildung 5-1 Outlier-Boxplot

¹ Im Gegensatz zu Quantil-Boxplots werden mögliche Ausreißer nicht mit einbezogen. Ein Punkt gilt als möglicher Ausreißer, falls er mehr als 1,5-mal des Interquartilsabstands vom oberen bzw. unteren Rand der Box entfernt ist [114, S. 54].

² Innerhalb dieses Bereichs liegt die Hälfte aller gemessenen Werte. Die Variabilität steigt mit der Größe des Interquartilsabstands.

³ Der Whisker begrenzt den Datensatz auf höchstens das 1,5-fache des Interquartilsabstands. Dabei endet der Whisker bei dem Wert der Datenmenge, der noch innerhalb dieser Grenze liegt.

5.1.1 Einfluss des WDVS-Aufbaus

Im Zuge der ersten Versuche soll nachgewiesen werden, ob alle Kombinationen möglicher Werkstückaufbauten geprüft werden müssen oder ob sich die Zahl der Versuche ergebnisorientiert reduzieren lässt. Dazu werden die WDVS-Aufbauten 1 bis 16 (Anwendungsfall 1: Komplettaufbau) experimentell untersucht. Sie entsprechen nach Herstellerangaben einer weitverbreiteten Zusammensetzung an Systembestandteilen, wobei EPS als Dämmstoff verwendet wird. Um ebenso mögliche Wechselwirkungen erfassen zu können, werden neben der Vorschubgeschwindigkeit die Einflussfaktoren Werkzeugtyp und Zustellung in großen Stufenabständen variiert. Daraus ergibt sich der vollfaktorielle, randomisierte Versuchsplan – im weiteren Verlauf Versuchsplan I-I genannt – mit 4 Faktoren und einer Wiederholung. Dieser umfasst 256 Versuche. Aus Tabelle 11 lassen sich die Faktoren, deren Modellierungstyp und die Faktorstufen ablesen. Der Faktor Drehbewegung wird vorerst konstant gehalten, weitere Untersuchungen finden sich in Abschnitt 5.1.3.

Tabelle 11 Faktoren und Stufen Versuchsplan I-I

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriiell (nominal)	1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 7 / 8 / 9 / 10 / 11 / 12 / 13 / 14 / 15 / 16
Werkzeugtyp	[-]	kategoriiell (nominal)	1 / 2
Zustellung	[mm]	stetig	0,5 / 1
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	300 / 600
Drehbewegung	[-]	konstant	Gleichlauf
Drehzahl	[1/min]	konstant	1636

Eine objektive Aussage zur Klärung der (Teil-) Forschungsfrage 1 „Welchen Einfluss hat der Aufbau des WDVS auf das Abtragsergebnis sowie den Werkzeugverschleiß?“ wird mittels einer statistischen Auswertung erlangt. Als Test dient eine einfaktorische Varianzanalyse, auch ANOVA genannt. Dabei wird die Varianz der Stichproben zwischen den Faktorstufen des WDVS-Aufbaus mit der Varianz innerhalb einer Faktorstufe verglichen, wodurch signifikante Unterschiede zwischen den Stufen ermittelt werden können. Die Voraussetzungen zur Anwendung dieser statistischen Methode sind erfüllt: Die Versuchsdurchführung erfolgte randomisiert, die Messdaten sind von Ausreißern befreit, unabhängig, normalverteilt⁴ und weisen eine Varianzhomogenität⁵ auf [115, S. 335, 116, S. 63]. Allein die Prämisse nach Hubert [116, S. 63] mit einer Gruppengröße von mehr als 20 Werten zu arbeiten, wird nicht eingehalten. Handelt es sich allerdings um Testgruppen gleicher Größe mit jeweils einem Umfang von 16 Werten, so sind diese als robust⁶ anzusehen [117, S. 334] [118, S. 34]. Eine Verletzung der Bedingung stellt demnach kein Ausschlusskriterium dar.

⁴ Dies bestätigt die Prüfmethode Shapiro-Wilk-W-Test, welche im Gegensatz zu anderen Tests auf Normalverteilung (wie dem Kolmogorow-Smirnow-Test) auch für kleine Stichproben eine hohe Teststärke aufweist. Die Nullhypothese, dass eine Normalverteilung der Grundgesamtheit vorliegt, wird nicht abgelehnt. Von einer Normalverteilung innerhalb eines jeden WDVS-Aufbaus ist auszugehen.

⁵ Die Varianzhomogenität fordert annähernde Gleichheit der Varianzen in verschiedenen Gruppen. Als Prüfungsmethode dient der Lavene-Test. Die Nullhypothese wird beibehalten, die Varianzgleichheit nicht abgelehnt. Es ist davon auszugehen, dass die Gruppen homogene Varianzen besitzen. Bestätigt wird dies ebenfalls durch die Tests auf gleiche Varianzen: Bartlett, Brown-Forsythe und O'Brien.

⁶ In der Statistik wird die Unabhängigkeit der Zielgrößen von Streuungen in den Faktoren als Robustheit bezeichnet.

Für detailliertere Informationen zu den verwendeten Teststatistiken unter Verwendung der Datenanalysesoftware JMP wird auf Meintrup [114] verwiesen. Die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung und Varianzhomogenität sind Anhang D zu entnehmen. Lediglich die ANOVA selbst soll in diesem Abschnitt vorgestellt werden.

Für die Umsetzung einer ANOVA wird zunächst die Nullhypothese H_0 aufgestellt. Diese geht davon aus, dass in g unabhängigen Stichproben die Erwartungswerte μ_g aller Grundgesamtheiten gleich sind. Die Alternativhypothese H_1 widerspricht dem. Entsprechend lauten die Hypothesen

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_g$$

$$H_1 : \mu_k \neq \mu_g$$

Wird die Nullhypothese zu Gunsten der Alternativhypothese verworfen, so sind nicht alle Erwartungswerte gleich. Die Alternativhypothese ist erfüllt, sofern bereits die Erwartungswerte zweier Gruppen signifikant voneinander abweichen.

Für die Teststatistik einer Varianzanalyse wird zunächst die quadratische Abweichung jedes einzelnen Messwerts vom Mittelwert der Gruppe betrachtet. Innerhalb des Versuchsplans I-I entsprechen diese Gruppen den WDVS-Aufbauten. Die sogenannte Fehlerquadratsumme SSE (Sum of Squares Error), auch Quadratsumme innerhalb einer Gruppe genannt, berechnet sich aus

$$SSE = \sum_{k=1}^g \sum_{j=1}^{n_k} (X_{kj} - \bar{X}_k)^2 \quad (5.1)$$

Dabei steht k für die Gruppennummer der insgesamt g Gruppen mit jeweils n_k Werten. \bar{X}_k ist der arithmetische Mittelwert der Gruppe k . Die Quadratsumme zwischen den Gruppen SSB (Sum of Squares Between) ergibt sich äquivalent durch das Ersetzen des entsprechenden Gruppenmittelwerts \bar{X}_k durch den globalen Mittelwert \bar{X}

$$SSB = \sum_{k=1}^g n_k (\bar{X}_k - \bar{X})^2 \quad (5.2)$$

Aus diesen beiden Summen resultiert die quadratische Abweichung jedes einzelnen Beobachtungswertes vom globalen Mittelwert mit der sogenannten totalen Quadratsumme $SSTO$ (Sum of Squares Total):

$$SSTO = SSE + SSB = \sum_{k=1}^g \sum_{j=1}^{n_k} (X_{kj} - \bar{X})^2 \quad (5.3)$$

Wird daraufhin die Quadratsumme durch den dazugehörigen Freiheitsgrad geteilt, so lässt sich die mittlere Quadratsumme herleiten. Es gilt zu beachten: Um die richtige Wahl für den Nenner in der mittleren Quadratsumme zu treffen, müssen die Freiheitsgrade bestimmt werden. In der Quadratsumme SSE stehen n Summanden und g Mittelwerte $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_g$, die jeweils einen Freiheitsgrad darstellen. Daher bleiben $n - g$ Freiheitsgrade übrig. Ebenso stehen in der Quadratsumme SSB zwar g Summanden aber der globale Mittelwert \bar{X} entspricht einem Freiheitsgrad, weshalb diese Summe $g - 1$ Freiheitsgrade aufweist. Die mittlere Fehlerquadratsumme MSE (Mean Sum of Errors) lautet

$$MSE = \frac{SSE}{n-g} \quad (5.4)$$

Das Gleiche gilt für die mittlere Quadratsumme zwischen den Gruppen MSB (Mean Sum Between)

$$MSB = \frac{SSB}{g-1} \quad (5.5)$$

Die Varianzanalyse setzt voraus, dass alle Varianzen gleich sind: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_g^2 = \sigma^2$. Ist die Nullhypothese richtig, so sind die mittlere Fehlerquadratsumme MSE und auch die mittlere Quadratsumme zwischen den Gruppen MSB ein erwartungstreuer Schätzer für σ^2 . Das Verhältnis kann dazu dienen zu prüfen, ob die Nullhypothese beibehalten werden kann. Es ergibt sich die Teststatistik

$$F = \frac{MSB}{MSE} \quad (5.6)$$

Die Teststatistik ist unter der Nullhypothese F-verteilt, daher kann mit der realisierten Teststatistik

$$f = \frac{msb}{mse}$$

der p-Wert errechnet werden

$$p = P(F_{g-1; n-g} > f)$$

Die Informationen werden üblicherweise in einer ANOVA Tabelle zusammengetragen. Der Aufbau ist Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12 Aufbau einer ANOVA Tabelle

Quelle der Summe	Freiheitsgrad	Quadratsumme	Mittlere Quadratsumme	Teststatistik f	p-Wert
Variabilität zwischen den Gruppen	$g - 1$	SSB	MSB	F	p
Variabilität innerhalb der Gruppen	$n - g$	SSE	MSE		
Totale Variabilität	$n - 1$	$SSTO$			

Wird nun für Versuchsplan I-I eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt, ergeben sich für die Qualitätsmerkmale folgende in den Tabelle 13 und Tabelle 14 aufgeführten Ergebnisse.

Tabelle 13 Versuchsplan I-I: ANOVA Tabelle Abtrag

Quelle der Summe	Freiheitsgrad	Quadratsumme	Mittlere Quadratsumme	Teststatistik f	p-Wert
Variabilität zwischen den Gruppen	15	265,734	17,7156	0,2961	0,9955
Variabilität innerhalb der Gruppen	240	14.361,436	59,8393		
Totale Variabilität	255	14.627,170			

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

Tabelle 14 Versuchsplan I-I: ANOVA Tabelle Relativer Massenverlust

Quelle der Summe	Freiheitsgrad	Quadratsumme	Mittlere Quadratsumme	Teststatistik f	p-Wert
Variabilität zwischen den Gruppen	15	0,095773	0,006385	0,1439	0,9999
Variabilität innerhalb der Gruppen	240	10,646212	0,044359		
Totale Variabilität	255	10,741986			

Für die Qualitätsmerkmale wird die Nullhypothese signifikant nicht abgelehnt, denn der p-Wert liegt deutlich über dem Signifikanzniveau α^7 von 0,05 (5 Prozent) [114, S. 175]. Folglich bewirkt der Faktor WDVS-Aufbau keinen signifikanten Unterschied. Die Abweichung der Mittelwerte der einzelnen Stufen des Faktors kann als zufällig deklariert werden, statistische Unterschiede gibt es nicht. Die Ergebnisse stammen aus einer Grundgesamtheit.

Abbildung 5-2 veranschaulicht dies grafisch. Gruppieren nach den Stufen des Faktors WDVS-Aufbau können die Ergebnisse dahingehend geprüft werden, ob sich die Varianz innerhalb eines Aufbaus auffällig von der Varianz zwischen den Aufbauten unterscheidet. Boxplots für jeden Stufenwert in Reihe ermöglichen einen schnellen Überblick. Die einzelnen Beobachtungswerte sind dazu getrennt nach WDVS-Aufbau auf der Abszisse aufgetragen. Die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß lassen sich auf der Ordinate ablesen. Weichen eine oder mehrere Boxen in Position wesentlich von den anderen ab, so kann von einem Einfluss des Faktors ausgegangen werden. Sollte der Faktor WDVS-Aufbau keinen Einfluss auf die Qualitätsmerkmale aufweisen, müssten alle Boxplots näherungsweise gleiche Mittelwerte besitzen. Gebildet wird der lokale Mittelwert einer Gruppe aus 16 Einzelversuchen. Diese ergeben sich aus den zwei Stufenwerten der Faktoren Werkzeugtyp, Zustellung und Vorschubgeschwindigkeit sowie einer Versuchswiederholung. Der globale Mittelwert über alle WDVS-Aufbauten dient der Orientierung. Dieser findet sich in der rechten unteren Ecke der Diagramme.

Ersichtlich wird, dass:

- weder die Spannweiten noch die Mittelwerte der Abtragungsergebnisse einer auffälligen Schwankung durch den WDVS-Aufbau unterliegen. Die Mittelwerte der einzelnen Faktorstufen gleichen in etwa dem globalen Mittelwert aus allen Faktorstufen. Des Weiteren liegen Mittelwert und Median nahe beieinander, was für eine symmetrische Verteilung und gegen Extremwerte und Ausreißer bei den Messwerten spricht. Ein Einfluss des WDVS-Aufbaus ist demnach nicht erkennbar.
- Schwankungen der Ergebnisse unterschiedlicher Dämmstoffdicken nicht auszumachen sind. Alle geraden Nummerierungen des WDVS-Aufbaus weisen eine Dämmstoffdicke von vier Zentimetern auf, alle ungeraden eine Dicke von zwei Zentimetern. Ansonsten sind die Systembestandteile identisch.

Neben dem WDVS-Aufbau wurden in Versuchsplan I-I weitere Faktoren untersucht. Eine grafische Darstellung der Messergebnisse ist dem Anhang E zu entnehmen.

⁷ Das Signifikanzniveau bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, mit der im Rahmen eines „Hypothesentests“ die „Nullhypothese“ fälschlicherweise verworfen werden kann, obwohl sie richtig ist (Fehler erster Art, auch α -Fehler genannt) [119, S. 67].

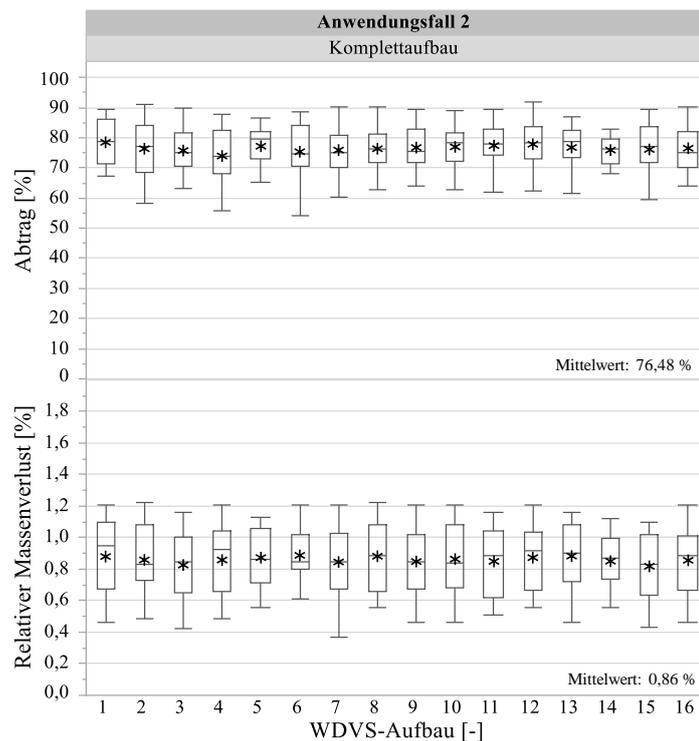


Abbildung 5-2 Ergebnisse Versuchsplan I-I: Abtrag [%] und relativer Massenverlust [%] in Abhängigkeit des WDVS-Aufbaus [-] bei Werkzeugtyp 1 / 2, Zustellung 0,5 / 1,0 mm sowie Vorschubgeschwindigkeit 300 / 600 mm/min

Anhand einer statistischen Analyse ist ebenfalls nachzuweisen, dass bei den Haupteffekten beider Qualitätsmerkmale der Faktor Zustellung das Signifikanzniveau unterschreitet und somit als bedeutend einzustufen ist. Die Vorschubgeschwindigkeit als Haupteffekt hingegen unterschreitet das Signifikanzniveau einzig für die Zielgröße Massenverlust. Der Faktor Werkzeugtyp hingegen stellt nur für die Zielgröße Abtrag einen signifikanten Haupteffekt dar. Die Wechselwirkungseffekte Zustellung*Vorschubgeschwindigkeit sowie Werkzeugtyp*Vorschubgeschwindigkeit – wobei die entsprechenden Faktoren der Wechselwirkungen innerhalb des Softwareprogramms JMP mit einem * verbunden werden – unterschreiten das Signifikanzniveau bei der Zielgröße Massenverlust. Für die Zielgröße Abtrag sind keine Wechselwirkungen als signifikant einzustufen. Signifikante Effekte gilt es in weiteren Versuchsreihen durch Hinzunahme weiterer Faktorstufen zu untersuchen.

Schlussfolgerung:

- Versuchsplan I-I ermöglicht es Forschungsfrage 1 in Teilen zu beantworten: Es besteht kein nachweislicher Einfluss des WDVS-Aufbaus auf den Abtrag sowie den Massenverlust. Untersucht wurden Komplettaufbauten an WDVS, bestehend aus unterschiedlichen Systembestandteilen. Als Test dient eine einfaktorische Varianzanalyse. Für die weitere Versuchsdurchführung bedeutet dies, dass der Faktor in seinen Stufen reduziert werden kann. In Abschnitt 5.1.4 wird der Einfluss einzelner Systembestandteile des WDVS auf die Qualitätsmerkmale ermittelt. Zusammen mit den Untersuchungen zum Einfluss von Mineralwolle und Verdübelung (vgl. Hauptversuche Abschnitt 5.2.3) kann Forschungsfrage 1 dann gänzlich beantwortet werden.
- Die Faktoren Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit und Werkzeugtyp gilt es als Haupteffekte in weiteren Versuchsreihen zu untersuchen. Dabei zu beachten sind die Wechselwirkungseffekte Zustellung*Vorschubgeschwindigkeit sowie Werkzeugtyp*Vorschubgeschwindigkeit.

5.1.2 Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und der Zustellung

Die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst die Wirtschaftlichkeit des Abtrags von WDVS. In den Hauptversuchen wird eine Geschwindigkeit von drei Metern pro Minute vorausgesetzt und nicht weiter variiert. Zuvor sind grundlegende Untersuchungen in kleinerem Spektrum notwendig. Es gilt u.a. zu prüfen, ob eine Geschwindigkeit von drei Metern pro Minute überhaupt möglich ist. Der dazu erstellte Versuchsplan I-II und die Ergebnisse der Untersuchungen werden in diesem Abschnitt dargestellt und erläutert. Versuchsplan I-I liefert die Grundlage: Die Faktorstufen des WDVS-Aufbaus können merklich eingeschränkt werden. Differenziert werden lediglich zwei Aufbauten, welche sich anhand des Systembestandteils Kleber unterscheiden. Indem ein mineralischer Kleber mit einem Klebeschaum verglichen wird, werden möglichst weite Stufenabstände gewählt. Verbleibende Systembestandteile sind identisch. Daraus ergibt sich eine gezielte Untersuchung des Systembestandteile Kleber und eine Überprüfung der Untersuchungsergebnisse des Versuchsplan I-I (vgl. Abschnitt 5.1.1).

Ein signifikanter Einfluss der Zustellung auf die Qualitätsmerkmale wurde in Versuchsplan I-I nachgewiesen. Der Faktor wird demnach um einen weiteren Stufenwert ergänzt und ist damit bewusst nach Herstellerempfehlungen zu groß gewählt. In Anlehnung an Przyklenk [67] ist darauf hinzuweisen, dass aufgrund der Flexibilität der Bürstenwerkzeuge – genauer des Besatzes – bei einer weiteren Steigerung der Zustellung keine potentielle Erhöhung der auf das Werkstück wirkenden Kraftkomponente zu erwarten ist. Wird ein bürstenabhängiger Zustellwert überschritten, so ist mit einer Verringerung der Anpressung und folglich mit rückläufigen Abtragsergebnissen zu rechnen [67, S. 2–5]. Angesichts des innerhalb dieser Arbeit gewählten Bezugspunkt der Zustellung – der Betonoberfläche – ist bei einer Stufenerhöhung ebenso keine Änderungen der Krafterwirkung auf das WDVS zu erwarten. Vielmehr erfährt der Besatz auf der Betonoberfläche eine größere Durchbiegung.

Der vollfaktorielle, randomisierte Versuchsplan I-II mit 4 Faktoren mehrerer Stufen und einer Wiederholung liefert 208 durchzuführende Kombinationen (vgl. Tabelle 15). Die acht Stufenwerte der Vorschubgeschwindigkeit legen die Zeitdauer fest, die benötigt wird, um den 145 Zentimeter langen WDVS-Aufbau eines Prüfkörpers zu durchfahren. Für die Auswertung erfolgt eine Erweiterung zweier Stufenwerte der Vorschubgeschwindigkeit um 300 sowie 600 Millimeter pro Minute anhand einer Übertragung von 32 Versuchen des Versuchsplans I-I.

Tabelle 15 Faktoren und Stufen Versuchsplan I-II

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategorial (nominal)	13 / 15
Werkzeugtyp	[-]	kategorial (nominal)	1 / 2
Zustellung	[mm]	stetig	0,5 / 1 / 1,5
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	900 / 1200 / 1500 / 1800 / 2100 / 2400 / 2700 / 3000
Drehbewegung	[-]	konstant	Gleichlauf
Drehzahl	[1/min]	konstant	1636

Für das Qualitätsmerkmal Abtrag sind die Ergebnisse in Abbildung 5-3 zusammengefasst. Durch eine Unterteilung nach den Stufen des Faktors Zustellung ergeben sich drei Einzelgrafiken. Die globalen Mittelwerte beider Werkzeugtypen über die Faktorstufen der Vorschubgeschwindigkeit finden sich am unteren Rand der jeweiligen Einzelgrafik. Dies ermöglicht einen Vergleich der Ergebnisse zwischen den Einzelgrafiken. Zusätzlich sind die Mittelwerte der Faktorkombinationen zur Veranschaulichung der Verläufe über Geraden miteinander verbunden, es entstehen Liniendiagramme. Da es sich bei dem Faktor

Vorschubgeschwindigkeit um einen stetigen Modellierungstyp handelt, besteht die Möglichkeit einer Interpolation zwischen den Stufeneinstellungen. Da dem WDVS-Aufbau auch für Versuchsplan I-II kein signifikanter Einfluss auf die Qualitätsmerkmale zuzuschreiben ist, werden die Messwerte des Faktors nicht gesondert betrachtet. Eine entsprechende Darstellung liefert Anhang E. Daraus resultieren zuzüglich einer Wiederholung $n = 4$ Messwerte pro Box.

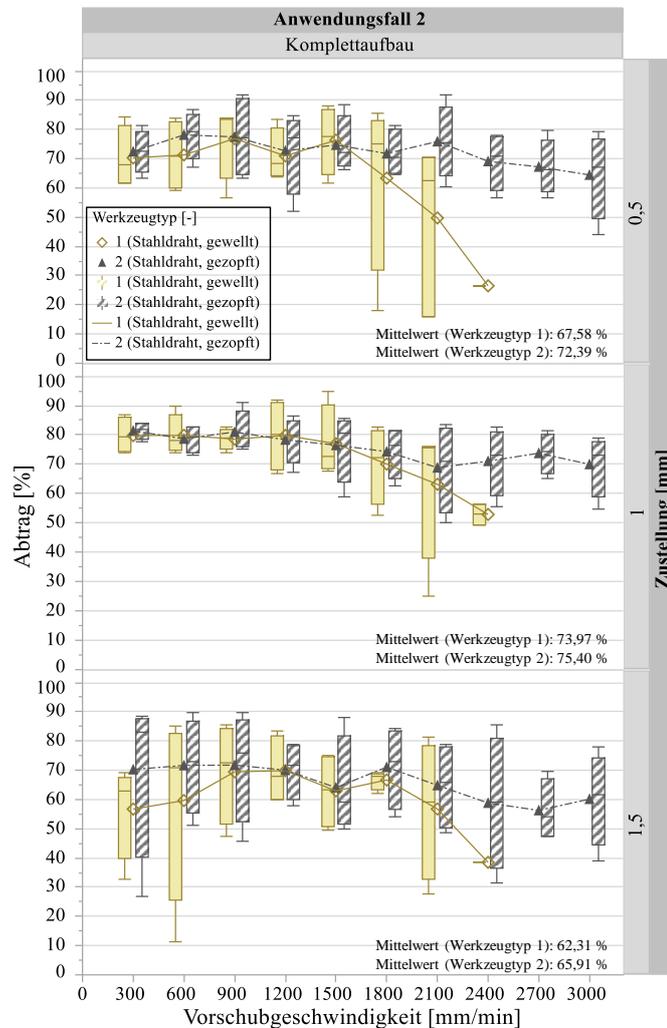


Abbildung 5-3 Ergebnisse Versuchsplan I-II: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf und WDVS-Aufbau 13/15

Auffällig ist, dass für Bürstentyp 1, der gewellten Stahldrahtbürste, der Verlauf ab einer Vorschubgeschwindigkeit von 2100 bzw. 2400 Millimeter pro Minute abbricht. Auch ist bereits ab einem Stufenwert von 1800 Millimeter pro Minute eine fallende Tendenz des Liniendiagramms auszumachen. Dies begründet sich wie folgt: In den experimentellen Versuchen wurde Werkzeugtyp 1 zehn unterschiedlichen Stufenwerten der Vorschubgeschwindigkeit ausgesetzt. Aus den Faktorstufen des WDVS-Aufbaus und der Zustellung sowie einer Wiederholung resultieren zwölf Einzelversuche des Werkzeugs für jeden Stufenwert der Vorschubgeschwindigkeit. Bei Vorschubwerten ab 1800 Millimeter pro Minute wurde der gewünschte Abtrag (Definition vgl. Abschnitt 4.1.3.1) erst teilweise und bei weiterer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ab 2700 Millimeter pro Minute gänzlich nicht mehr erreicht.

Wird dieser Bereich unter einem steigenden Verlauf der Geschwindigkeit betrachtet – aufgrund der Randomisierung entspricht dies nicht der Versuchsreihenfolge – so hat Werkzeugtyp 1 innerhalb eines Versuchs anfänglich Reste an EPS hinterlassen, worauf Rückstände an weiteren Systembestandteilen von Unter- und Oberputz inkl. Armierung folgten, bevor dann kein Abtrag mehr möglich war. Das Bürstenwerkzeug hat sich letztlich nur noch auf dem WDVS-Aufbau bewegt, die Schlussbeschichtung aus Ober- und Unterputz inkl. Armierung wurde nicht mehr durchtrennt. Unabhängig des WDVS-Aufbaus sowie der Zustellung war dies zu beobachten. Eine eindeutige Trennlinie der Abtragsergebnisse nach Vorschubgeschwindigkeit ist nicht auszumachen. Dies wird der Flexibilität des Werkzeugs zugeschrieben. Erlaubten Vorschubgeschwindigkeiten von 1800 Millimeter pro Minute größtenteils einen Abtrag der Systembestandteile, so häuft sich die Anzahl der Ausfälle bis schließlich bei keinem der zwölf Einzelversuche ein Abtrag mehr erbracht werden kann. Als Ausfall ist das Aufrollen des Bürstenwerkzeugs auf das WDVS zu sehen. Auf eine grafische Darstellung anhand von Nullwerten wurde an dieser Stelle verzichtet. Hat sich das Werkzeug erst einmal aufgerollt, so ist in keinem der Einzelversuche eine weitere Trennung der Schlussbeschichtung mehr zu beobachten. Abbildung 5-4 veranschaulicht dies anhand einzelner Ergebnisdarstellungen. Diese sind einer Rangordnung unterworfen: Zeigt (a) den gewünschten Abtrag – bis auf Reste von Kleber wurden alle Systembestandteile entfernt – so folgen ab (b-c) Rückstände von Dämmmaterial an der Betonwand. Die Bilder (d-e) zeigen das Auffahren des Werkzeugs nach einigen Zentimetern zurückgelegter Strecke bevor dann bei (f) und (g) kein Abtrag mehr verzeichnet werden kann. Mit Werkzeugtyp 2 hingegen, der gezopften Stahldrahtbürste, ist ein Abtrag des WDVS unter allen Stufen der Vorschubgeschwindigkeit möglich.



Abbildung 5-4 Versuchsplan I-II: Abtragsergebnisse Werkzeugtyp 1 nach der Vorschubgeschwindigkeit (Draufsicht); (a) Stufe 1500 mm/min, (b-c) Stufe 1800 mm/min, (d) Stufe 2100 mm/min, (e) Stufe 2400 mm/min, (f-g) Stufe 2700 mm/min

Ähnlichkeiten mit Schweer und Koch [62] sind auffallend. In einer Veröffentlichung zur Thematik der metallischen Oberflächenbearbeitung mit Nadelfräsern konnte festgestellt werden, dass nur die Vorschubgeschwindigkeit die Spantiefe bestimmt und in demselben Maße abnimmt, wie diese erhöht wird.

Für das Qualitätsmerkmal Massenverlust ist anhand Abbildung 5-5 ersichtlich, dass eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit immer mit einer werkzeugabhängigen Verringerung des Massenverlustes verbunden ist. Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steht dem Besatz weniger Zeit für den Werkstückkontakt zur Verfügung. Bei konstanter Drehzahl bedeutet dies eine Verringerung des Auftreffens des Einzeldrahts pro Versuch auf dem Werkstück – bestehend aus WDVS-Aufbau und Betonoberfläche. Dies ist charakteristisch für den abnehmenden Massenverlust. Ebenso steigt die Geschwindigkeit, mit der das Werkzeug in den WDVS-Aufbau hineinfährt. Die vom Werkzeug abzutragende Volumenmenge pro Werkzeugumdrehung nimmt zu. Dies könnte als Erklärung dienen, weshalb borstenabhängig eine Verringerung des Abtragsergebnisses bis hin zu Versuchsausfällen beobachtet werden kann.

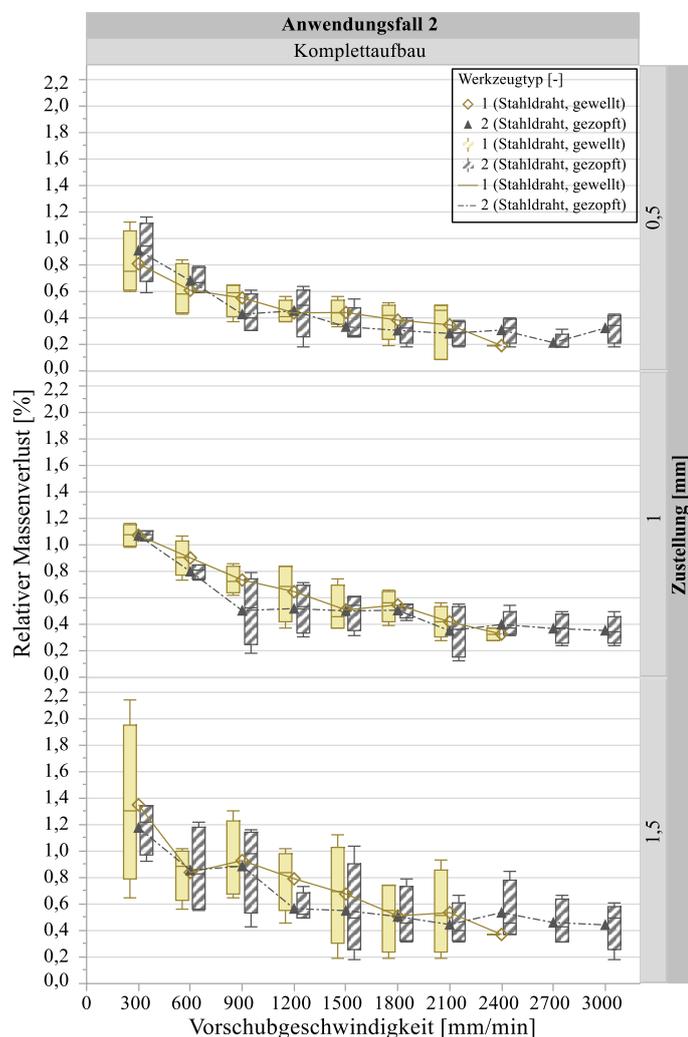


Abbildung 5-5 Ergebnisse Versuchsplan I-II: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf und WDVS-Aufbau 13/15

Versuchsplan I-II erlaubt weitere Rückschlüsse. Die Ergebnisse werden nachfolgend für Werkzeugtyp II über alle Vorschubgeschwindigkeiten sowie für Werkzeugtyp I bis zu einer Vorschubgeschwindigkeit von 2400 Millimeter pro Minute erläutert. Wie bei Versuchsplan I-I ist dem Faktor Zustellung ein Einfluss auf die Qualitätsmerkmale zuzuschreiben. Eine Erhöhung von 0,5 auf 1,0 Millimeter bewirkt eine Steigerung des Abtragsergebnisses. Wird die Zustellung allerdings um einen weiteren Stufenwert auf 1,5 Millimeter erhöht, so liegt der Abtrag im Mittel unter den vorherigen Stufeneinstellungen. Der Massenverlust hingegen steigt mit allen Stufenwerten an. Verdeutlicht wird dies exemplarisch in Tabelle 16. Die Mittelwerte des relativen Massenverlusts für Werkzeugtyp 2 sind dabei in Abhängigkeit der Zustellung für unterschiedliche Stufenwerte der Vorschubgeschwindigkeit aufgeführt.

Eine Erhöhung der Zustellung hat dabei eine Vergrößerung der Anpressung des Werkzeugs auf das Werkstück zur Folge. Dies bedeutet, dass der Besatz durch mangelnden Platz stärker durchgebogen wird. Unter dem Aspekt, dass der Abtrag von WDVS werkzeughabhängig unter gegebenen Einstellungen der Zustellung erreicht werden kann und alle Systembestandteile bis auf Klebereste entfernt werden können, ist der Faktor Zustellung um keinen weiteren Stufenwert zu ergänzen. Denn für einen möglichst geringen Massenverlust ist die Zustellung auf ein notwendiges Minimum zu begrenzen.

Tabelle 16 Analyseergebnisse relativer Massenverlust Versuchsplan I-II für Werkzeugtyp 2

Werkzeugtyp 2	Zustellung [mm]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]			
		300	1200	2100	3000
Mittelwert Relativer Massenverlust [%]	0,5	0,91	0,45	0,28	0,21
	1	1,07	0,52	0,35	0,36
	1,5	1,18	0,57	0,45	0,46

Eine statistische Auswertung der Messergebnisse anhand eines t-Tests ermöglicht die Bewertung der Signifikanz der einzelnen Faktoren. Für die Qualitätsmerkmale Abtrag und Massenverlust unterschreiten in allen Stufen die Faktoren Vorschubgeschwindigkeit und Zustellung das Signifikanzniveau. Der Faktor Werkzeugtyp hingegen ist nur für den Abtrag signifikant. Keine der möglichen Wechselwirkungseffekte des Qualitätsmerkmals Abtrag ist als bedeutend einzustufen. Für das Qualitätsmerkmal Massenverlust ist dem Term Werkzeugtyp*Vorschubgeschwindigkeit ein signifikanter Wechselwirkungseffekt zuzuschreiben. Dem Haupteffekt Vorschubgeschwindigkeit wird dabei die höchste Signifikanz zugeordnet.

Schlussfolgerung:

- Mit einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit kann der Werkzeugverschleiß bei konstanter Drehzahl reduziert werden. Gleichmaßen ist an einem Komplettaufbau aus WDVS je nach Werkzeugtyp mit schlechteren Abtragsergebnissen zu rechnen. So hat Werkzeugtyp 1 ab einer Vorschubgeschwindigkeit von 2700 Millimeter pro Minute trotz mehrfacher Versuche die Deckschicht (aus Ober- und Unterputz inkl. Armierung) gänzlich nicht mehr durchtrennt. Die Rückstände weiterer Systembestandteile liegen demnach bei 100 Prozent. Werkzeugtyp 2 hingegen hat den gewünschten Abtrag in allen Versuchen erbracht. Für die Hauptversuche unter konstanter Vorschubgeschwindigkeit ist daraus abzuleiten, dass die Werkzeugtypen den gewünschten Abtrag entweder erbringen oder nicht. Da der Faktor Vorschubgeschwindigkeit dafür maßgeblich ist, kann der Ausschluss eines Werkzeugs für die Hauptversuche unter konstanter Vorschubgeschwindigkeit bereits mit einer geringen Anzahl an Versuchen bzw. Versuchswiederholungen erfolgen. Für eine Beantwortung der Forschungsfragen 2 und 3 ist dies zu berücksichtigen.

- Mit höherer Zustellung nimmt der Werkzeugverschleiß zu, wohingegen für das Qualitätsmerkmal Abtrag erst eine Verbesserung und dann bei weiterer Stufenerhöhung tendenziell schlechtere Abtragungsergebnisse auftreten. Für einen verschleißarmen Werkzeugeinsatz ist der Faktor demnach so gering zu wählen, dass gerade der gewünschte Abtrag erbracht werden kann. Dies bildet die Ausgangsbasis für eine Beantwortung der Forschungsfrage 3.
- Die Faktorstufenänderung des WDVS-Aufbaus hat keinen signifikanten Einfluss. Unterschiede je nach verwendetem Kleber sind in Bezug auf den Abtrag sowie den Werkzeugverschleiß nicht nachzuweisen. Demnach werden die Untersuchungsergebnisse des Versuchsplans I-I über dessen Systemgrenzen hinaus verifiziert.
- Neben den Faktoren Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit und Werkzeugtyp gilt es die Wechselwirkungseffekte Werkzeugtyp*Vorschubgeschwindigkeit in weiteren Versuchsreihen zu berücksichtigen.

5.1.3 Einfluss der Drehbewegung

Bei den Trennverfahren Fräsen und Schleifen mit rotierenden Werkzeugen unterscheiden sich je nach Drehbewegung die erreichte Oberflächenqualität. Beim Gegenlaufräsen entsteht eine schlechtere Oberflächenqualität als beim Gleichlaufräsen, das Verfahren ist aber für die Bearbeitung harter Oberflächen besser geeignet. Ebenso läuft die Maschine ruhiger bzw. wird weniger in Schwingung versetzt, um nur einige Unterschiede zu nennen [6, S. 379]. Weit weniger Untersuchungen zum Einfluss der Drehbewegung existieren unter Verwendung eines Bürstenwerkzeugs. Das Forschungsvorhaben [49] zum Thema Nadelfräsen gibt vor, zur Vermeidung von Oberflächenverunreinigungen im Gegenlaufbetrieb zu arbeiten, wobei das abgetragene Material nicht zwischen Werkzeug und Werkstoff geführt wird. Zum Einfluss der Drehbewegung auf den Werkzeugverschleiß werden keine Angaben gemacht [49, S. 52–53]. Nach Schweer und Koch [62] hat die Drehbewegung beim Nadelfräsen einen Einfluss auf die Ergebnisse, wonach im Gegenlaufbetrieb im Vergleich zum Gleichlaufbetrieb eine höhere Abtragsleistung bei schlechterer Oberflächengüte erreicht wird. Aus den Experteninterviews geht hervor, dass sowohl Drehbewegung als auch Drehzahl technischer Bürsten oftmals von der Antriebsmaschine vorgegeben werden und nicht variabel sind [Experte 1.2.2.3]. Dahingehend bestehen keine Erfahrungen bezüglich der Effekte unterschiedlicher Drehbewegungen. Experte 1.2.8.14 hat auf die Differenzgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Werkzeug verwiesen und die Drehbewegung daher als unerheblich eingestuft. Lediglich bei Straßenkehrmaschinen werden die Rundbürsten bewusst im Gegenlauf betrieben, wodurch das Material nicht unter dem Werkzeug durchgeführt, sondern davor abgesaugt werden kann.

Auf Basis der durch Recherchen und Befragungen gewonnenen Informationen bildet sich die Forschungshypothese, dass eine Veränderung der Drehbewegung sich positiv auf die Qualitätsmerkmale ausüben könnte. Wenngleich auch nicht davon ausgegangen wird, dass eine Drehbewegung alle Zielgrößen begünstigt. Angelehnt an Versuchsplan I-II soll der Einfluss der Drehbewegung untersucht werden, indem die zuvor unter Gleichlauf ausgeführten Versuche nochmals im Gegenlauf durchgeführt werden. Keiner der begonnenen Versuche konnte dabei abgeschlossen werden, denn bereits nach einigen Zentimetern zurückgelegter Strecke kamen die Werkzeuge aufgrund einer Blockade zum Stehen. Die Einhausung war verstopft. Auslöser war der innige Verbund der Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung, welche beim Gegenlaufbetrieb vom Werkzeug unterfahren, anstatt von diesem durchtrennt wurden. Exemplarische Aufnahmen der unterfahrenen Systembestandteile sowie des abgetragenen Materials und der verstopften Einhausung zeigt Abbildung 5-6. Insgesamt kam es zu acht abgebrochenen Einzelversuchen mithilfe derer es zu prüfen galt, inwiefern eine Versuchsdurchführung im Gegenlaufbetrieb überhaupt möglich ist.

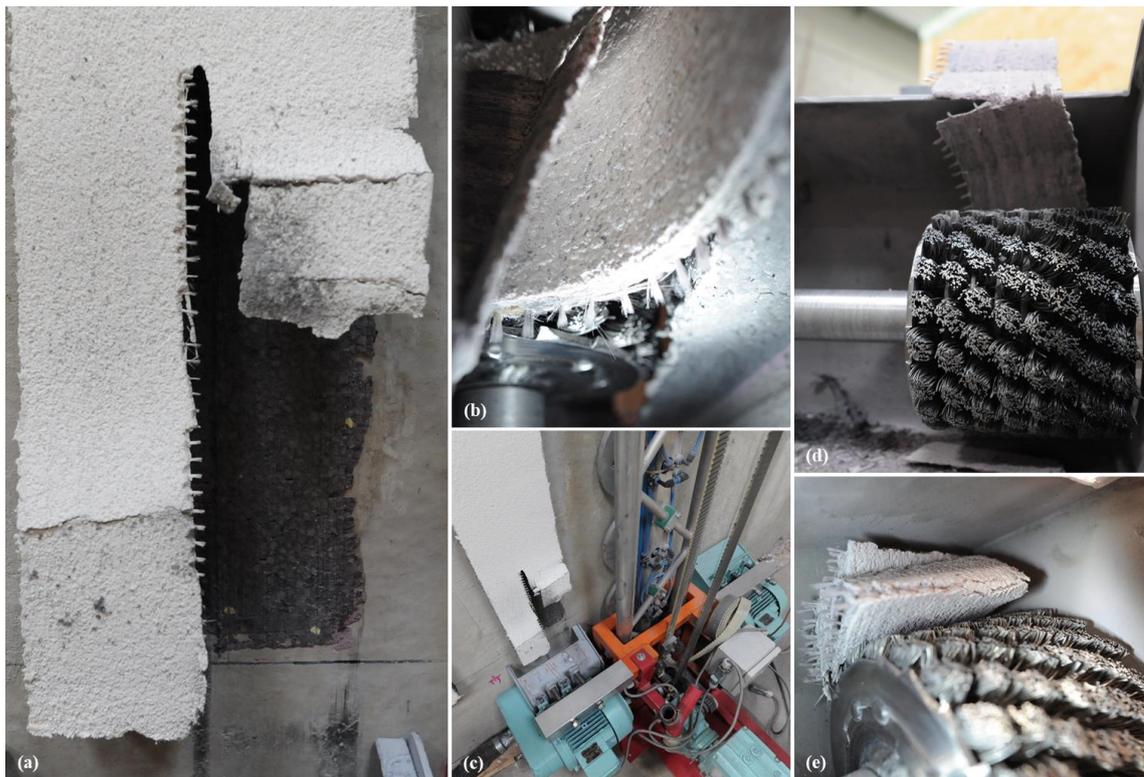


Abbildung 5-6 Versuchsplan I-III A: Unterfahren der Systembestandteile Putz und Armierung im Gegenlaufbetrieb; (a,c) WDVSAufbau nach Versuchsabbruch; (b) Bürstenwerkzeug kurz nach Versuchsabbruch; (d,e) verstopfte Einhausung

Um die Anzahl der Versuche gering zu halten, wurde die Vorschubgeschwindigkeit bei 300 Millimeter pro Minute festgehalten. Es ist anhand bestehender Erfahrungen aus vorangegangenen Versuchsreihen nicht davon auszugehen, dass weitere (höhere) Stufeneinstellungen einen Abtrag ermöglichen. Die Einstellungen sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17 Faktoren und Stufen Versuchsplan I-III Ausführung A

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriell (nominal)	13 / 15
Werkzeugtyp	[-]	kategoriell (nominal)	1 / 2
Zustellung	[mm]	stetig	0,5 / 1
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	300
Drehbewegung	[-]	konstant	Gegenlauf
Drehzahl	[1/min]	konstant	1636

Zur weiteren Untersuchung des Einflusses der Drehbewegung – als Bestandteil der Forschungsfrage 3 – rücken Versuche ohne die Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung in den Vordergrund. Dies begründet sich daraus, dass innerhalb dieser Arbeit infolge der geplanten Werkzeuganwendung in einem Baggeranbaugerät eine Optimierung auf den Abtrag des geklebten Dämmmaterials vorrangig ist (Anwendungsfall 1). Lediglich bei älteren WDVSAufbauten mit geringer Systemdicke muss das Werkzeug in der Lage sein, einen Komplettanbau abzutragen (Anwendungsfall 2). Bei diesen Aufbauten kann das vorgelagerte Fräswerkzeug die Entfernung der Systembestandteile Oberputz, Armierung, Unterputz und

einem Großteil des Dämmstoffs nicht gewährleisten (vgl. Abschnitt 4.1.2.3). Daraus folgt: Auch wenn der Abtrag aller Systembestandteile des WDVS ein Ausschlusskriterium darstellt, sind weitere Untersuchungen mit WDVS-Aufbauten ohne Armierungsschicht notwendig. Einerseits kann der Einfluss der Drehbewegung analysiert werden, andererseits erlaubt dies die Ergebnisse des Versuchsplans I-II in Relation zu setzen.

Der dazu entwickelte vollfaktorielle, randomisierte Versuchsplan I-IIIB mit 5 Faktoren und einer Wiederholung umfasst 320 durchzuführende Einzelversuche. Insgesamt lassen sich die Versuche in zwei vollfaktoriell randomisierte Blöcke bzw. Durchgänge aufteilen. Die jeweils 160 Versuche erfolgten hintereinander in gleicher Reihenfolge. Die untersuchten WDVS-Aufbauten 17 und 19 gleichen dabei in Teilen denen des Versuchsplans I-II mit den Nummern 13 und 15, nur mit einer verringerten Anzahl an Systembestandteilen bzw. ohne Putz und Armierung (vgl. Abschnitt 4.1.1.3). Die einzelnen Faktoren und Stufen sind Tabelle 18 zu entnehmen. Auf eine weitere Stufeneinstellung des Faktors Zustellung auf 1,5 Millimeter wurde gezielt verzichtet. Ein positiver Effekt konnte bereits in Versuchsplan I-II nicht identifiziert werden (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Tabelle 18 Faktoren und Stufen Versuchsplan I-III Ausführung B

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategorial (nominal)	17 / 19
Werkzeugtyp	[-]	kategorial (nominal)	1 / 2
Zustellung	[mm]	stetig	0,5 / 1
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	300 / 600 / 900 / 1200 / 1500 / 1800 / 2100 / 2400 / 2700 / 3000
Drehbewegung	[-]	kategorial (nominal)	Gleichlauf / Gegenlauf
Drehzahl	[1/min]	konstant	1636

Die Faktorstufen der Vorschubgeschwindigkeit sind dabei vergleichsweise gering zur Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeugs. Selbst für den höchsten Stufenwert von 3000 Millimeter pro Minute ist bei 1636 Werkzeugumdrehungen pro Minute sowie einer Prüfkörperlänge von 145 Zentimetern, damit zu rechnen, dass jeder Einzeldraht pro Versuch nahezu 800 Mal auf dem Werkstück aufkommt.

Die Messergebnisse des Versuchsplans I-IIIB zeigen Abbildung 5-7 für das Qualitätsmerkmal Abtrag sowie Abbildung 5-8 für den Massenverlust. Die Art der Darstellung erlaubt eine übersichtliche Beschreibung der Lage und Streuung der Ergebnisse. Die einzelnen Beobachtungswerte sind dazu unterteilt nach Vorschubgeschwindigkeit und Drehbewegung auf der Abszisse aufgetragen. Die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß lassen sich jeweils auf der Ordinate ablesen, ebenso wie die Zuordnung des Faktors Zustellung. Dem Faktor WDVS-Aufbau ist auch für Versuchsplan I-IIIB kein signifikanter Einfluss auf die Qualitätsmerkmale zuzuschreiben. Die Messwerte werden demnach nicht gesondert betrachtet. Eine entsprechende Darstellung liefert Anhang E. Infolgedessen ergeben sich je Boxplot $n = 4$ Messwerte. Die globalen Mittelwerte nach Faktorstufe der Vorschubgeschwindigkeit beider Werkzeugtypen finden sich am unteren Rand der jeweiligen Einzelgrafik. Sie ermöglichen einen Vergleich der Ergebnisse zwischen den Stufeneinstellungen. Die Mittelwerte der jeweiligen Faktorkombinationen der Vorschubgeschwindigkeit werden zur Veranschaulichung der Verläufe über Geraden miteinander verbunden.

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

Es ist zu erkennen, dass

- die Messergebnisse beider Qualitätsmerkmale bei ausgeglichenen Einstellungen keinen Unterschied bezogen auf die Drehbewegung zeigen,
- die untersuchten Werkzeuge vergleichbare Abtragsergebnisse erbringen und auch in Bezug auf den relativen Massenverlust kein Werkzeugtyp zu bevorzugen ist,
- Werkzeugtyp 1 gegenüber Werkzeugtyp 2 über alle Faktorstufen der Vorschubgeschwindigkeit überwiegend größere Spannweiten der Abtragsergebnisse erbringt, was gegen kontinuierliche Ergebnisse spricht,
- eine Stufenänderung der Vorschubgeschwindigkeit nur beim Qualitätsmerkmal Massenverlust die Messergebnisse maßgeblich beeinflusst,
- die Zustellung einen Einfluss auf die Ergebnisse beider Qualitätsmerkmale aufweist,
- beide Werkzeuge die Stufeneinstellungen der Vorschubgeschwindigkeit ohne Ausfall durchfahren und im Mittel überwiegend konstante Abtragsergebnisse erbringen. Der Verlauf der Liniendiagramme ist demnach relativ homogen, es ist weder eine näherungsweise monoton fallende noch steigende Tendenz zu beobachten.

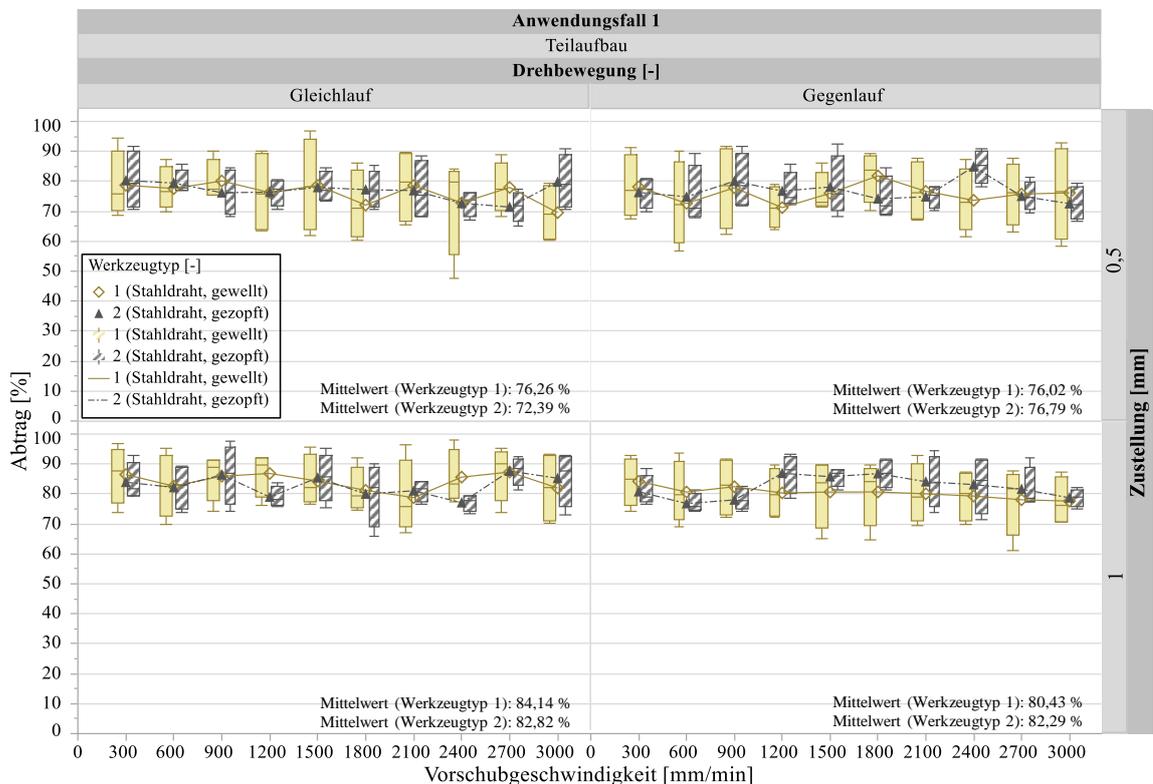


Abbildung 5-7 Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], Zustellung [mm] und Drehbewegung [-] bei WDV-S-Aufbau 17 / 19

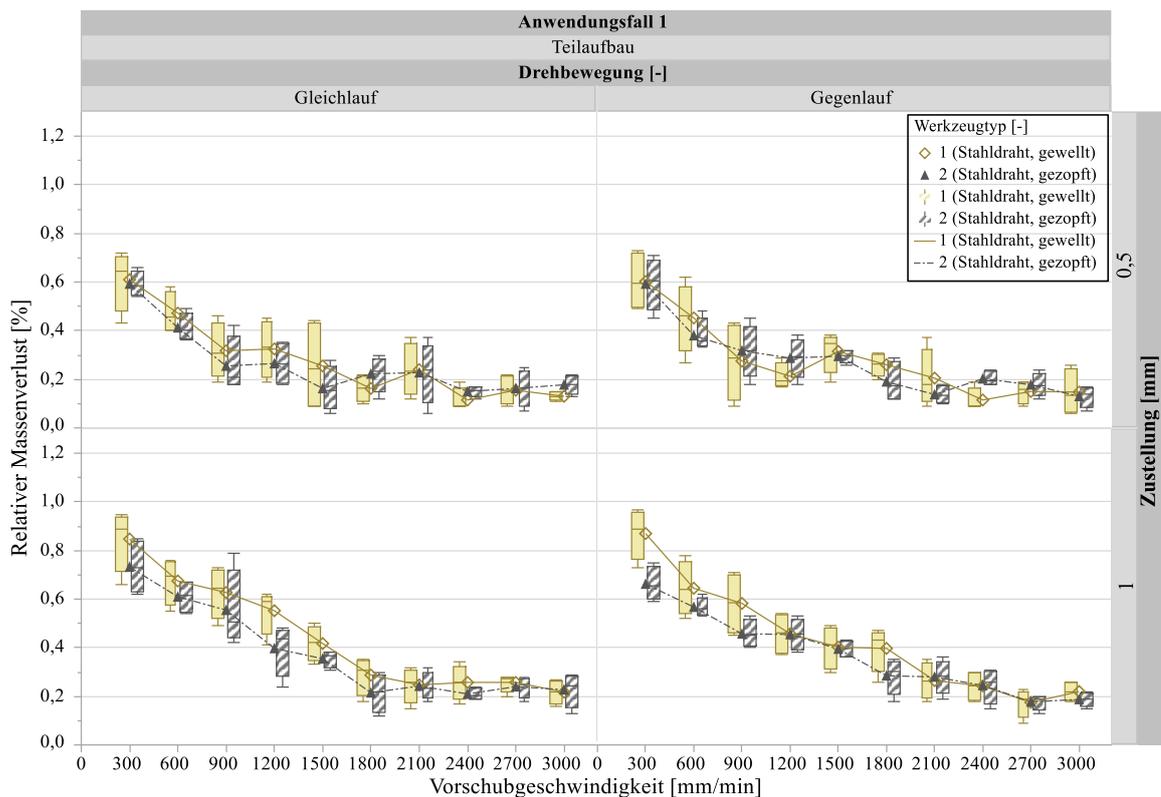


Abbildung 5-8 Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], Zustellung [mm] und Drehbewegung [-] bei WDVS-Aufbau 17 / 19

Eine statistische Analyse bestätigt die gewonnenen Eindrücke. Für das Qualitätsmerkmal Abtrag unterschreitet als Haupteffekt der Faktor Zustellung das Signifikanzniveau. Wechselwirkungseffekte sind nicht als signifikant einzustufen. Für das Qualitätsmerkmal Massenverlust stellen neben der Zustellung die Vorschubgeschwindigkeit und der Werkzeugtyp signifikante Haupteffekte dar. Zu nennende Wechselwirkungseffekte sind Werkzeugtyp*Vorschubgeschwindigkeit sowie Werkzeugtyp*Zustellung und Zustellung*Vorschubgeschwindigkeit.

Schlussfolgerung:

- Versuchsplan I-IIIA und I-IIIB ermöglichen es Forschungsfrage 3 in Teilen zu beantworten: Demnach kann ein Abtrag von WDVS mit Bürstenwerkzeugen an einem Komplettaufbau nur im Gleichlauf erfolgen, da ansonsten Oberputz, Armierung und Unterputz unterfahren werden. An einem Teilaufbau aus WDVS hingegen ist dem Faktor Drehbewegung in seinen zwei Stufen kein signifikanter Einfluss auf die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß nachzuweisen. Die Hauptversuche erfolgen daher im Gleichlauf. In Anlehnung an Stango [76] ist dabei von einer größeren Krafteinwirkung auf das WDVS auszugehen (vgl. Abschnitt 3.3.2), da innerhalb eines Umlaufs des Bürstenwerkzeugs der beschleunigte Einzeldraht zuerst auf den WDVS-Aufbau auftrifft und nicht auf die Betonoberfläche.
- Die Faktorstufenänderung des WDVS-Aufbaus hat keinen signifikanten Einfluss. Unterschiede je nach verwendetem Kleber sind in Bezug auf den Abtrag sowie den Werkzeugverschleiß nicht nachzuweisen. Demnach werden die Untersuchungsergebnisse der Versuchspläne I-I und I-II über deren Systemgrenzen hinaus weiter verifiziert. Durch einen Abgleich von Versuchsplänen kann

der Einfluss einzelner Systembestandteile des WDVS auf die Qualitätsmerkmale ermittelt und Forschungsfrage 1 fast gänzlich beantwortet werden (vgl. Abschnitt 5.1.4).

- Mit einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit kann auch an einem Teilaufbau aus WDVS der Werkzeugverschleiß bei konstanter Drehzahl reduziert werden, wohingegen kein Einfluss auf die Abtragsergebnisse nachzuweisen ist. Für eine Beantwortung der Forschungsfrage 3 ist dies zu berücksichtigen.
- Mit einer Stufenerhöhung der Zustellung von 0,5 auf 1,0 Millimeter nimmt der Werkzeugverschleiß sowie der Abtrag zu. Für einen verschleißarmen Werkzeugeinsatz ist der Faktor demnach so gering zu wählen, dass gerade ein rückstandsloser Abtrag erbracht werden kann. Dies bildet die Basis für die Beantwortung der Forschungsfrage 3.
- Die Faktoren Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit und Werkzeugtyp gilt es als Haupteffekte sowie die Wechselwirkungseffekte Werkzeugtyp*Vorschubgeschwindigkeit, Werkzeugtyp*Zustellung und Zustellung*Vorschubgeschwindigkeit in weiteren Versuchsreihen zu berücksichtigen.

5.1.4 Einfluss der Systembestandteile des WDVS

Für die innerhalb dieser Arbeit untersuchte Verwendung von Bürstenwerkzeugen – dem Abtrag von WDVS – sind grundsätzlich zwei Anwendungsfälle zu unterscheiden: Anwendungsfall 1 entspricht dem Abtrag der Systembestandteile Dämmstoff und Kleber, wohingegen bei Anwendungsfall 2 das Werkzeug den Komplettaufbau des WDVS zu bewerkstelligen hat. Abbildung 5-9 zeigt beispielhaft Aufbauten der Prüfkörper. Die bisher vorgestellten Ergebnisse sind repräsentativ für diese Anwendungsfälle und erlauben weitere Rückschlüsse. Die für einen Vergleich herangezogenen Messwerte unterschiedlicher Versuchspläne sind dabei – aufgrund der vollfaktoriellen Versuchsmuster – jeweils ausgewogen, weshalb auch kleine Auswirkungen eines Faktors identifiziert werden können [65]. Einerseits ermöglicht die Korrelation der Ergebnisse eine Analyse der Verschleißanteile einzelner Systembestandteile des WDVS, andererseits sind Rückschlüsse auf den Einfluss der Bestandteile auf das Abtragsergebnis möglich.

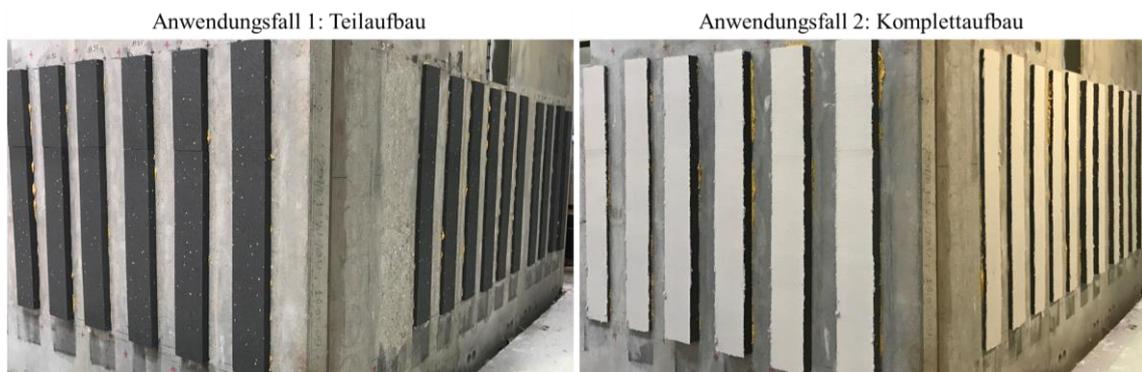


Abbildung 5-9 Exemplarischer Aufbau der Probekörper für Versuchsstand I

Mithilfe eines Vergleichs der Ergebnisse der Versuchspläne I-II (inklusive Teilergebnissen geringerer Stufenwerte der Vorschubgeschwindigkeit aus Versuchsplan I-I) und I-IIIB kann der Einfluss der Deckschicht aus Ober- und Unterputz inkl. Armierung auf den Abtrag sowie den Werkzeugverschleiß ermittelt werden. Dazu werden folgende Messwerte der Versuchspläne übernommen: Aus Versuchsplan I-IIIB die Ergebnisse gleichläufiger Drehbewegung sowie alle Messwerte der Versuchspläne I-I und I-II der Zustellung 0,5 und 1 Millimeter. Da der Faktoränderung WDVS-Aufbau kein signifikanter Einfluss auf die

Qualitätsmerkmale zuzuschreiben ist, werden die Messwerte der WDVS-Aufbauten 13 und 15 (Komplett-aufbauten) sowie 17 und 19 (Teilaufbauten) für einen Vergleich jeweils zusammengefasst.

Die Systembestandteile der Aufbauten 17 und 19 sind dabei ebenfalls in den Aufbauten 13 und 15 enthalten (vgl. Abschnitt 4.1.1.3). Weitere Versuchspläne erlauben zusätzliche Implikationen und werden im Nachgang erläutert, wodurch Forschungsfrage 1 fast gänzlich beantwortet werden kann.

Von einer tiefergehenden Untersuchung der einzelnen Systembestandteile der Deckschicht aus Ober- und Unterputz sowie der Armierung wird abgesehen. Einerseits ist ein Abtrag dieser Schichten mit einem Bürstenwerkzeug lediglich bei – für die Untersuchungen dieser Arbeit zweitrangigem – Anwendungsfall 2 notwendig, andererseits erfolgt der Abtrag dort ebenfalls als Ganzes und nicht in Teilen. Diese Bestandteile werden daher nicht gesondert, sondern im Verbund untersucht.

Der Einfluss der Deckschicht lässt sich aus Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 ableiten. Abweichend zu vorherigen Darstellungen wird dabei nicht der Werkzeugtyp, sondern der WDVS-Aufbau überlagert. Dies ermöglicht einen direkteren Vergleich der jeweils vier Messwerte eines Boxplots. Eine Beschreibung des Versuchsplans I-II liefert Abschnitt 5.1.2, wohingegen in Abschnitt 5.1.3 der Versuchsplan I-III B erläutert wird. An dieser Stelle sollen nur die Ergebnisse in Bezug auf den WDVS-Aufbau verglichen werden.

Ersichtlich ist, dass Werkstücke des Anwendungsfalls 1 (Teilaufbau) gegenüber Anwendungsfall 2 (Komplettaufbau) unter identischen Maschinen- und Werkzeug-Einstellungen einerseits ein höheres Abtragsergebnis erlauben, andererseits geringeren Werkzeugverschleiß zur Folge haben. So liegt das Abtragsergebnis für Werkzeugtyp 1 an einem Teilaufbau im Vergleich zu einem Komplettaufbau global über allen Vorschubgeschwindigkeiten im Mittel 8,7 Prozent (für eine Zustellung von 0,5 Millimeter) bis 10,1 Prozent (für eine Zustellung von 1,0 Millimeter) höher. Bei der gezopften Stahldrahtbürste verhält es sich ähnlich, mit 4,5 Prozent für eine Zustellung von 0,5 Millimeter sowie 7,4 Prozent für eine Zustellung von 1,0 Millimeter. Werden die Ergebnisse des Massenverlusts (globaler Mittelwert über alle Vorschubgeschwindigkeiten) an einem Teilaufbau mit einem Komplettaufbau in den Vergleich gesetzt, ergibt sich bezogen auf die Ergebnisse des Teilaufbaus ein Einsparpotential von 32 bis 45 Prozent, je nach Werkzeugtyp und Zustellung, sollte die Bürste einen Teil- anstatt einen Komplettaufbau bearbeiten.

Zugleich wird für Vorschubgeschwindigkeiten bis 1800 Millimeter pro Minute ersichtlich, dass die Kurvenverläufe der Abtragsergebnisse der gezopften Stahldrahtbürste verglichen mit der gewellten näher beieinander liegen. Demnach ist für die gewellte Stahldrahtbürste (Werkzeugtyp 1) mit geringerer Werkzeugsteifigkeit die Wirkung der Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung auf das Qualitätsmerkmal Abtrag durchschnittlich höher.

Ebenfalls auffällig für das Qualitätsmerkmal Abtrag ist ein werkzeugunabhängiger Anstieg der Differenz der Messwerte zwischen den Aufbauten mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück wird durch eine Änderung der Vorschubgeschwindigkeit allerdings nicht wesentlich beeinflusst, denn die Umfangsgeschwindigkeit (mit 10 bis 12 Metern pro Sekunde) ist gegenüber der Vorschubgeschwindigkeit sehr groß (Faktor 200 bis 2400). Bestätigt wird dies anhand der Ergebnisse des Anwendungsfalls 1. Die Faktorstufen der Vorschubgeschwindigkeiten haben keinen signifikanten Einfluss auf das Abtragsergebnis. Der Abfall der Messergebnisse mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit des Anwendungsfalls 2 (Komplettaufbau) ist somit der Deckschicht zuzuschreiben. Da vor allem der Faktor Vorschubgeschwindigkeit daran beteiligt ist, liegt die Vermutung nahe, dass die Geschwindigkeit mit der das Bürstenwerkzeug in den Werkstoff hineinbewegt wird – sowie das damit einhergehende abzufördernde Volumen – für das Abtragsergebnis relevant ist. Aufgrund der im Vergleich zur Relativgeschwindigkeit kleinen Änderung der Vorschubgeschwindigkeit ist für Anwendungsfall 2 nicht anzunehmen, dass dies durch eine Anpassung der Umfangsgeschwindigkeit kompensiert werden kann.

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

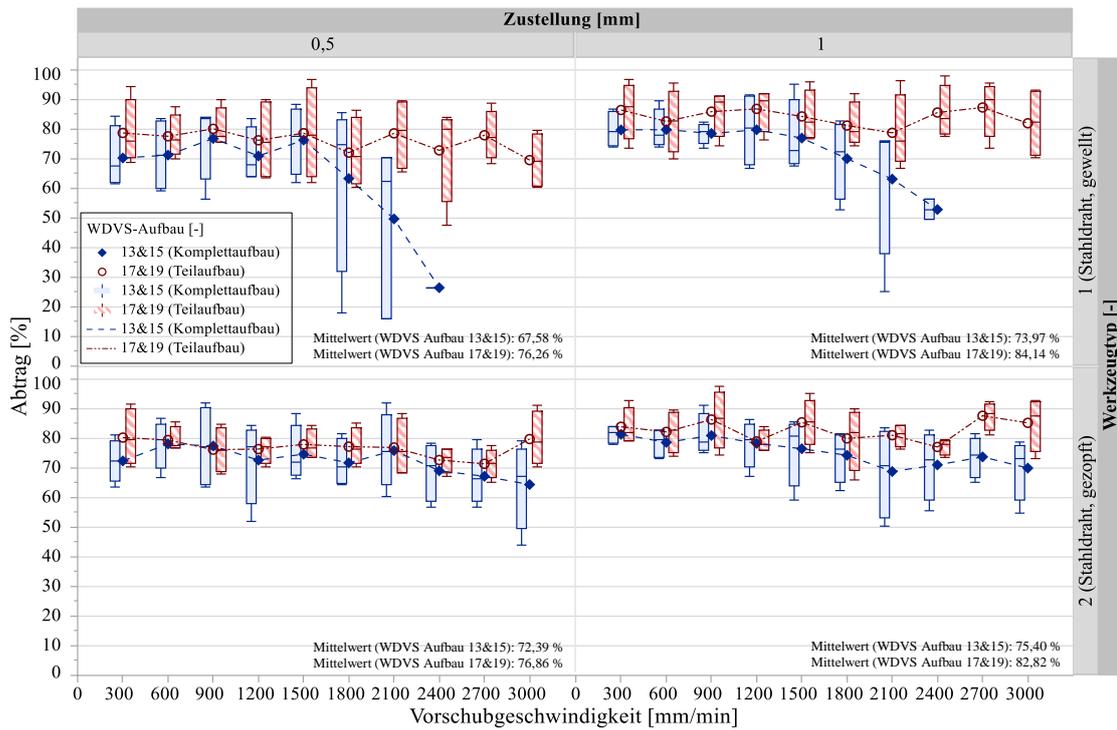


Abbildung 5-10 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB: Abtrag [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

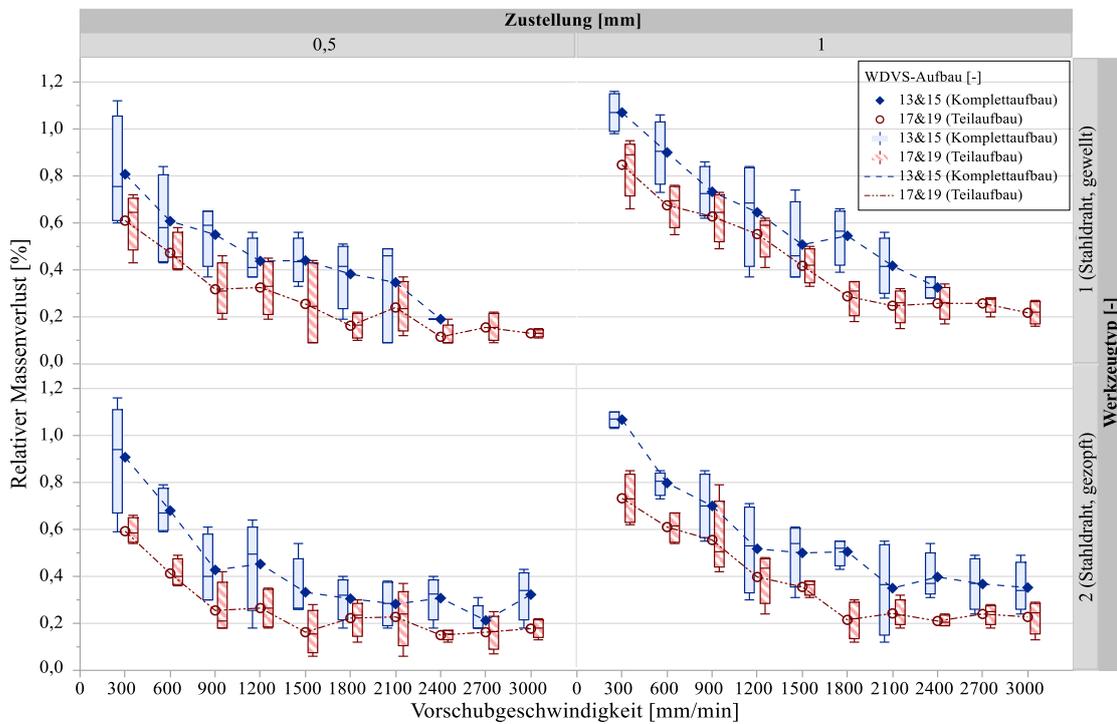


Abbildung 5-11 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-III: Relativer Massenverlust [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

Eine statistische Analyse der experimentellen Untersuchungsergebnisse ermöglicht es, die Signifikanz der Faktoren zu bewerten. Die anhand von Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11 beschriebenen Erkenntnisse werden dabei bekräftigt. Demnach sind die Faktoren Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit und WDVS-Aufbau (wobei die Ergebnisse nach Komplett- und Teilaufbauten differenziert werden) bedeutend. Ebenso unterschreiten als Wechselwirkung WDVS-Aufbau (Komplettaufbau)*Vorschubgeschwindigkeit sowie Werkzeugtyp*Vorschubgeschwindigkeit das Signifikanzniveau für die Qualitätsmerkmale Abtrag und Massenverlust. Nur für das Qualitätsmerkmal Massenverlust ist zusätzlich die Wechselwirkung Zustellung*Vorschubgeschwindigkeit und für das Qualitätsmerkmal Abtrag der Haupteffekt Werkzeugtyp signifikant. Dem Faktor Vorschubgeschwindigkeit ist dabei insgesamt die höchste Signifikanz zuzuordnen.

Für eine ganzheitliche Betrachtung einzelner Systembestandteile des WDVS müssen weitere Messergebnisse ergänzt werden. Erlauben die Versuchspläne I-I, I-II sowie I-IIIB eine Abgrenzung der Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung, so kann der Einfluss der Betonoberfläche sowie der Systembestandteile Kleber und Dämmstoff nicht separat analysiert werden. Durch das Einbeziehen der Versuchspläne I-IV und I-V wird dies ermöglicht. Die Versuchsmuster der vollfaktoriellen randomisierten Versuchspläne mit einer Wiederholung sind Tabelle 19 und Tabelle 20 zu entnehmen. Die Versuchspläne werden im Nachgang erläutert.

Um den Einfluss des Dämmstoffs auf die Qualitätsmerkmale beurteilen zu können, sind die Werkzeuge des Versuchsplans I-IV gegenüber dem Werkstück so zu positionieren, dass der Dämmstoff zwar durchfahren, die Betonoberfläche (sowie der Klebstoff) jedoch nicht berührt wird. Eine negative Zustellung macht dies möglich. WDVS-Aufbau 18 weist dabei EPS der Stärke vier Zentimeter auf, wobei aufgrund der Zustellung zwei Zentimeter bearbeitet werden. Anzumerken ist, dass die WDVS-Aufbauten 17 bis 19 den gleichen Dämmstoff aufweisen. Unterscheiden sich die Aufbauten 17 und 19 hinsichtlich des Systembestandteils Kleber, so entspricht WDVS-Aufbau 18 dem WDVS-Aufbau 17 mit einer Dämmstoffstärke von vier statt zwei Zentimetern. Ein Vergleich der Ergebnisse der Versuchspläne I-II bis I-V ist demnach gerechtfertigt.

Tabelle 19 Faktoren und Stufen Versuchsplan I-IV

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriiell (nominal)	18
Werkzeugtyp	[-]	kategoriiell (nominal)	1 / 2
Zustellung	[mm]	konstant	-2
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	300 / 600 / 900 / 1200 / 1500 / 1800 / 2100 / 2400 / 2700 / 3000
Drehbewegung	[-]	kategoriiell (nominal)	Gleichlauf / Gegenlauf
Drehzahl	[1/min]	konstant	1636

Abbildung 5-12 veranschaulicht die Messergebnisse des Versuchsplans I-IV. Jeder Box sind $n = 4$ Messwerte zuzuweisen. Da die Drehbewegung keinen nachweislich signifikanten Einfluss auf den Massenverlust hat, werden die Ergebnisse nicht gesondert dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Messergebnisse einen Wertebereich von $\pm 0,15$ Gramm aufweisen. Bezogen auf das Werkzeuggewicht liegt der Massenverlust somit bei $\pm 0,004$ bis $\pm 0,006$ Prozent. Der Messdatenaufnahme diente eine Präzisionswaage des Unternehmens ATP Messtechnik GmbH mit einer Ablesbarkeit von 0,05 Gramm sowie einer Linearität von $\pm 0,15$ Gramm. Im Rahmen der Messungenauigkeit des Systems zeigen demnach alle Werkzeugtypen einen Massenverlust von null Gramm an [120, S. 28]. Folglich ist dem Systembestandteil Dämmstoff kein Einfluss auf das Qualitätsmerkmal Massenverlust zuzuschreiben. Ebenso unterschreitet innerhalb einer statistischen Analyse keiner der Haupt- oder Wechselwirkungseffekte des Versuchsplans I-IV das Signifikanzniveau.

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

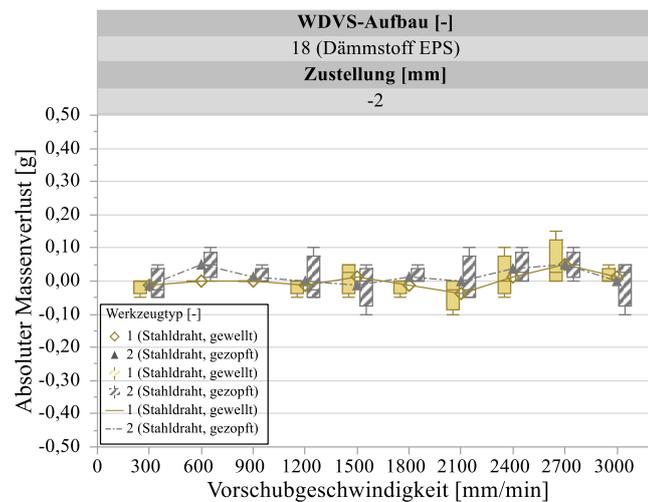


Abbildung 5-12 Ergebnisse Versuchsplan I-IV: Absoluter Massenverlust [g] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] bei Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf

Daraus folgt im Umkehrschluss nicht, dass von keinerlei Einfluss des Systembestandteils Dämmstoff auf die Qualitätsmerkmale ausgegangen werden kann. Auch wenn dieser selbst keinen messbaren Verschleiß hervorruft, wird eventuell dennoch der mechanische Prozess des Abtrags von WDVS beeinflusst. Denn das Werkzeug dringt pro Umlauf bei einer Drehbewegung im Gleichlauf zuerst in den Dämmstoff ein, bevor der Besatz dann den Klebstoff sowie die Betonoberfläche tangiert. Ein das Werkzeug von der Betonoberfläche abhebender Effekt und somit eine Verringerung des Werkzeugverschleißes ist denkbar. Ein Vergleich des Versuchsplans I-III B mit Versuchsplan I-V liefert weitere Informationen. Versuchsplan I-V unterscheidet sich zu Versuchsplan I-IV lediglich anhand des WDVS-Aufbaus und der Zustellung. Den Stufenwert 0 des WDVS-Aufbaus zeichnet dabei aus, dass sich die Bürstenwerkzeuge auf einer Betonoberfläche der Festigkeit C25/30 bewegen. Die Erweiterung des Stichprobenumfangs erlaubt eine schärfere Abgrenzung einzelner Effekte. Die Einflüsse der Betonoberfläche, des Klebers, des Dämmstoffs sowie der Armierungsschicht können nun gesondert untersucht werden.

Tabelle 20 Faktoren und Stufen Versuchsplan I-V

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	konstant	0
Werkzeugtyp	[-]	kategoriiell (nominal)	1 / 2
Zustellung	[mm]	stetig	0,5 / 1
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	300 / 600 / 900 / 1200 / 1500 / 1800 / 2100 / 2400 / 2700 / 3000
Drehbewegung	[mm]	kategoriiell (nominal)	Gleichlauf / Gegenlauf
Drehzahl	[1/min]	konstant	1636

Die Ergebnisse des Versuchsplans I-V sind Abbildung 5-13 zu entnehmen. Veranschaulicht wird der Massenverlust zweier Bürstenwerkzeuge bei Kontakt mit der Betonoberfläche. Der Faktor Drehbewegung ist nicht signifikant und wird nicht gesondert aufgeführt. Jeder Boxplot entspricht vier Messwerten. Wie bereits bei Versuchsplan I-III B sind die Faktoren Vorschubgeschwindigkeit, Werkzeugtyp und Zustellung signifikant. Als Wechselwirkungseffekte des Versuchsplans I-V zu nennen sind die Kombinationen Werkzeugtyp*Vorschubgeschwindigkeit sowie Zustellung*Vorschubgeschwindigkeit.

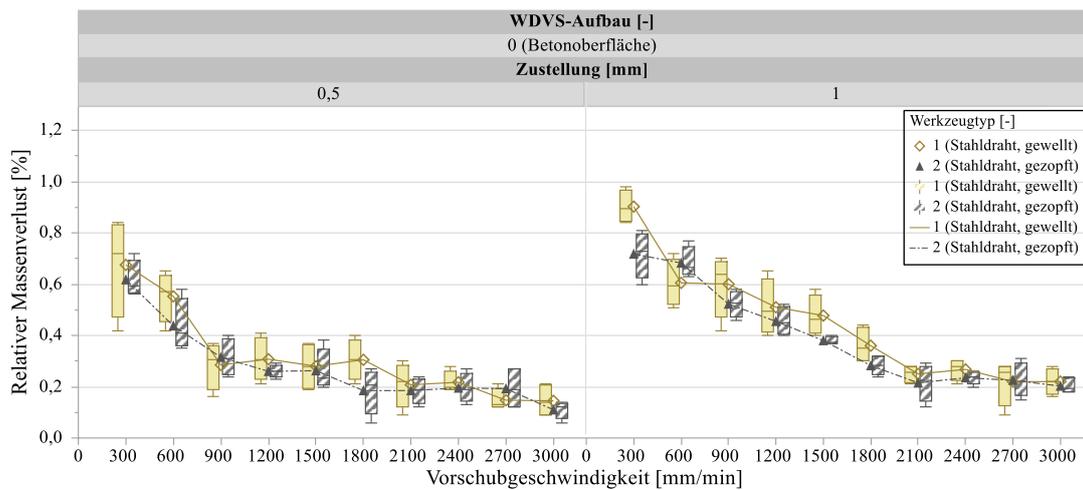


Abbildung 5-13 Ergebnisse Versuchsplan I-V: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf

Durch einen Vergleich der Versuchspläne I-III B (Teilaufbau) und I-V (Betonoberfläche) sowie unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Versuchsplans I-IV (Dämmstoff EPS) kann abschließend der Einfluss des Systembestandteiles Kleber ermittelt werden. Ersichtlich wird in Abbildung 5-14, dass die Verläufe der WDVS-Aufbauten nahe beieinander liegen und sich mehrfach überschneiden. Demnach ist auch dem Systembestandteil Klebstoff – ein Einfluss des Dämmstoffs EPS wurden bereits zuvor ausgeschlossen – keine Auswirkung auf den Werkzeugverschleiß zuzuweisen. Eine statistische Analyse bestätigt, dass es keine signifikanten Unterschiede auf den Werkzeugverschleiß gibt, wenn die Bürstenwerkzeuge anstatt durch einen Teilaufbau über die Betonoberfläche bewegt werden.

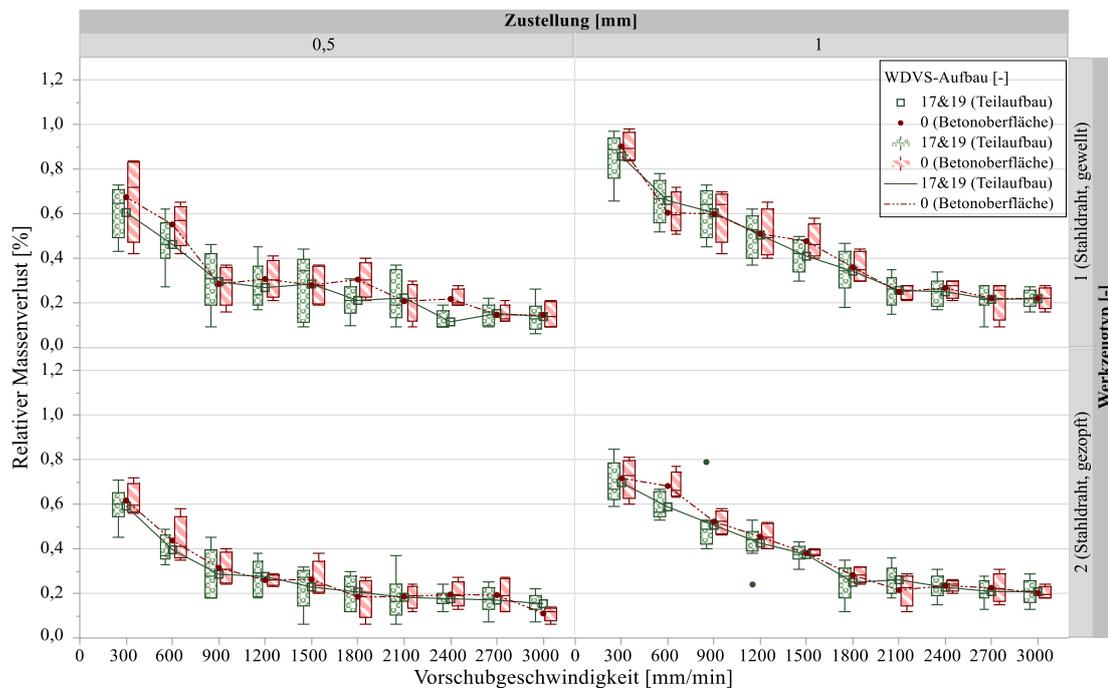


Abbildung 5-14 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-III & I-V: Relativer Massenverlust [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf

Nach der grafischen Darstellung sowie der statistischen Analyse der Messergebnisse erfolgt eine Beschreibung der Zusammenhänge mithilfe einer einfaktoriellen Regressionsanalyse. Die Eigenschaften der Qualitätsmerkmale werden dazu in Abhängigkeit der Variable Vorschubgeschwindigkeit beschrieben. Diese legt die Zeitdauer fest, welche von den Bürstenwerkzeugen bei konstanter Drehzahl benötigt wird, um den 145 Zentimeter langen WDVS-Aufbau eines Prüfkörpers zu durchfahren. Der Zusammenhang zwischen der Zielgröße y (auch als Regressionswert bzw. Regressanden bezeichnet) und der erklärenden Variablen x (bzw. dem Regressor) wird dabei von zufälligen Störungen überlagert und lässt sich nicht exakt als Funktion wiedergeben. „Ein Hauptziel der Regressionsanalyse besteht somit darin, den Einfluss der erklärenden Variablen auf den Mittelwert der Zielgröße zu untersuchen“ [121, S. 19]. Auf Basis statistischer Analysen wird eine Unterteilung nach den signifikanten Faktoren Werkzeugtyp, Zustellung und WDVS-Aufbau vorgenommen.

Besitzen die Messergebnisse eine lineare Tendenz, dann ist die lineare Regression mit dem Funktionsansatz

$$y = b_0 + b_1x \quad (5.7)$$

zur Beschreibung der statistischen Abhängigkeit der Variable y von der Variable x geeignet [122, S. 97]. Auf das Qualitätsmerkmal Abtrag (vgl. Abbildung 5-10) trifft dies bedingt für den Anwendungsfall Teilaufbau zu. Da dem Faktor Vorschubgeschwindigkeit allerdings kein signifikanter Einfluss auf das Qualitätsmerkmal Abtrag nachzuweisen ist, entspricht die Funktion innerhalb des untersuchten Faktorraums dem jeweiligen globalen Mittelwert.

Werden die Ergebnisse der Qualitätsmerkmale Massenverlust und Abtrag betrachtet (vgl. Abbildung 5-10 und Abbildung 5-11), letztere lediglich für den Anwendungsfall Kompletttaufbau, so lassen diese einen nichtlinearen Verlauf erkennen. Die lineare Funktion stellt somit keinen geeigneten Funktionsansatz dar. Vielmehr erscheint eine polynomiale Modellierung mit

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n \quad (5.8)$$

für den Anwendungsfall Kompletttaufbau des Qualitätsmerkmals Abtrag sinnvoll. Für das Qualitätsmerkmal Massenverlust hingegen ist charakteristisch, dass dieser mit steigender Stufenanzahl der Vorschubgeschwindigkeit absinkt. In Tabelle 21 ist daher eine Übersicht weiterer nichtlinearer Funktionen gegeben, welche in der Statistik angewandt werden, wobei y und x stets größer null sind [122, S. 105].

Gesucht ist jeweils die Funktion mit der besten Anpassung des Verlaufs an den Datensatz. Eine „gute“ Anpassung bedeutet, dass die Abweichungen der mittleren Messwerte von den zugehörigen Werten der Regression im Durchschnitt möglichst klein sind. Nach Eckstein [122] ist eine bestimmte nichtlineare Funktion zur Beschreibung statistischer Abhängigkeiten geeignet, sofern die Punkte aus den transformierten Einzelwerten einen linearen Verlauf aufweisen [122, S. 106]. Die zahlenmäßige Bestimmung der Regressionsparameter erfolgt dabei auf Basis der Methode der kleinsten Quadratsumme.

Tabelle 21 Bivariate nichtlineare Funktionen mit Linearisierungen, nach [122, S. 105]

Funktionsbezeichnung	Nichtlineare Funktion	Linearisierte Funktion
Inverse Funktion	$y = b_0 + b_1 * x^{-1}$	$y = b_0 + b_1 * z$ mit $z = x^{-1}$ (5.9)
Logarithmische Funktion	$y = b_0 + b_1 * (\ln x)$	$y = b_0 + b_1 * z$ mit $z = \ln x$ (5.10)
Exponentialfunktion	$y = \exp(b_0 + b_1 * x)$	$z = b_0 + b_1 * x$ mit $z = \ln y$ (5.11)
Potenzfunktion	$y = b_0 * x^{b_1}$	$\ln y = \ln b_0 + b_1 * (\ln x)$ (5.12)

Als Maß für die Güte der Regression dient das sogenannte einfache Bestimmtheitsmaß R^2 , mit einem Wertebereich zwischen null und eins. Dieses gibt den Anteil der von der Regression erklärten Streuung in den Daten wieder [123, S. 102] und ist nach Meintrup [114, S. 334] definiert als

$$R^2 = 1 - \frac{sse}{ssto} \quad (5.13)$$

mit der Summe der quadrierten Abweichung vom globalen Mittelwert \bar{y}

$$ssto = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (5.14)$$

sowie die Summe der quadrierten Residue

$$sse = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.15)$$

Dabei bezeichnet \hat{y} üblicherweise den geschätzten Wert der Zielgröße und y_i den tatsächlichen Messwert. Die Summe $ssto$ kann somit als Gesamtstreuung in den Daten aufgefasst werden, wohingegen die Summe sse die Streuung wiedergibt, welche nach der Anpassung übrig bleibt. Je näher das einfache Bestimmtheitsmaß R^2 an eins liegt, desto mehr Streuung kann durch die Funktion erklärt werden, desto besser passt diese zu den Messdaten [114, S. 334].

Werden die unterschiedlichen Funktionsansätze anhand des einfachen Bestimmtheitsmaß R^2 in den Vergleich gesetzt (vgl. Anhang E Tabelle 51 und Tabelle 52), so passt für das Qualitätsmerkmal Abtrag des Anwendungsfalls Komplettaufbau eine polynomiale Funktion 3. Grades am besten zu den Messdaten. Bekanntermaßen steigt bei polynomialen Funktionsansätzen die Anpassung an die Messdaten mit höherem Polynomgrad [121, S. 153]. Werden dann aber weitere Daten zur Validierung herangezogen, so führen komplexere Ansätze oftmals zu einer schlechteren Anpassung. Für die Messdaten dieser Arbeit wurden Polynome bis zur sechsten Ordnung ermittelt, eine signifikante Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes war allerdings bereits ab der dritten Ordnung nicht mehr festzustellen. Für das Qualitätsmerkmal Massenverlust hingegen passt sich ein logarithmischer Funktionsansatz den Messdaten am besten an.

Die entsprechenden Ausgleichskurven werden in Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 vorgestellt. Die Versuchsergebnisse sind als Punkte eingezeichnet. Dabei steht ein Punkt bei Versuchen mit gleichen Einstellungen sowie Faktoren – denen keine Signifikanz nachzuweisen ist – für das arithmetische Mittel der Ergebnisse. Die Funktionsgleichungen beschreiben den Abtrag bzw. den relativen Massenverlust bei der Bearbeitung eines WDVS-Aufbaus von einem Werkzeugtyp unter einer definierten Zustellung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit. Bei der Darstellungsform handelt es sich um zugeschnittene Größengleichungen nach DIN 1313 (Dezember 1998) [124]. Auf Basis der Versuche sowie der generierten Messwerte sind die Funktionen des Werkzeugtyp 1 an einem Komplettaufbau für einen Wertebereich der Vorschubgeschwindigkeit von 300 bis 2400 Millimeter pro Minute plausibel, bei Werkzeugtyp 2 sowie für den Anwendungsfall Teilaufbau weitet sich dieser auf 3000 Millimeter pro Minute.

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

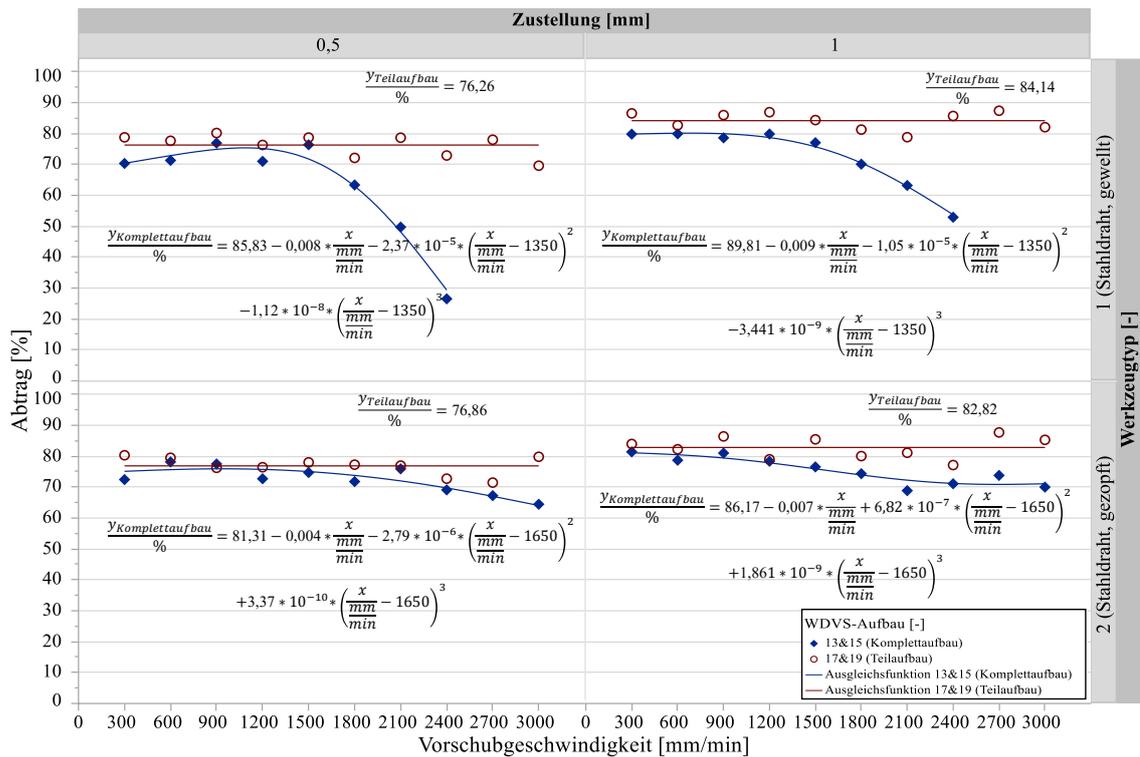


Abbildung 5-15 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB und Regressionsanalyse: Abtrag [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

Auffällig ist, dass für Werkzeugtyp 1 der Kurvenverlauf des Anwendungsfalls Komplettaufbau ab einer Vorschubgeschwindigkeit von etwa 1500 Millimeter pro Minute absinkt und dann ab 2400 Millimeter pro Minute komplett abbricht. Innerhalb der experimentellen Untersuchungen (Versuchsplan I-II) wurden Stufenwerte bis 3000 Millimeter pro Minute getestet, wobei mit steigender Stufeneinstellung der Vorschubgeschwindigkeit der gewünschte Abtrag erst teilweise und dann gänzlich nicht mehr erreicht werden konnte. Werkzeugtyp 1 hat sich schließlich nur noch auf der Deckschicht aus Ober- und Unterputz inkl. Armierung bewegt, diese allerdings nicht mehr durchtrennt. Eine detaillierte Beschreibung der Versuche liefert Abschnitt 5.1.2.

Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steht dem Besatz bei konstanter Drehzahl weniger Zeit für die Werkstückbearbeitung zur Verfügung. Die vom Werkzeug abzutragende Volumenmenge pro Werkzeugumdrehung nimmt zu. Dies könnte als Erklärung dienen, weshalb je nach Werkzeugtyp und Anwendungsfall ein fallender Kurvenverlauf des Abtrags zu verzeichnen ist. Denn einerseits ist Werkzeugtyp 2 (die gezopfte Stahldrahtbürste) gegenüber Werkzeugtyp 1 (einer gewellten Anordnung) als steifer einzustufen, andererseits müssen die Bürstenwerkzeuge bei einer Bearbeitung des Anwendungsfalls Komplettaufbau gegenüber einem Teilaufbau die Deckschicht aus Ober- und Unterputz inkl. Armierung durchtrennen. Sollte die Deckschicht nicht mehr durchtrennt werden, ist folglich von einer stärkeren Durchbiegung der Einzeldrähte des Werkzeugtyp 1 bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten auszugehen.

Auf eine Analyse sowie grafische Darstellung der Ergebnisse des Werkzeugtyp 1 für den Anwendungsfall Komplettaufbau ab einer Geschwindigkeit von 2400 Millimeter pro Minute wurde verzichtet. Diese liegen bei null Prozent und hätte innerhalb der Regressionsanalyse zu einer Verzerrung des Kurvenverlauf beigetragen.

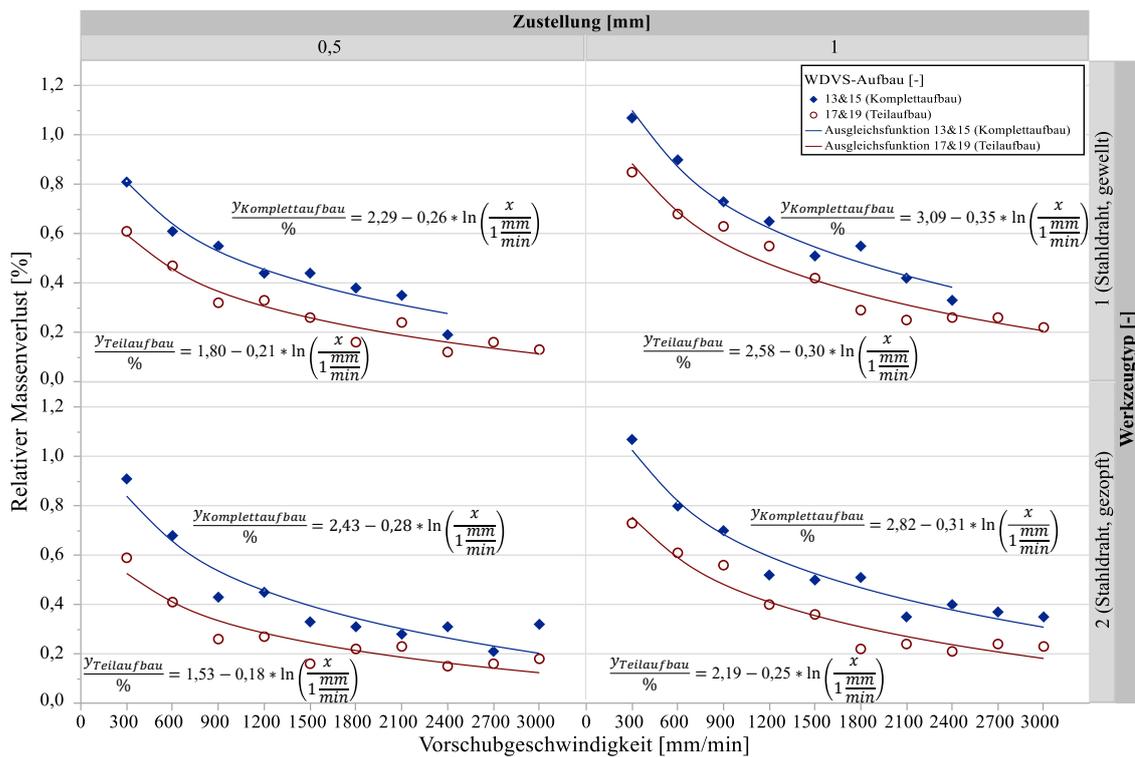


Abbildung 5-16 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB und Regressionsanalyse: Relativer Massenverlust [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

Ausgehend davon lässt sich ebenfalls der Einfluss weiterer Systembestandteile mathematisch beschreiben. Abtrag und Massenverlust können bei der Bearbeitung der Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung unter definierten Randbedingungen durch eine Subtraktion der Ausgleichsfunktionen des Anwendungsfalls Teilaufbau vom Anwendungsfall Komplettaufbau beschrieben werden, zu

$$\frac{y_{\text{Putz inkl. Armierung}}}{\%} = \frac{y_{\text{Komplettaufbau}}}{\%} - \frac{y_{\text{Teilaufbau}}}{\%} \quad (5.16)$$

Eine entsprechende grafische Darstellung ist Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 zu entnehmen. Für die Qualitätsmerkmale ist dabei auffällig, dass diese von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig sind. Wird der Faktor in seinen Stufen erhöht, so kommt es aufgrund der Deckschicht aus Unter- und Oberputz inkl. Armierung einerseits zu schlechteren Abtragsergebnissen, andererseits verringert sich der Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust. Eine Reduktion des Abtrags lässt sich dadurch begründen, dass das pro Werkzeugumdrehung abzufördernden Volumen an WDVS mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ansteigt. Denn bei konstanter Drehzahl verringert sich durch eine höhere Vorschubgeschwindigkeit die Anzahl der Aufsetzer des Besatzes pro Versuch auf dem Werkstück. Dennoch ist innerhalb eines Versuchs das abzutragende Volumen an WDVS konstant. Für die Ergebnisse des Qualitätsmerkmals Werkzeugverschleiß lässt sich demnach ableiten, dass dieser maßgeblich von der Anzahl der Aufsetzer des Einzeldrahtes bestimmt wird. Dem Faktor Zustellung hingegen ist für die Werte des Kurvenverlaufs der Deckschicht statistisch kein signifikanter Einfluss auf die Qualitätsmerkmale zuzuschreiben, auch wenn die errechneten Funktionen leicht voneinander abweichen. Angesichts des innerhalb dieser Arbeit gewählten Bezugspunkt der Zustellung – der Betonoberfläche – besteht bei einer Stufenerhöhung ebenso keine Änderungen der Ausrichtung des Einzeldrahtes zur Deckschicht.

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

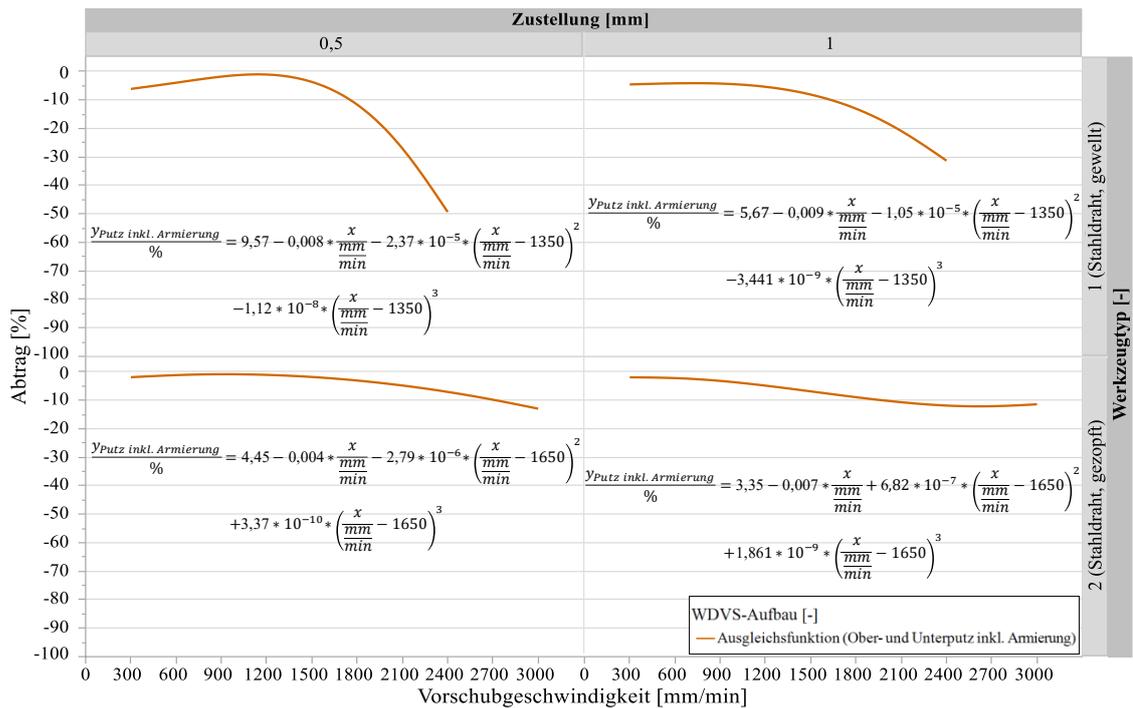


Abbildung 5-17 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB und Regressionsanalyse: Abtrag [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

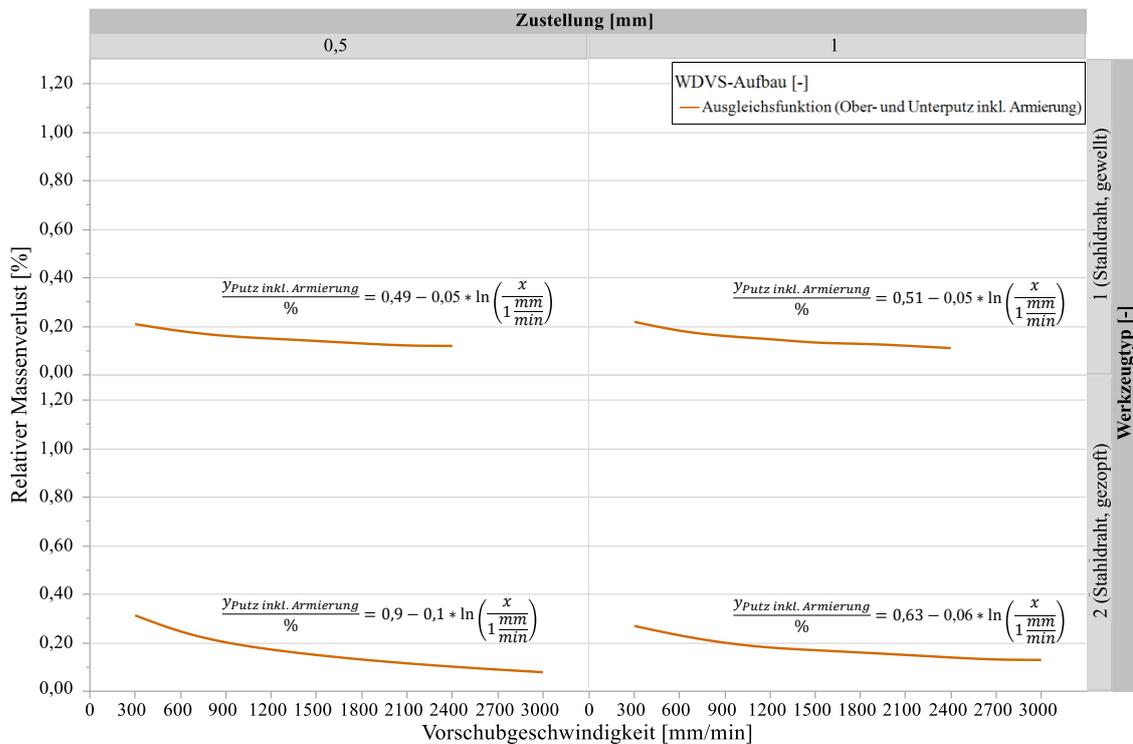


Abbildung 5-18 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-IIIB und Regressionsanalyse: Relativer Massenverlust [%] nach WDVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

Des Weiteren lässt sich der Einfluss der Betonoberfläche mathematisch beschreiben. Aufgrund einer statistischen Analyse (grafisch dargestellt in Abbildung 5-14) ist nachzuweisen, dass keine messbaren Unterschiede bestehen, sollten die Bürstenwerkzeuge anstatt durch einen Teilaufbau lediglich auf einer Betonoberfläche bewegt werden. Für Letzteres lässt sich demnach je nach Werkzeugtyp und Zustellung die Ausgleichsfunktion herleiten zu

$$\frac{y_{\text{Betonoberfläche}}}{\%} = \frac{y_{\text{Teilaufbau}}}{\%} \quad (5.17)$$

Schlussfolgerung:

Als maßgeblich lassen sich folgende Ergebnisse für eine Beantwortung der Forschungsfrage 1 festhalten:

- Es besteht kein Einfluss des WDVS-Aufbaus auf die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß, sofern zwischen Komplett- und Teilaufbauten differenziert wird.
- Werden die Ergebnisse der Komplett- und Teilaufbauten verglichen, so fördert die Deckschicht aus Ober- und Unterputz inkl. Armierung den Werkzeugverschleiß und führt zu geringeren Abtragungsergebnissen. Letzteres wird maßgeblich von der Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst.
- Die untersuchten Werkzeugtypen sind unter verschiedenen Stufeneinstellungen der Faktoren Zustellung und Vorschubgeschwindigkeit eher in der Lage für Anwendungsfall 1 (Teilaufbau) einen rückstandslosen Abtrag zu erbringen anstatt für Anwendungsfall 2 (Komplettaufbau). Für die Hauptversuche bedeutet dies: Auch wenn die Maschinenparameter anhand des Anwendungsfalles 1 optimiert werden sollen, müssen dennoch Versuche an Komplettaufbauten aus WDVS erfolgen. Denn der Abtrag eines Komplettaufbaus stellt ein Ausschlusskriterium dar.
- Den Systembestandteilen Dämmstoff und Kleber ist kein Einfluss auf den Werkzeugverschleiß nachzuweisen. Im Umkehrschluss ermöglicht dies die Untersuchung der Bürstenwerkzeuge in Langzeitversuchen (vgl. Abschnitt 5.2.4). Eine Nachbildung des Anwendungsfalles 1 ist möglich, wobei sich das Bürstenwerkzeug lediglich über die Betonoberfläche bewegt. Der Werkzeugverschleiß an einem Komplettaufbau ergibt sich folglich aus den Systembestandteilen Ober- und Unterputz inkl. Armierung sowie der Betonoberfläche.

5.1.5 Einfluss des Werkzeugverschleißes

Weder im Normwesen noch bei Bürstenherstellern lassen sich Angaben zur Lebensdauer und Standzeit von Bürstenwerkzeugen finden. In der Theorie können Bürstenwerkzeuge entlang der freien Höhe des Besatzes abgenutzt werden. Die Besatzhöhe bestimmt dabei die Werkzeugsteifigkeit. In der Praxis gilt das Werkzeug als verschlissen, die Standzeit als erreicht, sofern der gewünschte Abtrag nicht mehr in der dafür vorgesehenen Zeit umgesetzt werden kann [Experte 3.2.2.5]. Dies bedeutet im Umkehrschluss allerdings nicht, dass das Werkzeug entlang der Besatzhöhe vollkommen abgearbeitet wurde. Für die experimentellen Untersuchungen sowie der geplanten Anwendung der Werkzeuge in einem Baggeranbaugerät existieren konstruktive Grenzen. Der Besatz kann demnach nicht auf das höchstmögliche Maß abgearbeitet werden. Die Einhausung sowie der Werkzeugantrieb geben einen Mindestdurchmesser des Werkzeugs vor.

In den Hauptversuchen dieser Arbeit wird anhand von Langzeitversuchen die Leistungsfähigkeit von Bürstenwerkzeugen für eine Anwendung im Baggeranbaugerät analysiert (vgl. Abschnitt 5.2.4). Dennoch bieten bereits die Grundlagenversuche Informationsgehalt zum Einfluss des Werkzeugverschleißes. Sie bilden die Grundlage einer Vorhersage zu erwartender Effekte der Langzeitversuche an Versuchsstand II.

Doch zuvor gilt es den Werkzeugeinsatz der Grundlagenversuche vorzustellen. In diesen sowie bei der bisherigen Auswertung wurde zwischen Werkzeugtyp I und II differenziert. Aus Kostengründen war es nicht möglich für jeden Einzelversuch eine bis dato ungenutzte Bürste zu verwenden. Pro Werkzeugtyp waren demnach ein bis drei Werkzeuge je Versuchsplan im Einsatz (vgl. Tabelle 22). Insgesamt wurden in den Grundlagenversuchen zur Umsetzung der Versuchspläne 16 Werkzeuge verwendet, wobei neun dem Werkzeugtyp 2 und sieben dem Werkzeugtyp 1 zuzuordnen sind. Eine ausgeglichene Verteilung war ab Versuchsplan I-IV nicht mehr möglich. Dies begründet sich mit einer Verlagerung der Fertigung des Werkzeugherstellers und darauffolgenden Lieferproblemen vergleichbarer Werkzeugausführungen.

Der im Laufe der Versuche eintretende Werkzeugverschleiß beeinflusst das Verhalten der Bürsten. Diese Verhaltensänderung ist als systematische Störgröße zu interpretieren. Im Sinne der statistischen Versuchsplanung kann Abhilfe geschaffen werden: Das Prinzip der Randomisierung sowie die ausgewogene Verteilung der Faktoreinstellungen je Werkzeug ermöglichen die Generierung brauchbarer Messdaten. Denn auch wenn die unkontrollierbare Störgröße die Variabilität der Messungen erhöht, verursacht diese aufgrund der zufälligen und symmetrischen Verteilung keine systematische Verzerrung der Ergebnisse [101, S. 93]. Somit war auch bei einer statistischen Analyse der einzelnen Versuchspläne der Werkzeugnummer einvernehmlich kein signifikanter Einfluss auf die Qualitätsmerkmale zuzuschreiben. Im Gegenzug ist bei einer konsequenten Randomisierung – die Wiederholung mit eingeschlossen – der Einfluss der Verhaltensänderung infolge des vorhandenen Werkzeugverschleißes nicht von den Faktoreinflüssen zu differenzieren. Versuchsplan I-IIIB birgt dahingehend eine Besonderheit. Indem bei der Erstellung des vollfaktoriellen randomisierten Versuchsplans nicht von einer Wiederholung ausgegangen wurde, ergaben sich erst 160 durchzuführende Versuche (Durchgang I). Dieser Versuchsplan wiederum wurde im Anschluss in einem weiteren Durchgang II in gleicher Reihenfolge und Werkzeugnummer erneut getestet. Demnach entstanden zwei Blöcke. Daraus folgt ein definierter Abstand gleicher Versuchsmuster um jeweils 160 Versuche. Dies bedeutet, dass bei Durchgang II infolge von Durchgang I bereits ein Werkzeugverschleiß vorlag. Somit besteht die Möglichkeit eines Vergleichs der Durchgänge, wodurch wiederum der Einfluss des Werkzeugverschleißes bzw. die dadurch auftretende Verhaltensänderung abgebildet werden kann. Für die Hauptversuche von besonderem Interesse ist dabei vor allem der Faktor Werkzeugtyp.

Tabelle 22 Werkzeugverteilung der Grundlagenversuche bei Versuchsplan I-I bis I-V

Versuchsplan	Werkzeugtyp	I-I	I-II	I-IIIA	I-IIIB	I-IV	I-V
Werkzeugnummer	1	1.1 / 1.2 / 1.3	1.4 / 1.5	1.6 / 1.7	1.6 / 1.7	1.2 / 1.3	1.1 / 1.2 / 1.3 / 1.4
	2	2.1 / 2.2 / 2.3	2.4 / 2.5	2.6 / 2.7	2.6 / 2.7	2.2 / 2.3	2.8 / 2.9
Versuchsanzahl pro Werkzeugnummer	1	42 / 43 / 43	52 / 52	2 / 2	80 / 80	20 / 20	40 / 40 / 40 / 40
	2	44 / 42 / 42	52 / 52	2 / 2	80 / 80	20 / 20	80 / 80

Die Bedeutung der Verhaltensänderung infolge vorhandener Verschleißerscheinungen der Werkzeuge wird in Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20 für die Qualitätsmerkmale Abtrag und Massenverlust veranschaulicht. Da den Stufen der Drehbewegung sowie den Werkzeugnummern kein signifikanter Einfluss zuzuschreiben ist werden die Ergebnisse nicht getrennt visualisiert. Für den Faktor Vorschubgeschwindigkeit trifft dies auch auf das Qualitätsmerkmal Abtrag zu. Der globale Mittelwert der Ergebnisse über alle Vorschubgeschwindigkeiten nach entsprechendem Durchgang ist am rechten unteren bzw. oberen Rand jeder Einzelgrafik aufgeführt. Dies ermöglicht eine Abschätzung der Effekte.

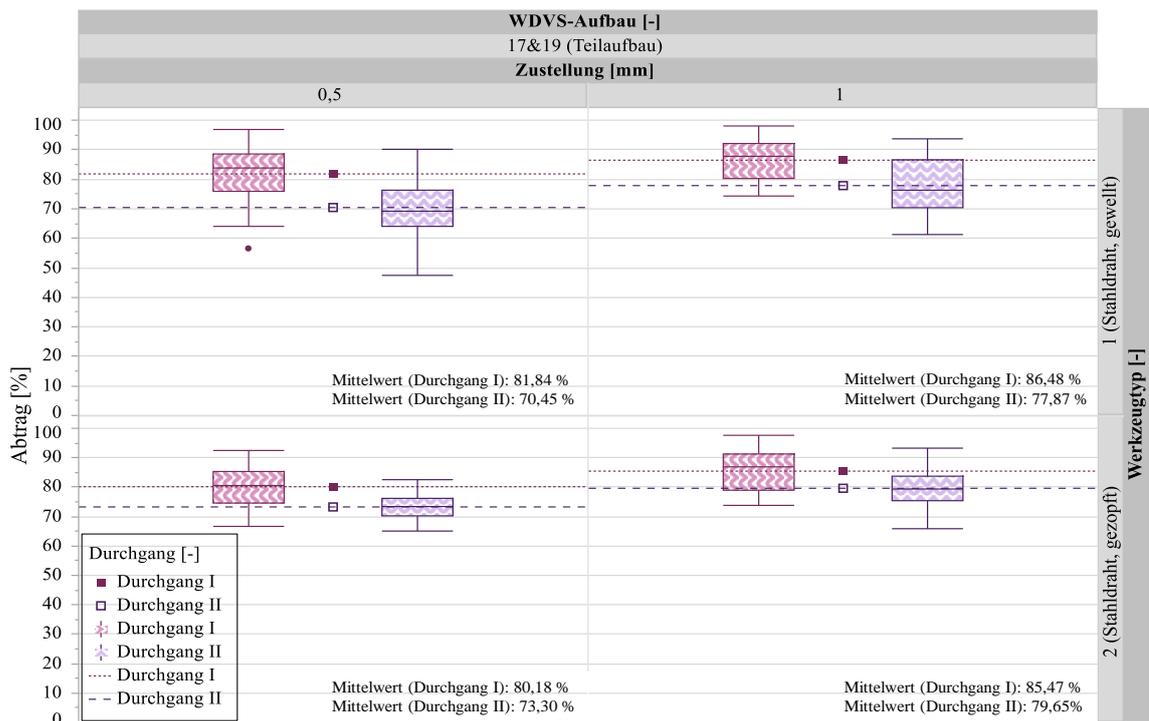


Abbildung 5-19 Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Abtrag [%] nach Durchgang [-] in Abhängigkeit des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Vorschubgeschwindigkeit 300 bis 3000 mm/min und Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf

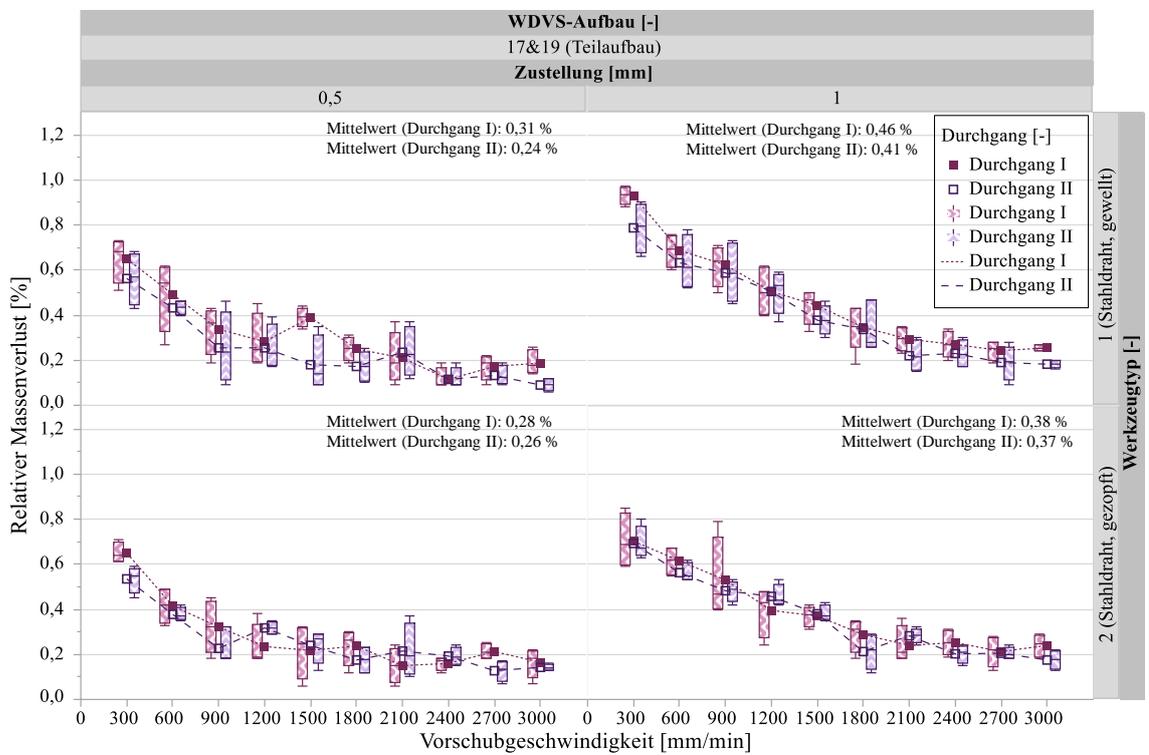


Abbildung 5-20 Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Relativer Massenverlust [%] nach Durchgang [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], Zustellung [mm] und des Werkzeugtyps [-] bei Drehbewegung Gleichlauf / Gegenlauf

Werden die Verläufe der beiden Durchführungen miteinander verglichen, so ist ersichtlich, dass Durchgang II überwiegend verringerte Abtragsergebnisse hervorbringt. Eine Abgrenzung nach Werkzeugtyp zeigt außerdem größere Unterschiede der Ergebnisse von Durchgang I zu II für die gewellte Stahldrahtbürste. Werkzeugtyp 2 (gezopfte Stahldrahtbürste) ist somit auch nach mehreren Versuchen eher in der Lage, einen kontinuierlichen bzw. reproduzierbaren Abtrag zu erbringen. Für das Qualitätsmerkmal Massenverlust ist werkzeugunabhängig eine Tendenz zu geringerem Massenverlust bei Durchgang II zu vermerken, auch wenn dies nicht für alle Stufeneinstellungen zutrifft. Dies könnte auf eine Änderung der Werkzeugeigenschaften aufgrund abnehmender Besatzhöhe zurückzuführen sein, denn in den Versuchen wurde die Anzahl der Umdrehungen pro Minute nicht verändert. Eine Verringerung des Werkzeugdurchmessers hat demnach wiederum einen kleineren Umfang und somit eine Verringerung der Umfangsgeschwindigkeit zur Folge. Für die Bürstenwerkzeuge bedeutet dies im Speziellen für Versuchsplan I-II B eine Reduktion der Geschwindigkeit um etwa 5 Prozent gegenüber vorangehender Durchführung mit gleichen Faktorkombinationen und -stufen.

Zusammengefasst führt der Werkzeugverschleiß im Durchschnitt zu einer Verringerung des Abtragsergebnisses der gewellten Stahldrahtbürste um 8,6 bis 11,4 Prozent, je nach Zustellung. Bei der gezopften Werkzeuganordnung hingegen verringern sich die Messergebnisse durchschnittlich je nach Zustellung um 5,8 bis 6,9 Prozent. Für das Qualitätsmerkmal Massenverlust hingegen führt der bei Durchgang II vorhandene Werkzeugverschleiß – vor allem für Werkzeugtyp 1 – zu einem geringeren Massenverlust. Eine statistische Analyse anhand eines t-Tests bestätigt den signifikanten Einfluss der Werkzeugabnutzung sowohl auf das Qualitätsmerkmal Abtrag als auch auf den Werkzeugverschleiß.

Schlussfolgerung:

Mit zunehmendem Werkzeugverschleiß geht eine Verringerung der Abtragsergebnisse einher. Die Minderung der Abtragsleistung wird dabei maßgeblich bestimmt von der Werkzeugausführung. Im Sinne der Forschungsfrage 2 ist daher ein Werkzeugtyp zu bevorzugen, welcher möglichst lange kontinuierliche Abtragsergebnisse erbringt. Neben der Identifikation der für jedes Werkzeug optimalen Maschinenparameter ist in den Hauptversuchen folglich zu prüfen, welche Fläche unter diesen Einstellungen abgetragen werden kann. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen somit die Notwendigkeit von Langzeitversuchen.

5.1.6 Werkzeugvergleich: Stahldrahtbürste gewellt und gezopft

Für den Abtrag von WDVS ist eine Werkzeugausführung zu bevorzugen, welche möglichst kontinuierliche Abtragsergebnisse erbringt. Eine Analyse der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse soll daher anhand der Varianzen der Einzelversuche erfolgen. Das Qualitätsmerkmal Abtrag ist dabei essentiell, Schwankungen der Messergebnisse des Massenverlusts seien dem hingegen untergeordnet. Letztere soll lediglich möglichst minimiert werden. Da die Versuchsdurchführung vollfaktoriell erfolgt und die einzelnen Systembestandteile der Komplett- und Teilaufbauten keinen statistisch relevanten Einfluss auf die Qualitätsmerkmale aufweisen, sollten alle Versuche bei gleichen Maschinen- und Werkzeugeinstellungen näherungsweise gleiche Varianzen aufweisen. Bei gleichem Umfang der experimentellen Versuche entspricht die Gesamtstreuung demnach der zu erwartenden Streuung eines Versuchs. Anhand der Spannweite kann dies nachfolgend in Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 veranschaulicht werden. Die Ergebnisse der Versuchspläne I-II bis I-IIIB ermöglichen dabei einen Vergleich nach Komplett- und Teilaufbauten. Die Werkzeugtypen hingegen werden überlagert.

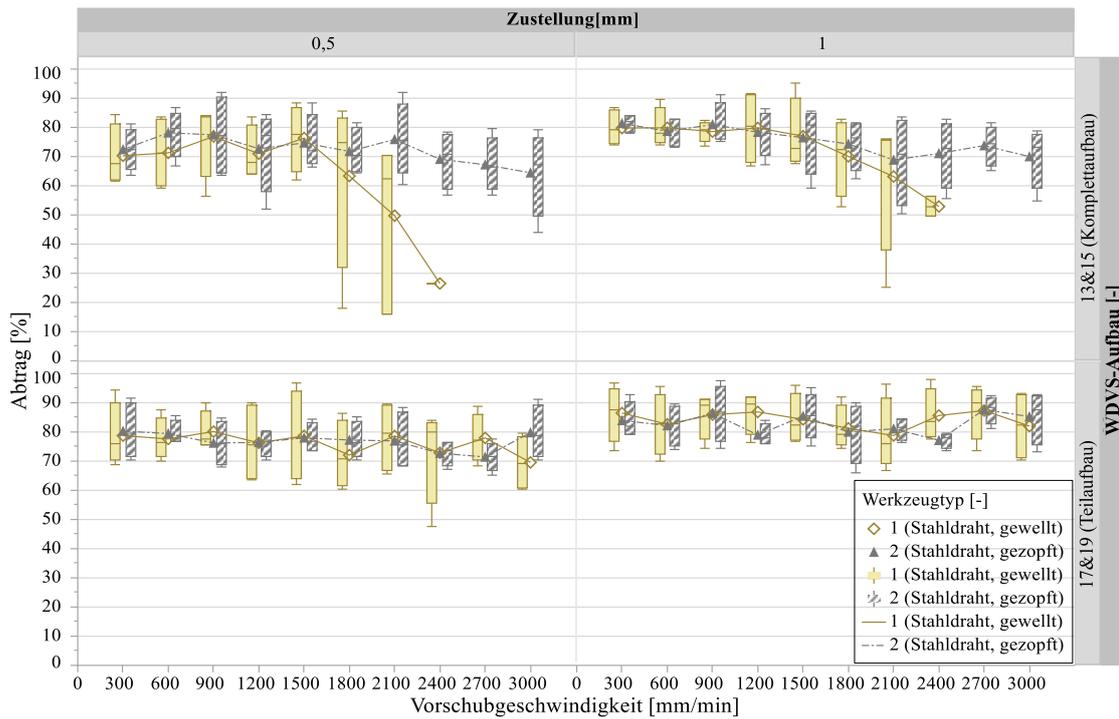


Abbildung 5-21 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-II & I-III: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDV-S-Aufbaus [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

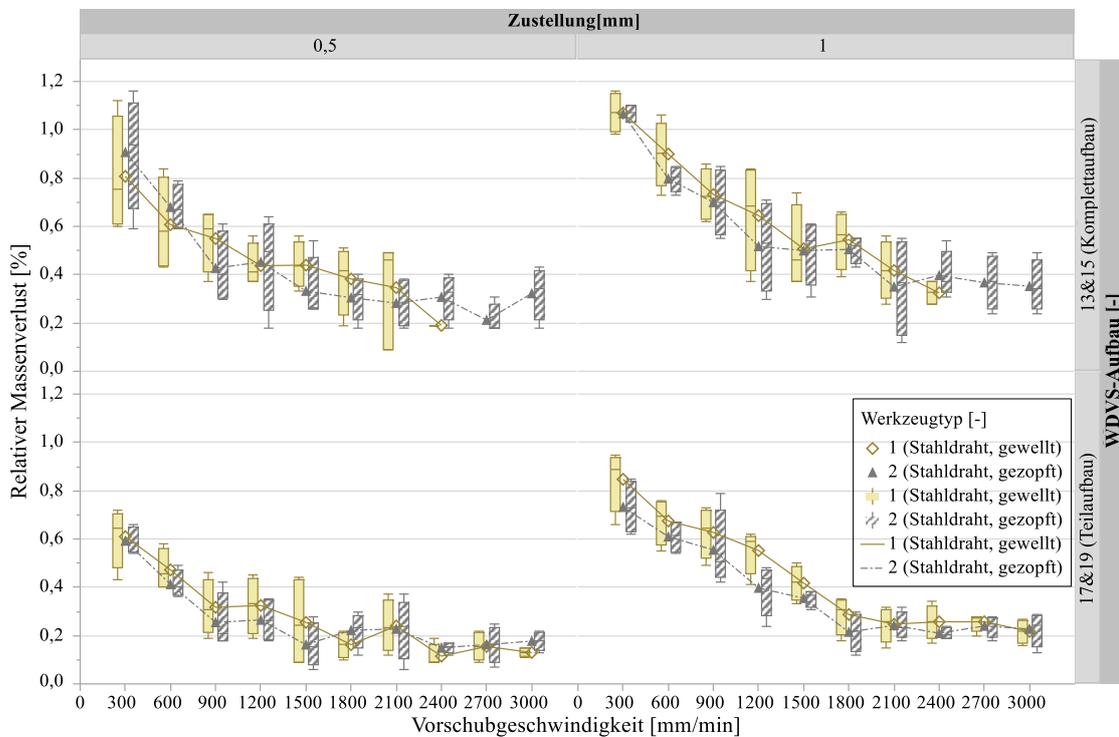


Abbildung 5-22 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-II & I-III: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDV-S-Aufbaus [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

Nach den Ergebnissen wäre eine gezopfte Stahldrahtbürste einer gewellten vorzuziehen, denn die Abtragsergebnisse weisen geringere Spannweiten auf. Dies entspricht ebenfalls den Prognosen der Experten, wonach eine gezopfte Bürste für den Abtrag von WDVS am ehesten konstante Ergebnisse erbringt [Experte 1.2.6.11].

Weitere wichtige Kenngrößen der für einen ausgewogenen⁸ Vergleich herangezogenen Messwerte sind zusammengefasst der Tabelle 23 für das Qualitätsmerkmal Abtrag und der Tabelle 24 für das Qualitätsmerkmal Massenverlust zu entnehmen. Abbildung 5-23 veranschaulicht diese graphisch. Anhand der Versuchsaufbauten werden die Ergebnisse differenziert. Der Aufbau des Versuchsplans I-IV – wobei sich das Bürstenwerkzeug nur durch den Dämmstoff EPS bewegt – hat keinen messbaren Einfluss des Systembestandteils Dämmstoff identifiziert, weshalb auf eine weitere Darstellung verzichtet wird. Aus Versuchsplan I-V – die Bürstenwerkzeuge werden über eine Betonoberfläche bewegt – lassen sich nur Auswirkungen auf das Qualitätsmerkmal Massenverlust ermitteln. Eine Unterscheidung nach den Faktoren Vorschubgeschwindigkeit und Zustellung wird bewusst nicht vorgenommen, können diese in der Praxis der Bürstenanwendung im Baggeranbaugerät vom Baggerfahrer angepasst werden. Möglichst geringe Ergebnisspannweiten auch unter Variation der genannten Faktoren sind erstrebenswert.

Tabelle 23 Analyseergebnisse Abtrag Versuchsplan I-II bis I-III B

Auswertekriterium	Versuchsplan I-II (Anwendungsfall 2: Komplettaufbau)		Versuchsplan I-III B (Anwendungsfall 1: Teilaufbau)	
	1	2	1	2
Werkzeugtyp				
Anzahl Versuche [-]	80 (58)	80	80	80
Mittelwert [%]	70,88	73,89	80,2	79,84
Median [%]	74,85	75,9	79,2	79,45
Spannweite [%]	78,90	47,80	50,40	32,50
Standardabweichung [%]	16,87	10,09	10,61	7,48
Interquartilsabstand [%]	19,125	14,5	15,53	10,675

Tabelle 24 Analyseergebnisse relativer Massenverlust Versuchsplan I-II bis I-V

Auswertekriterium	Versuchsplan I-II (Anwendungsfall 2: Komplettaufbau)		Versuchsplan I-III B (Anwendungsfall 1: Teilaufbau)		Versuchsplan I-V (Betonoberfläche)	
	1	2	1	2	1	2
Werkzeugtyp						
Anzahl Versuche [-]	80 (58)	80	80	80	40	40
Mittelwert [%]	0,59	0,48	0,36	0,32	0,39	0,34
Median [%]	0,55	0,43	0,28	0,26	0,32	0,28
Spannweite [%]	1,07	1,04	0,86	0,79	0,89	0,75
Standardabweichung [%]	0,25	0,251	0,22	0,18	0,22	0,18
Interquartilsabstand [%]	0,37	0,3	0,31	0,24	0,36	0,24

⁸ Es werden lediglich Messwerte für einen Vergleich herangezogen, welche in den Versuchen unterschiedlicher Versuchspläne von den Bürstentypen in identischen Faktorkombinationen der Faktorbereiche WDVS-Aufbau untersucht wurden. Im Umkehrschluss bedeutet dies beispielsweise, dass die Messwerte des Versuchsplans I-II mit einer Einstellung der Zustellung von 1,5 Millimetern nicht mit einfließen, da diese Faktorstufe der Zustellung nicht bei weiteren Versuchsplänen vertreten ist.

Insgesamt kann mithilfe des Vergleichs auf den Einfluss der Systembestandteile geschlossen werden. Ebenso wird eine direkte Gegenüberstellung der Werkzeugtypen möglich. So ist für Versuchsplan I-III B (Teilaufbau) die Spannweite sowie die Standardabweichung gegenüber Versuchsplan I-II (Komplettbau) für die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß geringer. Die Ergebnisse können folglich besser reproduziert werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung eine Reproduzierbarkeit der Messergebnisse erschweren. Werden die Kriterien Spannweite und Standardabweichung des Qualitätsmerkmals Massenverlust je nach Anwendung in den Vergleich gesetzt, so bestehen keine auffälligen Unterschiede für Versuchsplan I-V und Versuchsplan I-III B. Bei letzterem wird die Bürste durch einen WDVS-Teilaufbau bewegt, wobei Dämmstoff EPS auf eine Betonoberfläche geklebt ist. Eine statistische Analyse zeigt ebenso keine signifikanten Unterschiede der Messergebnisse Massenverlust der Versuchspläne I-III B und I-V. Hingegen ist für einen Vergleich zwischen einem Teilaufbau (Versuchsplan I-III B) und einem Komplettbau (Versuchsplan I-II) auffällig, dass sowohl die Spannweite als auch die Standardabweichung an einem Komplettbau für beide Qualitätsmerkmale größer sind. Somit besteht ebenfalls eine vergleichsweise schlechtere Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, die Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung wirken sich demnach nicht nur negativ auf den Massenverlust aus.

Äquivalent wird durch einen Vergleich von Werkzeugtyp 2 gegenüber Werkzeugtyp 1 eine bessere Ergebnis-Reproduzierbarkeit von Werkzeugtyp 2 verdeutlicht. Auffällig ist, dass die Spannweite sowie die Standardabweichung der Abtragsergebnisse der gewellten Stahldrahtbürste im Vergleich zur gezopften Werkzeugausführung für alle Anwendungsfälle deutlich größer ist. Werden hingegen die Mittelwerte sowie der Median der Messergebnisse unterschiedlicher Anwendungsfälle – unabhängig der Faktoren Vorschubgeschwindigkeit und Zustellung – verglichen, so erbringen beide Werkzeuge höhere Abtragsergebnisse bei Werkstücken ohne die Systembestandteile Schlussbeschichtung, Armierung und Unterputz. Der Massenverlust ist dabei geringer.

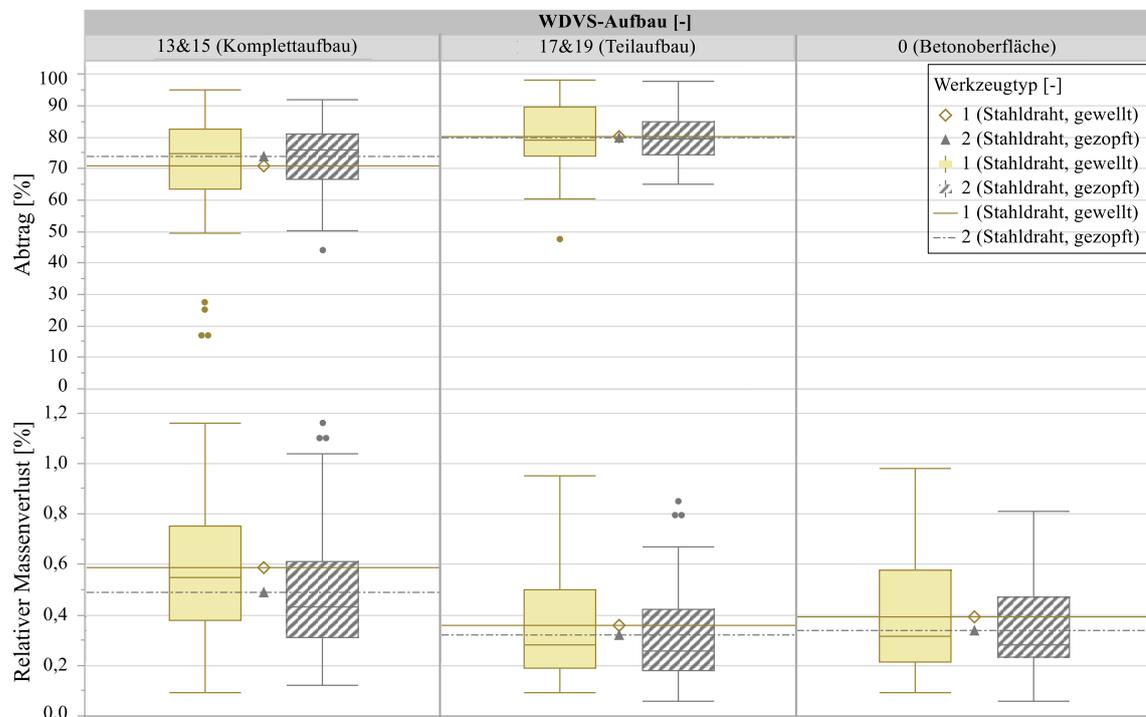


Abbildung 5-23 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-II bis I-V: Abtrag [%] und Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit des WDVS-Aufbaus [-] bei Drehbewegung Gleichlauf, Vorschubgeschwindigkeit 300 bis 3000 mm/min und Zustellung 0,5 und 1 mm

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

Ein Werkzeugtyp ist anhand dieser Kriterien – wobei nur der Mittelwert der Abtragsergebnisse innerhalb eines Anwendungsfalls betrachtet wird – nicht vorzuziehen. Ebenso entsprechen für das Qualitätsmerkmal Massenverlust die Kriterien Spannweite und Standardabweichung des Versuchsplans I-IIIB (Teilaufbau) in etwa denen des Versuchsplan I-V (Betonoberfläche), eine statistische Analyse zeigt keine signifikanten Unterschiede der Messergebnisse. Dennoch weisen die Kriterien Spannweite und Standardabweichung bei beiden Anwendungsfällen werkzeughängige Unterschiede auf. Folglich ist die Streuung der Messergebnisse nicht auf die Systembestandteile Dämmstoff und Kleber sondern auf die Werkzeugausführung zurückzuführen.

Es ist anzumerken, dass innerhalb des Versuchsplans I-II (Komplettaufbau) lediglich 58 Messwerte für einen Vergleich herangezogen werden. Aufgrund des Auffahrens von Werkzeugtyp 1 bei Vorschubgeschwindigkeiten ab 21000 Millimeter pro Minute erfolgt der Ausschluss von 22 Messwerten. Der Abtrag wäre folglich mit null Prozent in den Vergleich eingeflossen und hätte zu einer Verzerrung beigetragen (Abbildung 5-21 verdeutlicht dies grafisch). Infolgedessen ist Werkzeugtyp 2 gegenüber Werkzeugtyp 1 noch deutlicher zu bevorzugen. Eine Beschreibung der Versuche des Versuchsplans I-II liefert Abschnitt 5.1.2.

Das durch die Zusammenfassung der signifikanten Faktorstufen der Zustellung und der Vorschubgeschwindigkeit in Tabelle 23 und Tabelle 24 sowie Abbildung 5-23 dennoch keine Verfälschung der Ergebnisse vorgenommen wird, soll anhand der Tabelle 25 exemplarisch dargelegt werden. Abgebildet sind die Untersuchungsergebnisse der Werkzeugtypen 1 und 2 an einem Teilaufbau bei einer Zustellung von einem Millimeter. Die zuvor beschriebenen Eindrücke werden dadurch plausibilisiert. Werkzeugtyp 2 weist auch hier in fast allen Stufeneinstellungen der Vorschubgeschwindigkeit deutlich geringere Ergebnisspannweiten auf.

Tabelle 25 Analyseergebnisse Abtrag Versuchsplan I-IIIB nach Vorschubgeschwindigkeit bei Zustellung 1 mm

Auswertekriterium	Versuchsplan I-IIIB (Anwendungsfall 1: Teilaufbau)									
Vorschubgeschwindigkeit	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000
	Werkzeugtyp 1									
Anzahl Versuche [-]	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Mittelwert [%]	85,4	81,7	84,2	83,6	82,5	81	79,4	82,5	82,7	79,8
Median [%]	87,2	81,4	88,7	86,5	82,4	81,7	76,3	83,6	84,8	55,5
Spannweite [%]	23,2	26,2	19,6	20	30,6	27,5	29,5	28,2	34,1	23
Standardabweichung [%]	8,2	9,7	8,4	8,1	9,6	8,8	10,5	8,8	11	9,7
Interquartilsabstand [%]	15,5	19,7	16,2	16,2	12,5	13,1	19,4	11,9	14,8	19,4
	Werkzeugtyp 2									
Anzahl Versuche [-]	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Mittelwert [%]	82,4	79,5	82,2	83	85,6	83,4	82,6	80,1	84,7	82
Median [%]	79,6	77,5	80,8	81,7	86,1	84,7	82,8	79,2	84,4	80,8
Spannweite [%]	16	15,5	23,2	17,2	19,8	25,9	20,6	20	15	19,7
Standardabweichung [%]	5,6	6	8,1	6,4	5,7	8,3	6,4	7,1	6,5	7,2
Interquartilsabstand [%]	8,3	11,2	13,5	12,1	5,5	9,9	8,6	13	14,5	13,7

Schlussfolgerung:

- Ein Vergleich der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bildet einen Ausgangspunkt zur Beantwortung der Forschungsfrage 2, wonach Werkzeugausführungen zu bevorzugen sind, die möglichst kontinuierliche Abtragungsergebnisse erbringen. Anhand der Grundlagenversuche ist demnach eine gezopfte Stahldrahtbürste gegenüber einer gewellten Werkzeuganordnung zu bevorzugen.
- Neben der Werkzeugausführung wird die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen von dem Anwendungsfeld bestimmt. Wird ein Komplettaufbau mit einem Teilaufbau in den Vergleich gesetzt, so weisen die Messergebnisse der Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß an einem Teilaufbau geringere Streuungen auf. Dies gilt es für die Hauptversuche zu berücksichtigen.

5.1.7 Multikriterielle Optimierung

Nach Kleppmann [111] sollten Zielgrößen voneinander abgegrenzt, quantifizierbar und unabhängig sein, wobei eine geringe Anzahl ratsam ist. Für die innerhalb dieser Arbeit gewählten Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust trifft dies zu. Dennoch bewirken Einstellungen von Faktoren und Stufen oftmals zusammenhängende Effekte. Anhand der bisher dargestellten Untersuchungsergebnisse ergibt sich dabei die Problemstellung werkzeugabhängig Maschinenparameter zu identifizieren, welche den Bewertungskriterien optimal entsprechen. Ziel ist es, das Qualitätsmerkmal Abtrag zu maximieren sowie den Massenverlust der Bürste zu minimieren. Als Verfahren dazu bietet sich die multikriterielle Optimierung an. Marler und Arora [125] geben einen Überblick gebräuchlicher Methoden zur Lösung multikriterieller Optimierungsprobleme. Die Pareto-Optimalität bildet dabei ein Grundkonzept. In der Literatur werden ebenso die Bezeichnungen Mehrzieloptimierung, Vektoroptimierung oder mehrkriterielle Optimierung verwendet [126, S. 170]. Die erlangten Lösungen stellen dabei jeweils einen optimalen Kompromiss bezüglich der gewählten Ziele dar [127, S. 73].

Kann ein einzelnes Optimierungskriterium nur dann verbessert werden, wenn ein anderes Kriterium verschlechtert wird, so wird von einem Mehrzieloptimierungsproblem gesprochen. Der optimale Kompromiss wird dann als pareto-optimale Lösung bezeichnet [127, S. 78]. Die Lösung des Problems liegt dabei nicht eindeutig in einem Punkt, sondern besteht aus einer Menge verschiedener Lösungen, welche alle die Optimierungsziele auf unterschiedliche Weise erfüllen. In diesem Sinne werden Punkte genau dann dominiert, wenn sie nicht pareto-optimal sind [128, S. 509]. Aus einer großen Menge von optimalen Lösungen lassen sich außerdem Paretofronten bilden, an welchen interessante Eigenschaften von Faktorstufenänderungen abgelesen werden können [127, S. 73] [129]. Dennoch muss jeder Entscheider seine pareto-optimale Lösung anhand der eigenen Zielpräferenz selbst bestimmen.

Da für eine werkzeugabhängige Optimierung der Maschinenparameter Anwendungsfall 1 (Teilaufbau) vorrangig ist, werden im Nachgang die Ergebnisse des Versuchsplans I-IIB für eine multikriterielle Optimierung herangezogen. Abbildung 5-24 zeigt die pareto-optimalen Lösungen – aufgetragen über die Bewertungskriterien Abtrag und Massenverlust – sowie die charakteristische Paretofront (orange Linie).

Die insgesamt 320 Einzelversuche des vollfaktoriellen Versuchsplans I-IIIB ergeben sich dabei aus den in Tabelle 18 aufgezeigten Faktoren und Faktorstufen sowie einer Versuchswiederholung. Da sowohl dem Faktor Drehbewegung als auch dem WDVS-Aufbau kein signifikanter Einfluss auf die Qualitätsmerkmale zuzuschreiben ist, werden die Messergebnisse mitsamt der Versuchswiederholung zusammengefasst. Pro Werkzeugtyp ergeben sich daraus 20 dargestellte Punkte. Ersichtlich ist, dass die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß nicht gleichzeitig ein Optimum erreichen. Vielmehr handelt es sich um einen Lösungsraum gleichwertiger Lösungsmöglichkeiten.

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

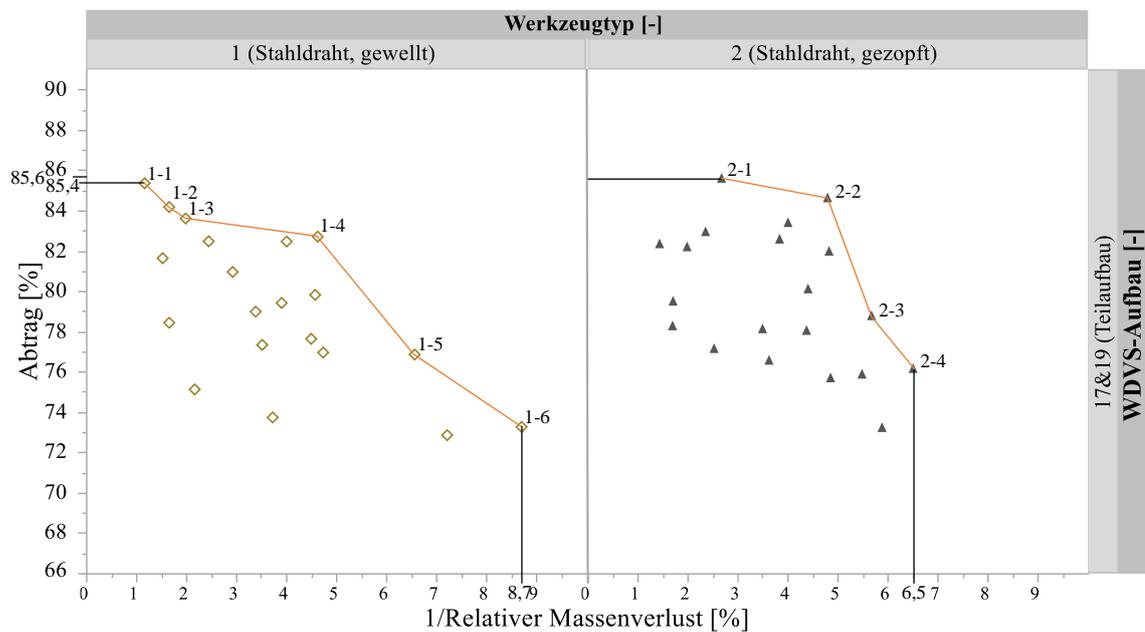


Abbildung 5-24 Paretofront mit optimalen Messwerten

Ebenfalls werden viele Punkte durch andere dominiert – sie liegen nicht auf der Paretofront. Eine Zuordnung der Parametereinstellungen zu den entsprechenden pareto-optimalen Lösungen findet sich in Tabelle 26. Demnach ist für einen möglichst maximierten Abtrag der Faktor Zustellung in seinen Stufenwerten zu erhöhen sowie die Vorschubgeschwindigkeit zu reduzieren. Bei konstanter Drehzahl bedeutet letzteres eine Steigerung des Auftreffens des Einzeldrahts pro Versuch auf dem Werkstück. Steht hingegen die Reduktion des Massenverlustes und somit des Werkzeugverschleißes im Vordergrund, so sind die Faktoren Zustellung und Vorschubgeschwindigkeit konträr zu reduzieren bzw. zu erhöhen.

Tabelle 26 Parameter der pareto-optimalen Punkte

Pareto-optimale-Punkt	Zustellung [mm]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]	Abtrag [%]	Relativer Massenverlust [%]	1/ Relativer Massenverlust [%]
Werkzeugtyp 1					
1-1	1	300	85,38	0,86	1,16
1-2	1	900	84,2	0,61	1,65
1-3	1	1200	83,63	0,51	1,98
1-4	1	2700	82,73	0,22	4,62
1-5	0,5	2700	76,88	0,15	6,56
1-6	0,5	2400	73,29	0,12	8,7
Werkzeugtyp 2					
2-1	1	1500	85,63	0,38	2,67
2-2	1	2700	84,66	0,21	4,79
2-3	0,5	2400	78,81	0,18	5,67
2-4	0,5	3000	76,19	0,15	6,5

Schlussfolgerung:

Die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß können nicht gleichzeitig optimiert werden. Für die Untersuchungen dieser Arbeit stellt die rückstandslose Entfernung des Dämmstoffs (ggf. inklusive Ober- und Unterputz sowie der Armierung) ein Ausschlusskriterium dar. Somit wird an dieser Stelle für die weiteren Untersuchungen – in Bezug auf Forschungsfrage 2 und 3 – eine Pareto-optimale Lösung angestrebt, bei welcher der gewünschte Abtrag erbracht und der Massenverlust minimiert wird. Die Optimierung des Werkzeugverschleiß ist unter diesem Aspekt vorrangig. Für die Hauptversuche bedeutet dies, dass die Parameter Zustellung bzw. Anstellung und Drehzahl auf ein für den gewünschten Abtrag notwendiges Maß erhöht werden. Die Vorschubgeschwindigkeit hingegen wird bei drei Metern pro Minute konstant gehalten. Denn nur so kann der Abtrag von WDVS mit Bürstenwerkzeugen eine sinnvolle Alternative zum derzeitigen Stand der Technik, dem maschinellen Abschälen mit dem Baggerlöffel oder Sortiergreifer, darstellen.

5.1.8 Zusammenfassung der Grundlagenversuche

In Abschnitt 1.3 wurden drei Forschungsfragen zum Thema Abtrag von WDVS mit spanender Bürste definiert:

1. Welchen Einfluss haben der Aufbau des WDVS sowie die einzelnen Systembestandteile auf das Abtragsergebnis sowie den Werkzeugverschleiß?
2. Welches Bürstenwerkzeug ist für den rückstandslosen und kontinuierlichen Abtrag eines Standard-WDVS am besten geeignet, unter dem Gesichtspunkt der Verschleißoptimierung?
3. Wie sind werkzeugabhängig die Maschinenparameter (Anstellung, Vorschubgeschwindigkeit, Drehbewegung und Drehzahl) zu wählen, um den Abtrag zu maximieren sowie den Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust zu minimieren?

Infolgedessen soll eine Werkzeugempfehlung inkl. optimaler Maschinenparameter für den Abtrag eines Standard WDVS-Aufbaus ausgesprochen werden.

Eine grundsätzliche Eignung von Bürstenwerkzeugen zum Abtrag von WDVS konnte in den Grundlagenversuchen bisher nachgewiesen werden. Ebenso wurden in über 1000 Einzelversuchen unterschiedliche Faktoren und Stufen gesichtet. Dies ermöglicht es Forschungsfrage 1 fast gänzlich zu beantworten und schafft die Ausgangsbasis zur Klärung der Forschungsfragen 2 und 3, was den Umfang der Hauptversuche deutlich reduziert.

Die Untersuchungsergebnisse der Grundlagenversuche werden im Nachgang nochmals kurz vorgestellt und es wird erläutert, inwieweit es zu einer Ausdünnung der Parameter für die Hauptversuche kommen kann. Tabelle 27 liefert eine Zusammenfassung. Eine Unterteilung der Parameter in die Gruppen Werkstück, Werkzeug und Maschine wird vorgenommen. Diese sind repräsentativ für die Forschungsfragen 1,2 und 3.

5.1 Analyse der Grundlagenversuche

Tabelle 27 Schnittstellen der Grundlagen- und Hauptversuche

	Grundlagenversuche	Hauptversuche
Werkstück	Kein signifikanter Einfluss der einzelnen Systembestandteile bei Teil- und Komplett-aufbauten an WDVS.	Geringere Stufenanzahl des Faktors WDVS-Aufbau. Lediglich ein Aufbau pro An-wendungsfall. Ausnahme für Nachweis des Einflusses von Verdübelung und MW.
Werkzeug	Die Werkzeugausführung ist signifikant für das Ergebnis. Gezopfte Besatzanordnung liefert kontinuierlichere bzw. reprodu-zierbarere Ergebnisse als gewellte.	Erweiterung der Faktorstufen und des Faktorraums, indem mehr Werkzeug-ausführungen getestet werden.
Parameter	Die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst den Massenverlust, ist aber für den Abtrag nur bei Komplettaufbauten (Anwendungs-fall 2) signifikant	Hohe Vorschubgeschwindigkeiten sind wirtschaftlich und verschleißarm. Für die Hauptversuche wird die Vorschub-geschwindigkeit daher konstant bei drei Metern pro Minute gehalten und die Mindestdrehzahl für den gewünschten Abtrag ermittelt.
Maschine	Es ist kein signifikanter Einfluss der Drehbewegung bei Teilaufbauten von WDVS (Anwendungsfall 1) nachweisbar. Bei Komplettaufbauten ist ein Abtrag nur im Gleichlauf möglich. Eine große Zustellung führt nicht zwingend zu einem besseren Abtragsergebnis aber zu einer Steigerung des Massenverlusts.	Konstante Drehbewegung im Gleichlauf Iterative Erhöhung der Zustellung (ebenso wie der Drehzahl). Kraftanstellung des Werkzeugs in den Langzeitversuchen, da sich mit fortschreitendem Verschleiß die Werkzeugsteifigkeit ändern kann.

Ein signifikanter Einfluss der einzelnen Systembestandteile des WDVS konnte sowohl für den Anwendungsfall 2 (Komplettaufbauten) als auch für Anwendungsfall 1 (Teilaufbau) nicht nachgewiesen werden. Für die weitere Versuchsdurchführung bedeutet dies, dass zwar zwischen den Anwendungsfällen differenziert wird, die Faktorstufen aber reduziert werden können. Eine funktionale Beschreibung der Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit ist – je nach Anwendungsfall, Werkzeugtyp und Zustellung – Abschnitt 5.1.4 zu entnehmen. Des Weiteren ist den Systembestandteilen Dämmstoff und Kleber kein Einfluss auf den Werkzeugverschleiß nachzuweisen. Im Umkehrschluss ist es möglich Anwendungsfall 1 nachzubilden, indem die Bürstenwerkzeuge über eine Betonoberfläche bewegt werden. Da dennoch der Einfluss einer Verdübelung sowie des Dämmstoffs Mineralwolle (MW) in den Hauptversuchen beziffert werden soll – womit Forschungsfrage 1 gänzlich beantwortet werden kann – weitet sich der Faktorraum diesbezüglich auf.

Der Faktor Werkzeugtyp beeinflusst die Messergebnisse signifikant. Bürstenwerkzeuge zum Abtrag von WDVS sollten möglichst lange ein kontinuierliches Abtragsergebnis erbringen. Die Spannweite der zu erwartenden Messwerten sollte demnach möglichst klein sein. Anhand der Grundlagenversuche konnten die Standard-Anordnungen des Besatzes – gewellt und gezopft – miteinander verglichen werden. Folglich ist die gezopfte Bürste der gewellten vorzuziehen. Werden Bürstenwerkzeuge anhand ihrer Steifigkeit verglichen, so bildet die Besatzanordnung Litendraht einen Kompromiss der bisher untersuchten Werkzeuge [52]. Diese und weitere Anordnungen gilt es in den Hauptversuchen für eine Beantwortung von Forschungsfrage 2 zu testen.

Um Forschungsfrage 3 zu beantworten lassen sich folgende Erkenntnisse der Grundlagenversuche zu den Auswirkungen unterschiedlicher Maschinenparameter auf die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß nutzen:

In den Hauptversuchen wird der Faktor Vorschubgeschwindigkeit bei drei Metern pro Minute konstant gehalten. Daraus folgt eine Anforderung an die untersuchten Werkzeuge für den geplanten Einsatz im Baggeranbaugerät. Werkzeuge, welche nicht in der Lage sind, unter dieser Voraussetzung den gewünschten Abtrag zu erbringen, entfallen und werden nicht weiter untersucht. Wie in den Grundlagenversuchen anhand eines Komplettaufbaus von WDVS gezeigt werden konnte, kann es werkzeugabhängig bei höheren Stufenwerten zu Ausfällen kommen (vgl. Abschnitt 5.1.2). Demnach könnten in den Hauptversuchen Werkzeuge für die weitere Untersuchung ausgeschlossen werden, welche unter geringeren Stufeneinstellungen in der Lage gewesen wären die Systembestandteile bis auf verbleibende Klebereste zu entfernen. Allerdings beeinflusst die Vorschubgeschwindigkeit ebenso den Werkzeugverschleiß. Je größer der Stufenwert desto geringer ist der Massenverlust, denn mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steht dem Besatz weniger Zeit für den Werkstückkontakt zur Verfügung. Bei konstanter Drehzahl bedeutet dies eine Verringerung des Auftreffens des einzelnen Besatzes pro Versuch auf das Werkstück. Es ist demnach in den Hauptversuchen unter konstanter Vorschubgeschwindigkeit die für den Abtrag notwendige Mindestdrehzahl zu ermitteln.

Ein Einfluss der Drehbewegung auf die Qualitätsmerkmale konnte in den Grundlagenversuchen an Teilaufbauten nicht nachgewiesen werden. Vielmehr war bei Komplettaufbauten ein Unterfahren der Systembestandteile Armierungsputz und Schlussbeschichtung bei einer Drehbewegung im Gegenlauf zu beobachten. Für die weiteren Hauptversuche ergibt sich daraus eine gleichläufige Drehbewegung.

Wie anhand von Recherchen und Befragungen zu erwarten, sowie durch die Grundlagenversuche bestätigt (vgl. Abschnitt 5.1.2), ist nicht mit einer kontinuierlichen Verbesserung der Abtragsergebnisse bei größerer Zustellung zu rechnen. Vielmehr steigt der Werkzeugverschleiß weiter an. Für die Hauptversuche wird daher ein iterativer Ansatz gewählt: Die Anzahl der Umdrehungen (vorrangig) in Kombination mit der Zustellung wird schrittweise soweit erhöht, bis entweder der gewünschte Abtrag erreicht oder aber die maximal zulässige und/oder vom Versuchsstand mögliche Drehzahl bzw. Umfangsgeschwindigkeit überschritten wird. Herstellerempfehlungen werden dabei berücksichtigt (vgl. Abschnitt 4.1.1.2). Die in leitfadengestützten Interviews befragten Experten befürworteten dieses Vorgehen. Anzumerken ist, dass überwiegend Zustellbereiche empfohlen wurden, Angaben für eine Kraftanstellung fehlen gänzlich. Auftretende Verschleißerscheinungen (vgl. Abschnitt 5.1.5) gilt es zu berücksichtigen, weshalb innerhalb der Langzeitversuche – als Abschluss der Hauptversuche – eine Kraftanstellung erfolgt.

5.2 Analyse der Hauptversuche

Innerhalb der Hauptversuche liegt der Schwerpunkt auf den Forschungsfragen 2 und 3. Ausgehend von leitfadengestützten Experteninterviews sowie Literaturrecherchen werden dazu 13 Werkzeugtypen experimentell untersucht. Zu unterscheiden sind die Versuchsreihen zur Werkzeugauswahl, die Untersuchung der Auswirkung von Verdübelung (als Bestandteil der Forschungsfrage 1) sowie die Langzeitversuche. In der genannten Reihenfolge kommt es im Nachgang zur Ergebnisvorstellung.

Ein Vergleich verschiedener Werkzeugausführungen ist vorrangig, wobei unter konstanter Vorschubgeschwindigkeit und gleichläufiger Drehbewegung die Faktoren Drehzahl und Zustellung iterativ erhöht werden. Durch dieses Vorgehen kann der Werkzeugverschleiß minimiert werden. Das Ziel ist die Identifikation von Werkzeugen, welche den gewünschten Abtrag – auch bei Komplettaufbauten aus WDVS – erbringen. Neben EPS als Dämmstoff wird ebenfalls Mineralwolle (MW) betrachtet, diese findet in Zusammenspiel mit EPS als Brandriegel in der Praxis Anwendung. Um weiter die Anzahl der Versuche zu verringern, werden innerhalb eines Versuchsdurchgangs beide Dämmstoffe untersucht. Eine Zuordnung des Massenverlusts nach WDVS-Aufbau ist demnach bei den Versuchen zur Werkzeugauswahl nicht möglich. Das Qualitätsmerkmal Massenverlust wird in den Langzeitversuchen an ausgewählten Bürsten gezielt analysiert.

Nach Albrecht und Schwitalla [2, S. 35] weisen 60 Prozent der mit EPS gedämmten Gebäude zusätzlich Dübel als Befestigungsmittel auf. Mineralwolle-Platten müssen auf allen Untergründen ebenso zusätzlich statisch gedübelt werden [12] (vgl. Abschnitt 2.1.1). Aus der Anzahl verbauter WDVS mit Verdübelung ergibt sich die Notwendigkeit der experimentellen Untersuchung. Es gilt zu prüfen, inwieweit sich Dübel auf den Abtrag von WDVS mit einem Bürstenwerkzeug auswirken (vgl. Abschnitt 5.2.3).

Im Gegensatz zu Versuchsstand I, ermöglicht Versuchsstand II eine Kraftanstellung des Werkzeugs. Empfehlungen der Werkzeughersteller fehlen allerdings, weswegen zur Werkzeugauswahl primär die Zustellung als Faktor in die Untersuchungen einfließt. Einem festen Zustellwert ist dabei immer auch eine Anpressung zuzuordnen (vgl. Abschnitt 5.2.1). Der fortschreitende Werkzeugverschleiß beeinflusst diese Zuordnung, weshalb in den ersten Versuchen zur Werkzeugauswahl eine für den gewünschten Abtrag notwendige Zustellung identifiziert und dieser eine Anpressung zugewiesen wird. Solcherlei Verschleißerscheinungen der Werkzeuge, wonach die zuvor im Neuzustand ermittelten Zuordnungen von Zustellung und Anpressung signifikant abweichen, konnten durch die Versuche zur Werkzeugauswahl nicht gemessen werden. Eine Abweichung der Zuordnung ist deshalb erst mit einem Fortschreiten der Langzeitversuche zu erwarten. Die aus den Versuchsreihen zur Werkzeugauswahl bestimmte Anpressung sowie die ermittelte Mindestdrehzahl für den gewünschten Abtrag bilden daher den Ausgangspunkt der Langzeitversuche. Diese verfolgen das Ziel einer Leistungsabschätzung. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Abschnitt 5.2.4. Die Langzeitversuche bilden den Abschluss der experimentellen Versuche.

5.2.1 Zusammenhang zwischen Zustellung und Anpressung

Bereits 1980 konnte durch Przyklenk [67, S. 2–5, 58, S. 111] nachgewiesen werden, dass eine Erhöhung der Zustellung nicht mit einem linearen Anstieg der auf das Werkstück wirkenden Kraft verbunden ist. Ein Maximum des Abtrags ergibt sich demnach bereits bei geringer Krafteinwirkung. Zugeschrieben wird dies der Flexibilität von Bürstenwerkzeugen, worauf nach Erreichen eines Maximums die Werkzeugschneiden nicht mehr optimal zum Eingriff kommen. Abbildung 5-25 gibt für die Bürstentypen der Hauptversuche die Beziehung zwischen Anpressung und Zustellung wieder. Eine Werkzeugarbeitsbreite von 160 Millimeter dient als Bezugsgröße. Zum Vergleich werden alle Werkzeuge mit 1.000 Umdrehungen pro Minute angetrieben. Vier Kraftsensoren KD40s (ME-Meßsysteme) ermöglichen die Messdatenaufnahme.

Der Zusammenhang von Zustellung und Anpressung verdeutlicht einerseits die Grenzen der Flexibilität von Bürstenwerkzeugen, andererseits werden die Unterschiede der Werkzeugtypen ersichtlich. Es sind annähernd Progressive, Degressive und lineare Verläufe auszumachen. Ähnlichkeiten zu den Kennlinien metallischer Federn sind auffällig [130, G 63]. Eine wissenschaftliche Untersuchung von Bürstenwerkzeugen als Feder bietet weiteres Untersuchungspotential, ist allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ferner wird im Sinne der Verschleißoptimierung die Anstellung auf ein notwendiges Minimum reduziert. Wird nach der Besatzanordnung differenziert, so weisen gezopfte Besatzanordnungen zwar gegenüber gewellten oder verseilten Werkzeugausführungen größtenteils höhere Kraftverläufe auf. Eine strikte Anordnung in Reihe nach Przyklen [52] – wobei Bürsten in der Reihenfolge gezopft, verseilt, gewellt und glatt eine Verringerung der Steifigkeit aufweisen – ist allerdings nicht gegeben. Zuzuschreiben ist dies unterschiedlichen Besatzmaterialien, -durchmessern und -längen sowie Besatzdichten.

Dieser Umstand, dass Bürstenwerkzeuge solche unterschiedlichen Eigenschaften aufweisen, macht es nicht möglich Aussagen auf weitere – nicht innerhalb dieser Arbeit untersuchte – Werkzeugausführungen zu übertragen oder zu pauschalisieren. Es können lediglich anhand von Tendenzen Empfehlungen ausgesprochen werden. Diese sind dann allerdings für den jeweiligen Anwendungsfall gezielt zu untersuchen. Für die innerhalb der Forschungsarbeit gewählten Bürsten werden die Maschinenparameter durch den Betriebsbereich des Baggeranbaugeräts weiter eingegrenzt (vgl. Abschnitt 4.1.2.1) und beeinflusst somit die Beantwortung der Forschungsfrage 3.

Auf eine weitere Erhöhung der Stufenwerte der Werkzeugtypen 105 und 112 musste verzichtet werden. Dies liegt außerhalb der technischen Leistungsfähigkeit der Antriebsmaschine des Versuchsstandes II. Ebenfalls ist auszumachen, dass Werkzeugtyp 103 innerhalb der betrachteten Stufeneinstellungen des Faktors Zustellung, von null bis vier Millimetern, nicht den Betriebsbereich des Baggeranbaugeräts erreicht. Dies gilt es in den weiteren Untersuchungen zu beachten.

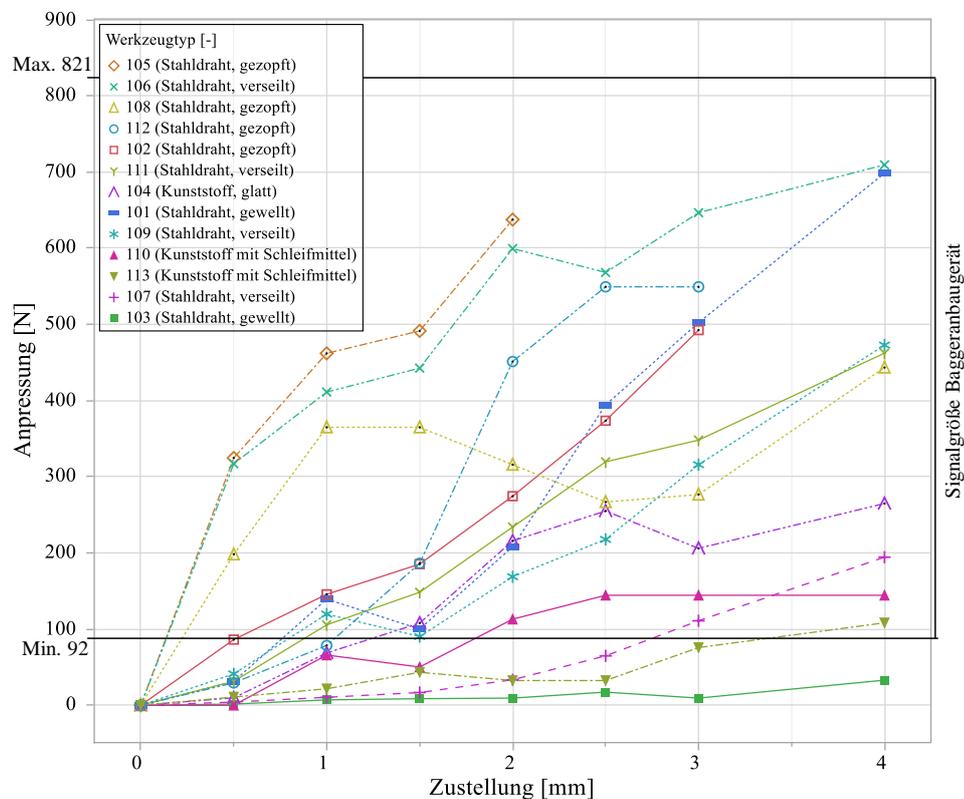


Abbildung 5-25 Anpressung [N] nach Werkzeugtyp in Abhängigkeit der Zustellung [mm]

5.2.2 Werkzeugvergleich und Werkzeugauswahl

Folgende Voraussetzungen sind von den Werkzeugen für eine potentielle Praxisanwendung zu erfüllen: Die Entfernung eines WDVS-Teilaufbaus (Anwendungsfall 1) dient der Bewertung der Funktionserfüllung anhand der Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß. Die Maschinenparameter werden dahingehend optimiert und bilden den Ausgang der Langzeitversuche. Der Abtrag der Systembestandteile des Anwendungsfalls 2 (Komplettaufbau) hingegen stellt ein Ausschlusskriterium dar. Im Vergleich zu den Grundlagenversuchen wird erstmals MW als Dämmstoff betrachtet. Die WDVS-Aufbauten 107 und 108 sowie 109 und 110 unterscheiden sich dabei durch den verwendeten Dämmstoff. Den ungeraden Nummerierungen ist ein Dämmstoff aus EPS zugewiesen, den geraden MW (vgl. Abschnitt 4.1.1.3). Ebenso sind die Aufbauten 107&108 in denen der Nummerierung 109&110 enthalten. Es wurde nur eine Deckschicht aus Ober- und Unterputz inkl. Armierung aufgebracht. Die Aufbauten 107&108 sowie 109&110 werden getrennt nach den Anwendungsfällen gemeinsam auf einem Betonprüfkörper untersucht, wobei das Werkzeug zuerst durch den Dämmstoff EPS bewegt wird. Durch diese Grundvoraussetzung an die Werkzeuge ergibt sich eine erste Selektion zur Klärung der Forschungsfragen 2 und 3. Tabelle 28 sind die zusammengefassten Ergebnisse nach Werkzeugtyp und WDVS-Aufbau zu entnehmen. Eine Beschreibung der einzelnen Versuche nach Besatzanordnung erfolgt im Anschluss in den Abschnitten 5.2.2.1 bis 5.2.2.5, wobei nach aufsteigendem Ergebnisverlauf vorgegangen wird.

Anzumerken ist, dass der Dämmstoff EPS weiterhin im Fokus dieser Arbeit steht. Den Abtrag von WDVS mit MW gilt es lediglich nachzuweisen. Sollte außerdem eine Werkzeugausführung den gewünschten Abtrag erbringen, so wird der Faktor Drehzahl um weitere zwei Stufen erhöht. Somit ist sicherzustellen, dass auch bei einer potentiellen Praxisanwendung im Baggeranbaugerät und möglichen Drehzahlschwankungen das Ergebnis erbracht werden kann.

Tabelle 28 Versuchsstand II: Bewertung der Ergebnisse nach Werkzeugtyp

Werkzeugtyp	Kurzbeschreibung	Anwendungsfall 1 (Teilaufbau)		Anwendungsfall 2 (Komplettaufbau)	
		WDVS- Aufbau			
		107 (EPS)	108 (MW)	109 (EPS)	110 (MW)
112	Stahldraht, gezopft	++	++	++	++
101	Stahldraht, gewellt	++	++	++	++
105	Stahldraht, gezopft	++	++	++	++
109	Stahldraht, verseilt	++	++	-	--
102	Stahldraht, gezopft	++	++	--	--
108	Stahldraht, gezopft	+	+	-	-
107	Stahldraht, verseilt	+	+	-	--
111	Stahldraht, verseilt	+	+	-	--
106	Stahldraht, verseilt	+	+	--	--
103	Stahldraht, gewellt	++	+	--	--
104	Kunststoff, glatt	++	+	--	--
113	Kunststoff mit Schleifmittel	++	++	--	--
110	Kunststoff mit Schleifmittel	+	+	--	--
++	Aufbau bewältigt (kaum Klebereste vorhanden)	Bewertungskriterium			
+	Aufbau bewältigt, deutlich Klebereste vorhanden				
-	Aufbau bewältigt, Dämmstoffreste vorhanden	Ausschlusskriterium			
--	Keinerlei Systembestandteile entfernt				

5.2.2.1 Werkzeugtyp 110 und 113: Kunststoff mit Schleifmittel

Die Werkzeuge mit Schleifmittel besetztem Besatz in gerader Anordnung werden im Bereich der Nachbearbeitung von Oberflächen, zum Verrunden von Kanten, Entgraten, Polieren und Reinigen verwendet. Für den Abtrag von WDVS ergeben sich aufgrund von Recherchen sowie Empfehlungen die in Tabelle 29 dargestellten Faktoren und Stufenwerte. Nach Uhlmann [61] kommt es infolge höherer Zustellung zu einer stärkeren Verdrängung der Filamente, wodurch sich größere Werte der Normalkraft auf eine größere Kontaktfläche verteilen. Da der Besatz entlang seiner Höhe mit abrasiven Medien besetzt ist, befinden sich mehr Werkzeugschneiden im Einsatz. Bei einem Werkzeugdurchmesser von 250 Millimetern resultieren aus den untersuchten Drehzahlen Umfangsgeschwindigkeiten von 9,82 bis 31,94 Metern pro Sekunde. Der Versuchsplan II-I ist bezogen auf die Werkzeugtypen insofern ausgewogen, bis eines der Werkzeuge den gewünschten Abtrag – lediglich Klebereste vorhanden bzw. keine Dämmstoffrückstände – für die WDVS-Aufbauten erbringt. Daraufhin sind keine Verbesserungen des Abtrags, sondern nur erhöhte Verschleißerscheinungen zu erwarten. Die Stufenwerte werden nicht weiter gesteigert, sofern sich die aus der Zustellung resultierende Anpressung bereits im Betriebsbereich des Baggeranbaugeräts befindet. Eine Randomisierung des Versuchsplans ist aufgrund dieses Vorgehens nicht möglich.

Tabelle 29 Faktoren und Stufen Versuchsplan II-I

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriell (nominal)	107&108 / 109&110
Werkzeugtyp	[-]	kategoriell (nominal)	110 / 113
Zustellung	[mm]	stetig	0 / 1 / 2 / 3 / 4
Drehzahl	[1/min]	stetig	750 / 1125 / 1500 / 2440
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	konstant	3000
Drehbewegung	[-]	konstant	Gleichlauf

In Abbildung 5-26 und Abbildung 5-27 sind die Ergebnisse am Teilaufbau (WDVS-Aufbau 107&108) sowie Komplettaufbau (WDVS-Aufbau 109&110) dargestellt. Zu unterscheiden sind das Bewertungskriterium Abtrag sowie die Rückstände an Dämmstoffen aus EPS und MW. Diese lassen sich auf der Ordinate ablesen. Letztere führen ebenso wie Rückstände weiterer Systembestandteile zum Ausschluss eines Werkzeugs aus der weiteren Betrachtung und dient nicht der Bewertung der Funktionserfüllung. Als stetiger Faktor erlaubt die Drehzahl eine Interpolation der Ergebnisse. Daraus ergeben sich Liniendiagramme. Gruppirt nach den Stufen des Faktors Drehzahl können die Ergebnisse dahingehend geprüft werden, ob ein rückstandsloser Abtrag möglich ist. Dazu gilt es einen Betriebspunkt zu identifizieren, ab welchem die Rückstände an EPS sowie MW null Prozent betragen. Die einzelnen Beobachtungswerte sind dazu getrennt nach Zustellung und Drehzahl auf der Abszisse aufgetragen und sollten von links nach rechts betrachtet werden.

Zu erkennen ist in Abbildung 5-26, dass Werkzeugtyp 113 verglichen mit Werkzeugtyp 110 bereits bei einer Zustellung von einem Millimeter und einer Drehzahl von 2440 Umdrehungen den gewünschten Abtrag erbringt. Um dennoch dem Betriebsbereich des Baggeranbaugeräts zu entsprechen, werden weitere Untersuchungen bis zu einer Zustellung von drei Millimetern durchgeführt. Obgleich der gewünschte Abtrag an einem Teilaufbau von beiden Werkzeugtypen erbracht werden kann, sind diese für die weiteren experimentellen Untersuchungen auszuschließen. Abbildung 5-27 veranschaulicht dies grafisch. Die Werkzeugtypen 110 und 113 sind nicht in der Lage, die Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung zu durchtrennen. Der Abtrag für die Komplettaufbauten liegt demnach bei null, die Rückstände an Dämmstoff bei einhundert Prozent. Dies schließt weitere Systembestandteile wie Wärmedämmstoff und Kleber mit ein.

5.2 Analyse der Hauptversuche

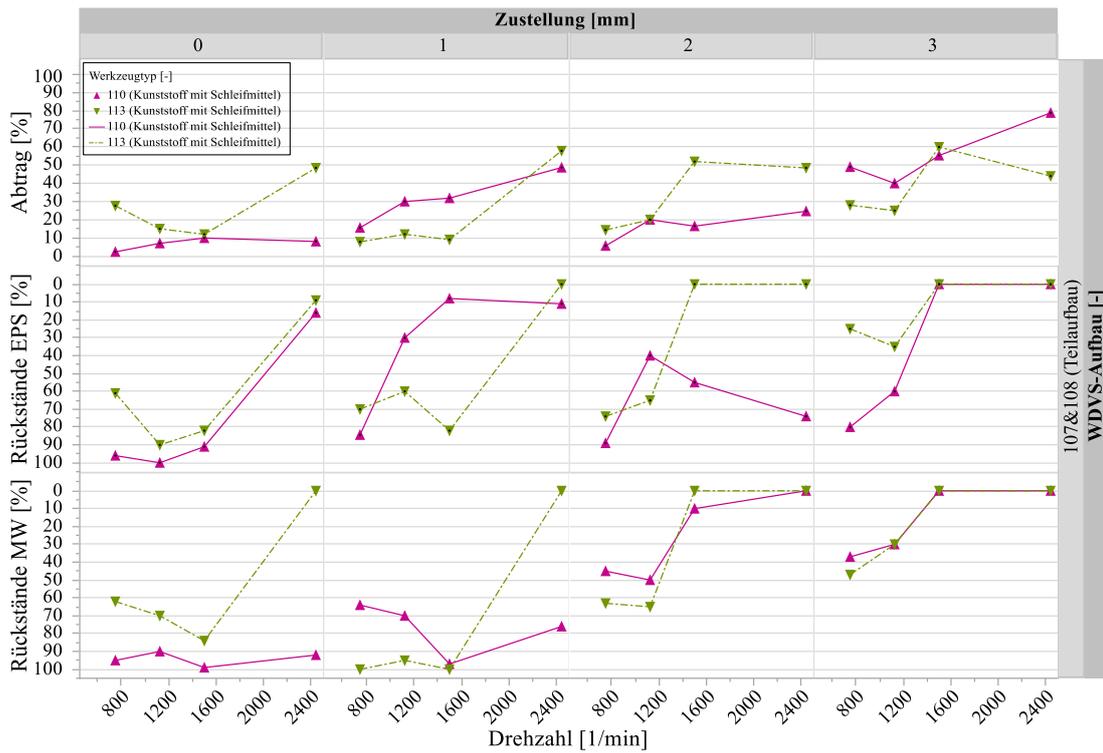


Abbildung 5-26 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 110 und 113 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]

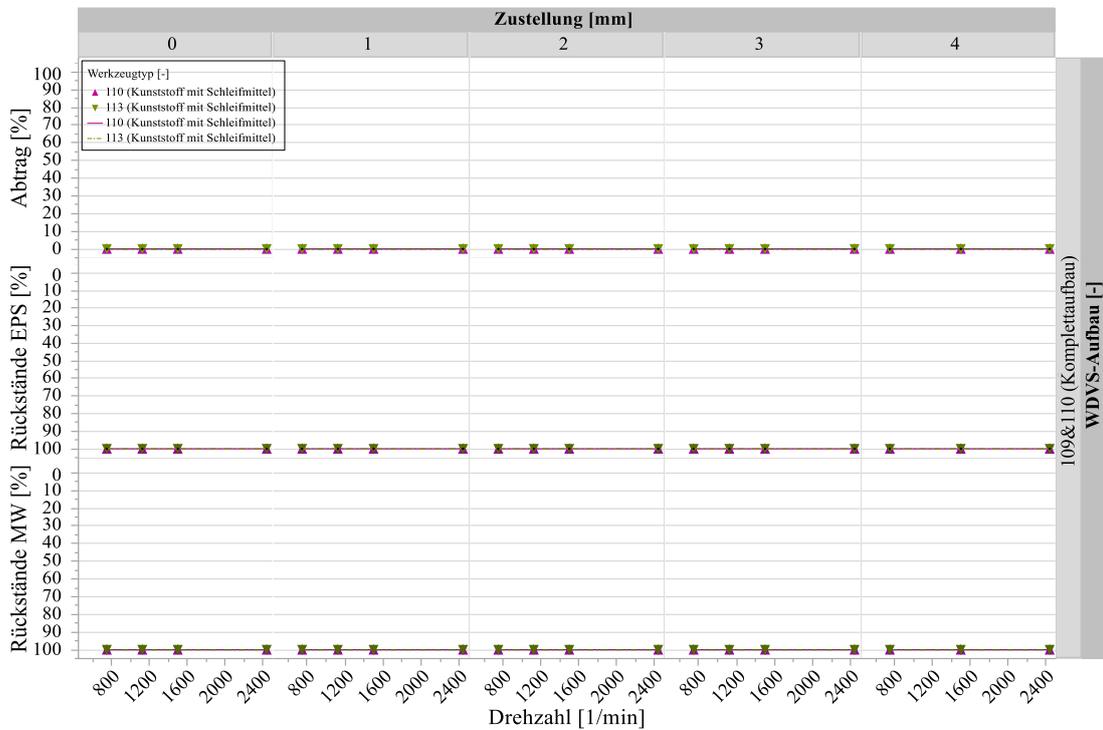


Abbildung 5-27 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 110 und 113 Anwendungsfall 2 (Komplettlaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]

5.2.2.2 Werkzeugtyp 104: Kunststoff glatt

Rundbürsten mit Kunststoffbesatz finden bspw. in Straßenkehrmaschinen Anwendung. Eine Reinigung der Oberfläche wird durch den Abtransport von Verschmutzungen (zur Absaugung) erreicht. Im Gegensatz zu metallischen Drähten ist von synthetischen Fasern einerseits kein Besatzbruch zu erwarten, andererseits ist diesen keine Veränderung der Oberflächenstruktur zuzuschreiben [Experte 3.1.7.13]. Straßen aus Beton sowie Gebäudefassaden weisen als Oberflächen vergleichbare Eigenschaften auf. Inwiefern eine Übertragbarkeit auf Werkzeuge zum Abtrag von WDVS besteht, gilt es in den experimentellen Untersuchungen zu testen. Die Faktoren und Stufeneinstellungen zeigt Tabelle 30.

Tabelle 30 Faktoren und Stufen Versuchsplan II-II

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriell (nominal)	107&108 / 109&110
Werkzeugtyp	[-]	konstant	104
Zustellung	[mm]	stetig	0 / 1 / 2 / 3
Drehzahl	[1/min]	stetig	250 / 375 / 500 / 750
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	konstant	3000
Drehbewegung	[-]	konstant	Gleichlauf

Nach Angaben des Herstellers sollte eine Drehzahl von 500 Umdrehungen pro Minute möglichst nicht überschritten werden. Getestet werden Drehzahlen bis 750 Umdrehungen pro Minute. Aufgrund vorhandener Sicherheitsbeiwerte gemäß DIN EN 1083 Teil 2 (Juli 1997) ist dennoch keine Gefährdung bei Überschreitung zu erwarten [91]. Für den Praxiseinsatz ist allerdings eine Einhaltung maximal zulässiger Drehzahlen geboten. Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29 veranschaulichen die Ergebnisse.

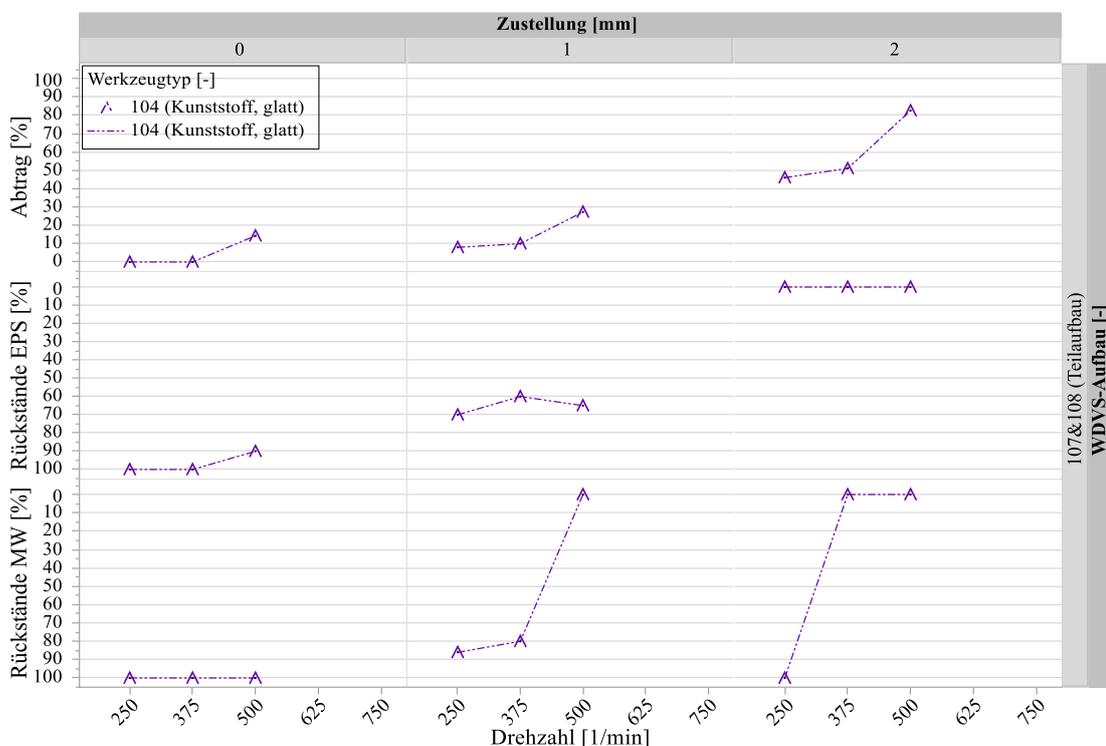


Abbildung 5-28 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 104 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]

5.2 Analyse der Hauptversuche

Zu erkennen ist, dass bereits mit zulässigen Drehzahlen (ab 375 Umdrehungen pro Minute) der gewünschte Abtrag an einem Teilaufbau erreicht werden kann. Dennoch wird ebenfalls Werkzeugtyp 104 für die weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Einerseits ist kein Durchtrennen der Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung möglich (vgl. Abbildung 5-29), andererseits ist eine bislang nicht zu beobachtende Folgeerscheinung aufgetreten: Werkzeugtyp 104 hat sich zugesetzt. Dies wird der Faserstruktur des Dämmstoffs MW zugeschrieben. Eine Reinigung vor jedem Versuch war notwendig. Ebenso ist ein Ausfransen der Fasern zu beobachten (vgl. Abbildung 5-30).

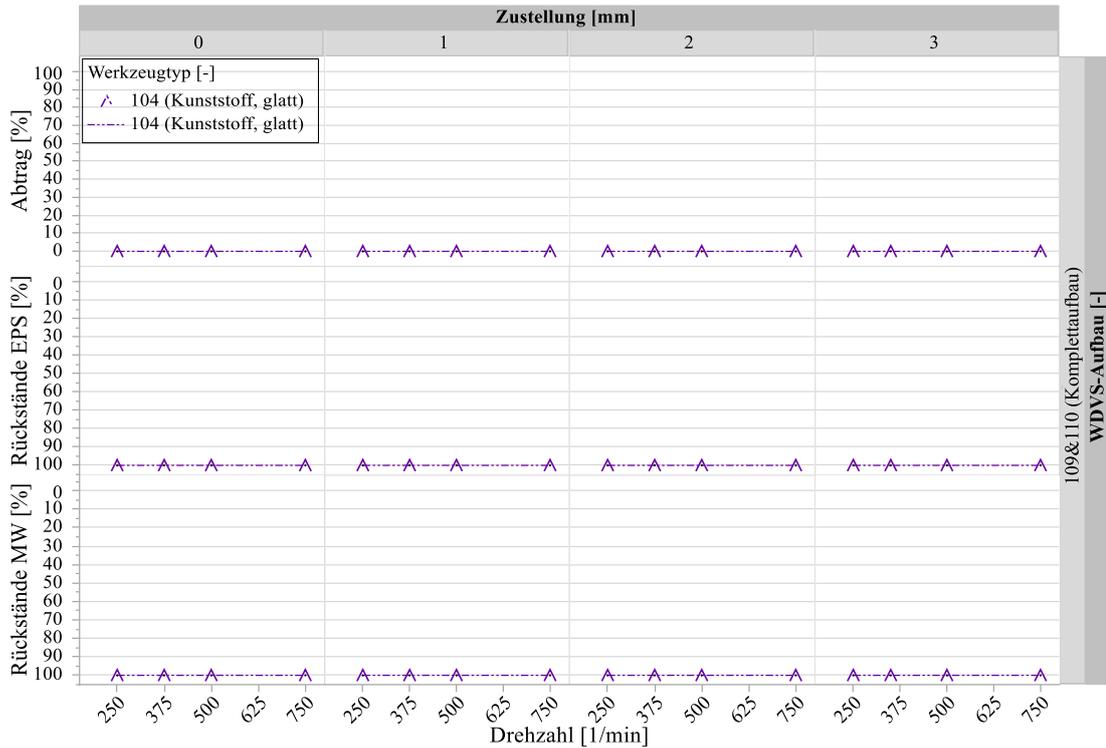


Abbildung 5-29 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 104 Anwendungsfall 2 (Komplettaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]



Abbildung 5-30 Aufnahmen Werkzeugtyp 104: (a) Bürste setzt sich zu; (b) Einzelspitzen vor Versuchsdurchführung; (c) Einzelspitzen nach Versuchsdurchführung

5.2.2.3 Werkzeugtyp 106,107,109 und 111: Stahldraht verseilt

Bei Litzendraht handelt es sich um eine Seilkonstruktion aus unterschiedlich starken Stahldrähten. Die Besatzart wird überwiegend zum Entgraten eingesetzt. Im Gegensatz zu gezopften Anordnungen ist vom Litzendraht mehr Flexibilität zu erwarten, bei gleichzeitig höherer Steifigkeit als bei gewellten Besatzanordnungen [Experte 1.2.6.11]. Getestet werden vier verseilte Stahldrahtbürsten. Werkzeugtyp 107 weist dabei eine – für Rundbürsten untypische – Schrägstellung des Besatzes um fünf Grad längs der Rotationsebene auf. Dadurch ergibt sich ein positiver Spanwinkel. Eine höhere Steifigkeit und folglich bessere Abtragsergebnisse sind zu erwarten. Dennoch werden nach Angaben des Herstellers nur etwa 0,5 Prozent der radialen Bürsten mit einer Auslenkung gefertigt [Experte 2.1.4.8]. Denn infolge der Beanspruchung sind auch eine Auslenkung des Besatzes entgegen der Schrägstellung sowie erhöhte Verschleißerscheinungen denkbar. Tabelle 31 zeigt die in den Versuchen variierten Faktoren sowie deren Stufeneinstellungen. Für Werkzeugtyp 107 gilt es eine maximal zulässige Umfangsgeschwindigkeit zu beachten. Diese liegt nach Herstellerangaben bei 15 Metern pro Sekunde (etwa 1150 Umdrehungen pro Minute) [Experte 2.1.4.8].

Für alle weiteren Werkzeugtypen des Versuchsplans II-III liegt der Grenzwert über dem höchsten Stufenwert des Versuchsstands II. Alle drei Hersteller der vier Bürsten empfehlen für die experimentellen Untersuchungen möglichst mit den Drahtspitzen zu arbeiten, die Zustellung ist folglich zu minimieren.

Tabelle 31 Faktoren und Stufen Versuchsplan II-III

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriell (nominal)	107&108 / 109&110
Werkzeugtyp	[-]	kategoriell (nominal)	106 / 107 / 109 / 111
Zustellung	[mm]	stetig	0 / 1 / 2 / 3
Drehzahl	[1/min]	stetig	750 / 1125 / 1150 / 1500 / 2440
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	konstant	3000
Drehbewegung	[-]	konstant	Gleichlauf

Abbildung 5-31 veranschaulicht die Ergebnisse an den Teilaufbauten der Dämmstoffe EPS und MW. Ersichtlich wird, dass alle Werkzeuge den gewünschten Abtrag bereits bei geringer Stufeneinstellung des Faktors Zustellung ermöglichen, Werkzeugtyp 106 sogar ohne Zustellung. Um dennoch dem Betriebsbereich des Baggeranbaugeräts zu entsprechen, werden die Stufenwerte weiter erhöht. Werden die Bürstenwerkzeuge allerdings nach den Versuchsdurchführungen betrachtet, so ergibt sich ein recht unterschiedliches Bild (vgl. Abbildung 5-33). Zwei der vier Werkzeuge haben sich zugesetzt, wie es bereits bei Werkzeugtyp 104 zu beobachten war. Es handelt sich dabei um Werkzeugtyp 107 und 109.

Die Versuchsergebnisse an einem Komplettaufbau aus WDVS führen dann gänzlich zum Ausschluss aller vier Bürstenwerkzeuge an den weiterführenden Untersuchungen. Grafisch zeigt dies Abbildung 5-32. Demnach ist Werkzeugtyp 106 nicht in der Lage die Systembestandteile Ober- und Unterputz inkl. Armierung zu durchtrennen. Werkzeugtyp 107, 109 und 111 vermochte dies in ungenügendem Maße: Deutliche Rückstände verbleiben, wie anhand exemplarischer Aufnahmen aus Abbildung 5-34 ersichtlich wird. Auffällig ist, dass ein Abtragen des WDVS-Aufbaus 109 (Dämmstoff EPS) möglich war, die Deckschicht des WDVS-Aufbaus 110 (Dämmstoff MW) allerdings praktisch nicht durchtrennt werden konnte. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Strukturen der Dämmstoffe zurückführen. So kann der Dämmstoff MW im Gegensatz zu EPS komprimiert werden. Ein kontinuierlicher Abtrag selbst bei WDVS-Aufbau 109 (Komplettaufbau, Dämmstoff EPS) ist dennoch nicht zu erwarten.

5.2 Analyse der Hauptversuche

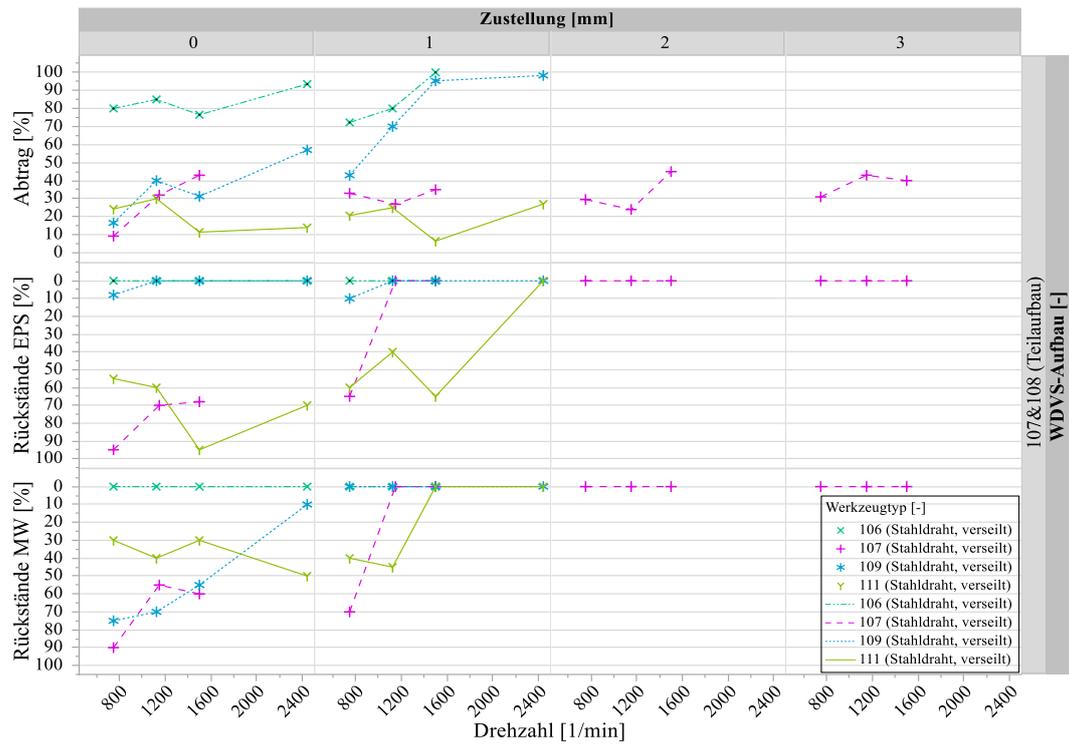


Abbildung 5-31 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 106, 107, 109 und 111 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]

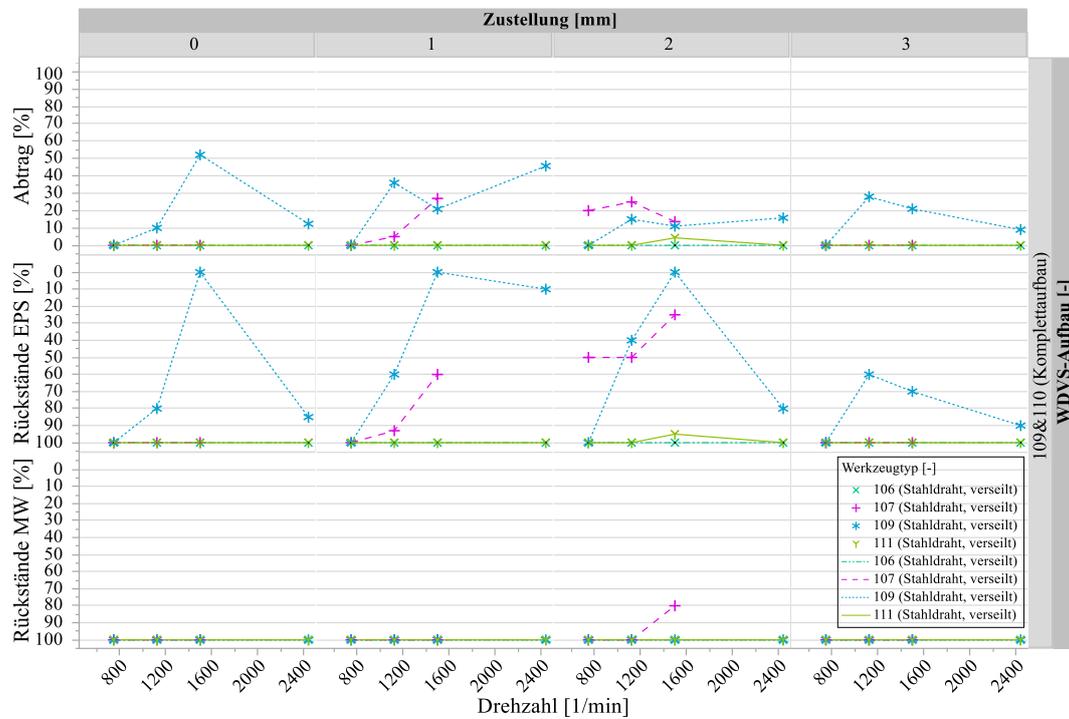


Abbildung 5-32 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 106, 107, 109 und 111 Anwendungsfall 2 (Komplettaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]



Abbildung 5-33 Aufnahmen Werkzeugtyp 106, 107, 109 und 111 nach der Versuchsdurchführung (Anwendungsfall 1)

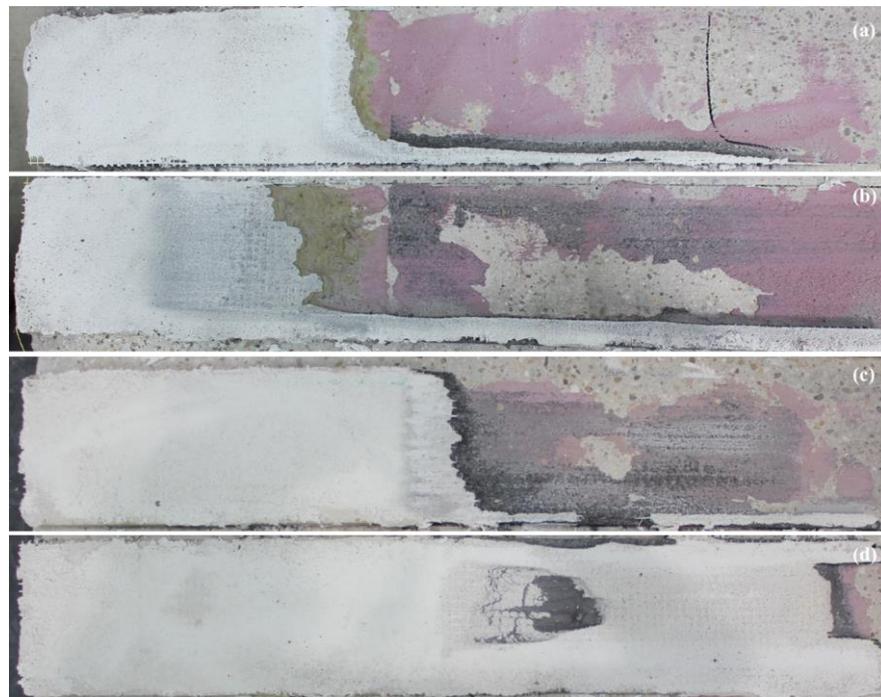


Abbildung 5-34 Aufnahmen der Ergebnisse (Anwendungsfall 2) bei Drehzahl 1500 1/min: (a) Werkzeugtyp 109, Zustellung 0 mm; (b) Werkzeugtyp 107, Zustellung 1 mm (c) Werkzeugtyp 109, Zustellung 3 mm; (d) Werkzeugtyp 111, Zustellung 2 mm

5.2.2.4 Werkzeugtyp 101 und 103: Stahldraht gewellt

Gewellte Stahldrahtbürsten finden vielerlei Anwendung. Bürsten aus dem Bereich Entgraten sowie der Oberflächenbearbeitung werden innerhalb der Hauptversuche getestet. Die sinusähnliche Wellenform der Einzeldrähte macht die gewellte Stahldrahtbürste flexibel und ermöglicht eine Federwirkung. Wird die gewellte Stahldrahtbürste mit der gezopften Ausführung in den Vergleich gesetzt, ist für den Abtrag von WDVS ein Eindringen in Vertiefungen sowie ein Ausgleich von Unebenheiten denkbar [Experte 2.2.5.9]. Infolge großer Zustellwerte ist eine höhere Nachgiebigkeit des Werkzeugs zu erwarten. Der Einzeldraht biegt sich in der Wellung, wobei dieser Effekt stark von der Besatzdichte und damit einhergehenden Stützeffekten benachbarter Einzeldrähte geprägt wird [Experte 2.2.5.10]. Tabelle 32 zeigt eine Auflistung der Faktoren und Stufenwerte des Versuchsplans II-IV. Die Spiralwalzenbürste (Werkzeugtyp 103) weist dabei eine maximal zulässige Drehzahl von 1000 Umdrehungen pro Minute auf. Gemäß DIN EN 1083 Teil 2 (Juli 1997) enthält diese Herstellerangabe einen Sicherheitsbeiwert, wonach Stufenwerte bis 1125 Umdrehungen pro Minute experimentell untersucht werden können. Durch den Betriebsbereich des Baggeranbaugeräts ergibt sich des Weiteren die Notwendigkeit der Untersuchung von Stufenwerten der Zustellung größer gleich sechs Millimeter für Werkzeugtyp 103 (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Tabelle 32 Faktoren und Stufen Versuchsplan II-IV

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriiell (nominal)	107&108 / 109&110
Werkzeugtyp	[-]	kategoriiell (nominal)	101 / 103
Zustellung	[mm]	stetig	0 / 1 / 2 / 3 / 4 / 6 / 8
Drehzahl	[1/min]	stetig	750 / 1125 / 1500 / 2440
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	konstant	3000
Drehbewegung	[-]	konstant	Gleichlauf

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an den Teil- sowie Komplettaufbauten sind in Abbildung 5-35 und Abbildung 5-36 ersichtlich. Den Grafiken ist zu entnehmen, dass beide Bürstenwerkzeuge den gewünschten Abtrag an einem Teilaufbau erbringen, an einem Komplettaufbau allerdings nur Werkzeugtyp 101. Wie bereits die Werkzeuge 104, 106, 110 und 113 konnte ebenfalls Werkzeugtyp 103 an einem Komplettaufbau die Deckschicht aus Armierungsschicht und Schlussbeschichtung nicht durchtrennen. Werden die Bürstenwerkzeuge 103, 104, 106, 110 und 113 unter dem Aspekt der Werkzeugsteifigkeit betrachtet, so resultiert aus den Stufenwerten der Zustellung eine vergleichsweise niedrige Anpressung (vgl. Abbildung 5-25). Den Werkzeugtypen ist demnach eine geringe Steifigkeit zuzuweisen.

Werkzeugtyp 101 hingegen ist in der Lage, den gewünschten Abtrag für beide Anwendungsfälle zu leisten und wird demnach in die Versuchspläne der weiteren Untersuchungen einbezogen. Eine Drehzahl von 1125 Umdrehungen pro Minute sowie eine Zustellung von zwei Millimetern bilden den weiteren Betriebspunkt und legen den Ausgangspunkt der Langzeitversuche fest. Eine Zustellung von zwei Millimeter entspricht dabei einer Anpressung von 208 Newton. Diese Faktoreinstellung ermöglicht einen rückstandslosen Abtrag aller Systembestandteile sowie den gewünschten Abtrag bei den Anwendungsfälle Teil- und Komplettaufbau.

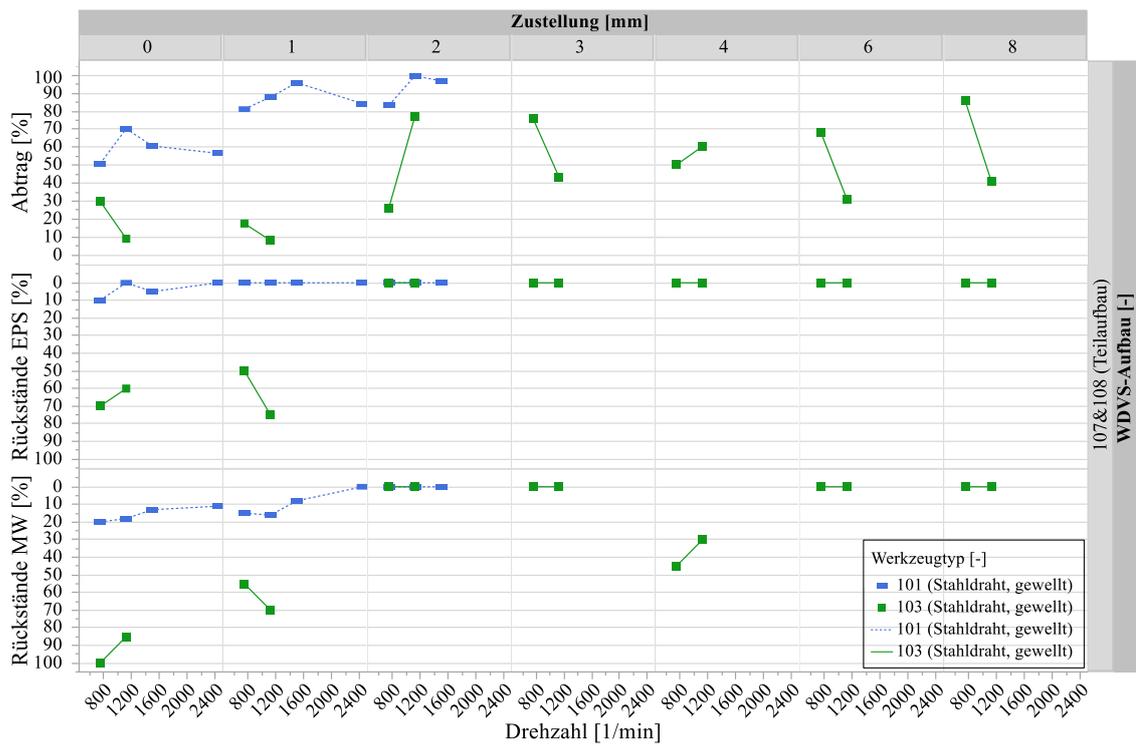


Abbildung 5-35 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 101 und 103 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]

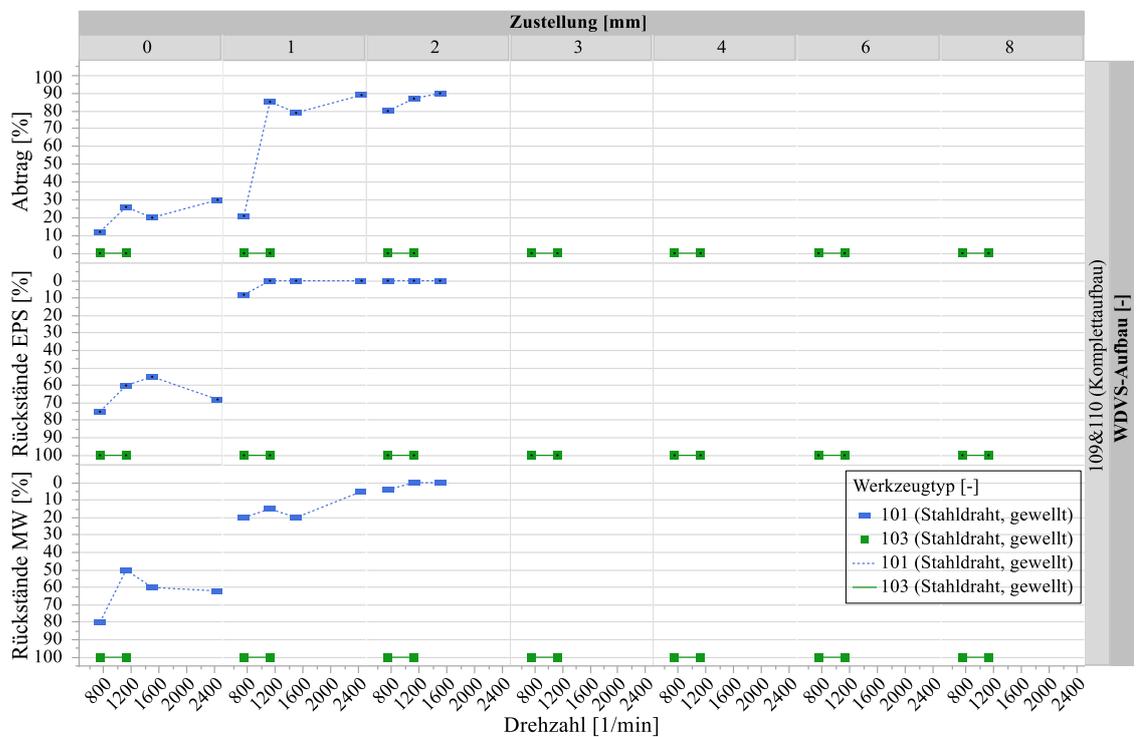


Abbildung 5-36 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 101 und 103 Anwendungsfall 2 (Kompletttaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]

5.2.2.5 Werkzeugtyp 102, 105, 108, 112: Stahldraht gezopft

Gezopfte Stahldrahtbürsten werden je nach Ausführung der Zöpfe für die Oberflächenbearbeitung, das Entfernen von Beschichtungen oder zum Entgraten verwendet. Innerhalb der experimentellen Untersuchungen wurden gezopfte Werkzeugausführungen von neun der 17 befragten Experten als Werkzeugausführung für den Abtrag von WDVS empfohlen (vgl. Anhang A). Ihnen ist innerhalb der betrachteten Anordnungen die geringste Flexibilität zuzuschreiben. Im Gegenzug könnte diese Werkzeugausführung Standzeitvorteile bieten [Experte 2.2.5.10]. Daraus ergeben sich vier Werkzeugtypen für die experimentelle Untersuchung der Hauptversuche. Tabelle 33 zeigt die Faktoren und Faktorstufen.

Tabelle 33 Faktoren und Stufen Versuchsplan II-V

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriell (nominal)	107&108 / 109&110
Werkzeugtyp	[-]	kategoriell (nominal)	102 / 105 / 108 / 112
Zustellung	[mm]	stetig	0 / 0,5 / 1 / 2 / 3
Drehzahl	[1/min]	stetig	750 / 1125 / 1500 / 2440
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	konstant	3000
Drehbewegung	[-]	konstant	Gleichlauf

Abbildung 5-37 veranschaulicht die Ergebnisse des Qualitätsmerkmals Abtrag für den Anwendungsfall 1. Erkennbar ist, dass alle betrachteten Werkzeugausführungen den gewünschten Abtrag bei unterschiedlichen Maschineneinstellungen erbringen. Einschränkungen der maximal zulässigen Drehzahl für den Einsatz an Versuchsstand II bestehen nicht. Hingegen werden die Stufenwerte des Faktors Zustellung im Gegensatz vorangegangener Versuchspläne der Hauptversuche um einen Wert erweitert. Dies begründet sich durch die Steigung des Kurvenverlaufs (vgl. Abbildung 5-25) der Werkzeuge 105 und 108, wonach diese bereits bei einer Zustellung von 0,5 Millimeter dem Betriebsbereich des Baggeranbaugeräts entsprechen. Für Werkzeugtyp 102 hingegen ergibt sich daraus eine Mindestzustellung von knapp über einen Millimeter, weshalb die Zustellung bis auf 1,5 Millimeter erhöht wird. Wie der Grafik zu entnehmen ist, führen bereits geringere Stufeneinstellungen einen rückstandslosen Abtrag herbei.

Eine Eingrenzung der Werkzeugtypen für die weitere Versuchsdurchführung ergibt sich durch die Ergebnisse des Anwendungsfalles 2 (Komplettaufbau). Diese stellt Abbildung 5-38 dar. Ersichtlich ist, dass lediglich die Werkzeugtypen 105 und 112 den gewünschten Abtrag erbringen. Werkzeugtyp 102 sowie 108 sind dazu nicht in der Lage, wobei Werkzeugtyp 102 die Deckschicht aus Armierungsschicht inkl. Schlussbeschichtung nicht zu durchtrennen vermag. Hingegen kann Werkzeugtyp 108 die Deckschicht zwar durchtrennen, hinterlässt dann allerdings deutliche Rückstände. Ähnlichkeiten zu den Ergebnissen des Werkzeugtyps 1 bei der Untersuchung des Einflusses der Vorschubgeschwindigkeit sind auffällig (vgl. Abschnitt 5.1.2). Werkzeugtyp 102 rollt sich auf den Dämmstoffaufbau auf. Exemplarische Aufnahmen der Untersuchungsergebnisse zeigt Abbildung 5-39. Werden die Werkzeugtypen 105 sowie 112 in den Vergleich gesetzt, so weisen beide ähnliche Besatzdichten sowie einen Besatzdurchmesser von 0,8 Millimetern auf (vgl. Abschnitt 4.1.1.2). Dennoch ist Werkzeugtyp 105 deutlich steifer. Die freie Besatzlänge des Werkzeugtyps 105 überwiegt die des Werkzeugtyps 112, weshalb die Unterschiede in der Besatzanordnung – im Speziellen der Zopfauflösung – zu suchen sind. Besitzt Werkzeugtyp 112 eine offene Zopfform, so ist Werkzeugtyp 105 hingegen durchgezopft. Eine hohe Werkzeugsteifigkeit bietet für den Abtrag von WDVS allerdings nicht nur Vorteile. Für einen Ausgleich von Unebenheiten der Außenfassade oder Schwankungen des Baggeranbaugeräts ist eine flexible Bürste zu bevorzugen. In der experimentellen Versuchsumgebung unter Idealbedingungen mag dies nicht in dem Maße zum Tragen kommen, wie es in der Praxis relevant ist.

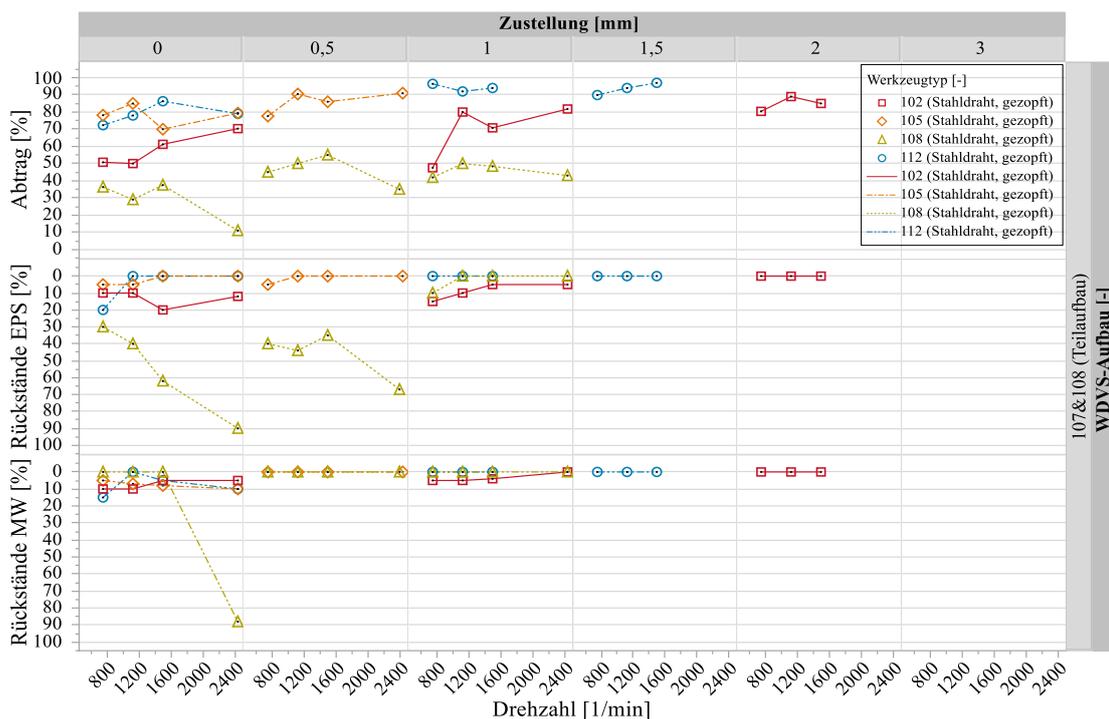


Abbildung 5-37 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 102, 105, 108 und 112 Anwendungsfall 1 (Teilaufbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]

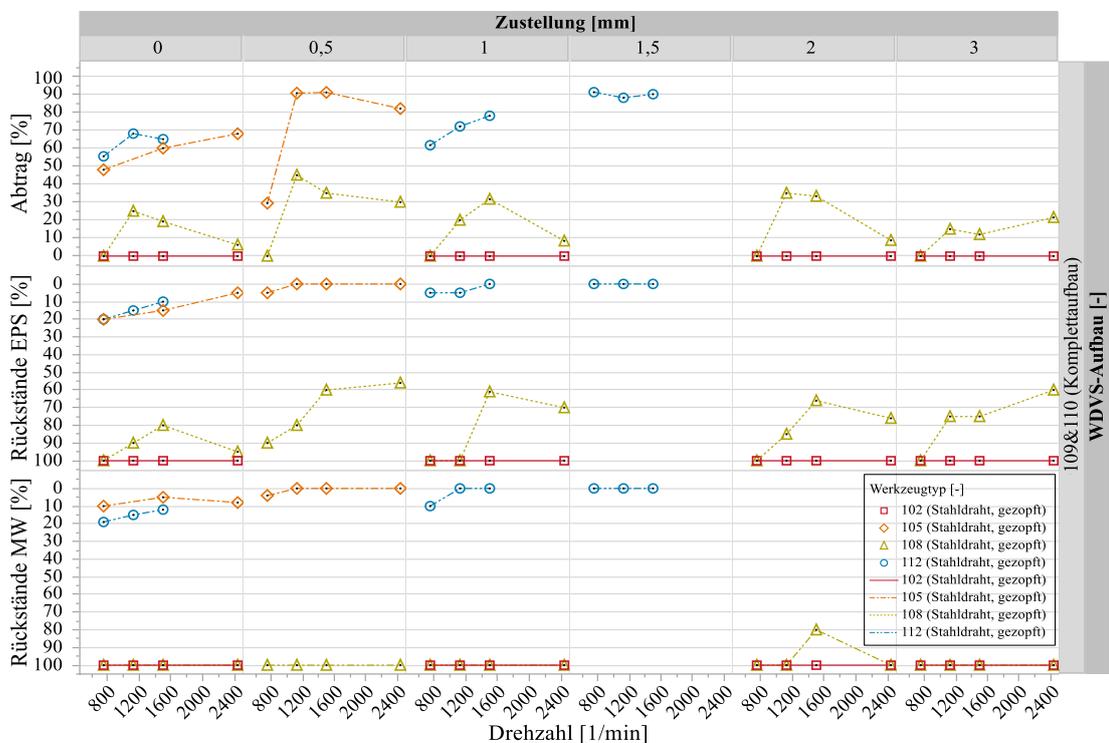


Abbildung 5-38 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 102, 105, 108 und 112 Anwendungsfall 2 (Komplettanbau): Abtrag [%] und Rückstände an EPS und MW [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Drehzahl [1/min] und der Zustellung [mm]

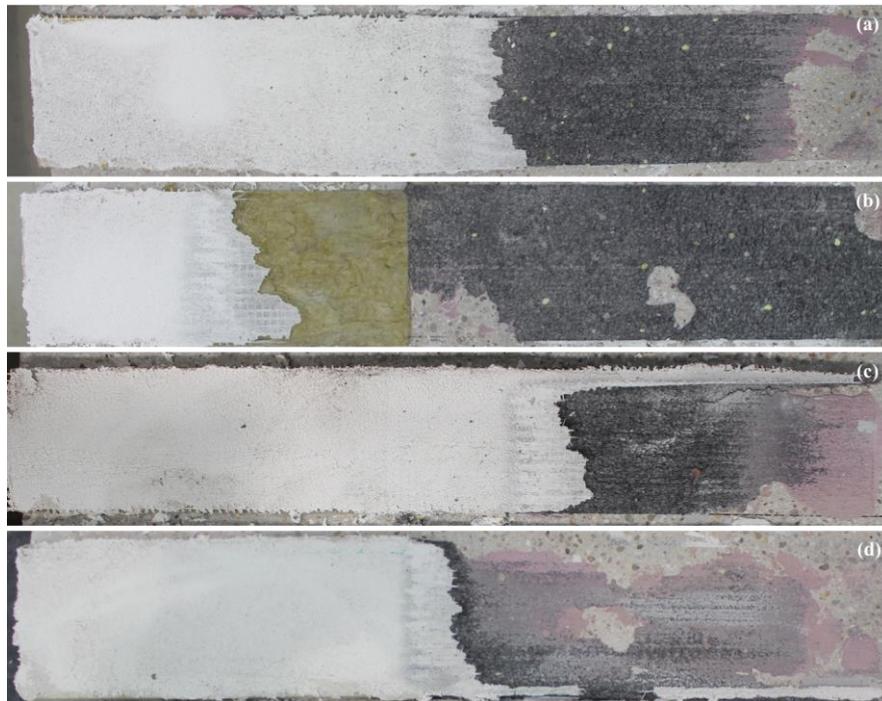


Abbildung 5-39 Aufnahmen der Ergebnisse Werkzeugtyp 108 (Anwendungsfall 2) (a) Zustellung 0 mm, Drehzahl 1500 1/min; (b) Zustellung 0,5 mm, Drehzahl 1125 1/min; (c) : Zustellung 2 mm, Drehzahl 1125 1/min; (d) Zustellung 3 mm, Drehzahl 2440 1/min

Schlussfolgerung:

Werden die Ergebnisse der Versuchsreihen zur Werkzeugauswahl zusammengefasst, ergeben sich insgesamt drei Bürstenwerkzeuge für die weiteren Untersuchungen. Diese Werkzeugtypen inkl. der ermittelten verschleißoptimalen Maschinenparameter bieten das Potential der Antwort auf die Forschungsfragen 2 und 3. Es handelt sich dabei um eine gewellte Anordnung (Werkzeugtyp 101) sowie zwei gezopfte Stahldrahtbürsten (Werkzeugtyp 105 und 112). Erkennbar ist, dass verschiedene Bürstentypen unterschiedliche Drehzahlen und Zustellwerte benötigen, um den gewünschten Abtrag zu erbringen:

- Eine Drehzahl von 750 Umdrehungen pro Minute sowie eine Zustellung von 1,5 Millimetern bilden den weiteren Betriebspunkt des Werkzeugtyps 112
- Werkzeugtyp 105 hingegen erbringt bereits bei einer Zustellung von einem halben Millimeter sowie einer Drehzahl von 1125 Umdrehungen pro Minute den gewünschten Abtrag
- Für Werkzeugtyp 101 bilden eine Drehzahl von 1125 Umdrehungen pro Minute sowie eine Zustellung von zwei Millimetern den Ausgangspunkt der Langzeitversuche

Verglichen mit den weiteren ebenfalls untersuchten Werkzeugtypen weisen die drei Bürsten eine hohe Steifigkeit auf (vgl. Abbildung 5-25).

5.2.3 Auswirkung von Verdübelung

Zusätzlich zu der klebenden Befestigung der Dämmstoffplatten an der Außenfassade kann eine Verdübelung notwendig sein, wobei die Befestigungsarten der konstruktiven und statischen Verdübelung differenziert werden. Die konstruktive Verdübelung übernimmt keine statischen Funktionen, sondern dient als Montagehilfe. Eine statische Verdübelung hingegen ist notwendig, falls der Untergrund für eine ausschließlich verklebte Befestigung des WDVS nicht geeignet ist, oder wenn dies dämmstoffspezifisch erforderlich ist [8]. MW-Platten beispielsweise müssen auf allen Untergründen zusätzlich statisch gedübelt werden [12]. Dabei kann die Dübelung unter oder durch den bewehrten Unterputz erfolgen.

Innerhalb dieser Arbeit stehen – basierend auf der Markthäufigkeit – geklebte WDVS mit Dämmstoffplatten aus EPS im Vordergrund. MW als Dämmstoff gilt es dennoch zu untersuchen – auch begründet durch die zunehmende Häufigkeit als Brandriegel in Kombination mit EPS. Bei geklebten Systemen mit EPS werden zumeist Schlagdübel mit einem Nagel aus Stahl oder Kunststoff eingesetzt. Bei statisch notwendigen Dübeln werden vorwiegend Schraubdübel verwendet. Diese haben sich aufgrund ihres großen Anwendungsspektrums als Universallösung etabliert [11, S. 189] und werden in den experimentellen Untersuchungen verwendet. Es wird die Annahme getroffen, dass eine statische Verdübelung sich stärker auf den Abtrag von WDVS auswirkt, als dies bei einer konstruktiven Verdübelung zu erwarten ist, weshalb die Verdübelung ebenfalls durch den bewehrten Unterputz erfolgt. Nach Riedel sind vier bis acht Dübel pro Quadratmeter üblich [12, S. 175]. Das Fraunhofer IBP spezifiziert diese Angabe: Auf Basis von Daten der EJOT Baubefestigung GmbH werden im Mittel 6,2 Dübel pro Quadratmeter für die Verdübelung von EPS verwendet [2, S. 35].

Im Zuge der Versuche wird geprüft, inwiefern die Verdübelung einen Einfluss auf den Abtrag von WDVS hat. Dazu werden die WDVS-Aufbauten 101 bis 106 mit den Dämmstoffen EPS, MW sowie EPS und MW experimentell untersucht (vgl. Abschnitt 4.1.1.3). Diese sind repräsentativ für die Anwendungsfälle einer gedämmten Außenfassade mit EPS, MW oder EPS mit Brandriegel. Die Aufbauten 101 bis 103 entsprechen dabei denen der Nummerierung 104 bis 106, sind aber zusätzlich mit drei Schraubdübeln versehen. Ein Abgleich der Untersuchungsergebnisse der beiden Dreiergruppen soll den Einfluss der Verdübelung auf die Zielgrößen aufzeigen. Tabelle 34 gibt die Faktorstufen sowie die Stufenwerte der experimentellen Versuche wieder. Basierend auf vorangegangener Werkzeugauswahl werden zwei Werkzeugausführungen unterschiedlicher Besatzanordnungen (gewellt und gezopft) verwendet. Die Maschinenparameter sind entsprechend der Versuche zur Werkzeugauswahl konstant gehalten und werden nicht weiter variiert. Auf eine weitere Untersuchung des Werkzeugtyp 105 wird dabei verzichtet, da es sich ebenso wie Werkzeugtyp 112 um eine gezopfte Stahldrahtbürste handelt. Aufgrund der noch höheren Steifigkeit (vgl. Abbildung 5-25) ist davon auszugehen, dass sich eine Verdübelung deshalb geringer auf die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß auswirkt.

Tabelle 34 Faktoren und Stufen Versuchsplan II-VI

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte	
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriell (nominal)	101 / 102 / 103 / 104 / 105 / 106	
Werkzeugtyp	[-]	kategoriell (nominal)	101	112
Zustellung	[mm]	konstant	-6 / -4 / -2 / 2	1,5
Drehzahl	[1/min]	konstant	1125	750
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	konstant	3000	
Drehbewegung	[-]	konstant	Gleichlauf	
Vorwerkzeug	[-]	kategoriell (nominal)	Schneide / Bürste	

Bevor die Ergebnisse der experimentellen Versuche dargestellt werden können, gilt es die Besonderheiten der Versuchsdurchführung zu beschreiben. Da in der Praxis geringe Dämmstoffstärken nicht konstruktiv verdübelt werden, weichen die WDVS-Aufbauten des Versuchsplans II-VI mit einer Dämmstoffdicke von zehn Zentimetern von den bisher in dieser Arbeit betrachteten Systemstärken ab. Aufgrund der geplanten Praxisanwendung der Bürstenwerkzeuge in einem Baggeranbaugerät ist davon auszugehen, dass alle Systembestandteile des WDVS bis zu einer Materialstärke von 15 bis 30 Millimetern – je nach Anstellwinkel des Baggers – von einem vorgelagerten Werkzeug abgetragen werden können. Daraus haben sich die bisher untersuchten Anwendungsfälle mit Dämmstoffdicken von zwei bis vier Zentimetern ergeben. Eine Untersuchung des vorgelagerten Trennwerkzeugs ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Um dennoch die Auswirkungen einer Verdübelung auf den Abtrag sowie die Bürstenwerkzeuge ermitteln zu können, ist auch für die experimentellen Untersuchungen ein vorgelagertes Werkzeug notwendig. Hinzu kommt, dass Versuchsstand II aufgrund der Einhausung nur eine Bearbeitung von Materialstärken bis zu fünf Zentimetern ermöglicht. Neben dem in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Aufbau der Versuchsstands wurde dazu – der Werkzeugtrommel vorgelagert – eine Schneide montiert (vgl. Abbildung 5-40). Diese kann gegenüber dem Werkstück im Schneidwinkel ausgerichtet werden und soll den WDVS-Aufbau bis auf eine Reststärke an geklebtem Dämmmaterial entfernen. Die Schneide wird dazu in einem Abstand von zwei Zentimetern zur Betonoberfläche positioniert. Die auf der Betonoberfläche verbleibenden Systembestandteile können dann von der nachgelagerten Bürste abgespant werden. Abweichend von der Praxisanwendung erfolgt die Werkstückbearbeitung durch das Schneidwerkzeug sowie durch die Bürsten nicht in einem Arbeitsgang. Somit können die Ergebnisse gesondert betrachtet werden.



Abbildung 5-40 links: Schneide, rechts: Versuchsstand II mit vorgelagertem Schneidwerkzeug (WDVS-Aufbau 102)

Anzumerken ist, dass zum Zeitpunkt der ersten Versuchsdurchführung innerhalb des Projektes BaDA keine Fräse, sondern eine Schneide als vorgelagertes Werkzeug geplant war. Den zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung vorgesehenen Aufbau des Baggeranbaugeräts zeigt Abbildung 5-41. Die im Versuchsstand II eingesetzte Schneide wurde von der WIMAG GmbH entwickelt und sollte die Bedingungen beim Einsatz des Baggeranbaugeräts nachstellen. Erst durch die experimentellen Untersuchungen ist es mit fortschreitendem Projektverlauf zu einer Anpassung gekommen, wie in Abschnitt 4.1.2.1 aufgezeigt wird.

Exemplarische Aufnahmen der Einzelversuche mit dem Schneidwerkzeug sind – getrennt nach den Dämmstoffen EPS, MW sowie EPS und MW – Abbildung 5-42 zu entnehmen. Die Beschreibung erfolgt im Anschluss. Zusammengefasst war für alle Aufbauten ein Entfernen der oberen Systembestandteile (Oberputz, Armierung und Unterputz sowie ein Großteil des Dämmstoffs) mit dem Schneidwerkzeug möglich. Reste an Dämmstoff und Kleber konnten dann im Anschluss von den Bürstenwerkzeugen abgespant werden. Sofern es sich um die WDVS-Aufbauten 101 bis 103 mit Schraubdübeln handelte, wurden diese von der Schneide aus dem Betonprüfkörper herausgezogen und nicht von den Bürstenwerkzeugen erfasst. Daraus ergeben sich keine signifikanten Unterschiede der Abtragsergebnisse in Folge einer Verdübelung. Ein Einfluss auf den Werkzeugverschleiß ist ebenso wenig auszumachen.

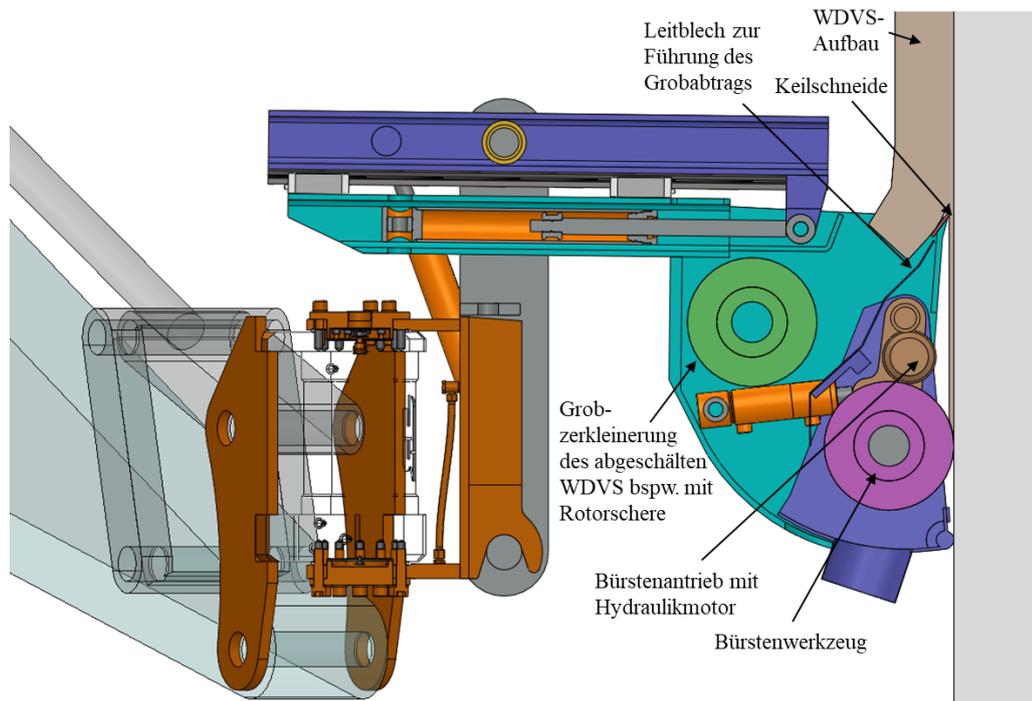


Abbildung 5-41 Darstellung des geplanten Baggeranbaugeräts (Stand: November 2017) [131]



Abbildung 5-42 Exemplarische Aufnahmen der Abtragsergebnisse mit einem Schneidwerkzeug, entstanden in Zusammenarbeit mit [132]

Die Aufnahmen (a) und (b) der Abbildung 5-42 zeigen den WDVS-Aufbau 106 (EPS, ohne Verdübelung) vor und nach dem Einsatz der Schneide. Erkennbar ist auf Bild (b), dass die Aufbauten fast vollständig abgelöst in Vorschubrichtung hinter dem Werkstück liegen. Lediglich Rückstände an EPS und Kleber

verbleiben auf dem Betonprüfkörper. Für die WDVS-Aufbauten 102 (MW, mit Verdübelung) zeigt Bild (c) den Versuchsdurchgang, wobei der WDVS-Aufbau über den Rand des Betonprüfkörpers hinausgeschoben wird. Aus Abbildung (d) wird ersichtlich, dass ebenfalls nur Reste an MW sowie Kleber auf der Betonoberfläche verbleiben. Bild (e) präsentiert den abgeschnittenen Aufbau inklusive Verdübelung. Werden die Versuche anhand der Dämmstoffe EPS und MW in den Vergleich gesetzt, so ist ein schlagartiges Lösen des Aufbaus lediglich beim Dämmstoff EPS zu beobachten. MW hingegen wird erst komprimiert und dann entlang einer Risskante parallel zur Betonoberfläche verschoben. Die Aufnahmen (f) bis (h) veranschaulichen den Versuchsdurchgang sowie die Ergebnisse bei der Bearbeitung von EPS und MW (WDVS-Aufbau 103, mit Verdübelung), wobei durch den 200 Millimeter großen Dämmstoffstreifen MW im sonst überwiegend mit EPS gedämmten Aufbau der Einfluss von Brandriegeln untersucht werden soll. Auf den Aufnahmen (f) und (g) ist zu erkennen, dass der Dämmstoff MW zusammengestaucht wird. Für den Dämmstoff EPS hingegen ist ein schlagartiges Loslösen vom Werkstück zu verzeichnen. Auch für diesen WDVS-Aufbau ist ein Herausziehen der Verdübelung durch die Schneide zu beobachten, wie Aufnahme (h) zeigt.

Dennoch ist eine Schneide als vorgelagertes Werkzeug in der Praxis ungeeignet, da – wie vor allem beim Dämmstoff EPS zu beobachten – die Schneide den Dämmstoff nicht schneidet, sondern erst leicht komprimiert, bis dieser sich schlagartig vom Prüfkörper löst und in Vorschubrichtung sowie vom Werkstück abgewandt nach oben davongeschleudert wird. Ein Sammeln, Grobzerkleinern und Absaugen des von der Schneide abgetragenen Gutes mit einem Baggeranbaugerät ist unrealistisch, weshalb es diesbezüglich zu einer Anpassung in Form einer Fräse gekommen ist, wie in Abschnitt 4.1.2.1 aufgezeigt.

Ein Herauslösen der Verdübelung durch das vorgelagerte Schneidwerkzeug hat zur Folge, dass die Bürstenwerkzeuge nur die Systembestandteile Dämmstoff und Kleber durchfahren. Versuchsergebnisse zu diesem Anwendungsfall (Teilaufbau) wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellt. Signifikante Abweichungen der Ergebnisse waren auch für Versuchsplan II-VI nicht zu verzeichnen. Unter Verwendung einer Schneide ist der Verdübelung demnach kein Einfluss zuzuschreiben.

Da allerdings nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, dass Dübel auch nach der ersten Bearbeitung durch ein vorgelagertes Werkzeug im Werkstück verbleiben, gilt es deren Einfluss weiter zu analysieren. Im denkbar ungünstigsten Fall durchlaufen die Bürstenwerkzeuge dann die senkrecht zur Bearbeitungsfläche stehenden Dübel. Innerhalb der experimentellen Untersuchungen wird dies anhand des WDVS-Aufbaus 101 (Dämmstoff EPS, mit Verdübelung) nachgebildet, wobei der Aufbau stückweise entlang seiner Höhe von den Bürsten mehrfach durchfahren wird. Abbildung 5-43 zeigt exemplarische Ergebnisse der insgesamt 4 Überfahrten des Werkzeugtyps 101. Die Aufnahmen (a) und (b) bilden den ersten Durchgang ab. Etwa vier Zentimeter der Materialstärke sind entfernt. Ersichtlich wird, dass die Dübel weiterhin im WDVS-Aufbau verbleiben, nur die Dübelteller wurden abgespannt. Die darauffolgende Überfahrt, veranschaulicht in Bild (c), legt die drei Schraubdübel weiter frei. Erst durch ein drittes Überfahren (vgl. Aufnahme (d) und (e)) werden zwei der drei Dübel aus der Verankerung gelöst und vom Bürstenwerkzeug entgegen der Vorschubrichtung wegbefördert. Durchgang Vier bei einer Zustellung von zwei Millimeter hat dann eine Entfernung aller verbleibenden Systembestandteile zur Folge. Aufnahme (f) zeigt, dass alle Dübel entfernt und der gewünschte Abtrag erbracht werden konnte. Signifikante Unterschiede der Messergebnisse zu denen mit vorgelagerter Schneide oder des WDVS-Aufbaus 106 (Dämmstoff EPS, ohne Verdübelung) bestehen nicht. Ein Werkzeugverschleiß bzw. eine Beschädigung infolge der Verdübelung ist ebenfalls nicht erkennbar. Von einem signifikanten Einfluss der Verdübelung ist demnach auch bei einem Kontakt des Bürstenwerkzeugs mit den Dübeln nicht auszugehen.

Zusammengefasst bestehen keine signifikanten Unterschiede der Abtragungsergebnisse nach Befestigungsart oder Dämmstoff. Die Untersuchungsergebnisse sind in Anhang E graphisch veranschaulicht.



Abbildung 5-43 Exemplarische Aufnahmen der Abtragsergebnisse des Bürstentyps 101 bei mehrfacher Überfahrt des WDVS-Aufbaus 101 (Dämmstoff EPS inkl. Verdübelung), entstanden in Zusammenarbeit mit [132]

Die Praxisversuche bestätigen die in den experimentellen Untersuchungen an Versuchsstand II erlangten Ergebnisse insofern, dass kein nachweislicher Einfluss der Verdübelung sowohl auf das Abtragsergebnis als auch auf das Bürstenwerkzeug vorliegt. Eine detaillierte Beschreibung der Praxisversuche liefert Anhang F. An dieser Stelle sollen lediglich die Ergebnisse zur Thematik der Verdübelung vorweggegriffen werden. Abbildung 5-44 zeigt die Abtragsergebnisse des Baggeranbaugeräts zu Praxisversuch 2 im Ausschnitt. Ein Fräswerkzeug war dabei dem Bürstenwerkzeug (Werkzeugtyp 112) vorgelagert und entfernte die Systembestandteile Oberputz, Armierung und Unterputz sowie einen Großteil des Dämmstoffs, bevor dann im gleichen Arbeitsgang das Bürstenwerkzeug das dargestellte Ergebnis erbrachte. Der 3,4 Quadratmeter große Prüfkörperabschnitt wurde mit den WDVS-Aufbauten 101 bis 103 versehen. Ein mineralischer Baukleber sowie 14 Schraubdübel dienten der Befestigung. Ersichtlich ist, dass der gewünschte Abtrag erbracht werden konnte. Werden die Aufnahmen mit den zuvor an Versuchsstand II erbrachten Ergebnissen verglichen, so ist zu erkennen, dass vereinzelt Schraubdübel in der Betonwand verbleiben. Vielmehr hat das Fräswerkzeug diese umgelegt und plastisch verformt. Ein Einfluss auf die Qualitätsmerkmale ist dennoch nicht auszumachen.



Abbildung 5-44 Aufnahmen der Verdübelung nach der Praxisanwendung des Baggeranbaugeräts

Schlussfolgerung:

Ein Einfluss der Befestigungsform Verdübelung auf die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß ist nicht signifikant nachzuweisen. Somit kann Forschungsfrage 1 – basierend auf den bereits vorgestellten Erkenntnissen der Grundlagenversuche – nun gänzlich beantwortet werden.

5.2.4 Langzeitversuche

In den Versuchsreihen zur Werkzeugauswahl (vgl. Abschnitt 5.2.2) konnten die drei Werkzeugtypen 101, 105 und 112 für den Abtrag von WDVS als geeignet identifiziert sowie deren verschleißoptimale Maschinenparameter ermittelt werden. Um die Forschungsfragen 2 und 3 gänzlich zu beantworten sind abschließende Untersuchungen notwendig. In der Praxis ist bei Abbrucharbeiten ein Bürstenwerkzeug zu bevorzugen, welches den gewünschten Abtrag (Definition siehe Abschnitt 4.1.3) möglichst lange erbringt. Ein Werkzeugwechsel auf der Baustelle ist unerwünscht. Ein Abgleich mit den Daten des deutschen Wohngebäudebestandes in Anhang B liefert für Ein- und Mehrfamilienhäuser über alle Baualterklassen einen gedämmten Außenwand-Flächenanteil (bei Gebäuden mit Dämmung außen) von etwa 45 bis 3300 Quadratmetern. Diese Spannweite ohne Werkzeugwechsel mindestens zu bewältigen wird im Nachgang als Grundvoraussetzung für die Werkzeugtypen festgelegt und soll in Form von Langzeitversuchen getestet werden. Die Ergebnisse der Grundlagenversuche schaffen dabei die Basis der Versuchsdurchführung, denn:

- Bei Anwendungsfall 1 (Teilaufbau) beeinflusst lediglich das Auftreffen des Besatzes auf die Betonoberfläche den Massenverlust maßgeblich (vgl. Abschnitt 5.1.4). Den Systembestandteilen Dämmstoff und Kleber ist keine Bedeutung für die Qualitätsmerkmale nachzuweisen. Demnach lässt sich der Werkzeugverschleiß an einem Teilaufbau nachbilden, indem die Bürstenwerkzeuge auf einer Betonoberfläche bewegt werden.
- Mit zunehmendem Beanspruchungsweg steigen die Verschleißerscheinungen am Bürstenwerkzeug. Diese beeinflussen das Werkzeugverhalten und haben Auswirkungen auf die Effizienz des Abtrags (vgl. Abschnitt 5.1.5). Demnach sind einem Herunterfahren des Besatzes entlang der freien Besatzhöhe Grenzen gesetzt. Neben Einschränkungen des Baggeranbaugeräts gilt es zu ermitteln, wie lange der gewünschte Abtrag erbracht werden kann. Die von einem Bürstenwerkzeug bearbeitete Fläche soll dabei der Bewertung dienen. Dazu werden, gestaffelt nach zuvor anhand von Gebäudebestandsdaten festgelegten Bearbeitungsstrecken, vereinzelt Prüfkörper des WDVS-Aufbaus 107&109 (Teilaufbau) eingelegt und bezüglich des Abtragsergebnisses untersucht. Der Massenverlust wird in Intervallen ebenfalls erfasst.

In den Langzeitversuchen werden die drei Werkzeugtypen mit den zuvor in den Hauptversuchen iterativ ermittelten Maschinenparametern angetrieben (vgl. Tabelle 34). Daraus folgen werkzeugabhängige Stufenwerte der Faktoren Anpressung und Drehzahl. Um dennoch eine Vergleichbarkeit herzustellen wird folgendes Vorgehen gewählt: Die Vorschubgeschwindigkeit wird für alle Werkzeugtypen zweistufig variiert. Bei Versuchen an Teilaufbauten zur Abtragsermittlung beträgt diese konstant drei Meter pro Minute. Werden die Bürsten auf einer Betonoberfläche rotiert, erfolgt keine Vorschubbewegung. Dieses Vorgehen begründet sich durch den Aufbau des Versuchsstands II. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Umfangsgeschwindigkeit gegenüber der Vorschubgeschwindigkeit sehr groß ist (Faktor 200-330), sodass die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück durch eine Änderung der Vorschubgeschwindigkeit nicht wesentlich beeinflusst wird. Die Vorschubgeschwindigkeit erscheint vernachlässigbar klein. Hinzu kommt, dass bei einer gleichläufigen Drehbewegung von einer Vorschubbewegung keine negativen Effekte auf den Massenverlust zu erwarten sind. Diese unterstützt den Zwangsdurchlauf des Einzeldrahts auf der Betonoberfläche. Folglich müsste sich eine Drehbewegung ohne Vorschubgeschwindigkeit stärker auf den Werkzeugverschleiß auswirken. Sollten die untersuchten Werkzeuge demnach den gewünschten Abtrag auch nach längerer Überfahrt der Betonoberfläche erbringen, ist davon auszugehen, dass dies bei einer Vorschubbewegung mindestens ebenso der Fall ist. Ein Werkzeugvergleich ist aufgrund dieser Herangehensweise nur über die Bearbeitungszeit möglich. Die Bearbeitungsstrecke bzw. -fläche lässt sich dann – für eine potentielle Vorschubgeschwindigkeit von 3000 Millimeter pro Minute sowie einer Arbeitsbreite von 780 Millimetern – rechnerisch ermitteln.

Sollte der gewünschte Abtrag nicht mehr erbracht werden können, obwohl es zu keiner Einschränkung der Versuche anhand der freien Besatzhöhe gekommen ist, werden die Faktoren Drehzahl und Anpressung schrittweise erhöht.

Es gilt zu erwähnen, dass eine Verringerung des Werkzeugdurchmessers durch ein Herunterfahren des Besatzes entlang der freien Höhe eine Reduktion der Umfangsgeschwindigkeit bewirkt. Dies wiederum verringert die Werkzeugsteifigkeit. Andererseits erhöht sich die Steifigkeit des Besatzes bei einer Reduktion der freien Höhe. Aufgrund gegenläufiger Effekte wird – wie auch in der Praxis üblich – die Drehzahl nicht angepasst. In Folge dessen lassen sich die Einflüsse der Änderung der Umfangsgeschwindigkeit und der freien Besatzhöhe nicht gesondert untersuchen. Die elastische Aufhängung des Bürstenwerkzeuges in Form eines Seilzugs mit Gewichten ermöglicht eine gleichbleibende Anpressung auch bei auftretenden Verschleißerscheinungen. Kontrolliert werden kann diese anhand der vier im Versuchsstand verbauten Drucksensoren (KD40s, ME-Meßsysteme). Dabei ergibt sich im Vergleich zu vorangegangenen Versuchen die Problematik der Abweichung von Zustellung und Anpressung. Wurden bisher nur kurze Strecken zurückgelegt – der Werkzeugverschleiß ist dabei zu vernachlässigen – so konnte einer Zustellung eine definierte Anpressung zugeschrieben werden (vgl. Abbildung 5-25). Bei einer Kraftanstellung des Werkzeugs zum Werkstück ist mit fortschreitender Versuchsdauer eine Verringerung der daraus resultierenden Zustellung zu erwarten. In der Praxis wiederum bedeutet dies, dass Unebenheiten der Außenfassade schlechter kompensiert werden können. Bürstenwerkzeuge mit längerfristig größeren Zustellwerten sind demnach zu bevorzugen.

Tabelle 35 Faktoren und Stufen Versuchsplan II-VII

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte		
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriiell (nominal)	107&108		
Werkzeugtyp	[-]	kategoriiell (nominal)	101	105	112
Anpressung	[N]	konstant	208 / 394 / 502	325	186
Drehzahl	[1/min]	konstant	1125 / 1500 / 2440	1125	750
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	0 / 3000		
Drehbewegung	[-]	konstant	Gleichlauf		
Bearbeitungsfläche	[m ²]	stetig	45 - 3300		

Dieses Vorgehen ermöglicht es, die Werkzeuge anhand ihrer Abtragsleistung – worunter der Abtrag pro Bearbeitungsfläche zu verstehen ist – zu vergleichen und eine Werkzeugauswahl für die Praxisversuche vorzunehmen. Auf Basis der multikriteriellen Optimierung (vgl. Abschnitt 5.1.7) wird dabei bewusst ein pareto-optimale Lösung angestrebt, bei welcher der gewünschte Abtrag erreicht und der Werkzeugverschleiß minimiert ist. Ebenso wäre ein Ansatz denkbar, bei welchem der Abtrag maximiert wird. Da allerdings aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kein Mehrwert zu erwarten ist, werden die für einen Werkzeugverschleiß signifikanten Parameter Anstellung und Drehzahl des Versuchsplans II-VII weiterhin möglichst niedrig gehalten.

Die Ergebnisse der Langzeitversuche veranschaulicht Abbildung 5-45 für eine gewellte sowie Abbildung 5-46 für zwei gezopfte Besatzanordnungen. Da im Vorhinein die Leistungsfähigkeit der Bürstenwerkzeuge nicht abzuschätzen war, wurde für die Messdatenaufnahme ein gestaffeltes Vorgehen gewählt. Dies bedeutet, die Bearbeitungszeit der Messdatenaufnahme und somit die vom Werkzeug zurückgelegte Strecke bzw. bearbeitete Fläche vervielfältigt sich mit fortschreitender Versuchsdurchführung.

5.2 Analyse der Hauptversuche

Werden nun die Messergebnisse der gewellten Stahldrahtbürste betrachtet (vgl. Abbildung 5-45), so ist zu erkennen, dass

- der relative Massenverlust mit fortschreitender Bearbeitungsfläche annähernd linear ansteigt,
- nach 500 Quadratmeter Bearbeitungsfläche eine Anpassung der Drehzahl auf 2440 Umdrehungen pro Minute notwendig ist, um einen rückstandslosen Abtrag weiterhin zu gewährleisten. Eine Stufenerhöhung von 1125 auf 1500 Umdrehungen pro Minute ist dazu nicht ausreichend.
- Werkzeugtyp 101 auch mit einer Drehzahl von 2440 Umdrehungen pro Minute lediglich bis zu einer Bearbeitungsfläche von 1000 Quadratmetern nachweislich den gewünschten Abtrag erbringt.

Auch eine Erhöhung der Anpressung von 208 Newton auf die Stufenwerte 394 sowie 502 Newton nach 1800 Quadratmeter Bearbeitungsfläche konnte keinen rückstandslosen Abtrag mehr herbeiführen. Somit erfolgt ein Ausschluss des Werkzeugtyp 101 für die weiteren Untersuchungen.

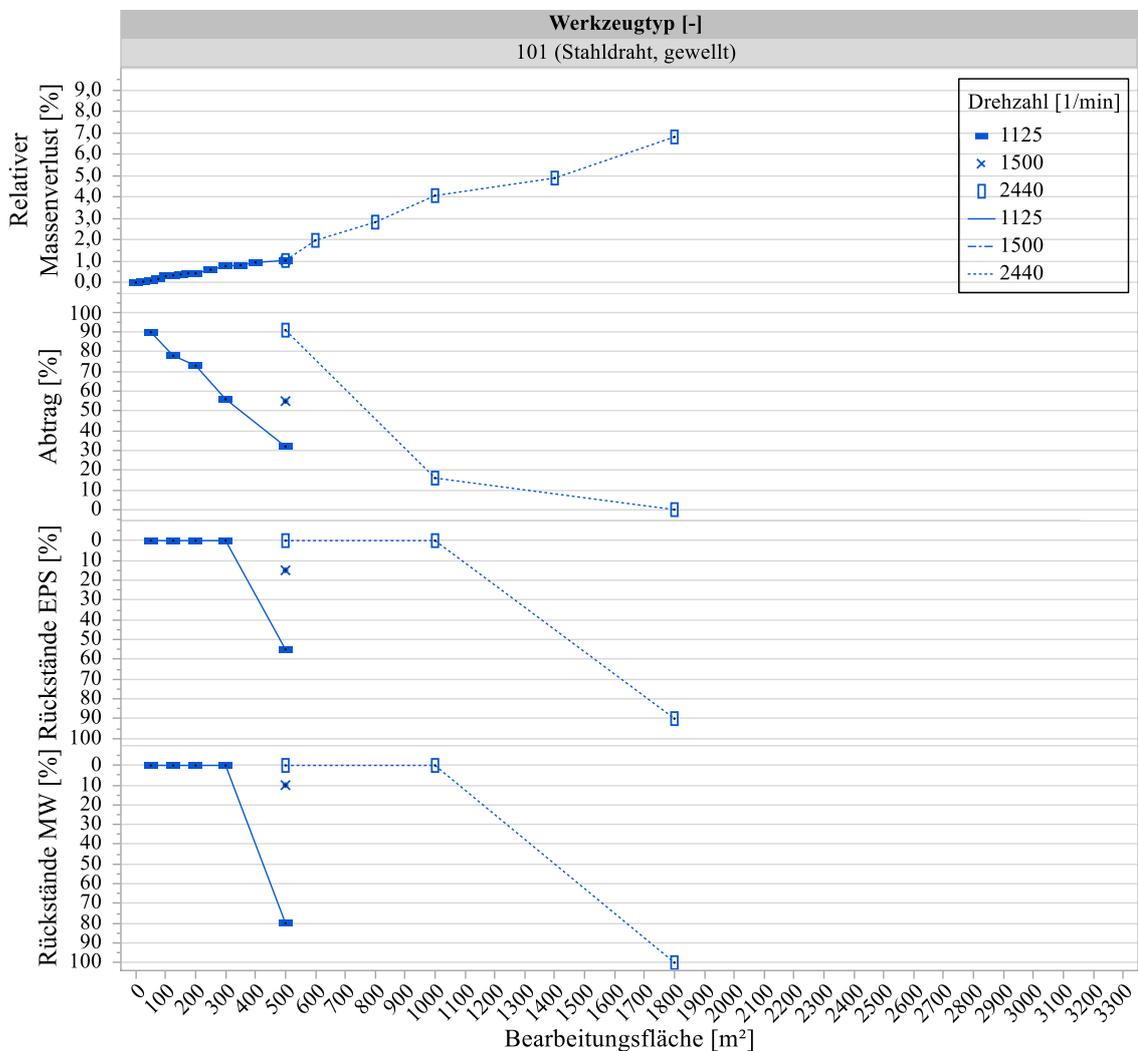


Abbildung 5-45 Ergebnisse Langzeitversuche Bürstentyp 101: Relativer Massenverlust [%], Abtrag [%] und Rückstände EPS und MW [%] nach Drehzahl [1/min] in Abhängigkeit der Bearbeitungsfläche [m²]

Als weitaus geeigneter für einen Einsatz im Baggeranbaugerät stellten sich die gezopften Werkzeuganordnungen heraus. Wie anhand der Abbildung 5-46 ersichtlich wird, können alle Wohngebäudetypen ohne einen Werkzeugwechsel bearbeitet werden. Ein rückstandsloser Abtrag kann unter den zuvor ermittelten optimalen Maschinenparametern ohne Anpassung kontinuierlich erbracht werden. Beide Werkzeugausführungen sind somit für eine Praxisanwendung geeignet.

Werden die Ergebnisse der beiden gewellten Stahldrahtbürsten in den Vergleich gesetzt, so unterscheiden sich diese anhand des relativen Massenverlusts. Werkzeugtyp 105 weist innerhalb des betrachteten Intervalls einen geringeren relativen Massenverlust auf, weshalb von einer längeren Werkzeugstandzeit auszugehen ist. Anzumerken ist allerdings, dass das Gewicht der freien Besatzhöhe des Werkzeugtyps 105 das des Werkzeugtyps 112 um den Faktor 1,64 überschreitet. Ebenso übersteigen die Anschaffungskosten – für eine Stückzahl von eins – des Werkzeugtyps 105 die des Werkzeugtyps 112 um etwa 20 Prozent.

Innerhalb der untersuchten Bearbeitungsstrecke ist des Weiteren keine Verringerung der resultierenden Zustellung bei gleichbleibender Kraftanpressung zu verzeichnen.

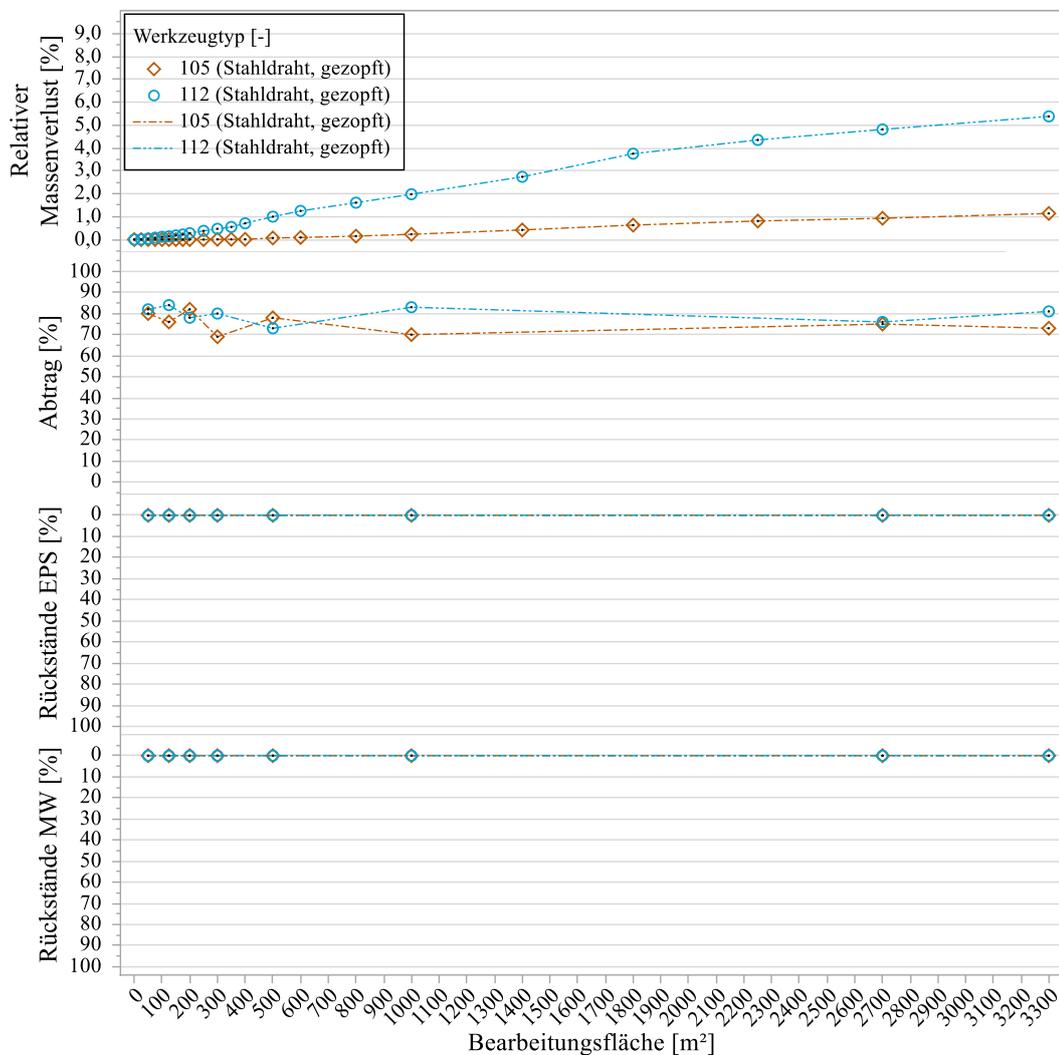


Abbildung 5-46 Ergebnisse Langzeitversuche Bürstentyp 105 und 12: Relativer Massenverlust [%], Abtrag [%] und Rückstände EPS und MW [%] nach Drehzahl [1/min] in Abhängigkeit der Bearbeitungsfläche [m²]

Ein Querlegen des Besatzes infolge plastischer Verformung kann begründen, weshalb von Werkzeugtyp 101 der gewünschte Abtrag ab einer Bearbeitungsfläche von 1000 Quadratmetern nicht mehr erbracht wird. Dies hat ungünstige Eingriffsbedingung für den Einzeldraht als Schneide zur Folge (vgl. Abschnitt 3.3.2). Neben dem Abarbeiten des Einzeldrahtes entlang der freien Besatzhöhe stellt die plastische Verformung eine weitere Möglichkeit des Werkzeugverschleißes dar. Abbildung 5-47 veranschaulicht dies bildlich. Gezeigt werden Aufnahmen der drei Werkzeugtypen im Neuzustand sowie nach Abschluss der Langzeitversuche. Ersichtlich ist, dass nur bei der gewellten Stahldrahtbürste eine plastische Verformung auftritt. Werkzeugtyp 101 wird demnach nicht weiter untersucht.

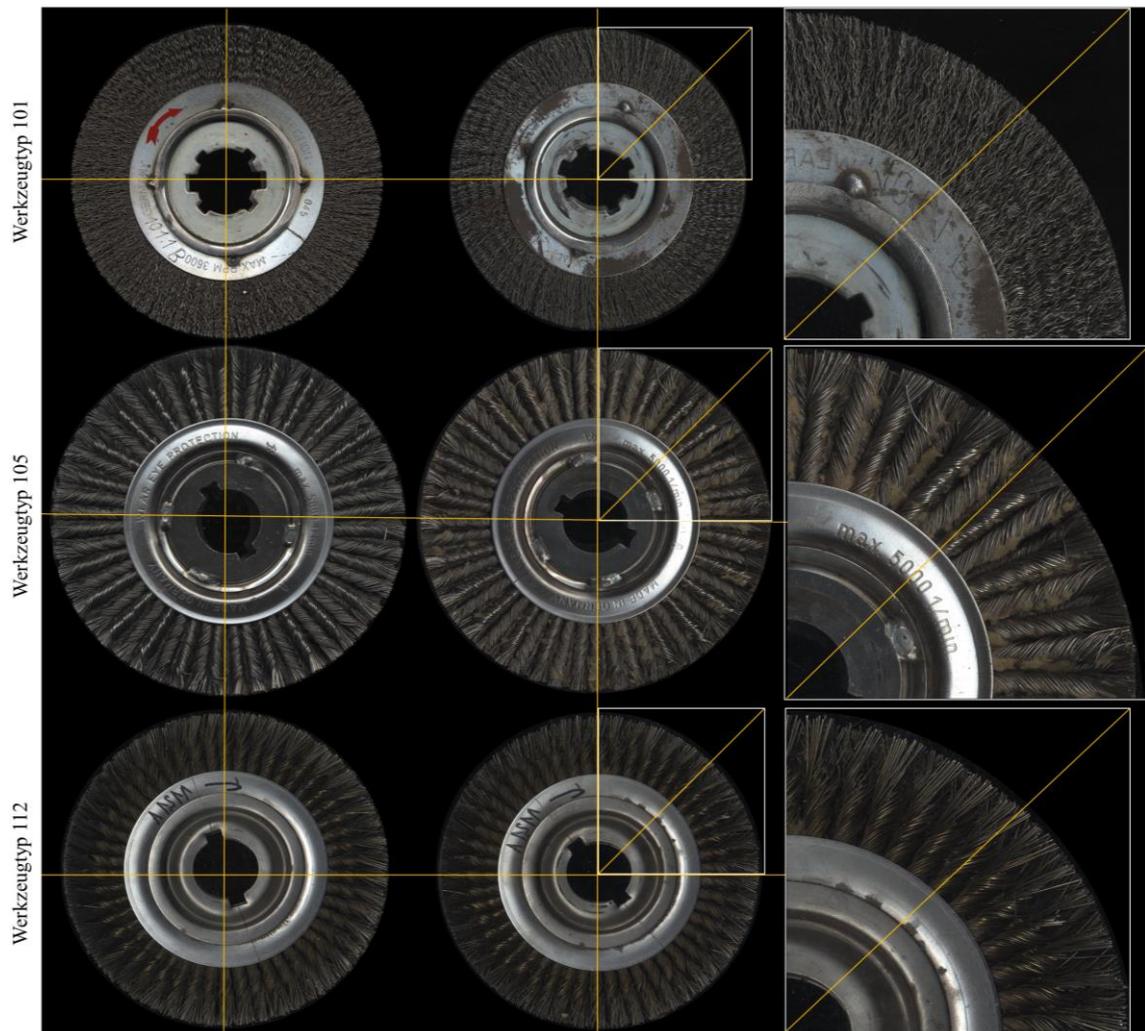


Abbildung 5-47 Exemplarische Aufnahmen Werkzeugtyp 101, 105 und 112 vor (Bild links) und nach (Bilder rechts) der Versuchsdurchführung

Neben der grafischen Darstellung kann der Zusammenhang der Qualitätsmerkmale Abtrag und Massenverlust von der Bearbeitungsfläche durch eine einfaktorielle Regressionsanalyse beschrieben werden. Die Grundlagen dazu sind Abschnitt 5.1.4 zu entnehmen. Betrachtet werden die Werkzeugtypen 105 und 112 mit gezopfter Besatzanordnung bei der Bearbeitung eines Teilaufbaus aus WDVS unter den zuvor in Abschnitt 5.2.2 ermittelten verschleißoptimalen Maschinenparametern. Ersichtlich ist in Abbildung 5-46, dass sich die Bearbeitungsfläche nicht maßgeblich auf den Abtrag auswirkt. Eine statistische Analyse der Effekte bestätigt dies.

Da dem Faktor Bearbeitungsfläche innerhalb des betrachteten Wertebereichs von 45 bis 3300 Quadratmetern kein signifikanter Einfluss auf den Abtrag nachzuweisen ist, entspricht die Ausgleichsfunktion bezogen auf das untersuchte Werkzeug dem jeweiligen globalen Mittelwert

$$\text{für Werkzeugtyp 105 mit} \quad \frac{y}{\%} = 75,38 \quad (5.18)$$

$$\text{für Werkzeugtyp 112 mit} \quad \frac{y}{\%} = 79,63 \quad (5.19)$$

Dies bedeutet, dass mit dem Werkzeugtyp 105 durchschnittlich 75,38 Prozent Abtrag erreicht wird, mit Werkzeugtyp 112 hingegen 79,63 Prozent, unabhängig der Bearbeitungsfläche.

Für eine Beschreibung der statistischen Abhängigkeit der Variable Massenverlust von der Variable Bearbeitungsfläche hingegen sind mehrere Funktionsansätze möglich. Aus Abbildung 5-46 auszumachen ist, dass der Massenverlust mit fortschreitender Bearbeitungsfläche ansteigt und ebenso immer größer null ist. Wird das einfache Bestimmtheitsmaß R^2 als Kenngröße für die Güte der Regression herangezogen, so ist eine lineare Modellierung plausibel. Für beide Werkzeugtypen ist $R^2 \geq 0,983$. Demnach können mehr als 98 Prozent der Streuung in den Messdaten durch den Funktionsansatz erklärt werden. Für den Anwendungsfall Teilaufbau ergeben sich die Ausgleichsfunktionen des Qualitätsmerkmals Massenverlust über die Bearbeitungsfläche

$$\text{für Werkzeugtyp 105 zu} \quad \frac{y}{\%} = -0,0708 + 0,000366 * \left(\frac{x}{m^2}\right) \quad (5.20)$$

$$\text{für Werkzeugtyp 112 zu} \quad \frac{y}{\%} = 0,0098 + 0,00180 * \left(\frac{x}{m^2}\right) \quad (5.21)$$

mit einem Wertebereich der Bearbeitungsfläche des Werkzeugtyps 105 von größer gleich 194 Quadratmetern.

Die geplante Praxisanwendung der Bürstenwerkzeuge mit dem in Abschnitt 4.1.2.1 beschriebenen Baggeranbaugerät ermöglicht ein Herunterfahren des Besatzes entlang der freien Höhe bis zu einem Werkzeugdurchmesser von 215 Millimeter. Für Werkzeugtyp 105 entspricht dies einem relativen Massenverlust von knapp 93 Prozent, für Werkzeugtyp 112 hingegen etwa 70 Prozent (vgl. Abschnitt 4.1.1.2). Wird bezogen darauf eine Prognose der Werkzeugstandzeit anhand der ermittelten Ausgleichsfunktionen abgegeben, so lässt sich für Werkzeugtyp 105 eine Bearbeitungsfläche von knapp 254.292 Quadratmetern errechnen, für Werkzeugtyp 112 hingegen 38.883 Quadratmeter.

Die Ergebnisse der Grundlagenversuche ermöglichen eine weitere Bewertung. Demnach kommt es infolge eines vorhandenen Werkzeugverschleißes zu geringerem Massenverlust (vgl. Abschnitt 5.1.5). Die mögliche Werkzeugstandzeit könnte folglich noch höher liegen als die errechnete Prognose. Dennoch ist anzumerken, dass weitere Verschleißerscheinungen der Werkzeuge wie plastische Verformungen und/oder Besatzausbruch nicht ausgeschlossen werden können. Die tatsächliche Werkzeugstandzeit gilt es demnach in der Praxis zu ermitteln.

Schlussfolgerung:

Für den Abtrag von WDVS sind die Werkzeugtypen 105 und 112 zu empfehlen mit den in Abschnitt 5.2.2 ermittelten verschleißoptimalen Maschinenparametern. Die Werkzeugausführungen entsprechen gezopften Stahldrahtbürsten mit einem Besatzdurchmesser von 0,8 Millimetern in durchgezopfter bzw. offener Zopfform.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Bereich Abtrag von WDVS sind innerhalb des letzten Jahrzehnts u.a. folgende Trends zu beobachten: Verschärfung der gesetzlichen Rahmenbedingungen, Anstieg der Entsorgungskosten, Reduktion der Emissionen aufgrund neuer gesetzlicher Vorgaben. Durch diese Trends werden sich auch die geforderten Trennschärfen erhöhen, was langfristig wiederum Auswirkungen auf die für den Abtrag von WDVS eingesetzten Technologien haben wird. Verfahren, welche zu einem späteren Zeitpunkt des Abbruchablaufs greifen und aktuell eine Weiterentwicklung erfahren, zeigen beispielhaft das Forschungsprojekte „RESSOURCE.WDVS“ der FH Münster [43] sowie die Entwicklung des CreaSolv®-Verfahren zur „selektiven Extraktion“ des Fraunhofer-Instituts IVV mit der Crea Cycle GmbH [133]. Methoden für einen maschinellen selektiven Abbruch von WDVS auf der Baustelle hingegen fehlen. An dieser Stelle setzt die vorliegende Forschungsarbeit an, indem Bürsten – die in einem Baggeranbaugerät Einsatz finden – für den Abtrag von WDVS erstmals wissenschaftlich untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sowie der weitere Forschungsbedarf des Themengebietes werden im Nachgang zusammengefasst.

6.1 Zusammenfassung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist es, eine Werkzeugempfehlung inkl. Maschinenparameter für die kontinuierliche Bearbeitung eines Standard WDVS-Aufbaus auszusprechen. Daraus lassen sich drei Forschungsfragen ableiten, die durch die wissenschaftlichen Untersuchungen dieser Arbeit beantwortet werden können:

1. Welchen Einfluss haben der Aufbau des WDVS sowie die einzelnen Systembestandteile auf das Abtragsergebnis sowie den Werkzeugverschleiß?
2. Welches Bürstenwerkzeug ist für den rückstandslosen und kontinuierlichen Abtrag eines Standard-WDVS am besten geeignet, unter dem Gesichtspunkt der Verschleißoptimierung?
3. Wie sind werkzeugabhängig die Maschinenparameter (Anstellung, Vorschubgeschwindigkeit, Drehbewegung und Drehzahl) zu wählen, um den Abtrag zu maximieren sowie den Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust zu minimieren?

Da Bürstenwerkzeuge bisher nicht zum Abtrag von WDVS eingesetzt werden, sind anfänglich Grundlagenuntersuchungen notwendig. Infolge derer kann die Eignung von Bürsten zum Abtrag von WDVS nachgewiesen sowie der Einfluss unterschiedlicher Parametereinstellungen analysiert werden. In den Hauptversuchen wird dann eine Werkzeugauswahl vorgenommen sowie die verschleißoptimalen Maschinenparameter ermittelt. Insgesamt werden in Grund- und Hauptversuchen 16 Ausführungen von Rundbürsten an 31 Werkstückaufbauten unter Variation der Maschinenparameter Anstellung, Vorschubgeschwindigkeit, Drehbewegung und Drehzahl experimentell untersucht. Infolge der Vielfalt an Kombinationsmöglichkeiten einzelner Bestandteile eines WDVS liegen die meistverbauten Systeme im Schwerpunkt der Betrachtung. Unter Einhaltung gängiger Methoden der statistischen Versuchsplanung ergeben sich daraus knapp 1500 Einzelversuche, die durchgeführt und ausgewertet werden. Leitfadengestützte Experteninterviews bilden neben Literaturrecherchen eine wichtige Datenbasis. Diese ermöglichen primär die Werkzeugauswahl sowie die Eingrenzung des Faktorraums für die Optimierung der Maschinenparameter. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt durch die Qualitätsmerkmale Abtrag (vgl. Abschnitt 4.1.3.1) und Werkzeugverschleiß in Form von Massenverlust (vgl. Abschnitt 4.1.3.2), wobei Ersteres möglichst maximiert und Letzteres minimiert werden soll.

Auf Basis der Grundlagenversuche (vgl. Abschnitt 5.1) sowie der Hauptversuche (vgl. Abschnitt 5.2) kann nun eine Antwort auf die Forschungsfragen gegeben werden. Dazu wird auf die Ergebnisse mehrerer Versuchspläne zurückgegriffen.

Forschungsfrage 1:

- Auf Basis statistischer Tests ist einer Faktorstufenänderung des WDVS-Aufbaus kein Einfluss auf die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß zuzuschreiben, sofern zwischen einem Komplett- und einem Teilaufbau differenziert wird. Untersucht werden Komplettaufbauten (vgl. Abschnitt 5.1.1 und Abschnitt 5.1.2) und Teilaufbauten (vgl. Abschnitt 5.1.3) an WDVS, bestehend aus unterschiedlichen Systembestandteilen. Mittels einer Regressionsanalyse können die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß bei der Bearbeitung von Komplett- und Teilaufbauten an WDVS mit Bürstenwerkzeugen beschrieben werden. Die entsprechenden Funktionsansätze sind Abschnitt 5.1.4 zu entnehmen.
- Werden hingegen die Auswirkungen einzelner Systembestandteile des WDVS auf die Messergebnisse analysiert, so bestimmen vor allem die Deckschicht aus Putz inkl. Armierung den Abtrag. Der Werkzeugverschleiß wird zusätzlich durch die Betonoberfläche – auf welcher das WDVS aufgebracht ist – hervorgerufen (vgl. Abschnitt 5.1.4). Anhand eines Vergleichs der Messergebnisse unterschiedlicher Versuchspläne bzw. Prüfkörperaufbauten kann dies ermittelt und mathematisch beschrieben werden. Weitere Untersuchungen zum Einfluss einzelner Systembestandteile des WDVS ergeben zudem, dass der Dämmstoff EPS sowie der Systembestandteil Kleber keinen nachweislichen Einfluss auf den Werkzeugverschleiß haben. Vielmehr bestehen keine signifikanten Unterschiede der Messergebnisse sollten die Bürstenwerkzeuge über eine Betonoberfläche anstatt durch einen Teilaufbau an WDVS bewegt werden. Anhand dessen lässt sich der Werkzeugverschleiß an einem Teilaufbau durch eine Betonoberfläche nachbilden. Die Festigkeitsklasse des Betons wird dabei nicht variiert.
- Neben der Werkzeugausführung wird die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen von dem Anwendungsfeld bestimmt. Wird eine Komplettaufbau mit einem Teilaufbau in den Vergleich gesetzt, so weisen die Messergebnisse der Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß an einem Teilaufbau geringere Streuungen auf (vgl. Abschnitt 5.1.6).
- In den Hauptversuchen wird eine zusätzliche Verdübelung als Bestandteil der mechanischen Befestigungsmittel untersucht (vgl. Abschnitt 5.2.3). Eine Auswirkung auf die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß kann nicht nachgewiesen werden.

Forschungsfrage 2:

- Der Faktor Werkzeugtyp wird innerhalb der Grundlagenversuche in zwei Stufen (gewellte und gezopfte Stahldrahtbürste) variiert. Diese Werkzeugausführungen decken nach Angaben des Bürstenherstellers Lessmann GmbH mit etwa 65 Prozent den Großteil der von ihnen gefertigten Anordnungen ab [113]. Anhand der Messergebnisse unterschiedlicher Versuchspläne ist dem Faktor Werkzeugtyp ein signifikanter Einfluss auf die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß zuzuweisen. Erfolgt eine Analyse der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse nach Werkzeugtyp (vgl. Abschnitt 5.1.5 und Abschnitt 5.1.6), so ist eine gezopfte Stahldrahtbürste einer gewellten vorzuziehen. Diese weist einerseits geringere Ergebnisspannweiten auf und ist andererseits bei einem vorherrschenden Werkzeugverschleiß als robuster einzustufen. Die Unterschiede der Werkzeugtypen zeigen sich vor allem bei schnellen Vorschubgeschwindigkeiten sowie dem Anwendungsfall Komplettaufbau.

- Werden die Ergebnisse der Hauptversuche zusammengefasst, so ist eine gezopfte Stahldrahtbürste für den Abtrag von WDVS zu empfehlen (vgl. Abschnitt 5.2.2). Von den insgesamt 13 untersuchten Werkzeugen konnten die Werkzeugtypen 105 und 112 (vgl. Abschnitt 4.1.1.2) den gewünschten Abtrag für alle Gebäudetypen erbringen (vgl. Abschnitt 5.2.4). Diese weisen ähnliche Besatzdichten sowie einen Besatzdurchmesser von 0,8 Millimetern in durchgezopfter bzw. offener Zopfform auf. Verglichen mit den weiteren untersuchten Werkzeugtypen ist den Werkzeugtypen 105 und 112 eine hohe Steifigkeit zuzuschreiben (vgl. Abbildung 5-25). Diese sind unter den folgenden verschleißoptimalen Maschineneinstellungen für den Abtrag von WDVS zu empfehlen: Für Werkzeugtyp 112 eine Drehzahl von 750 Umdrehungen pro Minute sowie eine Anpressung von 186 Newton, Werkzeugtyp 105 hingegen erbringt bereits bei einer Anpressung von 325 Newton sowie einer Drehzahl von 1125 Umdrehungen pro Minute den gewünschten Abtrag. Die angegebenen Werte beziehen sich auf eine Vorschubgeschwindigkeit von drei Metern pro Minute sowie einer Werkzeugarbeitsbreite von 160 Millimeter. Ein Vergleich der Werkzeugtypen wird mithilfe einer linearen Regression ermöglicht. Die Variablen Abtrag und Massenverlust werden dabei in Abhängigkeit der Bearbeitungsfläche erklärt. Für den Anwendungsfall Teilaufbau ergeben sich die linearen Funktionsansätze des Qualitätsmerkmals Massenverlust je nach Werkzeug über die Bearbeitungsfläche

$$\text{für Werkzeugtyp 105 zu} \quad \frac{y}{\%} = -0,0708 + 0,000366 * \left(\frac{x}{m^2}\right) \quad (5.20)$$

$$\text{für Werkzeugtyp 112 zu} \quad \frac{y}{\%} = 0,0098 + 0,00180 * \left(\frac{x}{m^2}\right) \quad (5.21)$$

Wird für die geplante Praxisanwendung der Bürsten in einem Baggeranbaugerät (vgl. Abschnitt 4.1.2.1) eine Prognose der Standzeit anhand der ermittelten Ausgleichsfunktionen abgegeben, so lässt sich für Werkzeugtyp 105 eine Bearbeitungsfläche von knapp 254.292 Quadratmetern errechnen, für Werkzeugtyp 112 hingegen 38.883 Quadratmeter. Eine detaillierte Beschreibung liefert Abschnitt 5.2.4.

Forschungsfrage 3:

Die Auswirkungen der Einstellmöglichkeiten Anstellung, Vorschubgeschwindigkeit, Drehbewegung und Drehzahl auf die Qualitätsmerkmale werden nachfolgend beschrieben. Die Forschungsfrage 3 lässt sich dennoch nur werkzeug- und anwendungsspezifisch beantworten.

- Der Faktor Zustellung bestimmt maßgeblich die auf das Werkstück wirkende Kraft (vgl. Abschnitt 5.2.1). Der Zustellung ist dabei ein Einfluss sowohl auf den Abtrag als auch auf den Massenverlust zuzuschreiben (vgl. Abschnitt 5.1.2). Demnach bestehen werkzeugabhängige Zustellwerte, bei welchen die Werkzeugschneide optimal zum Eingriff kommt und das Abtragsergebnis folglich ein Maximum erreicht. Eine weitere Erhöhung der Zustellung ist über diesen Punkt hinaus nicht zielführend, denn der Massenverlust steigt mit höheren Stufeneinstellungen an, wohingegen das Abtragsergebnis sich durchschnittlich verschlechtert.
- Der Faktor Vorschubgeschwindigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf den Massenverlust (vgl. Abschnitt 5.1.1 bis 5.1.4). Bei konstanter Drehzahl führen höhere Stufeneinstellungen einen verschleißärmeren Werkzeugeinsatz herbei. Neben der Vorschubgeschwindigkeit wird die Anzahl der Auftreffer des Einzeldrahts pro Versuch auf dem Werkstück ebenfalls von der Drehzahl bestimmt. Höhere Drehzahlen sind bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit demnach verschleißfördernd. Wird für eine Analyse des Qualitätsmerkmals Abtrag zwischen Komplett- und Teilaufbauten differenziert, so beeinflusst die Vorschubgeschwindigkeit nur an einem Komplettaufbau das Ergebnis. Werkzeugabhängig ist eine Steigerung dabei mit schlechteren

Abtragsergebnissen verbunden. Der funktionale Zusammenhang der Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß in Abhängigkeit der Variable Vorschubgeschwindigkeit wird in Abschnitt 5.1.4 beschrieben. Eine Steigerung der Drehzahl hingegen führt innerhalb des betrachteten Faktorraums werkzeugabhängig zu überwiegend besseren Abtragsergebnissen (vgl. Abschnitt 5.2.2).

- Anhand einer multikriteriellen Optimierung (vgl. Abschnitt 5.1.7) der Zielgrößen kann aufgezeigt werden, dass die Qualitätsmerkmale Abtrag und Werkzeugverschleiß nicht gleichzeitig ein Optimum erreichen. Steht eine werkzeugabhängige Verschleißoptimierung im Vordergrund, so sind die Faktoren Zustellung und Vorschubgeschwindigkeit möglichst zu reduzieren bzw. zu erhöhen. Letzteres bestimmt ebenso wie die Drehzahl die Anzahl der Auftreffer des Einzeldrahtes auf dem Werkstück. Die genannten Faktoren werden demnach werkzeugabhängig lediglich auf ein für den gewünschten Abtrag (Definition siehe Abschnitt 4.1.3.1) notwendiges Maß erhöht.
- Für den Faktor Drehbewegung ist lediglich ein Einfluss auf den Anwendungsfall 2 (Komplettaufbau) festzustellen. Werden die Drehbewegungen Gleichlauf und Gegenlauf gegenübergestellt, so besteht kein signifikanter Einfluss der Drehbewegung auf die Qualitätsmerkmale an einem Teilaufbau aus WDVS oder weiterer Aufbauten ohne Deckschicht. Ein Abtrag von WDVS an einem Komplettaufbau allerdings ist bei gegenläufiger Drehbewegung nicht möglich. Aufgrund der Werkzeugaufrichtung entgegen der Vorschubrichtung wird im Gegenlaufbetrieb die Deckschicht des Komplettaufbaus unterfahren anstatt geschnitten. Daraufhin verstopft die Einhausung, das Werkzeug kann keine Drehbewegung mehr ausführen und die Versuche müssen abgebrochen werden. Eine detaillierte Beschreibung liefert Abschnitt 5.1.3.

6.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die vorliegende Arbeit leistet aufgrund der erstmaligen Untersuchung des Abtrags von WDVS unter Verwendung von Bürsten bei Variation einzelner Einflussparameter einen entscheidenden Beitrag für das Grundverständnis. Des Weiteren wird aufgezeigt, welche Werkzeugausführungen unter optimierten Maschinenparameter auch längerfristig kontinuierliche Abtragsergebnisse an einem Standard WDVS-Aufbau erbringen, bei minimalem Werkzeugverschleiß. Allerdings sind weitere Untersuchungen für eine ganzheitliche Betrachtung der Thematik notwendig. So ist in Zukunft neben weiteren Praxisversuchen eine Untersuchung unterschiedlicher Untergründe anzustreben. Denn je nach Festigkeit und Härte der Außenfassade ist mit ungleichem Werkzeugverschleiß zu rechnen [52, S. 63–65]. Auch wenn innerhalb der experimentellen Untersuchungen kein signifikanter Einfluss des Werkstücks auf die Qualitätsmerkmale ermittelt werden konnte, so beziehen sich diese Untersuchungen nur auf das WDVS. Eine Untersuchung des Einflusses der Betonfestigkeit oder anderweitiger Untergründe wie beispielsweise Mauerwerk waren nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Eine schichtweise selektive Trennung der einzelnen Systembestandteile des WDVS bereits auf der Baustelle bietet weiteres Wertschöpfungspotential. Dies kann zu Einsparungen bei den Entsorgungskosten führen. Innerhalb der experimentellen Untersuchung von Bürstenwerkzeugen konnte der Einfluss der einzelnen Systembestandteile des WDVS auf die Qualitätsmerkmale ermittelt werden, auch wenn eine schichtweise Entfernung dieser nicht den Schwerpunkt der Untersuchungen darstellte. Die Bestandteile Unterputz, Armierung und Oberputz wurden durch einen Abgleich einzelner Versuchspläne gesondert betrachtet, ebenso die Systembestandteile Dämmstoff und Kleber. Mithilfe einer entsprechenden Trägersystems wäre in der Praxis ein schichtweiser Abtrag denkbar, wobei anfallende Späne separat gesammelt werden müssten. Ein solcher Ansatz sowie die Optimierung der Trennschärfe der einzelnen Systembestandteile bieten weiteren Forschungsbedarf.

Von einer Realisierung deutlich größerer Vorschubgeschwindigkeiten als drei bis vier Meter pro Minute ist unter Verwendung des Baggeranbaugeräts zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit nicht auszugehen (vgl. Abschnitt 5.2.4). Dennoch beeinflusst der Faktor maßgeblich die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens in der Praxis. Anpassungen des Prototypens sind denkbar, weshalb weitere Versuche höherer Stufeneinstellungen stattgefunden haben. Im Zuge dessen konnte ebenfalls ein rückstandsloser Abtrag der Dämmstoffe EPS und MW an einem Teilaufbau bis zu einer Geschwindigkeit von sieben Metern pro Minute nachgewiesen werden. Zu weiteren Stufenerhöhungen des Faktors Vorschubgeschwindigkeiten ist es daraufhin nicht gekommen. Der in den Hauptversuchen als brauchbar identifizierte Werkzeugtyp 112 – mit einer Arbeitsbreite von 160 Millimetern – wurde dabei mit den ermittelten optimalen Maschinenparametern – einer Drehzahl von 750 Umdrehungen pro Minute sowie eine Anpressung von 186 N – angetrieben. Wäre der gewünschte Abtrag bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten nicht erreicht worden, so wäre in Anlehnung an Wolf [49, S. 55] eine Anordnung weiterer Bürstenwerkzeuge hintereinander denkbar gewesen.

Die dargestellten Untersuchungsergebnisse bieten neben der Weiter- oder Neuentwicklung eines Trägersystems zusätzlichen Forschungsbedarf auf dem Themengebiet des Abtrags von WDVS. So ist unter anderem der Frage nachzugehen, welcher gedämmte Außenwand-Flächenanteil unter diesen Maschinenparametern ohne Werkzeugwechsel bewerkstelligt werden kann. Innerhalb der Langzeitversuche (vgl. Abschnitt 5.2.4) konnte nachgewiesen werden, dass alle potentiell für einen Abtrag von WDVS in Frage kommenden Ein- und Mehrfamilienhäuser ohne einen Werkzeugwechsel auf der Baustelle bearbeitet werden können. Der gewünschte Abtrag eines gedämmter Außenwand-Flächenanteil von 3300 Quadratmetern konnte ohne größere Verschleißerscheinungen von den gezopfsten Stahldrahtbürsten der Nummer 105 und 112 nachgewiesen werden. Die Frage nach der Standzeit unterschiedlicher Werkzeugausführungen ist dennoch bisher ungeklärt.

Ein häufiger Grund für den notwendigen Rückbau von WDVS ist die Tatsache, dass die Systeme aktuellen Erfordernissen nicht mehr entsprechen [1]. Die Nutzungsdauer ist erfüllt, auch wenn die Lebensdauer nicht erreicht ist. Das Fraunhofer IBP empfiehlt in einem Bericht des Titels „Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS“, durchgeführt im Auftrag des Fachverband Wärmedämm-Verbundsystem e.V., die Aufdopplung bestehender Systeme. Im Vergleich zu einem Abtrag und anschließender Neudämmung des Gebäudes könnten somit Abfälle vermieden und die Nutzungsdauer des Wärmedämmverbundsystems von 40 bis zu 120 Jahren ausgedehnt werden [2]. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit ist es nicht möglich abzuschätzen, inwiefern sich die Aufdopplung bestehender WDVS, als Lösung der Verschiebung des Rückbaus in die Zukunft, auf dem Markt durchsetzen wird. Nach Angaben des Fraunhofer IBP [2] ist die Aufdopplung eine häufig angewandte Sanierungsmethode von WDVS. Anhand der in den experimentellen Untersuchungen gewonnenen Erfahrungen ist derzeit nicht davon auszugehen, dass ein Abtrag von aufgedoppelten Systemen nicht ebenfalls möglich ist. Bezogen auf den beabsichtigten Anwendungsfall der Bürstenwerkzeuge in einem Baggeranbaugerät ist vielmehr zu erwarten, dass das vorgelagerte Fräswerkzeug die Aufdopplung entfernt, das Bürstenwerkzeug demnach lediglich das Ursprungssystem teilweise oder im Ganzen abzutragen hat. Dennoch handelt es sich dabei um eine Vermutung, weitere Untersuchungen sind anzustreben.

Literaturverzeichnis

- [1] DBZ DEUTSCHE BAUZEITSCHRIFT. *Leitfaden WDVS* [online]. *Gestaltung-Brandschutz-Planungshilfe*, 2016 [Zugriff am: 9. April 2020]. Verfügbar unter: www.dbz.de/LeitfadenWDVS
- [2] ALBRECHT, W. und SCHWITALLA, C. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. *Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS. Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDVS nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung*. Valley, 2014. IBP-Bericht BBHB 019/2014/281. Report, Electronic Publication [Zugriff am: 9. April 2020]. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-377363.html>
- [3] FRANßEN, G. Heinemann & Partner Rechtsanwälte Partnerschaftsgesellschaft mbB. *Entsorgung von HBCD-haltigen Abfällen nach der POP-Abfall-Überwachungs-Verordnung*. Essen, 26. April 2018 [Zugriff am: 19. Juli 2019]. Verfügbar unter: https://www.heinemann-und-partner.de/fileadmin/user_upload/heinemann-und-partner.de/user_upload/18-03-16_Merkblatt_H_P_zur_POP-Abfall-UEberwV__HBCD_.pdf
- [4] SCHRÖDER, M. und POCHA, A. *Abbrucharbeiten. Grundlagen, Planung, Durchführung*. 3., akt. und erw. Aufl. Köln: R. Müller, 2015. Bauen im Bestand. ISBN 978-3-481-03096-4.
- [5] LEIBNIZ-INSTITUT FÜR LÄNDERKUNDE. *Bundesrepublik Deutschland: Nationalatlas. Dörfer und Städte*. Berlin: Springer Spektrum, 2012. ISBN 3-8274-2888-2.
- [6] DIETRICH, J. *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung*. 12. Aufl. Wiesbaden: Springer Science and Business Media; Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-14053-3 [Zugriff am: 9. April 2020].
- [7] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 55699 Verarbeitung von Wärmedämm-Verbundsystemen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Februar 2005.
- [8] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 55699 Anwendung und Verarbeitung von außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) mit Dämmstoffen aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) oder Mineralwolle (MW)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. August 2017.
- [9] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN TRANSPORTBETONINDUSTRIE E.V. *Festigkeitsklassen Beton*. Persönliche Mitteilung: E-Mail, 2019.
- [10] CISCHINSKY, H. und DIEFENBACH, N. Institut Wohnen und Umwelt. *Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand*. Darmstadt, 2018 [Zugriff am: 24. April 2020]. Verfügbar unter: www.iwu.de
- [11] NEUMANN, H.-H. *Praxis-Handbuch Wärmedämm-Verbundsysteme. Baustoffkunde, Verarbeitung, Schäden, Sanierung*. Köln: Rudolf Müller, 2008. ISBN 978-3-481-02154-2.
- [12] RIEDEL, W. *Wärmedämm-Verbundsysteme. Von der Thermohaut bis zur transparenten Wärmedämmung*. 2., überarb. Aufl. Waldshut-Tiengen: Baulino Verl.; Fraunhofer IRB-Verl., 2010. ISBN 978-3-938-53712-1.

- [13] SCHILD, K., WEYERS, M. und WILLEMS, W.M. *Handbuch Fassadendämmsysteme. Grundlagen - Produkte - Details*. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2010. ISBN 978-3-8167-8102-8.
- [14] SPRENGARD, C., TREML, S. und HOLM, A.H. Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München. *Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe - Produkte - Anwendungen - Innovationen*. FIW Bericht FO-12/12. Gräfelfing, 2013 [Zugriff am: 24. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.fiw-muenchen.de/media/pdf/metastudie_waermedaemmstoffe.pdf
- [15] DIEFENBACH, N. und CLAUSNITZER, K.-D. Institut Wohnen und Umwelt; Bremer Energie-Institut. *Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt; Bremer Energie-Institut, 2010. ISBN 978-3-941140-16-5 [Zugriff am: 24. April 2020]. Verfügbar unter: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Endbericht_Datenbasis.pdf
- [16] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN EN 13499 Wärmedämmstoffe für Gebäude Außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) aus expandiertem Polystyrol*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Dezember 2003.
- [17] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN EN 13500 Wärmedämmstoffe für Gebäude Außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) aus Mineralwolle*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Dezember 2003.
- [18] WURBS, J., BEER, I., BOLLAND, T., DEBIAK, M., DETTLING, F., KOCH-JUGL, J., TIETJEN, L., WALTHER, M., WUTTKE, J., STOLZENBERG, H.-C., RAUERT, C. und APEL, P. Umweltbundesamt, Fachgebiet IV 1.1 - Internationales Chemikalienmanagement, Hg. *Hebabromcyclododecan (HBBCD) Antworten auf häufig gestellte Fragen* [online]. 2017 [Zugriff am: 19. Juli 2019]. Verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/
- [19] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 4102-1 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Mai 1998.
- [20] VERBAND FÜR DÄMMSYSTEME, PUTZ UND MÖRTEL E. V. *Fragen und Antworten zur Brandsicherheit von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS)* [online], 2017. 20 Juni 2017 [Zugriff am: 19. Juli 2019]. Verfügbar unter: www.vdpm.info
- [21] BBSR-Berichte KOMPAKT, Hg. *Künstliche Mineralfaserdämmstoffe* [online]. 2011 [Zugriff am: 29. Juli 2019]. Verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BerichteKompakt/2011/DL_1_2011.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [22] DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH. *dena-Gebäudereport Kompakt 2018* [online]. *Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. 2018 [Zugriff am: 9. April 2020]. Verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/broschuere-dena-gebuedereport-kompakt-2018/>
- [23] STATISTISCHES BUNDESAMT. *Zensus 2011. Gebäude und Wohnungen Bundesrepublik Deutschland am 09. Mai 2011*. Wiesbaden, 2013 [Zugriff am: 24. April 2020]. Verfügbar unter: www.destatis.de

- [24] LOGA, T., STEIN, B., DIEFENBACH, N. und BORN, R. Institut Wohnen und Umwelt. *Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continuous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks".* 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU, 2015. ISBN 978-3-941140-47-9 [Zugriff am: 24. April 2020]. Verfügbar unter: http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf
- [25] CLAUSNITZER, K.-D., FETTE, M., JANßEN, K. und LÖSCH, S. Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM. *Nachdämmung („Aufdopplung“) alter Wärmedämmverbundsysteme an Wohngebäuden.* Bremen, 2016 [Zugriff am: 24. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/Formgebung_Funktionswerkstoffe/Energiesystemanalyse/Bericht%20WDVS-Aufdoppelung.pdf
- [26] BIGALKE, U., ARMBRUSTER, A., LUKAS, F., KRIEGER, O., SCHUCH, C. und KUNDE, J. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). *dena-Gebäudereport. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand.* Berlin, 2016 [Zugriff am: 9. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaeudereport.pdf
- [27] EUROPÄISCHE TECHNISCHE ZULASSUNG. ETAG 004, *Außenseitiges Wärmedämm-Verbundsystem mit Putzschicht.* 2013 [Zugriff am: 22. Juli 2019]. Verfügbar unter: https://oib.or.at/sites/default/files/etag/ETAG_004.pdf
- [28] LENGSELD, K. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. *Beurteilung der Langzeitbewährung von ausgeführten Wärmedämmverbundsystemen.* IBP-Bericht HTB-06/2015. Valley, 2015. Bericht, Elektronische Publikation [Zugriff am: 9. April 2020]. Verfügbar unter: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3773497.pdf
- [29] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN. *Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Anlage 6: Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Liegenschaften,* 2001 [Zugriff am: 9. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/PDF_Leitfaden_Nachhaltiges_Bauen/Anlage_6.pdf
- [30] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, *Bewertungsgesetz Anlage 22 (zu § 185 Absatz 3 Satz 3, § 190 Absatz 4 Satz 2).* 2015 [Zugriff am: 23. Juli 2019]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bewg/anlage_22.html
- [31] GRAUBNER, C.-A. und CLANGET-HULIN, M. *Analyse der Trennbarkeit von Materialschichten hybrider Außenbauteile bei Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen. Erstellung einer praxisnahen Datenbank für die Nachhaltigkeitsbeurteilung.* Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. Forschungsinitiative Zukunft Bau. 2837. ISBN 978-3-8167-8930-7 [Zugriff am: 9. April 2020]. Verfügbar unter: <https://www.irbnet.de/daten/rswb/13029010722.pdf>
- [32] ASAM, C. Bundesministerium für Bau-, Stadt- und Raumforschung. *Dämmmaßnahmen an Gebäudefassaden. BBSR Analyse KOMPAKT 11/2017,* 2017.
- [33] COLLET, M. *Abbruchbaustelle Mannheim.* Persönliche Mitteilung: E-Mail, 27. Februar 2020.
- [34] STO SE & CO. KGAA. *FAQs zum Thema Entsorgung von EPS Dämmplatten mit und ohne HBCD* [online], 2017 [Zugriff am: 29. Juli 2019]. Verfügbar unter: https://www.sto.de/media/documents/handwerker/FAQs_zum_Thema_EPS_Entsorgung.pdf

- [35] AUSSCHUSS FÜR GEFAHRSTOFFE, *TRGS 521 - Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle*. Februar 2008 [Zugriff am: 29. Juli 2019]. Verfügbar unter: <https://www.crb-gmbh.com/pdf/richtlinien---vorschriften/trgs-521.pdf>
- [36] BERUFGGENOSSENSCHAFT DER BAUWIRTSCHAFT. *Umgang mit Mineralwolle-Dämmstoffen (Glaswolle, Steinwolle). Handlungsanleitung*. Berlin, 2018. 341 [Zugriff am: 29. Juli 2019]. Verfügbar unter: <https://www.bgbau.de/fileadmin/Medien-Objekte/Medien/Bausteine/341/bau341.pdf>
- [37] HUBER, M. Universität für Bodenkultur, Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt, Institut für Abfallwirtschaft. *Masterarbeit: Entsorgung von Dämmstoffabfällen in Österreich*. Wien, 2013.
- [38] MORGENBESSER, D. *Recyclingfähigkeit von modernen Baukonstruktionen. Problematik von Materialvielfalt und -verbund im Fassaden- und Zwischenwandbau: AV Akademie*verlag, 2003. ISBN 978-3-639728-01-9.
- [39] FECHNER, J., MÖTZL HILDEGUND und UNZEITIG, U. Institut für Baubiologie und -ökologie. *Endbericht zum Projekt Abfallvermeidung im Bausektor. Ausgewählt im Rahmen der Initiative "Abfallvermeidung in Wien"*. Wien, 2003 [Zugriff am: 15. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.wenigermist.at/download/?id=Endbericht_AbfallvermeidungBausektor2003.pdf
- [40] BÖTTCHER, T. *Warmes Fressen für den Biber. Computergesteuerte Fräs-Technologie für sauberes und kostengünstiges Entfernen alter WDVS*. Bautenschutz + Bausanierung, 2001(Bd. 24, Nr. 2), 29-30.
- [41] THOMÉ-KOZMIENSKY, K.J. *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014. ISBN 978-3-944310-11-4.
- [42] DRESCH, H., DIMA, B., HORN, M., GRÜTTNER, W., MARK, F.E. und VEHLow, J. *Verwertung von Polystyrol-Schaumstoffabfällen mit HBCD. Untersuchung zur energetischen Verwertung von expandiertem Polystyrol-Schaumstoff (EPS) und extrudiertem Polystyrol-Schaumstoff (XPS), die als Flammenschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) enthalten, durch die Mitverbrennung in der Abfallverbrennungsanlage für kommunale Abfälle der Stadt Würzburg*. Technischer Bericht (Kurzfassung). Brüssel, 2014 [Zugriff am: 9. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.zvaws.de/infos/PS_FOAM_DE_SUMMARY_august2015.pdf
- [43] HELLER, N. und FLAMME, S. FH Münster. *RESSOURCE.WDVS – Ressourceneffiziente Nutzung von qualitätsgesichertem Sekundär-EPS sowie der mineralischen Fraktionen aus WDVS* [online], 2019 [Zugriff am: 30. Juli 2019]. Verfügbar unter: https://www.fh-muenster.de/forschung/forschungsprofil/projekt.php?pr_id=958
- [44] HELLER, N. und FLAMME, S. *Entwicklung, Modellierung und Bewertung von Verwertungswegen für Wärmedämmverbundsysteme. 7. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft*. Am 16. und 17. März 2017 an der RWTH Aachen: Tagungsband. Innsbruck: innsbruck university press, 2017. ISBN 3-90-312278-5.
- [45] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN EN 1083-1 Kraftbetriebene Bürstwerkzeuge*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Juli 1997.
- [46] BOCK, E. *Bürsten und Pinsel. Die vielfältigen Erzeugnisse des Bürsten- und Pinselmachergewerbes und ihre wichtigsten Bestandteile*. Bechhofen a. d. H.: Selbstverlag des Zentralverbands der Bürsten-

- und Pinselhersteller- sowie Zurrichter- und Zulieferbetriebe der Bundesrepublik Deutschland und Westberlin, 1983.
- [47] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 68346 Bezeichnung von Besteckungsmaterialien*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Januar 1980.
- [48] DENKENA, B. und TÖNSHOFF, H.K. *Spanen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-19771-0.
- [49] WOLF, H.-P. *Technisch-wissenschaftliche Begleitforschung zu den Vorhaben 'Nadelfräsen' einschließlich der Ermittlung der Verfahrenskenngrößen*. Eggenstein-Leopoldshafen: Fachinformationszentrum Energie Physik Mathematik, 1981. Forschungsbericht: BMFT FB HA 81 005, Humanisierung des Arbeitslebens / Bundesministerium für Forschung und Technologie.
- [50] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 8589-8 Fertigungsverfahren Spanen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. September 2003.
- [51] LANDENBERGER, D. *Flexible Feinbearbeitung für die Refabrikation von Automobilkomponenten*. Aachen: Shaker, 2007. Fortschritte in Konstruktion und Produktion. Bd. 7. ISBN 978-3-8322-6424-6.
- [52] PRZYKLENK, K. *Bestimmen des Bürstenverhaltens anhand einer Einzelborste*. Berlin: Springer, 1985. IPA IAO Forschung und Praxis. 87. ISBN 3-54-015956-8.
- [53] KULLEN-KOTI GMBH. *KULLEN-KOTI Select* [online]. *Händlerprogramm. Werkzeugbürsten für Profis*. 2019 [Zugriff am: 20. Mai 2019]. Verfügbar unter: <https://www.kullen.de/de/produkte/kataloge/>
- [54] NIEDERBERGER, W. *Entgraten - ein wichtiges Fertigungsverfahren. Entgraten mit Bandschleif- und Bürstmaschinen*. Schweizerische Gesellschaft für Werkzeugmaschinenbau und Fertigungstechnik - Institut für Werkzeugmaschinenbau und Fertigungstechnik an der ETH Zürich, 1982.
- [55] LANDENBERGER, D., STEINHILPER, R. und ROSEMAN, B. *Verbesserung der Oberflächengüte durch Bürstspanen. Spanendes Feinbearbeitungsverfahren*. VDI-Z, 2007, (03), 67-69.
- [56] THILOW, A.P., PRZYKLENK, K. und MAIER, R. *Entgratetechnik. Entwicklungsstand und Problemlösungen*. 3., verb. Aufl. Renningen: Expert-Verlag, 2008. Kontakt & Studium. Bd. 392. ISBN 978-3-8169-2831-7.
- [57] UHLMANN, E., SOMMERFELD, C., RENNER, M. und BAUMANN, M. *Bürstspanen von Profilen. Maschinenintegrierte Finishbearbeitung von funktionalen Profilflächen mit Bürstwerkzeugen*. WT Werkstattstechnik, 2017, 107(06), 472-478.
- [58] WARNECKE, H.J., THIEL, R., PRZYKLENK, K. und WILLEMS, P. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. *Wirtschaftlichkeit und Einsatzbereiche von Fertigungsverfahren zum Entgraten von Formteilen aus Blech*. Hannover: DFB, 1981. DFB-Forschungsbericht. Nr. 2. ISBN 978-3-86776-095-9.
- [59] LESSMANN GMBH. Lessmann GmbH. *Katalog 18* [online]. 2018 [Zugriff am: 6. November 2018]. Verfügbar unter: <https://www.lessmann.com/>

- [60] BRIEL, K.D. *Entgraten mit Hochleistungsbürsten*. Schweizer Maschinenmarkt: SMM: die Schweizer Industriezeitschrift, 1983, (17), 30-33.
- [61] UHLMANN, E., LYPOKKA, P., SOMMERFELD, C., BÄCKER, C., DETHLEFS A und HOCHSCHILD, L. *Funktionsflächen flexibel finishen [online]*. *Abrasives Bürsten*. WB Werkstatt und Betrieb, 2014, (04), 70-72 [Zugriff am: 17. Mai 2019]. Verfügbar unter: https://www.wiso-net.de/document/WEBE__902A4AF3AAD6666740F6AC11047276DA
- [62] SCHWEER, W. und KOCH, R.E. *Nadelfräsen - ein neues Verfahren der Oberflächenbearbeitung*. Werkstatt und Betrieb 109, 1976, (6), 343-349.
- [63] RSA CUTTING SYSTEMS GMBH. *Ganz schön auf Draht. Effiziente Oberflächenbearbeitung mit Hochleistungsbürsten*. Oberflächentechnik. DER BETRIEBSLEITER, (Sonderdruck).
- [64] AUGUST MINK KG. August Mink KG, Hg. *Das Mink HP-System – einfache Montage und Demontage ohne Ausbau der Welle [online]*, 2018. 03.2018 [Zugriff am: 8. Oktober 2019]. Verfügbar unter: https://www.mink-buersten.com/uploads/tx_userminkinfomaterial/HP-Prospekt_klein.pdf
- [65] WOLF, H.-P. *Bearbeitungsverfahren "Nadelfräsen"*. Kurzbericht der Hochschulgruppe Fertigungstechnik der Technischen Hochschulen und Universitäten der Bundesrepublik Deutschland. Industrieanzeiger, 1979, 101(23), 32-33.
- [66] LEFOR, K., KANNACHER, M., KAHLHÖFER, R. und WOLF, H.-P. *Entwicklung einer Nadelfräs-Versuchsanlage zur Oberflächenbearbeitung von Bändern und Blechtafeln zum Abbau schädigender Belastungen und Erhöhung der Arbeitssicherheit. Forschungsbericht HA 81-014 Humanisierung des Arbeitslebens*. Karlsruhe, 1981.
- [67] PRZYKLENK, K. *Entgratanlagen mit spanenden Werkzeugen. Fachtagung Entgraten - ein wichtiges Fertigungsverfahren*. Schweizerische Gesellschaft für Werkzeugmaschinenbau und Fertigungstechnik - Institut für Werkzeugmaschinenbau und Fertigungstechnik an der ETH Zürich, 1982.
- [68] PRZYKLENK, K. *Oberflächentechnik. Kongress: Papers. Vorträge des zweiten SURTEC-Kongresses*. D10: Flexible Werkzeuge zur Oberflächenbearbeitung. Berlin: VDE-Verlag GmbH, 1983. VDI-Buch. ISBN 3-8007-1328-4.
- [69] THIEL, R. und PRZYKLENK, K. *Entwicklungstendenzen beim Entgraten von Blechen. Eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren*. bbr - Bänder Bleche Rohre, 1983, (9), 254-257.
- [70] WARNECKE, H.J. und PRZYKLENK, K. *Grundlagenversuche zum Verhalten von Stahldrahtbürsten*. WT Werkstattstechnik-Zeitschrift für industrielle Fertigung, 1984, (74), 171-174.
- [71] LANDENBERGER, D. und ROSEMAN, B. *Einsatz des Bürstspanens zur Feinbearbeitung. Fertigungsverfahren*. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2006, 101(06), 374-377.
- [72] CHEN, L., STANGO, R.J. und CARIAPA, V. *A Force-Control Model for Edge-Deburring with Filamentary Brush. Technical Brief*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(3), 528-532.

- [73] OVERHOLSER, R.W., STANGO, R.J. und FOURNELLE, R.A. *Morphology of metal surface generated by nylon/abrasive filament brush*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003(43), 193-202.
- [74] SHIA, C.-Y., STANGO, R.J. und HEINRICH, S.M. *Analysis of Contact Mechanics for a Circular Filamentary Brush/Workpart System*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1998, 120(4), 715-721.
- [75] STANGO, R.J., CARIAPA, V., PRASAD, A. und LIANG, S.-K. *Measurement and analysis of brushing tool performance characteristics, part 1. Stiffness response*, 1991, 113(3), 283-289.
- [76] STANGO, R.J., CARIAPA, V. und ZUZANSKI, M. *Contact Zone Force Profile and Machining Performance of Filamentary Brush*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(1), 217-226.
- [77] STANGO, R.J., CHEN, L. und CARIAPA, V. *Automated Deburring with a Filamentary Brush: Prescribed Burr Geometry*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(3), 385-392.
- [78] STANGO, R.J. und KHULLAR, P. *Fundamentals of bristle blasting process for removing corrosive layer*. Conference Paper. Corrosion 2009 conference & expo, 2009, (09191).
- [79] STANGO, R.J., HEINRICH, S.M. und SHIA, C.-Y. *Analysis of constrained filament deformation and stiffness properties of brushes*, 1989, Vol. 111, 238-243.
- [80] ZHAO, H. und STANGO, R.J. *Role of Distributed Interbristle Friction Force on Brush Seal Hysteresis*. Department of Mechanical Engineering, Marquette University, Milwaukee. Journal of Tribology, 2007, 129(1), 199-204.
- [81] ZHAO, H. und STANGO, R.J. *Effect of Flow-Induced Radial Load on Brush Seal/Rotor Contact Mechanics*. Journal of Tribology, 2004, 126(1), 208-215.
- [82] ZHAO, H. und STANGO, R.J. *An Analytical Approach for Investigating Bristle/Backplate Hysteresis Phenomenon in Brush Seals*. Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005.
- [83] UHLMANN, E. und SOMMERFELD, C. *Three-dimensional dynamic contact analysis of abrasive filaments with a multi-body system*. Institute for Machine tools and Factory Management. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2018.
- [84] GEORG GERLITZKY. Technische Universität Berlin-Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Hg. *DynBrush* [online]. *Verbesserung der erzielbaren Oberflächengüte und der Wirtschaftlichkeit beim Bürstspanen durch die Entwicklung von Bearbeitungsstrategien mit gezielt eingestellter hoher Dynamik*. Projektinformation [Zugriff am: 16. Mai 2019]. Verfügbar unter: https://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Forschung/2-FeiFi/AIF_ZIM_DynBrush.pdf
- [85] GEORG GERLITZKY. Technische Universität Berlin-Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb. *FlexFeinst* [online]. *Flexible Feinstbearbeitung von Funktionsflächen mit alternativen Werkzeugkonzepten*. Projektinformation [Zugriff am: 16. Mai 2019]. Verfügbar unter: https://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Forschung/2-FeiFi/AIF_ZIM_FlexFeinst.pdf
- [86] GEORG GERLITZKY. Technische Universität Berlin-Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Hg. *Analyse des Zerspan- und Verschleißverhaltens beim Bürstspanen mit abrasivem*

- Medium sprödharter Werkstoffe* [online]. Projektinformation [Zugriff am: 16. Mai 2019]. Verfügbar unter: https://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Forschung/2-FeiFi/DFG_UH_100-228.pdf
- [87] GEORG GERLITZKY. Technische Universität Berlin-Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Hg. *BürstPro* [online]. *Entwicklung von speziellen gegossenen Bürstwerkzeugen und den dazugehörigen Prozessen für die Finishingbearbeitung von Profilen*. Projektinformation. abgeschlossen [Zugriff am: 16. Mai 2019]. Verfügbar unter: https://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Forschung/2-FeiFi/AIF_ZIM_BuerstPro.pdf
- [88] GEORG GERLITZKY. Technische Universität Berlin-Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Hg. *Bürsten von Verzahnungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität* [online]. Projektinformation. abgeschlossen [Zugriff am: 16. Mai 2019]. Verfügbar unter: https://www.iwf.tu-berlin.de/fileadmin/fg199/Forschung/4-Schleiftechnologie/FVA_Buersten_von_Verzahnungen.pdf
- [89] NEBELING, P.H., BLAICH, J., THEURER, S. und WILDERMUTH, T. *Was Bürsten so stark macht* [online]. *Bohrungen mit Bürsten entgraten*. Ke - konstruktion + engineering, 2017, (9), 44-45 [Zugriff am: 17. Mai 2019]. Verfügbar unter: https://www.wiso-net.de/document/KE__A71817968
- [90] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 6580 Begriffe der Zerspantechnik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Oktober 1985.
- [91] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. Deutsche Fassung EN 1083-2:1997, *DIN EN 1083-2 Kraftgetriebene Bürstwerkzeuge*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Juli 1997.
- [92] FRIESKE, H.-J. *Technische Mechanik-Statik. Modul Einführung und Grundbegriffe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN 978-3-658-23930-5 [Zugriff am: 24. April 2020]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-23930-5>
- [93] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 8589-0 Fertigungsverfahren Spanen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. September 2003.
- [94] STÖFERLE, T. und MÜLLER-GERBES, H. *Bearbeitung von Werkstückoberflächen durch Nadelfräsen*. WB Werkstatt und Betrieb, 1977, 110(1).
- [95] NOVOTNÝ, F., HORÁK, M. und STARÝ, M. *Abrasive cylindrical brush behaviour in surface processing*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2017, (61-72).
- [96] CZICHOS, H. *Verschleiß*. In: H. CZICHOS und K.-H. HABIG, Hg. *Tribologie-Handbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 127-180. ISBN 978-3-8348-1810-2.
- [97] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 50320 Verschleiß*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Dezember 1979, Zurückgezogen 1979.
- [98] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 8580 Fertigungsverfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. September 2003.
- [99] HOFMANN, H. und SPINDLER, J. *Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik. mit 69 Tabellen und zahlreichen Beispielen*. 3., überarb. Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2015. ISBN 978-3-446-44183-5.

- [100] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 8590 Fertigungsverfahren Abtrag*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. September 2003.
- [101] SIEBERTZ, K., VAN BEBBER, D. und HOCHKIRCHEN, T. *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*. 2. Auflage 2017. Berlin: Springer Berlin, 2017. VDI-Buch. ISBN 978-3-66255742-6.
- [102] LESSMANN GMBH. Lessmann GmbH. *Katalog 2019*. Deutschland, 2019. Katalog [Zugriff am: 20. Mai 2019]. Verfügbar unter: <https://www.lessmann.com/>
- [103] AUGUST RÜGGERBERG GMBH & CO. KG. August Rüggeberg GmbH & Co. KG, Hg. *PFERD-Werkzeughandbuch 23* [online]. *Katalog 8 - Technische Bürsten*, 2018 [Zugriff am: 20. Mai 2019]. Verfügbar unter: <https://www.pferd.com/media/PFERD-Werkzeughandbuch-de.pdf>
- [104] OETTINGER GMBH und OETTINGER, R. *Abbruch und Entsorgung von WDVS*. Persönliches Gespräch, 17. Juli 2019.
- [105] STO SE & CO. KGAA, MARCO SCHREIECK. *Bestellung WDVS*. Persönliche Mitteilung: E-Mail und Telefonisch, 2016-2019.
- [106] MÄRTIN, C. *Randbedingungen Baggeranbaugerät*. Persönliche Mitteilung: E-Mail, 12. Juli 2019.
- [107] BOSER, D. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). *Analyse vorhandener Defizite von Hydraulikbaggeranbaugeräten bei Abbrucharbeiten und Aufzeigen von technischen Verbesserungsmöglichkeiten*. Masterarbeit. Karlsruhe, 2018.
- [108] JOHANNES GERSTAECKER VERLAG GMBH. *Anrühren von Pigmenten*. Persönliche Mitteilung: telefonisch, 18. Juni 2019.
- [109] MASON, R.L., GUNST, R.F. und HESS, J.L. *Statistical design and analysis of experiments. With applications to engineering and science*. New York: Wiley, 1989. Wiley series in probability and mathematical statistics Applied probability and statistics. ISBN 0-471-85364-X.
- [110] KLEPPMANN, W. *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. 7., aktualisierte u. erw. Aufl. München: Hanser, 2011. Praxisreihe Qualitätswissen. ISBN 978-3-446-42942-0.
- [111] SCHEFFLER, E. *Statistische Versuchsplanung und -auswertung. Eine Einführung für Praktiker*. Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, 2001, [2001. ISBN 3-342-00366-9.
- [112] KLEIN, B. *Versuchsplanung - DoE. Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik*. 2., Aufl. München: Oldenbourg, R, 07.05.31. Mai 2007. Oldenbourg Lehrbücher für Ingenieure. ISBN 978-3-486-58352-6.
- [113] LESSMANN GMBH. *Rückfrage zur Versuchsdurchführung mit Bürsten*. Persönliche Mitteilung: E-Mail, 11. Juli 2019.
- [114] MEINTRUP, D. *Angewandte Statistik. Eine Einführung mit JMP: CreateSpace Open Publishing Platform*, 2018. ISBN 1-98-166989-2.
- [115] JANSSEN, J. und LAATZ, W. *Statistische Datenanalyse mit SPSS. Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests*. 8. Aufl. 2013. Berlin: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-32506-9.

- [116] HUBERT, F., MEYER, F. und LENZEN, J.M. *Grundlagen der Varianzanalyse. Konzeption - Durchführung - Auswertung*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014. ISBN 978-3-658-05665-0.
- [117] PERREAULT, W.D. und DARDEN, W.R. *Unequal cell sizes in marketing experiments: use of the general linear hypothesis*. American Marketing Association. Journal of marketing research: JMR, 1975, (III 3, Nr. 12), 333-342.
- [118] BRAY, J.H. und MAXWELL, S.E. *Multivariate analysis of variance*. Sage Publications. California, 1985. Quantitative Applications in the Social Sciences. ISBN 0-8039-2310.
- [119] TSCHIRK, W. *Statistik. Klassisch oder Bayes*. Berlin: Springer, 2014. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-364-25438-5-2.
- [120] DIETRICH, E. und SCHULZE, A. *Eignungsnachweis von Prüfprozessen. Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld*. 5., überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2017. ISBN 978-3-446-45171-1.
- [121] FAHRMEIR, L., KNEIB, T. und LANG, S. *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen ; mit 51 Tabellen*. Berlin: Springer, 2007. Statistik und ihre Anwendungen. ISBN 978-3-540-33932-8.
- [122] ECKSTEIN, P.P. *Repetitorium Statistik. Deskriptive Statistik - Stochastik - Induktive Statistik*. 8., aktualisierte u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014. ISBN 978-3-658-05748-0.
- [123] TOUTENBURG, H. *Arbeitsbuch zur deskriptiven und induktiven Statistik*. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2009. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-540-89036-2.
- [124] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., *DIN 1313 Größen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Dezember 1998.
- [125] MARLER, R.T. und ARORA J.S. *Survey of multi-objective optimization for engineering*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization*, S. 369-395.
- [126] SCHOLZ, D. *Optimierung interaktiv: Grundlagen verstehen, Modelle erforschen und Verfahren anwenden*: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-662-57952-7.
- [127] THIMMERMANN, J. Universität Paderborn. *Optimale Steuerung und Mehrzieloptimierung von dynamischen Systemen am Beispiel des Mehrfachpendels*. Dissertation. Paderborn, 8. November 2013.
- [128] KORTE, B. *Kombinatorische Optimierung: Theorie und Algorithmen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-662-57690-8.
- [129] KÜFER, K.-H., RUZIKA, S. und HALFFMANN, P. *Multikriterielle Optimierung und Entscheidungsunterstützung. Tagungsband GOR Entscheidungstheorie und -praxis 2018*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Gabler, 2019. ISBN 978-3-658-27041-4.
- [130] GROTE, K.-H. und FELDHUSEN, J. *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. Zweiundzwanzigste, neubearbeitete und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-68191-5.
- [131] MÄRTIN, C. *Vorstellung des Projektes*. Persönliche Mitteilung: E-Mail, 30. November 2017.

- [132] BLATTNER, D.R.B. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB). *Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung zum Abtrag von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) mittels spanender Bürste*. Masterarbeit. Karlsruhe, 22. Mai 2018.
- [133] CREACYCLE GMBH. *Der CreaSolv® Prozess* [online], 2019 [Zugriff am: 17. Juli 2019]. Verfügbar unter: <https://www.creacycle.de/de/der-prozess.html>
- [134] KAISER, R. *Qualitative Experteninterviews. Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung*. Wiesbaden: Springer VS, 2014. Elemente der Politik. ISBN 978-3-658-02479-6.
- [135] DIEFENBACH, N. Institut Wohnen und Umwelt. *Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung Oktober 2013* [online], 2013 [Zugriff am: 13. Juli 2019]. Verfügbar unter: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Flächen_Gebäudetypologie_Okt_2013.pdf
- [136] STATISTISCHES BUNDESAMT. *Bautätigkeit und Wohnungen* [online]. *Bestand an Wohnungen Fachserie 5 Reihe 3*, 2017 [Zugriff am: 9. April 2020]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publicationen/Downloads-Wohnen/bestand-wohnungen-2050300177004.pdf?__blob=publicationFile
- [137] INSTITUT WOHNEN UND UMWELT. *Dokument von 2005 / Daten überholt aktueller Stand der "Deutschen Wohngebäudetypologie"* [online], 2005 [Zugriff am: 13. Juli 2019]. Verfügbar unter: www.episcope.eu/building-typology/country/de/
- [138] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN TRANSPORTBETONINDUSTRIE E.V. *Jahresbericht 2014/2015* [online], 2015 [Zugriff am: 29. November 2016]. Verfügbar unter: https://www.betonshop.de/files/439/btb_jahresbericht_2014_2015.pdf
- [139] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN TRANSPORTBETONINDUSTRIE E.V. *50 Jahre BTB – Jahresbericht 2015/2016: Gremien und statistische Daten* [online], 2016 [Zugriff am: 29. November 2016]. Verfügbar unter: http://www.betonshop.de/files/466/btb_jahresbericht_2015_2016.pdf
- [140] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN TRANSPORTBETONINDUSTRIE E.V. *Jahresbericht 2016/2017* [online], 2017 [Zugriff am: 18. Juni 2019]. Verfügbar unter: https://betonshop.de/media/wysiwyg/btb_jahresbericht_2016_2017.pdf
- [141] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN TRANSPORTBETONINDUSTRIE E.V. *NEUE PERSPEKTIVEN - Jahresbericht 2018* [online]. *Verteilung der Produktion von Transportbeton nach Betonsorte in Deutschland in den Jahren von 2015 bis 2017*, August 2018 [Zugriff am: 18. Juni 2019]. Verfügbar unter: https://www.transportbeton.org/fileadmin/transportbeton-org/media/Verband/pdf/BTB_Jahresbericht_2018_web_final.pdf
- [142] FAHRMEIR, L., HEUMANN, C., KÜNSTLER, R., PIGEOT, I. und TUTZ, G. *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse*. 8., überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2016. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-662-50372-0.
- [143] HEDDERICH, J. und SACHS, L. Springer Spektrum. *Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R*. 16., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Germany: Springer Spektrum, 2018. ISBN 978-3-662-56657-2.

- [144] SHAPIRO, S.S. und WILK, M.B. *An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples) [online]*. *Biometrika*, 1965, 52(3/4), 591. ISSN 00063444 [Zugriff am: 24. April 2020]. Verfügbar unter: doi:10.2307/2333709

Anhang

A. Leitfadengestützte Experteninterviews

Für den Informationsaustausch mit den ausgewählten Experten dient ein Leitfaden als Stütze. Abweichend zu Erhebungen aus der empirischen Sozialforschung stehen direkte Sachinformationen im Vordergrund. Infolge fortlaufender Befragungen sowie eines Pre-Tests ist es zu einer iterativen Anpassung des Leitfadens gekommen, nachfolgend aufgeführt ist die letzte Version. Neben Grundlagen wurden ebenfalls Ergebnisse diskutiert. Anzumerken ist, dass den Experten im Vorfeld der Befragungen das Forschungsvorhaben erläutert wurde. Eine Beschreibung der anonymisierten Experten liefert Tabelle 36, wohingegen aus Tabelle 37 ersichtlich wird, welcher Experte zu welchen Themengebieten Informationen eingebracht hat sowie welche Werkzeugtypen empfohlen wurden. Eine runde Klammer deutet dabei darauf hin, dass ein Werkzeugempfehlung gemacht wurde, die einem bereits vorhandenen Werkzeug entsprach, sodass keine weitere Anschaffung erfolgte. Im Umkehrschluss konnten Werkzeugtypen ohne Klammern überwiegend direkt über den befragten Experten erworben werden.

Die Kontaktaufnahme zu den Experten erfolgte anhand der Mitgliederliste des Verbandes der Deutschen Pinsel und Bürstenhersteller e.V. sowie Internetrecherchen, Messekontakte und persönliche Empfehlungen. Interviewpartner zu identifizierten war dabei keine Schwierigkeit, vielmehr sind diese an den Ergebnissen der Untersuchungen sehr interessiert.

Innerhalb des Leitfadens abgefragt werden unterschiedliche Themengebiete, welche mit den Nummerierungen A bis F versehen sind. Der Punkt Personenbeschreibung hingegen dient lediglich der Einordnung der erlangten Informationen. Die Fragen der Nummerierungen A bis D ermöglichen ein grundlegendes Verständnis der Wirkungsweise von Bürstenwerkzeugen. Die dabei übermittelten Informationen stellen nach Kaiser [134] Betriebswissen und Kontextwissen dar. Mithilfe der Fragen bzw. Antworten der Nummerierungen D bis F hingegen kann eine Eingrenzung der Kombinationsmöglichkeiten für die experimentellen Untersuchungen vorgenommen werden. Einerseits wird die Auswahl möglicher Werkzeugausführungen begrenzt, andererseits können die Auswirkungen der Faktorstufenänderungen Zustellung bzw. Anpressung, Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit und Drehbewegung abgeschätzt werden. Da es sich um sogenanntes Deutungswissen handelt, sind dennoch grundlegende Untersuchungen notwendig. Lediglich der Ausgangspunkt im Faktorraum wird maßgeblich geprägt. Die Nummerierung F, bei dem die Experten nach Erfahrungen befragt werden, dient dem weiteren Verständnis der Wirkungsweise von Bürstenwerkzeugen und kann zusätzlich der Plausibilisierung der experimentellen Untersuchungsergebnisse dienen. Die Thesen können dabei belegt oder widerlegt werden. Zusätzlich können weitere Thesen von den Experten generiert werden. Somit weicht das methodische Design der Nummer F durch die quantitative Fragestellung von den übrigen qualitativen Fragen ab. Abschließend werden Empfehlungen für die weitere Informationsgewinnung abgefragt (vgl. Nummerierung G).

Es ist darauf hinzuweisen, dass während der (annähernd standardisierten) Befragungen unterschiedliche Fragentypen verwendet werden. Es handelt sich dabei um Einführungsfragen, strukturierte, direkte, indirekte, spezifische sowie interpretierende Fragen. Die Antworten wurden abschließend selektiv transkribiert.

Leitfaden Experteninterviews

Personenbeschreibung:

1. Was ist Ihre Aufgabe im Unternehmen?
2. Wie lange sind Sie bereits auf dem Gebiet tätig?
3. Auf welche Erfahrungen können Sie zurückgreifen?
4. Welchen Ausbildungshintergrund haben Sie?

A) Fertigung und Anwendung

1. Welche Arten von Bürsten fertigen Sie in Ihrem Unternehmen? Wie viele unterschiedliche technische Bürsten haben Sie im Sortiment? Fertigen Sie alles selbst oder kaufen Sie zu? Welcher Bereich/Branche ist in Ihrem Unternehmen am Umsatzstärksten?
2. Was sind typische Standard Rundbürsten-Ausführungen und deren Anwendungen? Welche Werkzeugausführungen sind auf dem Markt am häufigsten vertreten?
3. Welche Arten von Grundkörpern unterscheiden Sie und wo finden diese Anwendung?
4. Haben Sie Bürsten unterschiedlichster Besatzausführungen (gleiches Material) oder Materialkombinationen (gleiche Ausführung) oder aber Kombinationen unterschiedlicher Materialien und Ausführungen (innerhalb einer Bürste) im Sortiment?
5. Werden Bürsten bzw. der Besatz auf dem Grundkörper auch manchmal angewinkelt?
Wenn ja, wann?
6. Gibt es typische Standards bei der Fertigung und Ausführung von Bürsten?
7. Welche Toleranzen / Streuungen sind aus fertigungstechnischer Sicht erlaubt?

B) Werkzeugbeschreibung

1. Bürstenbeschreibung: Wie definieren Sie die Begriffe Besatz/Besteckung/Filament, Besatzhöhe/-länge, Besatzdicke/-durchmesser, Besatzart, Besatzausführung...etc.
2. Was verstehen Sie unter Besatzdichte/Füllmenge/Packungsdichte/Besatzzahl einer Bürste? Wie ist eine hohe, wie eine niedrige Besatzdichte definiert? Was verstehen Sie unter Vollbesatz? Wie kann die Besatzdichte unterschiedlichster Ausführungen miteinander verglichen werden?
3. Wie klassifizieren Sie eine Bürste?

C) Werkzeugeinsatz (Verschleiß, Standzeit, Leistung)

1. In der Literatur werden Bürstenwerkzeuge oftmals den Fertigungsverfahren spanen mit geometrisch bestimmter oder unbestimmter Schneide zugeordnet. Wo ordnen Sie verschiedene Bürstenausführungen im Bereich der Fertigungsverfahren ein? Wie arbeitet eine Bürste? Welche Wirkprinzipien sind für den Abtrag verantwortlich?
2. Wie definieren Sie Verschleiß? Welche Arten von Verschleiß können auftreten? Wie werden die Standzeit bzw. Lebensdauer einer Bürste festgelegt?

3. Wenn Sie eine „neue“ Bürste fertigen, wie legen Sie die Betriebsparameter fest? Werden diese auf das Werkstück oder das Werkzeug ausgelegt?
4. Welchen Einfluss haben die Umdrehungsgeschwindigkeit bzw. Zentrifugalkräfte auf das Umlegen und Aufrichten des Besatzes aber auch auf dessen Steifigkeit? Wann sind hohe Umdrehungszahlen wichtig?
5. Ab wann ist der Anpressung/Zustellung bzw. Eintauchtiefe zu hoch?
6. Wie würden Sie den Durchmesser einer Bürste/Freie Besatzlänge im Vergleich zur Dicke des WDVS-Aufbaus bzw. der Eintauchtiefe wählen?
7. Inwieweit halten Sie eine Änderung der Drehrichtung bzw. Drehbewegung für sinnvoll? Welche Faktoren sprechen dafür bzw. dagegen?
8. Welche Auswirkung hat die Ausführung des Besatzmaterials auf die Steifigkeit einer Bürste?
9. Gibt es (Erfahrungs-) Werte wie viel der Besatzhöhe nutzbar ist, bevor die Bürste als verschlissen gilt?
10. Wieweit kann eine gezopfte Bürste „heruntergefahren“ werden? Inwiefern gibt es Unterschiede durch die Besatzanordnung?

D) Forschung und Entwicklung

1. Verfügen Sie über eine eigene Abteilung, die sich mit Forschung und Entwicklung beschäftigt? Wenn ja, worin liegt deren Kernaufgabe? Welche Art von Untersuchungen wird durchgeführt und wie ist dementsprechend der Aufbau der Maschinen?
2. Für wen werden Untersuchungen durchgeführt?
3. Wie wird der Verschleiß gemessen, wie die Zustellung bzw. der Anpressung geregelt?
4. Sammeln Sie betriebsintern Daten um bspw. Optimierungen durchzuführen?

E) Werkzeugempfehlung

1. Welche Ausführung einer Bürste empfehlen Sie für den geplanten Anwendungsfall und warum? Von welcher Werkzeugausführung würden Sie abraten? Aus welchen Anwendungsgebieten findet der empfohlene Bürstentyp normalerweise Verwendung?
2. Welche Betriebsparameter empfehlen Sie für den geplanten Anwendungsfall?
3. Halten Sie eine Rundbürste für die richtige Wahl oder würden Sie zu einem anderen Bürstentyp tendieren, bspw. Tellerbürste? Wenn nicht, warum würden Sie davon abraten?

F) Erfahrungen (Thesendiskussion)

1. These 8: Die Bürste verschleißt durch ein „herunterfeilen“ des Besatzes und nicht durch ein Querlegen der Drähte.
2. These 16: Bei gleichbleibenden Maschinenparametern sind der Massenverlust und damit der Verschleiß annähernd linear über die Zeit.
3. These 2: Der Massenverlust steht im Zusammenhang mit der Anpressung.

4. These 6: Der Abtrag verbessert sich mit Zunahme des Anpressung bzw. der Zustellung.
5. These 3 und 7: Bei gleichbleibender Schnittgeschwindigkeit ist der Massenverlust bzw. Verschleiß höher aber der Abtrag besser, wenn die Vorschubgeschwindigkeit gering ist.
6. These 18: Die Zentrifugalkraft ist innerhalb des Versuchsbereichs vernachlässigbar.
7. These 15: Die Schnittgeschwindigkeit steht nicht in linearem Verhältnis zum Massenverlust bzw. Verschleiß und zum Abtrag.
8. These 17: Die Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit kann durch Erhöhung der Drehzahl kompensiert werden.
9. These 10: Der Abtrag ist bei neuen Bürsten mit geringeren Verschleißerscheinungen anfangs besser.
10. These 11: Die Zunahme der Steifigkeit durch Verringerung der Länge ist vernachlässigbar.
11. These 12: Die Drehbewegung ist für den Abtrag und den Verschleiß vernachlässigbar.
12. These 19: Die Drehzahl hat einen Einfluss auf den notwendigen Anpressdruck.

G) Empfehlungen zur Informationsgewinnung

1. Literaturempfehlung
2. Welche nationalen und internationalen Normen sind für Sie von Belang?
3. Mit welchen weiteren Personen sollte ich Ihrer Meinung nach den Kontakt suchen?

Tabelle 36 Beschreibung der befragten Experten und Zuweisung des anonymisierten Kürzels

Personen- gruppe	Beschreibung der Personengruppe	Unternehmenseigene Bezeichnung des Anwendungsbereichs für Bürstenwerkzeuge (zusammengefasst)	Unter- nehmens- nummer	Aufgabenbezeichnung im Unternehmen	Dienstzeit in der Branche [a]	Anonymi- siertes Kürzel	Art der Befragung	Datum der Befragung
Anwendungsberater Technischer Vertrieb	Personen, die gezielt Anwender in der Wahl der Bürsten beraten sowie diese vertreten. Es ist zu erwarten, dass diese Personen auf Erfahrung bei der Anwendung von Bürsten zurückgreifen können	Straßen- und Fußwegreinigung, Landschaftspflege und Anlagenpflege, Viehpflege, Betonsteinfertigung	1	Vertrieb	keine Angabe	1.1.1.1	persönlich, ohne Leitfaden	09.08.2018
				Vertrieb	5	1.1.1.2	telefonisch, mit Leitfaden	09.08.2018 13.11.2018
		Schweißnahtbearbeitung, Entgraten, Entfernen von Rückständen, Strukturieren/Polieren von Oberflächen	2	Anwendungstechniker	35	1.2.2.3	persönlich, ohne Leitfaden	15.08.2018 06.11.2018
		Abdichten, Ableiten, Abtragen, Auftragen, Entgraten, Reinigen, Sortieren, Transportieren, Veredeln	3	Fachberater	keine Angabe	1.2.3.6	persönlich, mit Leitfaden	29.08.2018 06.09.2018
		Sägen, Entgraten	6	Technische Beratung, Vertrieb	keine Angabe	1.2.6.11	persönlich, mit Leitfaden	28.11.2018
		Schrubben, Trennen, Entgraten, Entrosten, Entlacken, Entstauben, Bürsten, Reinigen, Polieren	8	Vertriebsleiter Industriebürsten	keine Angabe	1.2.8.14	persönlich, mit Leitfaden	11.01.2019
		Entgraten, Reinigen, Entrosten	12	Vertrieb / Sales	keine Angabe	1.2.12.17	Mailverkehr, ohne Leitfaden	10.11.2016
		Oberflächenbearbeitung	9	Service	keine Angabe	1.3.9.15	Mailverkehr, ohne Leitfaden	14.09.2018
Entwickler Technischer Leiter	Personen, die im Kerngeschäft nicht dem Vertrieb zuzuordnen sind sondern intern Produktentwicklung betreiben sowie verstärkt im Bereich der Fertigung agieren. Es ist zu erwarten, dass diese Personen Bezug zur Forschung und Entwicklung haben	Schweißnahtbearbeitung, Entgraten, Entfernen von Rückständen, Strukturieren/Polieren von Oberflächen	2	Technischer Vertrieb, Innendienst	keine Angabe	2.2.2.4	persönlich, mit Leitfaden	06.11.2018
		Abdichten, Ableiten, Abtragen, Auftragen, Entgraten, Reinigen, Sortieren, Transportieren, Veredeln	3	Entwickler, Anwendungstechniker	5	2.2.3.7	persönlich, mit Leitfaden	06.09.2018
		Transfertechnik, Reinigungstechnik, Abdichtungstechnik	4	Teamleitung Entwicklung/ Anwendungstechnik	10	2.1.4.8	telefonisch, mit Leitfaden	15.10.2018 21.11.2018
		Entgraten, Reinigen, Entrosten	5	Produktmanager	keine Angabe	2.2.5.9	telefonisch, mit Leitfaden	11.01.2018 24.10.2018
		Abdichten, Ableiten, Abtragen, Auftragen, Entgraten, Reinigen, Sortieren, Transportieren, Veredeln	3	Technischer Innendienst	keine Angabe	2.2.3.15	persönlich, mit Leitfaden	06.09.2018
		Entgraten, Reinigen, Entrosten	5	Entwicklung und Qualitätsmanagement	keine Angabe	2.2.5.10	telefonisch, mit Leitfaden	27.11.2018
		Oberflächenbearbeitung, Abdichten, Transportieren, Breitstrecken, Design	6	Leiter technischer Innendienst	keine Angabe	2.2.6.12	persönlich, mit Leitfaden	12.12.2018
Geschäftsführung	Personen, die u.a. administrative Tätigkeiten übernehmen. Es ist zu erwarten, dass diese Personen einen Überblick über Fertigung, Vertrieb sowie Forschung und Entwicklung haben	Schweißnahtbearbeitung, Entgraten, Entfernen von Rückständen, Strukturieren/Polieren von Oberflächen	2	Geschäftsführer	keine Angabe	3.2.2.5	persönlich, mit Leitfaden	06.11.2018
		Kehrwalzen und Tellerbesen, Besenleisten und Leistenbesen, Technische Bürsten, Bürsten für Klärwerke, Siebtrommelbürsten	7	Geschäftsführer und Inhaber	24	3.1.7.13	telefonisch, mit Leitfaden	09.01.2019

Tabelle 37 Zusammenfassung der Ergebnisse der Leitfadengestützten Experteninterviews sowie die Werkzeugempfehlung (rot: keine Antwort erhalten; grün: Antwort erhalten)

		Person [Anonymisiertes Kürzel]																
		1.1.1.1	1.1.1.2	1.2.2.3	1.2.3.6	1.2.6.11	1.2.8.14	1.2.12.17	1.3.9.15	2.2.2.4	2.2.3.7	2.1.4.8	2.2.5.9	2.2.3.15	2.2.5.10	2.2.6.12	3.2.2.5	3.1.7.13
Kategorie A Fertigung und Anwendung																		
Kategorie B Werkzeugbeschreibung																		
Kategorie C Werkzeugeinsatz																		
Kategorie D Forschung und Entwicklung																		
Kategorie E Werkzeugempfehlung		103	103	105	(102 / 108)	106 / 111	(102 / 108 / 109)	112	1 / 2 / 3	110	(106 / 109)	107	102	(102 / 105)	101 / 102	113	105	104
Kategorie F Erfahrungen (Hypothesen- diskussion)	These 8: Die Bürste verschleißt durch ein „herunterfeilen“ des Besatzes und nicht durch ein Querlegen der Drähte.	0	+	+	0	+	+			+	0	+	+	0	+	+	+	+
	These 16: Bei gleichbleibenden Maschinenparametern ist der Massenverlust annähernd linear über die Zeit.	0	0	0	0	0	+			0	0	+	0	0	-	-	+	-
	These 2: Der Verschleiß steht im Zusammenhang mit der Anpressung.	+	+	+	0	0	+			+	0	+	0	0	+	+	+	+
	These 6: Der Abtrag verbessert sich mit Zunahme der Anpressung bzw. der Zustellung.	-	-	-	0	-	-			-	0	-	0	0	-	-	+	-
	These 3 und 7: Der Verschleiß ist höher aber der Abtrag besser, wenn die Vorschubgeschwindigkeit gering ist.	0	0	+	0	+	+			+	0	0	0	0	+	+	+	+
	These 18: Die Zentrifugalkraft ist innerhalb des Versuchsbereichs vernachlässigbar.	0	+	0	0	0	+			0	0	+	+	0	+	+	+	+
	These 15: Die Schnittgeschwindigkeit steht nicht in linearem Verhältnis zum Verschleiß und zum Abtrag.	0	0	0	0	0	-			0	0	-	0	0	0	-	0	0
	These 17: Die Zunahme der Vorschubgeschwindigkeit kann durch Erhöhung der Drehzahl kompensiert werden.	0	+	+	0	+	+			+	+	+	0	0	0	+	+	0
	These 10: Der Abtrag ist bei neuen Bürsten mit geringeren Verschleißerscheinungen anfangs besser.	0	+	+	+	-	+			+	0	0	0	0	0	0	+	+
	These 11: Die Zunahme der Steifigkeit durch Verringerung der Länge ist vernachlässigbar.	0	0	-	0	0	+			0	0	0	0	0	+	+	-	-
These 12: Die Drehbewegung ist für den Abtrag und den Verschleiß vernachlässigbar.	0	0	+	+	+	+			+	0	-	0	0	+	+	+	+	
These 19: Die Drehzahl hat einen Einfluss auf den notwendigen Anpressung.	0	0	+	0	0	-			+	0	0	0	0	-	0	+	0	
Kategorie G Empfehlungen zur weiteren Informationsgewinnung																		

- Ablehnung
0 Nichtwissen/ keine Angabe
+ Zustimmung

B. Datenbasis Gebäudebestand

Gedämmter Gebäudebestand

Bis 2011 gab es in Deutschland keine belastbaren amtlichen Daten zum aktuellen Bestand an Gebäuden. Unter dem Namen Zensus2011 wurden dann neben Bevölkerungsdaten auch solche über den Bestand und Typ von Gebäuden erhoben. Bestandsdaten für die Jahre nach 2011 liegen als Fortschreibung der zuvor erhobenen Daten vor [23]. Die aktuellsten Angaben zum deutschen Gebäudebestand, unterteilt in Wohngebäude und nicht Wohngebäude, sind dem dena-Gebäudereport [22] sowie Cischinsky und Diefenbach [10, S. 17] zu entnehmen. Eine Eingruppierung in Baualtersklassen wird nicht vorgenommen. Diese liefert das IWU in [24, S. 18] sowie die Anzahl der Wohnungen bis 2009, wobei das Dokument erstmals 2005 entstanden und daraufhin überholt wurde. Hochhäuser sowie Nichtwohngebäude werden innerhalb dieser Arbeit aufgrund geringer Anzahl und unzureichender Datenlage ausgeschlossen. Im Fokus stehen Ein- und Mehrfamilienhäuser, nach Definition der IWU. Diese decken den Großteil des Gebäudebestandes ab. Als Grundlage diente [135]. Der Bestand gemäß Bautätigkeitsstatistik nach Angaben des Statistischen Bundesamts (vgl. [136]) für die Jahre 2010 bis 2016 ist einer Studie [10, S. 37] zu entnehmen, wobei lediglich eine Unterteilung in Ein-/Zweifamilienhäuser sowie Mehrfamilienhäuser vorgenommen wird. Angaben der gedämmten Außenwand nach Gebäudetyp und Baualtersklasse bis 2009 liefert [137]. Das IWU ([10, S. 44–48]) gibt grundlegende Daten über durchgeführte Wärmedämmmaßnahmen bis einschließlich 2016 aus, wobei lediglich die Zeitabschnitte „Altbauten bis Baujahr 1978“ sowie „Neubauten ab Baujahr 2010“ unterschieden werden. Demnach liegt bei 50,4 Prozent aller Wohngebäude eine Dämmung der Außenwand vor. Im unteren Tabellenteil werden auch die gedämmten Flächenanteile berücksichtigt. Nach Angaben der in [10] befragten Gebäudeeigentümer beträgt der mit Dämmschichten versehene Flächenanteil im Durchschnitt über alle Wohngebäude 82,7 Prozent. Wird der Fokus auf die Unterteilung der Baualtersklassen gelegt, so stellt sich heraus, dass der Anteil der wärmedämmten Altbauten deutlich niedriger liegt als im Durchschnitt über alle Wohngebäude. Werden dabei im Speziellen nachträgliche Modernisierungsraten betrachtet, so weisen 27,8 Prozent der „Altbauten bis 1979“ eine nachträglich gedämmte Bauteilfläche der Außenwand auf, dem gegenüber stehen 18,8 Prozent der „Neubauten ab 2010“ [10, S. 46]. Wurde bisher von gedämmter Außenwand gesprochen, so ist eine weitere Unterscheidung der Art der Wärmedämmung vorzunehmen. Unterschieden wird zwischen „Außendämmung“, „Innendämmung“, „Dämmung im Zwischenraum“ und „Dämmung im Bauteil selbst“. Die Art der Wärmedämmung unterscheidet sich anteilig in der Größenordnung je nach Außenwandtyp. Da bisher keine Unterscheidung vorgenommen wurde, werden entsprechend [10, S. 55] die Angaben aller Außenwandtypen im Gesamtbestand angesetzt. Eine genauere Betrachtung nach Außenwandtyp folgt im nächsten Abschnitt. Denn es gilt zu beachten: Auch wenn innerhalb dieser Arbeit lediglich der Außenwandtyp Beton betrachtet wird, ist ein Abtrag von WDVS anderer Außenwandtypen denkbar. Entscheidend ist dabei die Art der Wärmedämmung: Unter Verwendung eines Bürstenwerkzeugs ist lediglich die Bearbeitung außenliegender Dämmung möglich. Nach dieser Erläuterung der Datenquellen wird folglich auf die Hochrechnung eingegangen. Von Interesse sind dabei die Anzahl der außenwandgedämmten Wohngebäude nach Baualtersklasse, nach Gebäudetyp, die gedämmten Flächenanteile eines sowie aller außenwandgedämmten Gebäude. Die Datengrundlage sowie die Hochrechnung sind Tabelle 38 zu entnehmen. Zu erwähnen ist, dass das IWU in seinen Berichten oftmals Fehlerbandbreiten angibt. Dieser beziffert die Standardabweichung, die Häufigkeitsverteilungen sind demnach in Prozent +/- angegeben. Innerhalb der hier aufgeführten Hochrechnung wird der Mittelwert verwendet.

Werden die Häufigkeiten der gedämmten Flächenanteile in Prozent nun mit den Angaben der Außenflächen aus [137] kombiniert, so lassen sich für einen Großteil der innerhalb der Tabelle betrachteten Baualtersklassen die gedämmten Außenwand-Flächenanteile in Quadratmeter bestimmen. Für die Baualtersklassen für welche die Häufigkeit der gedämmten Flächenanteile nicht ermittelt werden konnte, wurde der Schnitt über alle Baualtersklassen angesetzt. Wird nun die Anzahl der Wohngebäude mit der Häufigkeit der Wohngebäude verknüpft, die einerseits über eine Dämmung verfügen, andererseits als Wärmedämmung eine Außendämmung aufweisen, so lässt sich die Anzahl der außenwandgedämmten Wohngebäude unterteilt nach Baualtersklasse und Gebäudetyp bestimmen. Eine Unterscheidung nach Baualtersklassen war dabei nicht möglich, da lediglich eine Datenquelle unabhängig nach Gebäudetyp sowie Alter vorliegt. Eine Korrelation der Anzahl außenwandgedämmter Wohngebäude sowie der Häufigkeit gedämmter Außenwand-Flächenanteile liefert die gedämmten Außenwand-Flächenanteile aller Gebäude mit Dämmung außen, unterteilt nach Wohngebäudetyp. Lediglich bei Mehrfamilienhäusern ab 13 Wohnungen und einer Baualtersklasse nach 1979 konnten keinerlei Informationen zu den Außenwandflächen ermittelt werden. Eine Hochrechnung war diesbezüglich nur bei der Anzahl der außenwandgedämmten Wohngebäude bis 2009 möglich. Selbst ohne vollständige Angaben der Gebäudeaußenflächen der Mehrfamilienhäuser ist ersichtlich, dass diese in Summe in Bezug auf gedämmte Außenwandflächen aller Wohnungen mit Dämmung überwiegen. Es wird erwartet, dass der tatsächliche Wert noch deutlich höher liegt als in der Hochrechnung ermittelt. Anhand aufgeführter statistischer Erhebungen wäre teilweise eine Gliederung nach Region möglich gewesen. Darauf wurde gezielt verzichtet.

Tabelle 38 Deutscher Wohngebäudebestand: Hochrechnung gedämmter Außenwand Flächenanteile und Wohngebäude, vgl. [22, 10, 24, 135–137]

Gebäudetyp	Baualterklassen											Summe Wohngebäude bis einschl. 2016	Vgl. Summe Gebäude nach dena 2016
	1.-2. WsVo						3. WsVo	EnEV 02/07	EnEV 09				
	bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2004	2005 - 2009		
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K			
Ein-/Zweifamilienhäuser													
freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser													
Anzahl Wohngebäude [-]	330.000	966.000	1.131.000	859.000	1.509.000	1.507.000	704.000	1.160.000	1.035.000	775.000			
Außenwandfläche [m²]	196,04			119,8	185,33	170,5	161,4	213,3	128,6	190,86			
Ein-/Zweifamilienhaus als Doppelhaushälfte, Reihenhaus oder sonstiger Gebäudetyp													
Anzahl Wohngebäude [-]	148.000	492.000	710.000	447.000	633.000	611.000	335.000	652.000	619.000	384.000			
Außenwandfläche [m²]	76,47		66,14	136,66	42,42	55,72	56,1	52,9	45,2	142,7			
Mehrfamilienhäuser													
Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen													
Anzahl Wohngebäude [-]	54.000	442.000	388.000	356.000	586.000	412.000	146.000	309.000	244.000	85.000			
Außenwandfläche [m²]	148		325,54	325,54	2041	338	449,13	776,8	697,8	1700			
Mehrfamilienhaus ab 13 Wohnungen													
Anzahl Wohngebäude [-]	600	28.700	7.400	17.300	34.000	50.100	15.000	28.700	20.900	7.600			
Außenwandfläche [m²]	307,40		1.246,00	1.378,00	3.249,79	2.132,00							
Summe Anzahl Wohngebäude [-]	532.600	1.928.700	2.236.400	1.679.300	2.762.000	2.580.100	1.200.000	2.149.700	1.918.900	1.251.600	707.967	18.947.267	18.800.000
Anteil Wohngebäude [%]	3%	10%	12%	9%	15%	14%	6%	11%	10%	7%	4%	100%	
Ein-/Zweifamilienhäuser mit Wärmedämmung Außenwand													
Wohngebäude mit Dämmung					43,80%							76,20%	49,60%
gedämmter Flächenanteil (falls Dämmung vorhanden)					73,70%							97,60%	82,90%
Mehrfamilienhäuser mit Wärmedämmung Außenwand													
Wohngebäude mit Dämmung					52,10%							79,90%	54,30%
gedämmter Flächenanteil (falls Dämmung vorhanden)					76,00%							96,60%	81,60%
Wärmedämmung Außenwand alle Wohngebäude													
Wohngebäude mit Dämmung					45,50%							76,50%	50,40%
gedämmter Flächenanteil (falls Dämmung vorhanden)					74,20%							97,50%	82,70%
Art der Wärmedämmung nach Außenwandtyp - alle Außenwandtypen													
Außendämmung													60,10%
Innendämmung													9,00%
Dämmung im Zwischenraum													24,50%
Dämmung im Bauteil selbst													6,30%

Hochrechnungen aus vorhandenen Datenbeständen														
Gebäudetyp	Baualterklassen											Anzahl Außenwandgedämmter Wohngebäude	gedämmte Außenwandflächen [m²] bis 2009/ Außenwanddämmung Wohngebäude bis 2016	Summe Anzahl Außenwandgedämmter Wohngebäude bis 2016
	1.-2. WsVo						3. WsVo	EnEV 02/07	EnEV 09					
	bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2004	2005 - 2009			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K				
Ein-/Zweifamilienhäuser														
freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser														
Anzahl Außenwandgedämmter Wohngebäude [-]	86.869	254.288	297.722	226.121	397.226	396.700	209.860	345.791	308.529	231.024				
gedämmte Außenwand-Flächenanteil [m²]	144,48		174,89	88,29	136,59	125,66	133,80	176,83	106,61	158,22				
gedämmter Außenwand-Flächenanteil [m²] aller Gebäude mit Dämmung Außen	49.290.789		52.068.661	19.964.850	54.256.408	49.848.685	28.079.338	61.144.799	32.892.130	36.553.360				
Ein-/Zweifamilienhaus als Doppelhaushälfte, Reihenhaus oder sonstiger Gebäudetyp														
Anzahl Außenwandgedämmter Wohngebäude [-]	38.959	129.513	186.899	117.667	166.630	160.838	99.862	194.359	184.521	114.469				
gedämmte Außenwand-Flächenanteil [m²]	76,47		66,14	136,66	42,42	55,72	56,1	52,9	45,2	142,7				
gedämmter Außenwand-Flächenanteil [m²] aller Gebäude mit Dämmung Außen	12.883.078		12.361.499	16.080.425	7.068.430	8.961.917	5.602.267	10.281.570	8.340.368	16.334.707				
Mehrfamilienhäuser														
Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen														
Anzahl Außenwandgedämmter Wohngebäude [-]	16.909	138.399	121.491	111.471	183.489	129.006	47.646	100.840	79.628	27.739				
gedämmte Außenwand-Flächenanteil [m²]	112,48		247,41	247,41	1.551,16	256,88	366,49	633,87	569,40	1.387,20				
gedämmter Außenwand-Flächenanteil [m²] aller Gebäude mit Dämmung Außen	17.469.046		30.058.124	27.579.104	284.620.651	33.139.023	17.461.815	63.919.322	45.340.390	38.479.756				
Mehrfamilienhaus ab 13 Wohnungen														
Anzahl Außenwandgedämmter Wohngebäude [-]	188	8.987	2.317	5.417	10.646	15.687	4.895	9.366	6.821	2.480				
gedämmte Außenwand-Flächenanteil [m²]	233,62		1.246,00	1.378,00	3.249,79	2.132,00								
gedämmter Außenwand-Flächenanteil [m²] aller Gebäude mit Dämmung Außen	2.143.371		2.887.101	7.464.617	34.597.635	33.445.456								
Summe Anzahl Außenwandgedämmter Wohngebäude [-]	142.924	531.187	608.429	460.677	757.991	702.231	362.263	650.356	579.499	375.713	325.703	5.496.973		
Anteil Außenwandgedämmter Wohngebäude	3%	10%	11%	8%	14%	13%	7%	12%	11%	7%	6%	100%		
Summe gedämmte Außenwand-Flächenanteil [m²]	81.786.283		97.375.385	71.088.995	380.543.124	125.395.081	51.143.420	135.345.690	86.572.888	91.367.822		1.120.618.690		
Anteil gedämmte Außenwandflächen [%]	7%		9%	6%	34%	11%	5%	12%	8%	8%		100%		

Außenwandgedämmte Gebäude

Neben der Anzahl der gedämmten Außenwandflächen ist ebenfalls der Außenwandtyp von Interesse. Dieser ist unterteilt nach Ein-/Zweifamilienhäuser sowie Mehrfamilienhäuser dem Bericht der IWU [10, S. 53] zu entnehmen. Ebenso liefert dieser eine Möglichkeit der Unterscheidung nach Art der Wärmedämmung nach Außenwandtyp (vgl. [10, S. 55]). Demnach sind bezogen auf alle Wohngebäude mit Wärmedämmung beim Außenwandtyp „Betonfertigteile, Großtafelbauweise, Plattenbau“ etwa 83 Prozent Außendämmung vorhanden. Überwiegt in Deutschland das Mauerwerk mit etwa 90 Prozent als Außenwandtyp in Wohngebäuden, so gilt dies nicht für die Anteile der gedämmten Außenwandtypen. Die entsprechende Datengrundlage liefert [10, S. 54]. Diese zeigt die insgesamt gedämmten Bauteilflächen bzw. Außenwandflächen nach Außenwandtyp für alle Wohngebäude. Dieser ergibt sich aus der Häufigkeit der Wohnungen mit Dämmung sowie der gedämmten Flächenanteile. Die getrennten Anteile sind dabei nicht gegeben, lediglich deren Summe. Der Außenwandtyp „Betonfertigteile, Großtafelbauweise, Plattenbau“ überwiegt. Dort sind 79,4 Prozent der Bauteilfläche insgesamt gedämmt, bezogen auf alle Wohngebäude. Der Anteil der Wohnungen mit Dämmung muss demnach höher liegen. Wird der gedämmte Flächenanteil aller Wohngebäude, unabhängig der Baualtersklasse von 82,70 Prozent angesetzt ([10, S. 45]), so ist zu erwarten, dass etwa 96 Prozent aller Wohngebäude mit dem Außenwandtyp „Betonfertigteile, Großtafelbauweise, Plattenbau“ über eine Dämmung verfügen. Wird dieser Ansatz weiterverfolgt, so liegen alle notwendigen Daten für eine Hochrechnung zugrunde.

Eine Korrelation der Häufigkeit des Außenwandtyps mit der Art der Wärmedämmung nach Außenwandtyp sowie der Wohngebäude mit Dämmung unter Annahme eines gedämmten Flächenanteils von 82,7 Prozent (vgl. [10, S. 45]) ergibt die Häufigkeit einer Außendämmung der Außenwand pro Außenwandtyp sowie Gebäudetyp und Baualtersklasse. Da weder für die Art der Wärmedämmung nach Außenwandtyp noch des Außenwandtyps immer Informationen nach Baualtersklasse vorliegen, wurde der Wert über alle Gebäude bzw. Baualtersklassen angesetzt. Zuletzt ist vor allem die Anzahl der gedämmten Wohngebäude mit einer Außenfassade aus „Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau“ zu ermitteln. Dazu werden die entsprechenden Häufigkeiten mit dem zuvor in Tabelle 39 ermittelten Wohngebäudebestand nach Baualtersklasse abgeglichen. Auch hier gilt, sollte eine Häufigkeit nicht nach Baualtersklasse angegeben sein, so wurde der Wert über alle Baualtersklassen angesetzt. Daraus ergeben sich insgesamt 329.602 gedämmte Gebäude mit Dämmung der Außenwand aus „Betonfertigteilen, Großtafelbauweise, Plattenbau“, wobei Mehrfamilienhäuser überwiegen. Für eine Ermittlung der insgesamt gedämmten Bauteilflächen dieser Kategorie wurde die Anzahl der Wohngebäude mit insgesamt gedämmten Flächenanteilen genutzt. Der zuvor gewählte Ansatz der gedämmten Flächenanteile von 82,7 Prozent musste für diese Berechnung nicht weiter verfolgt werden, da lediglich insgesamt gedämmte Bauteilflächen von Interesse sind. Daraus ergibt sich eine gedämmte Außenwandfläche von 134,55 Millionen Quadratmetern. Die entsprechenden Daten werden in Tabelle 39 aufgeführt.

Tabelle 39 Anzahl Wärmedämmter Gebäude und summierter Fläche des Außenwandtyps „Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau“, erstellt in Anlehnung an [135, 24, 26, 22, 10, 15, 137, 136]

	Baualterklassen											alle Wohngebäude		
	bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2004	2005 - 2009		2010 - 2016	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K			
Außenwandtyp Ein-/Zweifamilienhäuser														
einschaliges Mauerwerk			65,10%										59,90%	
zweischaliges Mauerwerk			26,60%										29,00%	
Fachwerk			4,30%										2,80%	
Holz-, Fertigteile, sonstiger Holzbau			2,40%										6,10%	
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau			0,80%										1,70%	
Sonstiges			0,70%										0,50%	
Außenwandtyp Mehrfamilienhäuser														
einschaliges Mauerwerk			69,40%										64,90%	
zweischaliges Mauerwerk			20,80%										24,20%	
Fachwerk			2,80%										2,30%	
Holz-, Fertigteile, sonstiger Holzbau			0,10%										0,40%	
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau			6,80%										7,90%	
Sonstiges			0,20%										0,20%	
Außenwandtyp alle Wohngebäuden														
einschaliges Mauerwerk			65,90%				58,30%			48,20%		53,10%	60,70%	
zweischaliges Mauerwerk			25,50%				30,50%			34,50%		26,80%	28,20%	
Fachwerk			4,10%				0,70%			1,00%		0,20%	2,70%	
Holz-, Fertigteile, sonstiger Holzbau			2,00%				6,80%			11,90%		14,10%	5,10%	
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau			2,00%				3,50%			4,00%		4,70%	2,70%	
Sonstiges			0,60%				0,10%			0,40%		1,10%	0,50%	
Art der Wärmedämmung nach Außenwandtyp														
<i>alle Außenwandtypen</i>														
Außendämmung													60,10%	
Innendämmung													9,00%	
Dämmung im Zwischenraum													24,50%	
Dämmung im Bauteil selbst													63,00%	
<i>einschaliges Mauerwerk</i>														
Außendämmung													88,00%	
Innendämmung													12,00%	
<i>zweischaliges Mauerwerk</i>														
Außendämmung													32,20%	
Innendämmung													5,80%	
Dämmung im Zwischenraum bzw. im Bauteil selbst													62,00%	
<i>Fachwerk</i>														
Außendämmung													52,80%	
Innendämmung													31,50%	
Dämmung im Zwischenraum bzw. im Bauteil selbst													15,70%	
<i>Holz-, Fertigteile, sonstige Holzbauweise</i>														
Außendämmung													49,60%	
Innendämmung													2,50%	
Dämmung im Zwischenraum bzw. im Bauteil selbst													47,90%	
<i>Betonfertigteile, Großtafelbauweise, Plattenbau</i>														
Außendämmung													83,00%	
Innendämmung													1,20%	
Dämmung im Zwischenraum bzw. im Bauteil selbst													15,80%	
Wärmedämmung nach Außenwandtyp alle Wohngebäude, insgesamt gedämmte Bauteilflächen														
alle Außenwandtypen													41,70%	
einschaliges Mauerwerk													29,20%	
zweischaliges Mauerwerk													58,50%	
Fachwerk													45,70%	
Holz-, Fertigteile, sonstiger Holzbau													78,20%	
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau													79,40%	
Hochrechnungen aus vorhandenen Datenbeständen														
Wärmedämmung Ein-/Zweifamilienhäuser nach Außenwandtyp, insgesamt gedämmte Wohngebäude mit Außendämmung														
einschaliges Mauerwerk													20,23%	
zweischaliges Mauerwerk													6,61%	
Fachwerk													1,25%	
Holz-, Fertigteile, sonstiger Holzbau													1,13%	
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau													0,64%	
Wärmedämmung Mehrfamilienhäuser nach Außenwandtyp, insgesamt gedämmte Wohngebäude														
einschaliges Mauerwerk													21,56%	
zweischaliges Mauerwerk													4,74%	
Fachwerk													0,82%	
Holz-, Fertigteile, sonstiger Holzbau													0,05%	
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau													5,42%	
Wärmedämmung alle Wohngebäude nach Außenwandtyp, insgesamt gedämmte Wohngebäude														
einschaliges Mauerwerk										18,11%		14,98%	16,50%	18,86%
zweischaliges Mauerwerk										6,95%		7,86%	6,10%	6,42%
Fachwerk										0,20%		0,29%	0,06%	0,79%
Holz-, Fertigteile, sonstiger Holzbau										3,19%		5,58%	6,61%	2,39%
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau										2,79%		3,19%	3,75%	2,15%
Anzahl Wärmedämmung Ein-/Zweifamilienhäuser nach Außenwandtyp Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau, insgesamt gedämmte Bauteilflächen mit Außendämmung														
<i>freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser</i>														
Anzahl Wohngebäude [-]	2.104	6.158	7.210	5.476	9.620	9.607	9.537	15.714	14.021	10.499				
<i>Ein-/Zweifamilienhaus als Doppelhaushälfte, Reihenhäuser oder sonstiger Gebäudetyp</i>														
Anzahl Wohngebäude [-]	944	3.137	4.526	2.850	4.035	3.895	4.538	8.833	8.386	5.202				
Anzahl Wärmedämmung Mehrfamilienhäuser nach Außenwandtyp Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau, insgesamt gedämmte Bauteilflächen mit Außendämmung														
<i>Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen</i>														
Anzahl Wohngebäude [-]	2.926	23.951	21.025	19.291	31.754	22.325	9.191	19.453	15.361	5.351				
<i>Mehrfamilienhaus ab 13 Wohnungen</i>														
Anzahl Wohngebäude [-]	33	1.555	401	937	1.842	2.715	944	1.807	1.316	478				
Summe Anzahl Außenwandgedämmter Wohngebäude [-]	6.006	34.801	33.162	28.554	47.252	38.543	24.211	45.807	39.083	21.530	10.653	329.602		
Summe gedämmte Außenwand-Flächenanteil [m²]	5.290.795	7.736.104	7.126.453	60.578.952	12.158.506	5.496.070	14.439.961	11.929.399	9.794.109				134.550.350	

gedämmte
Außenwand-
flächen [m²]
bis 2009

Festigkeitsklasse Beton

Die Druckfestigkeitsklassen sowie Betonkonsistenzen der letzten Jahre sind jeweils den Berichten des Bundesverbands der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB) zu entnehmen. Da lediglich die aktuellsten Ausgaben online verfügbar sind, siehe Tabelle 40, wurde der Verband kontaktiert. Einer darauffolgenden persönliche Mitteilung können weitere Angaben ab dem Jahr 1976 entnommen werden, welche in Abbildung B-1 dargestellt sind. Die Festigkeitsklasse C25/30 wurde in der Vergangenheit nicht separat, sondern unter C20/25 bis C25/30 zusammengefasst. Dennoch überwiegt seit der getrennten Erfassung der Anteil der Druckfestigkeitsklasse C25/30.

Tabelle 40 Produktionsverteilung deutsche Transportbetonindustrie, vgl. [138–141]

Anteil der Druckfestigkeitsklasse an der Gesamtproduktion nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 (Angaben in Prozent)						
Druckfestigkeit	2012	2013	2014	2015	2016	2017
C8/10	1,1	1,2	1,2	1,1	1	1
C12/15	7,9	7,2	7,3	6,9	6,8	6,8
C16/20	2,5	2,4	2,6	2	1,9	2
C20/25	19	16,2	16	14,8	14,4	14,5
C25/30	33,4	35,4	37,9	39,5	39,8	39,4
C30/37	22,1	19,2	21,7	21,6	21,4	20,8
C35/45	10,6	9,7	10,6	10,4	11,2	11,8
C40/50	-	-	0,5	0,7	0,7	0,6
C45/55	1,4	2,5	0,5	0,7	0,6	0,6
C50/60	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3	0,4
Andere	1,6	5,7	1,5	2,3	2,1	2,1

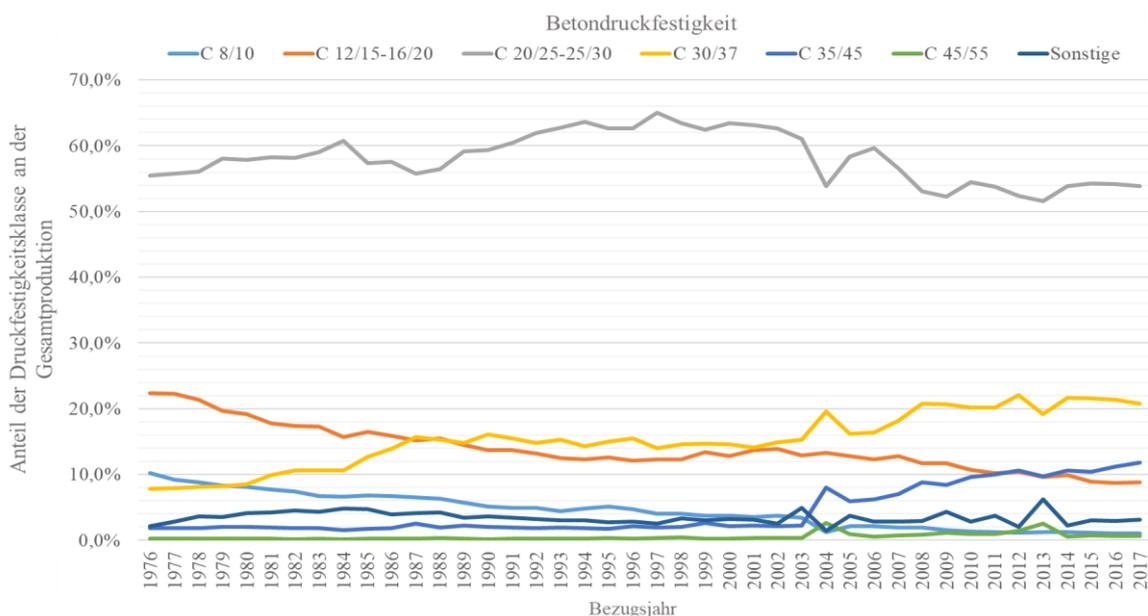


Abbildung B-1 Produktionsverteilung deutsche Transportbetonindustrie [9]

C. Wärmedämmverbundsysteme

Nach der Klassifikation für den Normalbeton C25/30 erfolgt die Mischung durch die Firma Heidelberger Beton Karlsruhe GmbH & Co.KG. Die Bestandteile der Rezeptur beeinflussen maßgeblich die mechanischen Eigenschaften des Betons. Die Hauptmerkmale der Rezeptur des Betons sind in Tabelle 41 zusammengefasst. Die Herstellerangaben der verwendeten Systembestandteile für die WDVS-Aufbauten sind Tabelle 42 bis Tabelle 46 zu entnehmen.

Tabelle 41 Merkmale der Betonrezeptur

Hauptmerkmale des Betons	
Festigkeitsklasse	C25/30
Expositionsklasse	XC4, XF1, XA1
Konsistenzklasse	F5
Größtkorn	08
Festigkeitsentwicklung	mittel
Zementart	CEM II 42,5 N
Zusatzstoff	Flugasche
Zusatzmittel	VC 1020 X (FM)
Klasse des Chloridgehalts	CL 0,4

Tabelle 42 Systembestandteil 1: Klebstoffe und Befestigung

Sto Baukleber (Mineralischer Klebemörtel)	
Rohdichte	1,5 g/cm ³
Biegezugfestigkeit (28 Tage)	5,6 N/mm ²
Druckfestigkeit (28 Tage)	19,7 N/mm ²
E-Modul dynamisch (28 Tage)	11.500 N/mm ²
Mischungsverhältnis	6,0 l Wasser pro 25 kg Material
Verbrauch (EPS)	4,00 – 4,5 kg/m ²
Verbrauch (Mineralwolle)	5,0 – 6,00 kg/m ²
Verbrauch pro mm Schichtdicke	1,33 kg/mm ²
Aushärtung	ca. 1 Tag/mm Schichtdicke
Überarbeitung	ca. 24-48 Stunden
Zusammensetzung	Zement, Kalkhydrat, Polymerpulver, Mineralische Füllstoffe, Verdicker, Chromatreduzierer
Sto Level Uni (Mineralischer Klebe- und Armierungsmörtel/Unterputz)	
Rohdichte	1,5 g/cm ³
Biegezugfestigkeit (28 Tage)	5,6 N/mm ²
Druckfestigkeit (28 Tage)	19,7 N/mm ²
E-Modul dynamisch (28 Tage)	11.500 N/mm ²
Mischungsverhältnis	6,0 l Wasser pro 25 kg Material
Verbrauch (EPS)	4,50 – 6,0 kg/m ²
Verbrauch (Mineralwolle)	6,0 – 7,00 kg/m ²
Verbrauch pro mm Schichtdicke	1,28 kg/mm ²
Aushärtung	ca. 1 Tag/mm Schichtdicke
Überarbeitung	ca. 24-48 Stunden
Zusammensetzung	Volldeklaration nach Vergaberichtlinie "natureplus®, Weißzement, Polymerpulver, Kalkhydrat, Mineralische Füllstoffe, Mineralische Leichtzuschlagstoffe, Organische Füllstoffe, Verdicker, Hydrophobierungsmittel

Sto Turbofix Mini (Einkomponenten PU-Schaum)	
Haftzugfestigkeit (28 Tage)	≥ 0,08 N/mm ²
Verbrauch	150 ml/m ² , Ausreichend für ca. 4 - 6 m ²
Aushärtung/ Überarbeitung	Nach ca. 2 Stunden ist eine ausreichende Haftung zum Untergrund für die weitere Bearbeitung erreicht.
Zusammensetzung	PU80PU - Montageschäume

Sto Thermodübel II UEZ 8/60	
Format	Durchmesser 8 mm Tellerdurchmesser 60 mm
Tragfähigkeit Dübelsteller	2,08 kN
Tellersteifigkeit	0,6 kN/mm
Bohrlochtiefe	≥ 90 mm

Tabelle 43 Systembestandteil 2: Dämmstoffe

Sto-Dämmplatte Top32 (aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum)	
Format	100 x 50 cm
Dicke	2 / 4 cm
Dichte	>17 kg/m ³

Sto-Polystyrol-Hartschaumplatte PS15SE 034	
Format	100 x 50 cm
Dicke	2 / 4 cm

Sto-Steinwolleplatte Xtra	
Format	120 x 40 cm
Dicke	2 / 10 cm
Dichte	85 kg/m ³

Tabelle 44 Systembestandteil 3 Unterputz

StoLevell Classic (Organische, zementfreie Leichtarmierungsmasse/Unterputz)	
Dichte	1,4 – 1,6 kg/cm ³
Verbrauch	2,50 – 4,00 kg/m ²
Überarbeitung	Nach frühestens 24 Stunden
Zusammensetzung	Polymerdispersion

StoLevell Uni (Mineralischer Klebe- und Armierungsmörtel/Unterputz)	
Festmörtelrohichte	1,4 g/cm ³
Biegezugfestigkeit (28 Tage)	2,9 N/mm ²
Druckfestigkeit (28 Tage)	7,4 N/mm ²
Mischungsverhältnis	6,3 l Wasser pro 25 kg
Verbrauch (EPS)	4,50 – 6,00 kg/m ²
Verbrauch (Mineralwolle)	6,00 – 7,00 kg/m ²
Verbrauch pro mm Schichtdicke	1,28 kg/m ²
Aushärtung	ca. 1 Tag/mm Schichtdicke
Überarbeitung	ca. 24-48 Stunden
Zusammensetzung	Volldeklaration nach Vergaberichtlinie "natureplus®", Weißzement, Polymerpulver, Kalkhydrat, Mineralische Füllstoffe, Mineralische Leichtzuschlagstoffe, Organische Füllstoffe, Verdicker, Hydrophobierungsmittel

Tabelle 45 Systembestandteil 4: Armierung

Sto-Glasfasergewebe	
Flächengewicht	165 g/m ²
Maschenweite	6,0 mm
Reißfestigkeit Anlieferungszustand	> 1.750 N/50mm
Restreißfestigkeit nach Alterung	> 1.000 N/50mm

Tabelle 46 Systembestandteil 5: Zwischen- und Schlussbeschichtung

Sto-Putzgrund (gefüllter, pigmentierter, organischer Voranstrich)	
Dichte	1,4 – 1,6 g/cm ³
Verbrauch	0,3 kg/m ²
Zusammensetzung	Polymerdispersion, Titandioxid, Mineralische Füllstoffe, Silikatische Füllstoffe, Wasser, Glykolether, Aliphaten, Verdicker, Dispergiermittel, Netzmittel, pH-Regulatoren, Lagerungsschutzmittel auf Basis BIT/MIT (1:1), Lagerungsschutzmittel auf Basis Bronopol (INN)

StoLotusan K (Oberputz mit Lotus-Effect® Technology in Kratzputzstruktur)	
Dichte	1,7 – 1,9 g/cm ³
Verbrauch	1,90 kg/m ²
Überarbeitung	Nach frühestens 24 Stunden
Zusammensetzung	Polymerdispersion, Titandioxid, Mineralische Füllstoffe, Aluminiumhydroxid, Silikatische Füllstoffe, Organische Füllstoffe, Wasser, Glykolether, Alkohole, Hydrophobierungsmittel, Dispergiermittel, Entschäumer, Verdicker, Beschichtungsschutzmittel auf Basis, Terbutryn / OIT / ZPT

StoSilico K (Silikonharz-Oberputz)	
Dichte	1,7 – 1,9 g/cm ³
Verbrauch	2 kg/m ²
Überarbeitung	Nach frühestens 24 Stunden
Zusammensetzung	Polymerdispersion, Silikonharzemulsion, Titandioxid, Mineralische Füllstoffe, Aluminiumhydroxid, Silikatische Füllstoffe, Organische Füllstoffe, Wasser, Aliphaten, Glykolether, Dispergiermittel, Verdicker, Netzmittel, Entschäumer, Beschichtungsschutzmittel auf Basis OIT / Diuron, Lagerungsschutzmittel auf Basis BIT/MIT (1:1)

D. Statistische Datenanalyse

Nachfolgend werden die einzelnen Teststatistiken dieser Arbeit ausführlich erläutert sowie die Ergebnisse der Datenanalyse mit dem Softwareprogramm JMP aufgeführt.

Zuvor wird die Überschreitungswahrscheinlichkeit, der sogenannten p-Wert, erklärt. Er bildet einen wichtigen Bestandteil des statistischen Hypothesentests und repräsentiert einen möglichen Ansatz zwischen der Null- und der Alternativhypothese zu entscheiden, indem dieser mit dem Signifikanzniveau α verglichen wird. Die Nullhypothese ist dann zu verwerfen, falls der p-Wert kleiner ist als das Signifikanzniveau α . Ansonsten wird diese beibehalten [142].

Der p-Wert ist definiert als

$$p := 2 P(Z > |z|) \quad (\text{D.1})$$

Mit
$$z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma} \sqrt{n} \quad (\text{D.2})$$

Varianzhomogenität

Getestet wird die Gleichheit der Varianzen in g unabhängigen Gruppen. Vorausgesetzt wird, dass es sich bei den Stichproben um unabhängige Zufallsstichproben handelt. Innerhalb der experimentellen Versuche ermöglicht dies die Randomisierung. Die Datenanalysesoftware JMP bietet als Teststatistik den Bartlett, Levene, Brown-Forsythe und O'Brien Test. Nach [116, S. 63] ist als Prüfmethode der ANOVA der Levene-Test geeignet. Er entspricht der einfaktoriellen Varianzanalyse mit dem Unterschied, dass die einzelnen Messungen vorab auf den Gruppenmittelwert des jeweiligen WDVS-Aufbaus transformiert werden. Denn große Varianzen führen im Mittel zu größeren absoluten Abweichungen als kleinere Varianzen, deren Unterschied wird durch die Varianzanalyse entdeckt. Die Hypothesen für den Test auf Gleichheit der Varianzen lauten [114]

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_g^2$$

versus
$$H_1 : \sigma_k^2 \neq \sigma_g^2$$

Für den Levene-Test werden in jeder Gruppe die absoluten Differenzen zum Mittelwert berechnet, mit

$$D_{kj} = |X_{kj} - \bar{X}_k| \quad (\text{D.3})$$

Im Anschluss folgt für diese Differenzen D_{kj} eine Varianzanalyse. Der p-Wert des Levene-Tests entspricht dem p-Wert der durchgeführten Varianzanalyse. Fällt die Entscheidung zu Gunsten der Alternativhypothese (p-Wert $< \alpha$), sind mindestens zwei Varianzen der Differenzen signifikant unterschiedlich. Andernfalls (p-Wert $\geq \alpha$) liefert der Test keinen Hinweis auf ungleiche Varianzen. Es ergeben sich für die Qualitätsmerkmale Abtrag und Massenverlust die in Tabelle 47 bis Tabelle 49 aufgeführten Testergebnisse.

Tabelle 47 Versuchsplan I-I: Ergebnisse Varianzhomogenität für das Qualitätsmerkmal Abtrag

Test	Freiheitsgrad Zähler	Freiheitsgrad Nenner	Teststatistik	p-Wert
Levene	15	240	0,7438	0,7385
Brown-Forsythe	15	240	0,6973	0,7864
O'Brien	15	240	0,8616	0,6081
Bartlett	15		0,7786	0,7032

Tabelle 48 Versuchsplan I-I: Ergebnisse Varianzhomogenität für das Qualitätsmerkmal Absoluter Massenverlust

Test	Freiheitsgrad Zähler	Freiheitsgrad Nenner	Teststatistik	p-Wert
Levene	15	240	0,2105	0,9994
Brown-Forsythe	15	240	0,1747	0,9998
O'Brien	15	240	0,2532	0,9981
Bartlett	15		0,1854	0,9997

Tabelle 49 Versuchsplan I-I: Ergebnisse Varianzhomogenität für das Qualitätsmerkmal Relativer Massenverlust

Test	Freiheitsgrad Zähler	Freiheitsgrad Nenner	Teststatistik	p-Wert
Levene	15	240	0,3582	0,9730
Brown-Forsythe	15	240	0,3385	0,9907
O'Brien	15	240	0,4185	0,9875
Bartlett	15		0,2224	0,9992

Wie ersichtlich wird, führt bei keinem der statistischen Tests der p-Wert zum Verwerfen der Nullhypothese gleicher Varianzen ($p > \alpha$).

Normalverteilung

Die Voraussetzung einer Normalverteilung der Ergebnisse innerhalb jeder Faktorstufe des WDVS-Aufbaus lässt sich ebenfalls mit einem statistischen Test stützen. Als sogenannter Normalitätstest hat sich der Shapiro-Wilk-Test durchgesetzt. Er ist für Gruppengrößen zwischen 15 und 30 Stichproben geeignet [114]. Hier lautet die Nullhypothese, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung F der Normalverteilung F_0 entspricht

$$H_0 : F = F_0$$

versus

$$H_1 : F \neq F_0$$

Für die Normalverteilung F_0 können theoretische Quantile (q_1, \dots, q_n) bestimmt werden. Die Teststatistik ist eine Korrelation dieser theoretischen Quantile mit den nach Größe geordneten Stichproben (x_1, \dots, x_n) . Die Teststatistik w lässt sich wie folgt berechnen [114, S. 229]

$$w = \frac{(\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(q_k - \bar{q}))^2}{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (D.4)$$

Der Wert liegt stets zwischen null und eins. Im Falle einer Normalverteilung sollten die beiden Schätzungen nahe beieinander liegen und somit ein Verhältnis von 1 ergeben. Kleine Werte für w sind evident für Abweichungen von der Annahme einer Normalverteilung [143, S. 487]. Weitere Informationen zum Shapiro-Wilk-Test sind [144] zu entnehmen.

Nachfolgend sind die Ergebnisse des Tests in Tabelle 50 zu sehen. Für keine der insgesamt 16 Gruppen des WDVS-Aufbaus ist der Anpassungstest nicht signifikant. Alle p-Werte liegen über dem Signifikanzniveau, wodurch eine Normalverteilung der Ergebnisse in allen Gruppen anzunehmen ist.

Tabelle 50 Versuchspln I-I: Ergebnisse Shapiro-Wilk-Test für die Qualitätsmerkmale Abtrag und Massenverlust

WDVS-Aufbau	Abtrag		Absoluter Massenverlust		Relativer Massenverlust	
	w	p-Wert	w	p-Wert	w	p-Wert
1	0,947	0,443	0,948	0,459	0,934	0,285
2	0,970	0,839	0,952	0,528	0,953	0,547
3	0,973	0,888	0,970	0,831	0,967	0,786
4	0,943	0,389	0,960	0,667	0,941	0,360
5	0,941	0,35	0,954	0,560	0,935	0,297
6	0,946	0,430	0,970	0,911	0,960	0,666
7	0,963	0,709	0,985	0,991	0,981	0,971
8	0,965	0,749	0,941	0,361	0,938	0,320
9	0,963	0,715	0,978	0,941	0,964	0,732
10	0,982	0,979	0,901	0,085	0,962	0,705
11	0,954	0,555	0,954	0,557	0,925	0,206
12	0,982	0,984	0,943	0,392	0,938	0,324
13	0,905	0,098	0,979	0,954	0,958	0,634
14	0,952	0,519	0,962	0,703	0,967	0,781
15	0,953	0,542	0,970	0,845	0,943	0,397
16	0,965	0,595	0,976	0,921	0,967	0,785

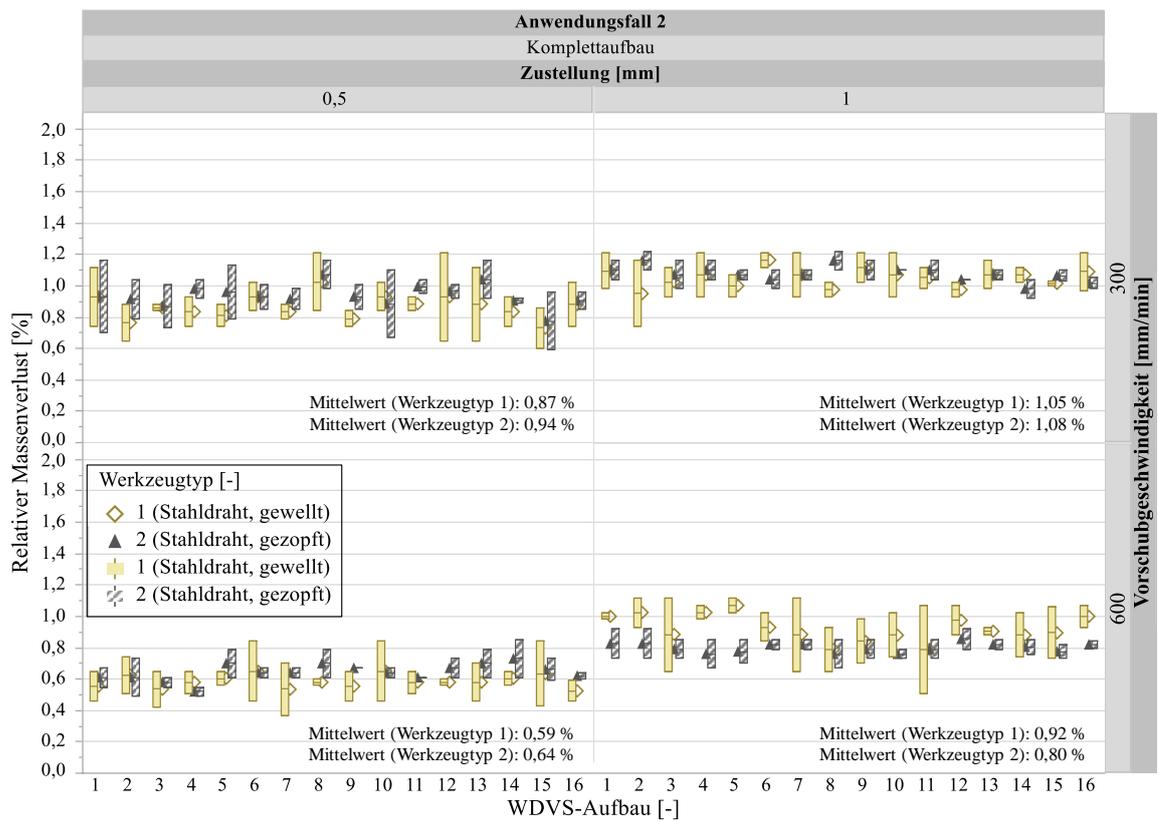


Abbildung E-2 Ergebnisse Versuchsplan I-I: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit des WDVS-Aufbaus [-], der Zustellung [mm] und Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]

Versuchsplan I-II

Für das Qualitätsmerkmal Abtrag sind die Ergebnisse des Versuchsplans I-II in Abbildung E-3 zusammengefasst. Abbildung E-4 veranschaulicht die relativen Messergebnisse des Qualitätsmerkmals Massenverlust. Es werden Outlier-Boxplots als Darstellungselement genutzt. Die globalen Mittelwerte beider Werkzeugtypen nach Faktorstufe der Vorschubgeschwindigkeit finden sich am unteren Rand der jeweiligen Einzelgrafik. Sie ermöglichen einen Vergleich der Ergebnisse zwischen den Faktorstufen. Zusätzlich sind die Mittelwerte der jeweiligen Faktorkombinationen zur Veranschaulichung der Verläufe über Geraden miteinander verbunden, es entstehen Liniendiagramme. Da es sich bei dem Faktor Vorschubgeschwindigkeit um einen stetigen Modellierungstyp handelt, besteht die Möglichkeit einer Interpolation zwischen den Stufeneinstellungen. Aus der weiteren Unterteilung nach den drei Stufen des Faktors Zustellung sowie den Stufen des WDVS-Aufbaus ergeben sich je Abbildung sechs Einzelgrafiken. Daraus resultieren zuzüglich einer Wiederholung n=2 Messwerte pro Box. Die Ränder der Box kennzeichnen somit die jeweiligen Messwerte.

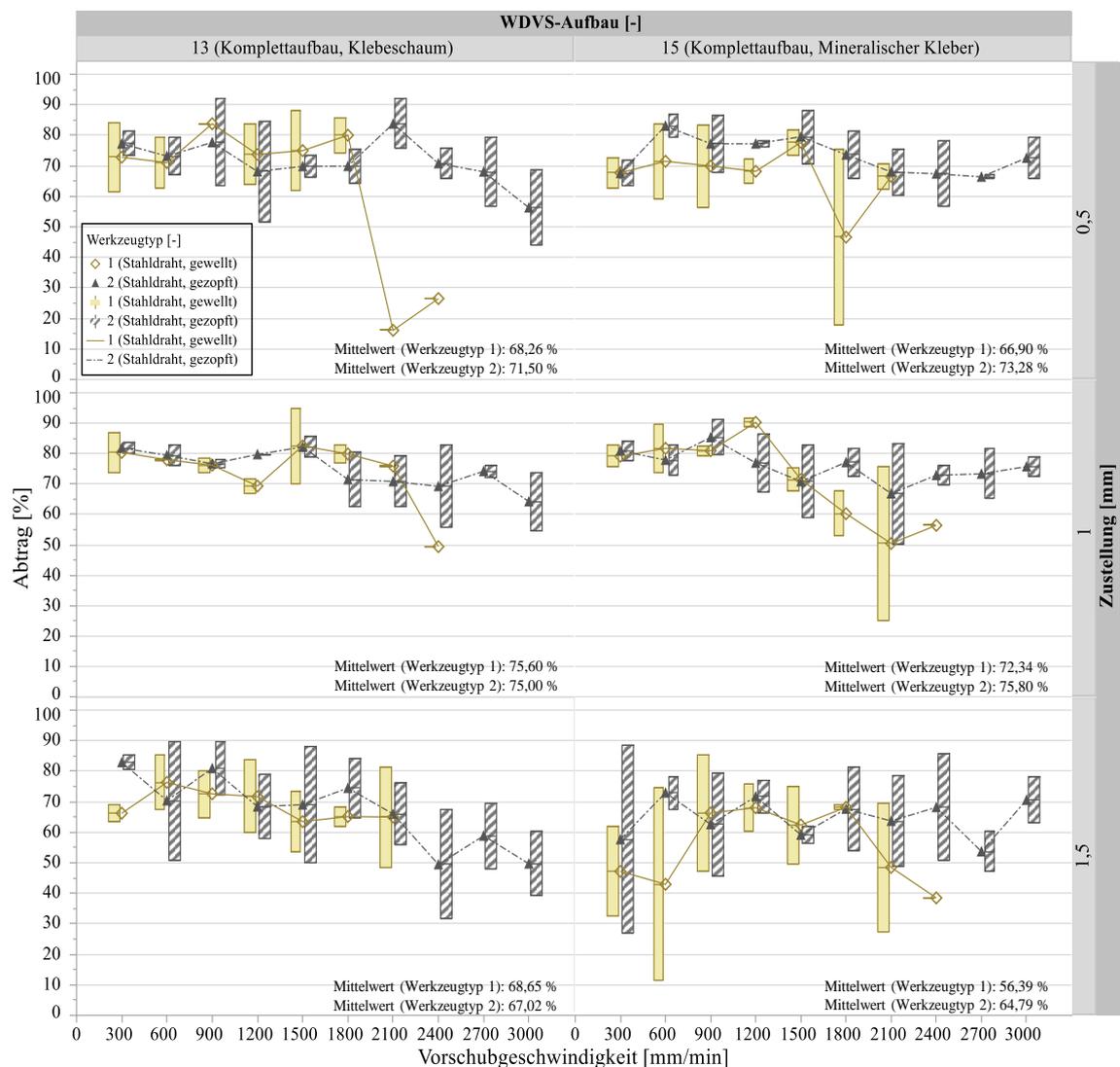


Abbildung E-3 Ergebnisse Versuchsplan I-II: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDVS-Aufbaus [-] und der Zustellung [mm]

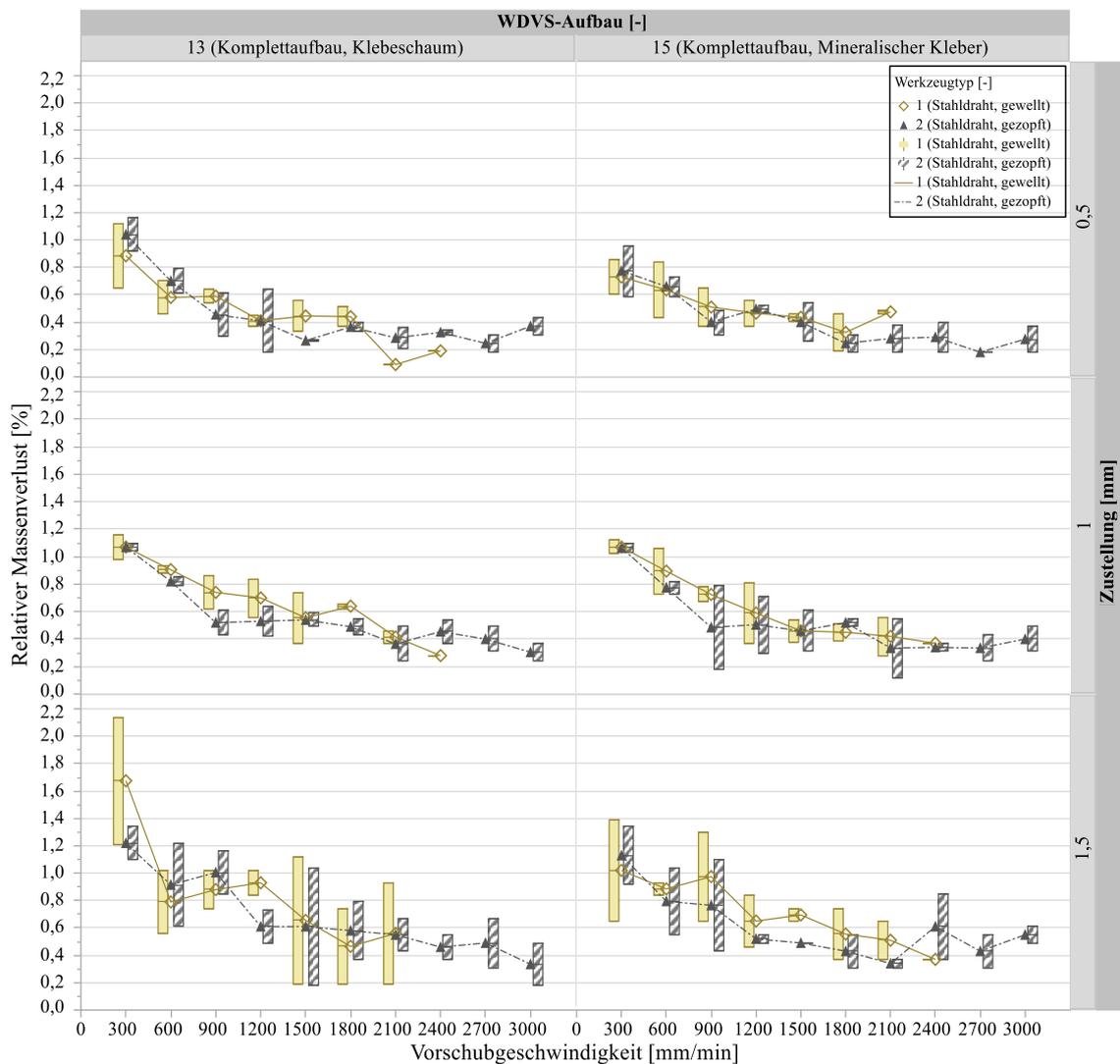


Abbildung E-4 Ergebnisse Versuchsplan I-II: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDV-S-Aufbaus und der Zustellung [mm]

Versuchsplan I-III

Die Messergebnisse des Versuchsplans I-IIIB zeigen Abbildung E-5 für das Qualitätsmerkmal Abtrag sowie Abbildung E-6 für den Massenverlust. Abbildung E-7 und Abbildung E-8 hingegen nehmen anstatt der Drehbewegung eine Unterteilung nach Werkzeugnummer vor. Die Art der Darstellung erlaubt eine übersichtliche Beschreibung der Lage und Streuung der Ergebnisse. Infolge der Darstellung ergeben sich je Boxplot $n=2$ Messwerte. Die globalen Mittelwerte beider Werkzeugtypen nach Faktorstufe der Vorschubgeschwindigkeit finden sich am unteren Rand des jeweiligen Diagramms. Sie ermöglichen einen Vergleich der Ergebnisse zwischen den Stufeneinstellungen. Die Mittelwerte der jeweiligen Faktorkombinationen der Vorschubgeschwindigkeit werden zur Veranschaulichung der Verläufe über Geraden miteinander verbunden.

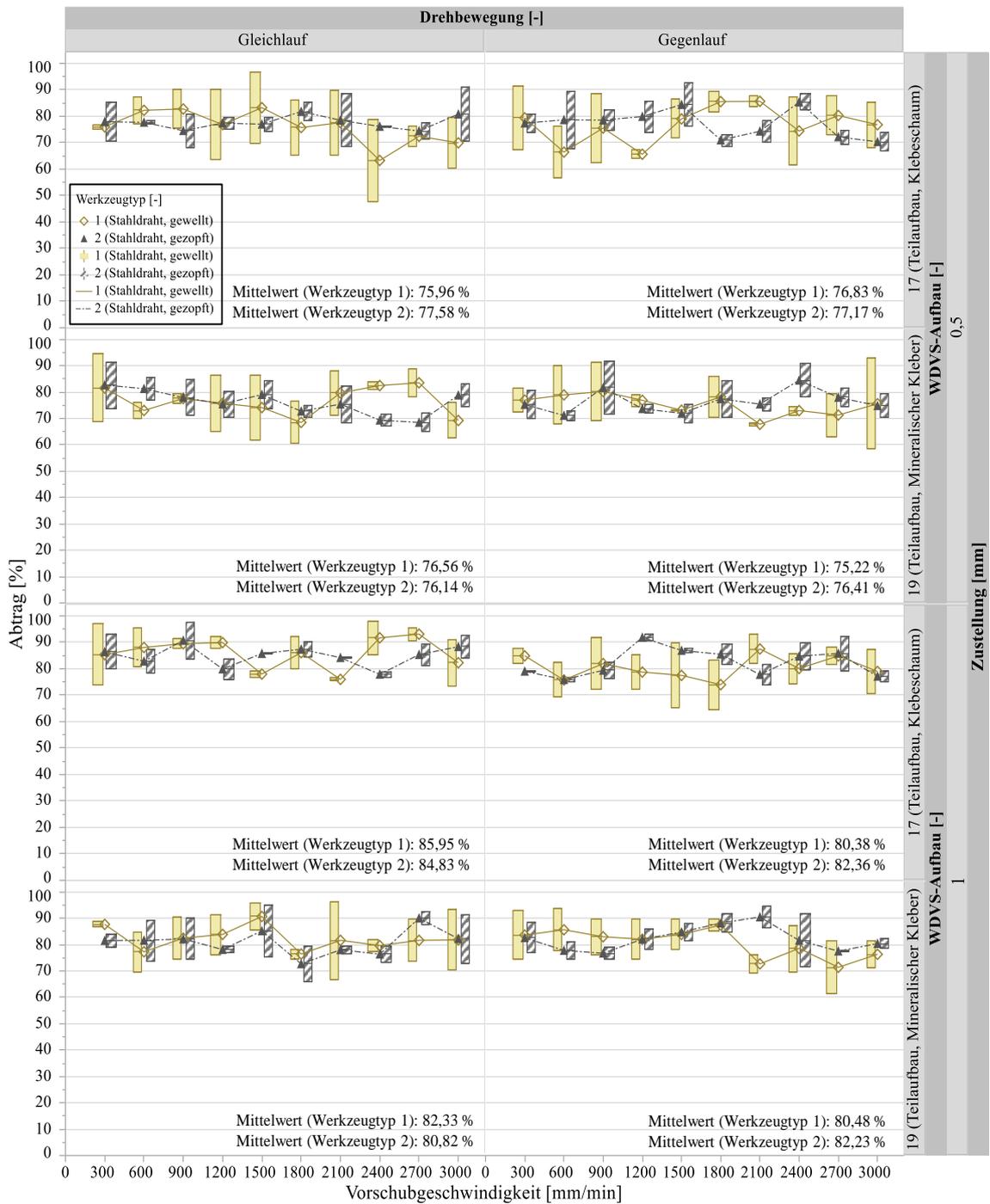


Abbildung E-5 Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], der Drehbewegung [-], der Zustellung [mm] und des WDVS-Aufbaus [-]

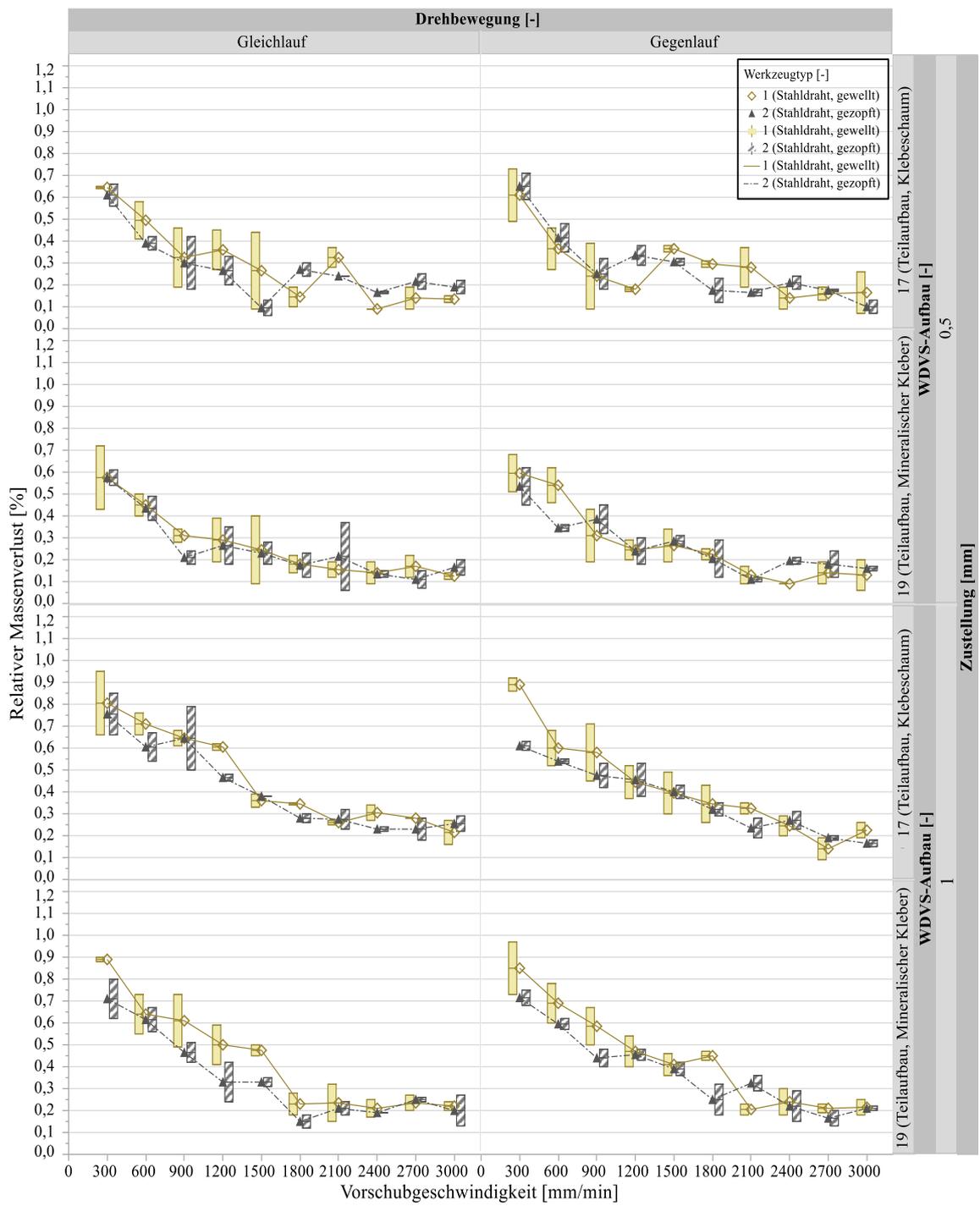


Abbildung E-6 Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], der Drehbewegung [-], der Zustellung [mm] und des WDVS-Aufbaus [-]

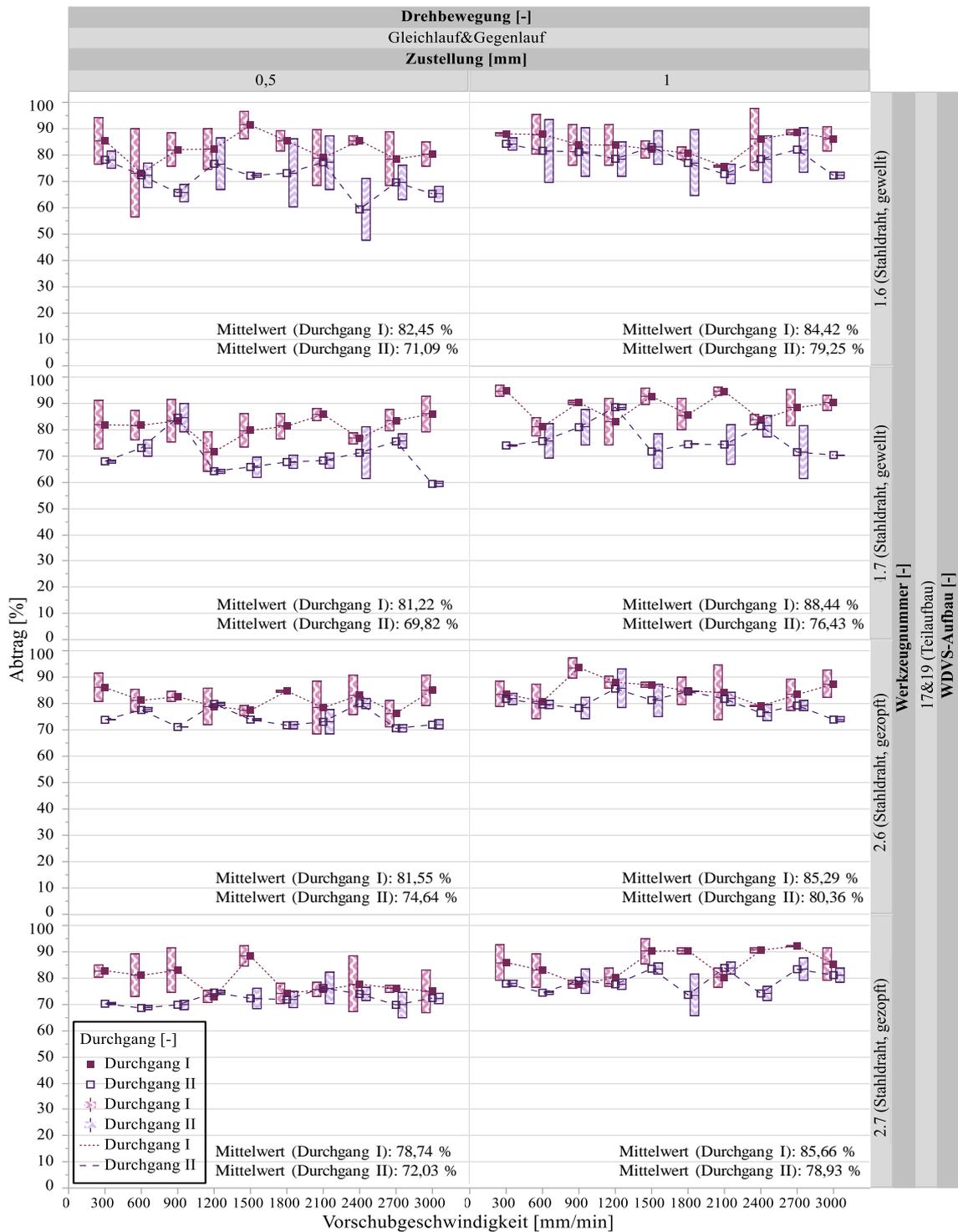


Abbildung E-7 Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Abtrag [%] nach Zustellung [mm] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Werkzeugnummer [-] nach Versuchsdurchgang [-]

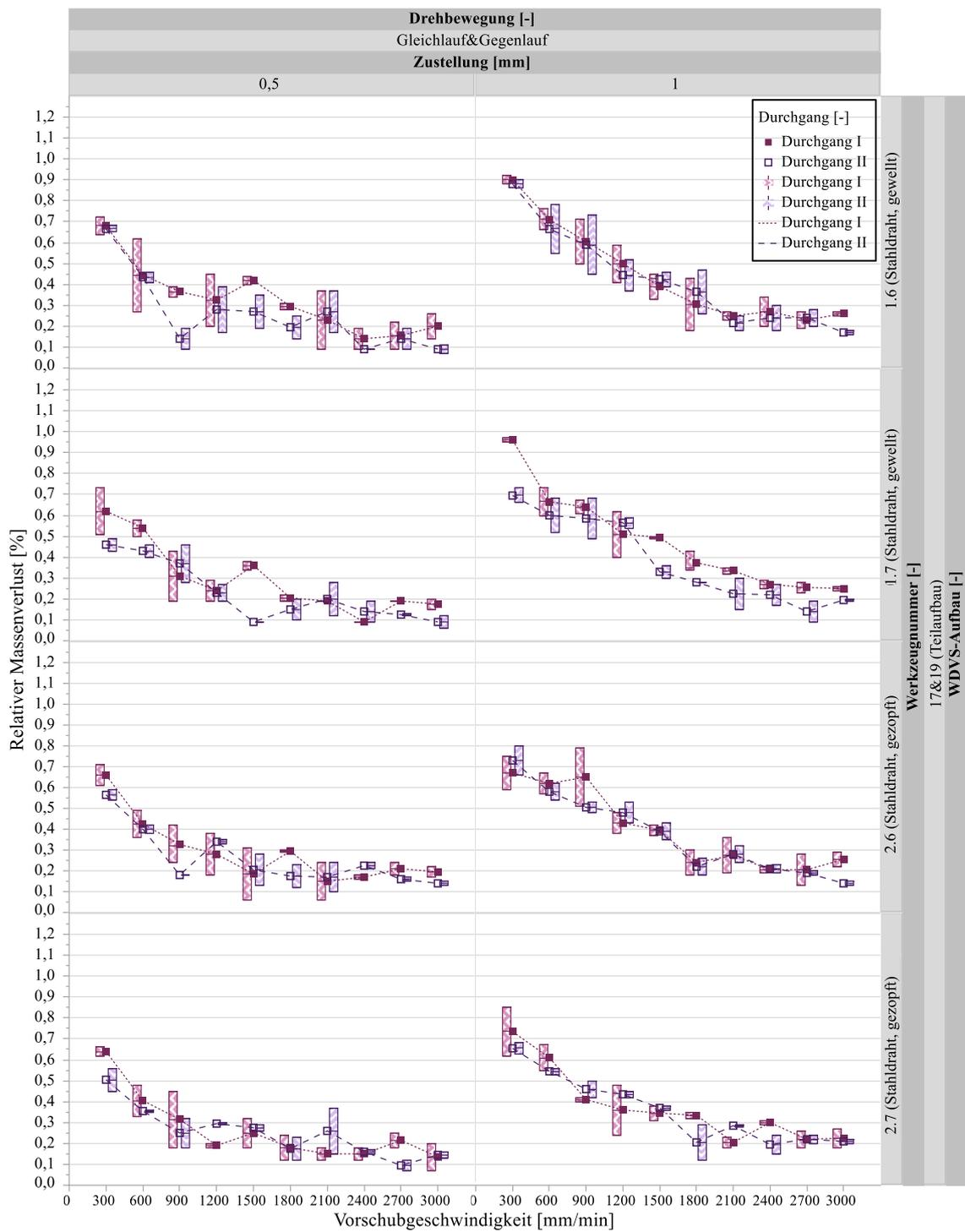


Abbildung E-8 Ergebnisse Versuchsplan I-IIIB: Relativer Massenverlust [%] nach Zustellung [mm] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] und der Werkzeugnummer [-] überlagert nach Versuchsdurchgang [-]

Versuchsplan I-II bis I-III

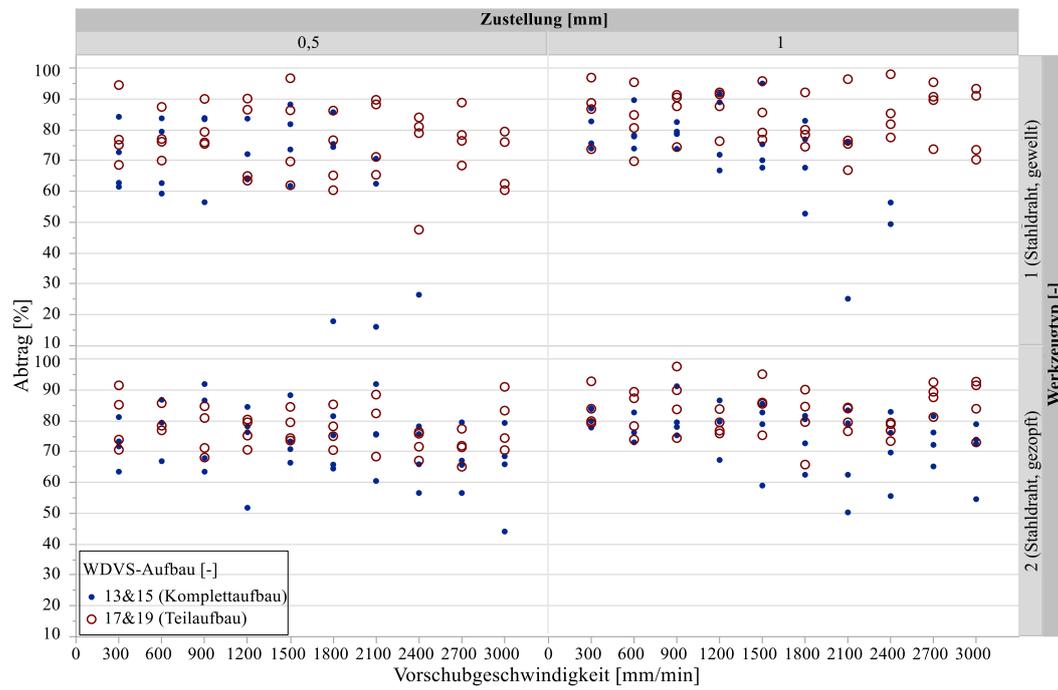


Abbildung E-9 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-III als Punktwolken: Abtrag [%] nach WDVVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

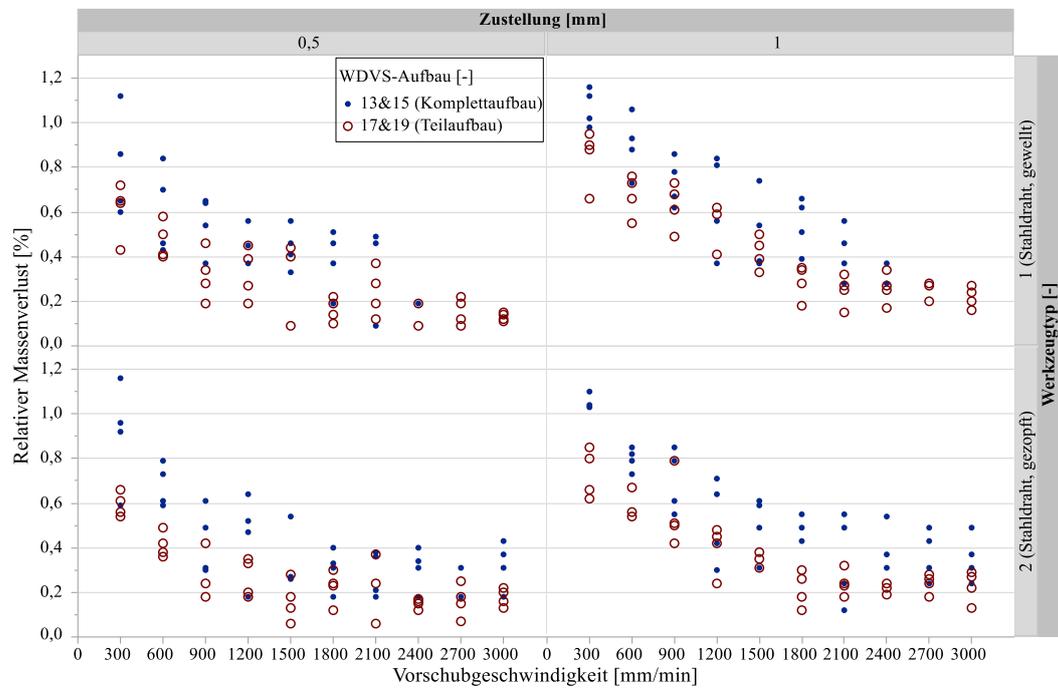


Abbildung E-10 Zusammenfassung Ergebnisse Versuchsplan I-I bis I-III als Punktwolken: Relativer Massenverlust [%] nach WDVVS-Aufbau [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des Werkzeugtyps [-] und der Zustellung [mm] bei Drehbewegung Gleichlauf

Tabelle 51 Vergleich unterschiedlicher Funktionsansätze für das Qualitätsmerkmal Abtrag anhand des einfachen Bestimmtheitsmaß R^2

Komplettaufbau				
Funktionsbezeichnung	Werkzeugtyp 1		Werkzeugtyp 2	
	Zustellung [mm]			
	0,5	1,0	0,5	1,0
Inverse Funktion	0,154	0,295	0,116	0,519
Logarithmische Funktion	0,340	0,528	0,337	0,725
Exponentialfunktion	0,547	0,743	0,581	0,774
Potenzfunktion	0,320	0,501	0,341	0,7125
Polynomiale Funktion 3. Grades	0,583	0,770	0,57	0,782

Tabelle 52 Vergleich unterschiedlicher Funktionsansätze für das Qualitätsmerkmal Massenverlust anhand des einfachen Bestimmtheitsmaß R^2

Teilaufbau				
Funktionsbezeichnung	Werkzeugtyp 1		Werkzeugtyp 2	
	Zustellung [mm]			
	0,5	1,0	0,5	1,0
Inverse Funktion	0,881	0,801	0,940	0,813
Logarithmische Funktion	0,947	0,954	0,8688	0,937
Exponentialfunktion	0,869	0,931	0,702	0,853
Potenzfunktion	0,877	0,901	0,858	0,890

Komplettaufbau				
Funktionsbezeichnung	Werkzeugtyp 1		Werkzeugtyp 2	
	Zustellung [mm]			
	0,5	1,0	0,5	1,0
Inverse Funktion	0,843	0,842	0,938	0,926
Logarithmische Funktion	0,947	0,972	0,905	0,963
Exponentialfunktion	0,897	0,967	0,758	0,868
Potenzfunktion	0,805	0,902	0,896	0,953

Versuchsplan I-IV

Abbildung E-11 zeigt die Messergebnisse des Versuchsplans I-IV. Aufgrund einer Versuchswiederholung sind jeder Box n=2 Messwerte zuzuordnen.

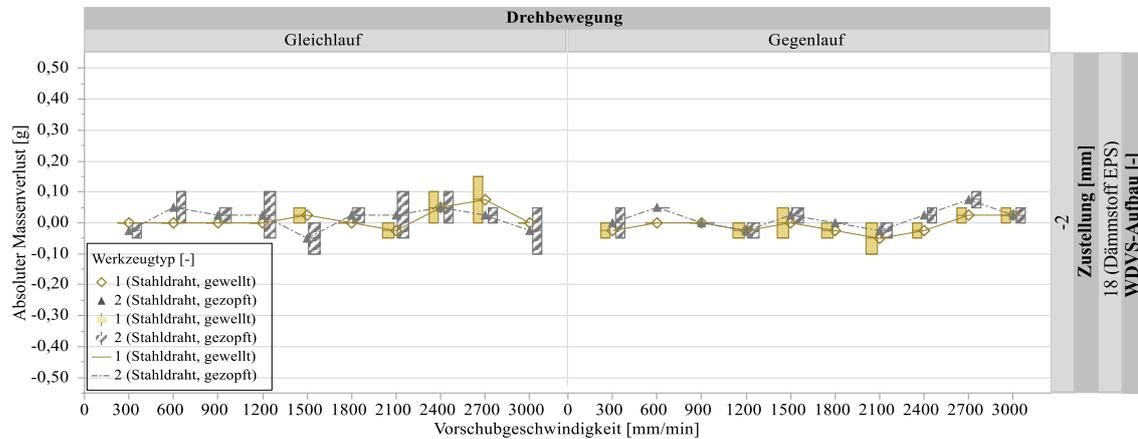


Abbildung E-11 Ergebnisse Versuchsplan I-IV: Absoluter Massenverlust [g] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], des WDVS-Aufbaus [-] und der Drehbewegung [mm] bei Zustellung -2 mm

Versuchsplan I-V

Abbildung E-12 veranschaulicht den Massenverlust zweier Bürsten bei Kontakt mit einer Betonoberfläche. Jeder Box sind aufgrund einer Wiederholung n= 2 Messwerte zu entnehmen.

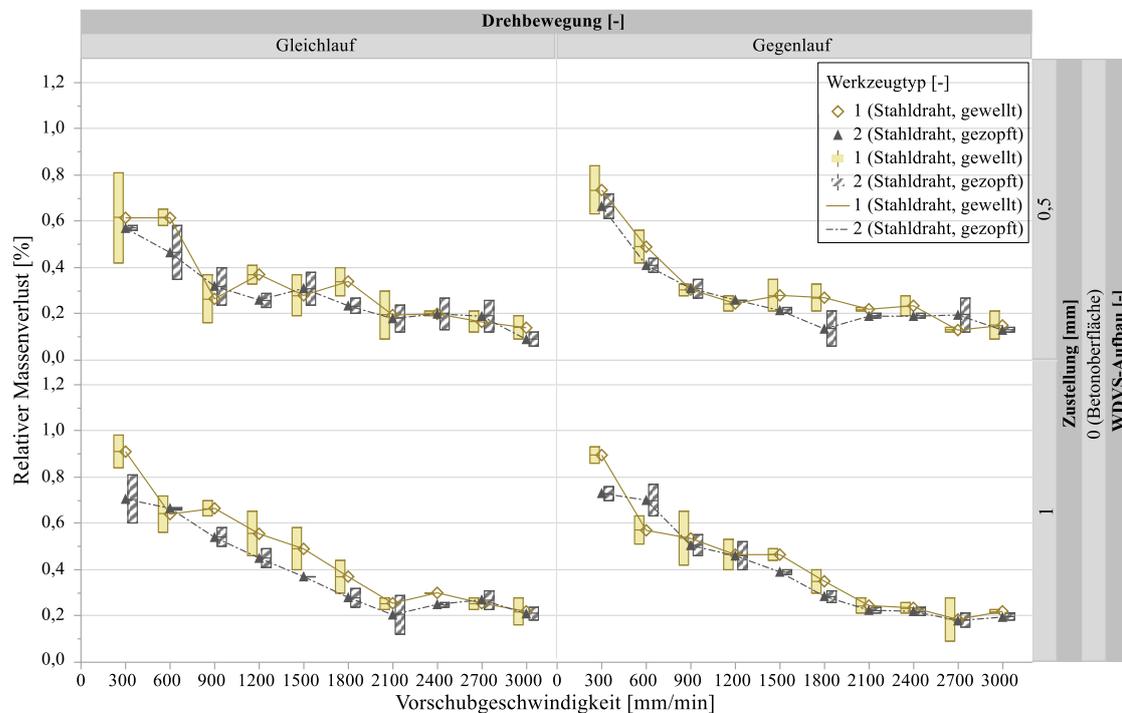


Abbildung E-12 Ergebnisse Versuchsplan I-V: Relativer Massenverlust [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit [mm/min], der Drehbewegung [-] und der Zustellung [mm]

Versuchsplan II-VII

Abbildung E-13 veranschaulicht die Untersuchungsergebnisse zur Thematik Verdübelung und Einfluss von MW grafisch. Unterschieden werden die Ergebnisse anhand des vorgelagerten Werkzeugs sowie der WDVS-Aufbauten mit und ohne Verdübelung, gruppiert nach Werkzeugtypen 101 und 112. Auf eine Darstellung nicht vorhandener Rückstände wird verzichtet. Auszumachen ist, dass keine signifikanten Unterschiede der Abtragsergebnisse nach Befestigungs- oder Dämmstoffart bestehen.

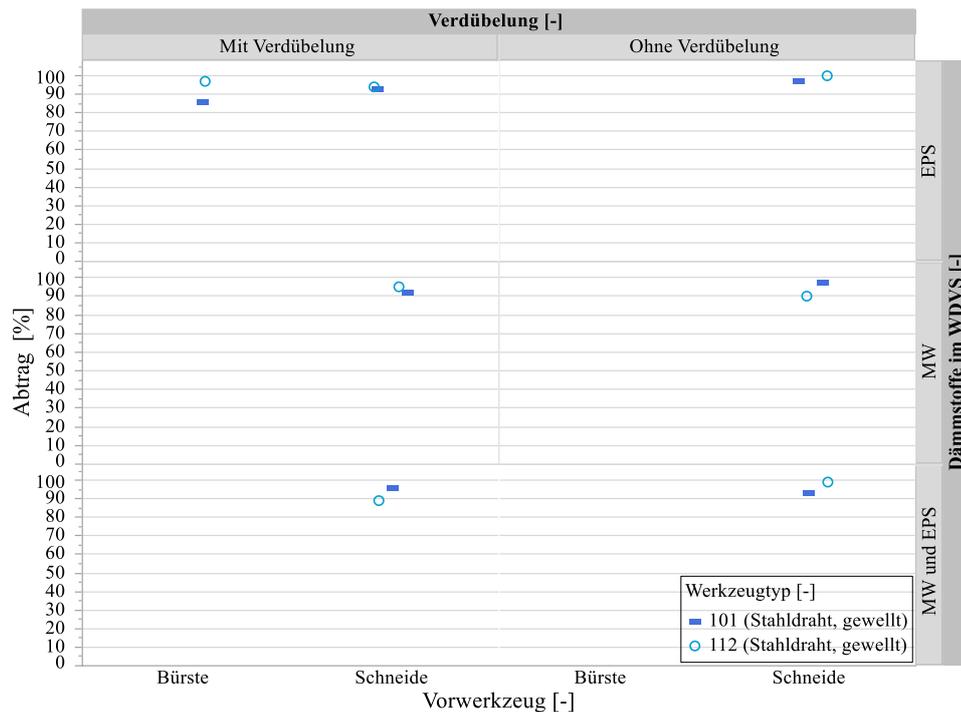


Abbildung E-13 Ergebnisse Hauptversuche Bürstentyp 101 und 112 mit und ohne Verdübelung: Abtrag [%] nach Werkzeugtyp [-] in Abhängigkeit des WDVS-Aufbaus [-] und der Verdübelung [-] bei WDVS-Aufbau 101 bis 106

F. Praxisversuche

Die Praxisversuche wurden gemeinsam mit der WIMAG GmbH am Institut TMB durchgeführt und dienen der Validierung der Untersuchungsergebnisse. Inwieweit die mit Bürstenwerkzeugen unter Laborbedingungen erzielten Abtragsergebnisse auf eine Praxisanwendung im Baggeranbaugerät übertragen werden können, gilt es zu analysieren.

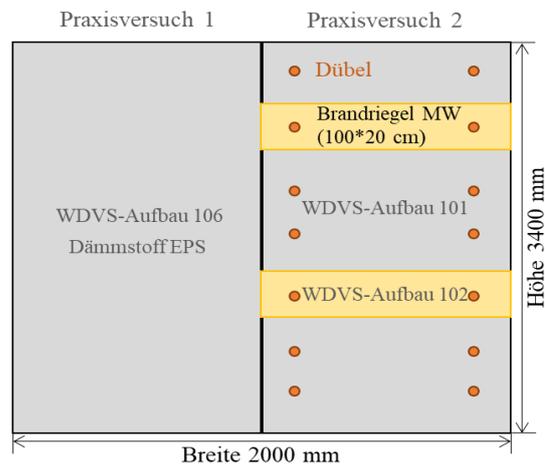


Abbildung F-1 Wandaufbau Praxisversuche (grau: Dämmstoff EPS; gelb: Dämmstoff MW)

Da WDVSt verstärkt seit den 1970er Jahre zur Anwendung kommen, sind für den Abbruch besonders Altbauten mit einer Dämmstoffdicke von sechs bis neun Zentimetern repräsentativ. Bei neueren Gebäuden hingegen treten höhere Stärken anteilig häufiger auf. So weisen die Baualterklassen 1979 bis 2009 eine mittlere Dämmstoffdicke von 9,9 Zentimetern auf [10]. Es ist davon auszugehen, dass – unter Verwendung des Baggeranbaugeräts – große Dämmstoffdicken einen stärkeren Einfluss auf das Abtragsergebnis haben. Eine Dämmstoffdicke von zehn Zentimetern wird demnach untersucht. Weiterhin stehen markthäufige Ausführungen im Fokus, weshalb sich die Zusammenstellung aus Abbildung F-1 ergibt.

Die Werkzeugtypen 105 sowie 112 haben sich für einen potentiellen Einsatz im Baggeranbaugerät qualifiziert, wobei die Werkzeug-Arbeitsbreite im Gegensatz zu den experimentellen Untersuchungen von 160 auf 780 Millimeter erhöht wird. Die Wahl des zum Einsatz kommenden Werkzeugtyps wird – neben den innerhalb dieser Arbeit betrachteten Qualitätsmerkmalen – auch durch monetäre Aspekte, das Werkzeuggewicht sowie die Werkzeughandhabung geprägt. Dadurch begründet sich die Entscheidung der Wimag GmbH, Werkzeugtyp 112 in den Praxisversuchen zu verwenden. Die innerhalb der experimentellen Untersuchungen ermittelten optimalen Maschinenparameter verbleiben, wobei der Anpressdruck – aufgrund der Vergrößerung der Arbeitsbreite – linear auf 918 Newton erhöht wird. Aus Tabelle 53 lassen sich die Faktoren, deren Modellierungstyp und die Faktorstufen ablesen. Eine Besonderheit stellt dabei die Drehbewegung im Gegenlaufbetrieb dar. Aufgrund des im Gleichlauf drehenden Vorwerkzeugs wirkt sich eine gegenläufige Drehbewegung der Bürste vorteilhaft auf die resultierenden Prozesskräfte aus. Eine Umkehrung der Drehbewegung wäre dennoch möglich [106]. Infolge der experimentellen Grundlagenversuche ist dieser Stufeneinstellung an einem Teilaufbau aber ebenso keine Bedeutung zuzuschreiben (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Tabelle 53 Faktoren und Stufen Praxisversuche

Faktor	Einheit	Modellierungstyp	Stufenwerte	
			Praxisversuch 1	Praxisversuch 2
WDVS-Aufbau	[-]	kategoriiell (nominal)	106	101 / 102
Werkzeugtyp	[-]	konstant	112	
Anpressung	[N]	stetig	0 - 918	
Drehzahl	[1/min]	konstant	750	
Vorschubgeschwindigkeit	[mm/min]	stetig	0 - 4000	
Drehbewegung	[-]	konstant	Gegenlauf	
Vorwerkzeug	[-]	konstant	Fräse	

Des Weiteren sind die Faktoren Anpressung und Vorschubgeschwindigkeit – abweichend zur experimentellen Versuchsdurchführung – keinem festen Stufenwert zuzuordnen. Denn das Baggeranbaugerät muss vom Baggerfahrer für jede Bahn neu angesetzt werden, wobei die Stufenwerte von Null ausgehend auf den gewünschten Wert erhöht werden. Da das Bürstenwerkzeug bereits vor dem ersten Werkstückkontakt eine Drehbewegung ausführt, kann die Drehzahl als konstant angesehen werden.

Veranschaulicht werden die Praxisversuche exemplarisch in Abbildung F-2. Darstellung (a) zeigt den Wandaufbau, bestehend aus den zuvor benannten Systembestandteilen. Die Werkzeuge werden dabei vom Baggerfahrer von unten nach oben geführt. Das Baggeranbaugerät im Detail zeigen die Bilder (b) und (c). Zuletzt ist in (d) Praxisversuch I abgebildet. Zu erkennen ist, dass der gewünschte Abtrag erbracht werden kann. Für eine rückstandslose Entfernung aller nicht mineralischen Systembestandteile ist dennoch teilweise eine überschneidende Überfahrt notwendig. Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit bis auf etwa vier Meter pro Minute konnte dies innerhalb der Praxisversuche kompensieren, sodass eine durchschnittliche Vorschubgeschwindigkeit von drei Metern pro Minute erreicht werden kann.

Eine Auswertung der Abtragsergebnisse ergibt einen Abtrag des WDVS-Aufbaus 106 (Praxisversuch 1) von knapp 69 Prozent. Bei Praxisversuch 2 hingegen, wird ein Abtrag von 64 Prozent für den Bereich des Dämmstoffs EPS sowie 57 Prozent bei einem Dämmstoff mit MW erreicht. Die Abtragsergebnisse liegen somit unter denen der experimentellen Versuche an den Versuchsständen I und II. Dennoch kann der gewünschte Abtrag erreicht werden. Aus den Untersuchungen zum Abtrag von WDVS mit spanender Bürste ist demnach abzuleiten, das Bürstenwerkzeuge unter den ermittelten Maschinenparameter geeignet sind.



Abbildung F-2 Exemplarische Aufnahmen der Praxisversuche