



Regenerierung von zementgebundenen Gießereiformstoffen

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 35888/1 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Dipl.-Ing. (BA) Stephan Borst

M. Sc. Felix Fötzsch

Dipl.-Ing. Christoph Althausse

Dipl.-Ing. Jürgen Naas

Dr.-Ing Thomas Neumann

**Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	35888/1	Referat	21/2	Fördersumme	486.474 €
----	----------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel **Regenerierung von zementgebundenen Gießereiformstoffen**

Stichworte Zementformverfahren, Regenerierung, Gießereizement

Laufzeit 33 Monate	Projektbeginn 21.09.2020	Projektende 21.06.2023	Projektphase(n)
------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	-----------------

Bewilligungsempfänger	AAGM Aalener Gießereimaschinen GmbH	Tel	+49 7362 956037 22
		Fax	+49 7362 956037 10
		Projektleitung Stephan Borst	
		Bearbeiter Felix Föttsch	

Kooperationspartner Gießerei-Institut (TU Bergakademie Freiberg)
Römheld & Moelle Eisengießerei GmbH
Schwenk Zement KG (assoziiertes Projektpartner)

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Ziel des Projektes war die Entwicklung einer Methode zur Aufbereitung und Wiederverwendung von zementgebundenen Formstoffen, um so eine Grundlage für die Umstellung von Gießereibetrieben hin zu zementgebundenen Formstoffen zu liefern. Denn der Ettringitzementformstoff emittiert auf Grund seiner anorganischen Charakteristik keinerlei leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe wie BTEX und auch kein Schwefeldioxid. Durch eine Substitution besteht die Möglichkeit, die Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter und die Umwelt rund um die Gießerei nachhaltig zu verbessern.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Industrierversuch wurde der Formstoffkreislauf für zementgebundene Formstoff unter Industrie nahen Bedingungen evaluiert. Hierzu wurden fünf Umläufe durchgeführt. Die Form fasste mit Ober- und Unterkasten ca. 3,5 t Formstoff. Als Gussteil wurde ein 1 t schwerer B-Säulen-Probekörper verwendet. Nach jedem Umlauf wurde der zuvor gebrochene Altsand regeneriert. Im ersten Umlauf wurden zur Formherstellung 100 % Neusand und ab dem 2. Umlauf 70 % Regeneratanteil am Formgrundstoff verwendet. Im Rahmen des Industrierversuches wurde ein Entsorgungskonzept aufgestellt. Auf Grund der Erkenntnisse des Industrierversuches wurde eine Konfiguration des Gemco-Schleifregenerators untersucht, um einen Formstoffkreislauf mit einem Regeneratanteil von 93,3 % zu analysieren. An Hand dieses Versuches erfolgt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Diese Regenerierungsanlage ist zwar eine Versuchsanlage es gibt allerdings auch Industrieanlagen die mit demselben Regenerierungsprinzip arbeiten.

Im ersten Arbeitsschritt wurde das Regenerat nach einmaligen Regenerierprozess untersucht. Die Versuche wurden an einer Anlage durchgeführt die im Chargenbetrieb mit eingebautem Schleifstein (Gemco-Schleifregenerator) arbeitet und an einer die im Durchlaufbetrieb (Wöhr-Fliehkraftreiniger) arbeitet. Die Regenerate wurden entsprechend der VDG-Merkblätter hinsichtlich ihrer granulometrischen Eigenschaften, dem auf dem Sandkorn verbliebenen Restzement sowie deren Einfluss auf die Formstoffeigenschaften überprüft. Zur Untersuchung des Wöhr-Fliehkraftreinigers wurden zeitaufwendige Umbaumaßnahmen durchgeführt, um zu gewährleisten, dass dieser sich für die Regenerierung von zementgebundenen Formstoffen eignet.

Ergebnisse und Diskussion

Durch den Industrierversuch wurde nachgewiesen, dass mittels Regenerat ein Formstoffkreislauf aufgebaut werden kann, der sich zur Gussteilerzeugung eignet. Prinzipiell lässt sich durch beide mechanische Regenerierungsanlagen der auf dem Sandkorn verbliebende Zement entfernen, wobei der Restzement mit keiner Anlagenkonfiguration rückstandlos entfernt werden konnte.

Auf Grund des Vergleiches der Formstoffkreisläufe des Industrierversuches mit dem des Gemco-Schleifregenerator lässt sich aus technischer Sicht folgendes zum Aufbau eines Ettringitzement-Formstoffkreislaufes festhalten:

Der aufwachsende Zement verschlechtert gleichzeitig die Regenerierung und die Festigkeit des Formstoffsystems. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Regenierintensität ab dem 2. Umlauf erhöht werden muss, da hier neben dem neu zugegeben Binder zusätzlich der Restzement des Regenerats zu entfernen ist. Von da an kann die Intensität konstant gehalten werden und es bildet sich ein Komponentengleichgewicht. Das bedeutet, dass beim Einfahren des Zementformstoffsystems mit Neusand ab dem 2. Umlauf eine höhere Regenerierungsintensität notwendig ist. Es gibt demzufolge theoretisch ein Regenerierungsgrad₁ für den ersten Umlauf und einen Regenerierungsgrad_{2...∞} für die restlichen Umläufe Dieser Wert ist prozessspezifisch und dementsprechend keine allgemein gültige Aussage möglich. Hierbei ist zu beachten, dass die Erhöhung der Regeneierintensität das Ausbringen verringert. Wodurch gegebenenfalls weniger Regenerat zur Verfügung steht wie es der Wiedereinsatzgrad zulässt. Aus wirtschaftlicher Sicht sollte der Regeneratanteil so hoch sein, wie es der Wiedereinsatzgrad ermöglicht. Das Festigkeitsniveau des Gemco-Schleifregenerator-Formstoffkreislaufes liegt trotz des höheren Regeneratanteils bei der Formstoffherstellung (93,3 %) in derselben Größenordnung wie das des Industrierversuch (70 %). Hierdurch lässt sich erkennen, dass sich ein kontinuierlicher Energieeintrag auf das Sandkorn bei gleichzeitiger Verwendung eines Schleifkörpers besser zur Entfernung des Restzementes eignet als der in diesem Projekt untersuchte Durchlaufbetrieb. Die Ursache ist die stärkere Haftung des Restzementes auf dem Sandkorn sowie der höhere Bindergehalt im Vergleich zu den kaltharzgebundenen Formstoffen, für den der Wöhr-Fliehkraftreiniger ursprünglich konzeptioniert ist. Eine allgemeingültige Quantifizierung eines Formstoffkreislaufes ist nur schwer möglich, da der notwendige Gesamt-Regenerierungsgrad von der tatsächlichen Formstoffrezeptur und dem erzielbaren Regenerierungsgrad der in der Gießerei vorhandenen Anlagen (Knollenbrecher, Regenerierungsanlage) abhängt. Die Umstellung einer Gießerei kann daher als individuelle Aufgabenstellung betrachtet werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Öffentlichkeitsarbeit erfolgt durch die Präsentation der Ergebnisse des Projektes auf dem Ledebur-Kolloquium am 25.10.24 und der Veröffentlichung einer Dissertation zu dieser Thematik. Ebenfalls werden die Ergebnisse in einem Arbeitskreis des Branchenverbandes vorgestellt.

Fazit

Das Ziel wurde grundsätzlich erfüllt. Im industriellen Maßstab ist nachgewiesen, dass mittels Regenerats aus zementgebundenen Formstoffen Gussteile mit konstanter Qualität hergestellt werden können. Unter bestimmten Rahmenbedingungen, wie Neusandzugabe über 10 % im Furanharz-Formstoffkreislauf oder strenge Anforderungen in Hinblick auf Emissionen und Geruchsimmissionen auf Grund des Standortes, ist die Umstellung einzelner Gießereien schon jetzt lukrativ. Auf Grund der bisherigen Erfahrungen mit dem Ettringitzement ist der Prozessablauf des Formverfahrens sehr ähnlich zum Furanharz, sodass die Umstellung für die Belegschaft als unproblematisch einzustufen ist. An dieser Stelle ist noch anzumerken, dass diese Ergebnisse zum gegenwärtigen Zeitpunkt mit einem Formstoffbinder erzielt wurden, dem noch ein Prototypen-Status zugeordnet werden kann. In Hinblick auf die industrielle Anwendung ist von einer weiteren Optimierung durch den Hersteller auszugehen. Dies wurde bereits im Rahmen des Industrierversuches unter Beweis gestellt, in dem in kurzer Zeit die Aushärtungscharakteristik des Zementes auf die vorherrschenden Bedingungen angepasst wurde.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	5
Zusammenfassung.....	10
1. Einleitung.....	12
2. Stand der Technik.....	13
2.1. Zementformstoff	13
2.1.1 Formstoffsystem	13
2.1.2 Ettringitzement	20
2.2 Regenerierung	23
3 Durchführung	27
3.1 Untersuchung der Regenerate	27
3.2 Regenerierungsanlagen	29
3.2.1 Gemco-Schleifregenerator.....	29
3.2.2 Wöhr-Fliehkraftreiniger	32
4 Diskussion der Festigkeitsentwicklung des Ettringitzementformstoffes	35
5 Einmaliger Regenerierprozess.....	38
5.1 Gemco-Schleifregenerator	38
5.2 Wöhr-Fliehkraftreiniger	46
6 Industrierversuch – Formstoffkreislauf	56
6.1 Durchführung.....	56
6.2 Rohgussteile.....	60
6.3 Eigenschaften des Regenerats und dessen Einfluss auf die Formstoffeigenschaften ...	67
6.4 Auswertung der Anlagenparameter in Bezug auf den Restbindergehalt	72
7 Formstoffkreislauf – Chargenbetrieb	74
8 Entsorgungskonzept.....	81
9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	83
10 Fazit	87
Literaturverzeichnis.....	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 theoretische Einflussgrößen auf die Festigkeit des Formstoffsystems nach [14]	14
Abbildung 2: Festigkeitsentwicklung des Quarzsandes H 32 mit 10 % Ettringitzement im Vergleich zur Furanharz-Referenz [1]	16
Abbildung 3: Restdruckfestigkeit des Quarzsandes H 32 mit 10 % Ettringitzement (100 % = 195 N/cm ²) im Vergleich zur Furanharz-Referenz (100 % = 777 N/cm ²) [1].....	17
Abbildung 4: Biegefestigkeit eines handverdichteten Formstoffes mit H 32 als Formgrundstoff bei unterschiedlichen Bindergehalten nach [35].....	18
Abbildung 5: Biegefestigkeit eines handverdichteten Formstoffes mit QQS 60 als Formgrundstoff bei unterschiedlichen Bindergehalten nach [35].....	18
Abbildung 6: Vergleich der 8 Stunden Gasdurchlässigkeit von Ettringitzement gebundenen Formstoffen mit unterschiedlichen Formgrundstoffen im Vergleich zu einer Furanharz-Referenz [1, 35]	19
Abbildung 7: 8 Stunden Biegefestigkeit von Zementformstoffen im ternären System Tonerdezement – Calciumsulfat - Portlandzement [1].....	21
Abbildung 8: Änderung des Ettringithabitus in Abhängigkeit vom pH-Wert in der Reaktionslösung [18, 25]	22
Abbildung 9: XRD des Ettringitzementleims 40/45/15 (w/z-Wert = 0,5) [15]	23
Abbildung 10: Verfahrensschritte der Altsandregenerierung [14]	25
Abbildung 11: Vergleich der Siebanalysen der Neusande Haltern 32 (H32) – mittlere Korngröße = 0,29 mm & Gleichmäßigkeitsgrad = 69 % und Quedlinburger Quarzsand (QQS 60) – mittlere Korngröße = 0,60 mm & Gleichmäßigkeitsgrad = 86 %	27
Abbildung 12: Vergleich des Einflusses von Ortho-Phosphorsäure auf den Restbindergehalt bei Ettringitzement gebundenen Formstoffen. links) Regenerat, Mitte) behandeltes Regenerat, rechts) Neusand. Beim Vergleich der 3 Abbildungen fällt auf, dass der Zement durch die Behandlung mit Ortho-Phosphorsäure rückstandslos vom Quarzsandkorn entfernt wurde.	28
Abbildung 13: Prinzipskizze des Gemco-Schleifregenerators [33].....	30
Abbildung 14: Durchschnittliche anliegende Wirkleistung am Drehstrommotor der Gemco-Anlage für den Schleifstein und das Schaufelrad	31
Abbildung 15: CAD-Modell des Wöhr-Fliehkraftreinigers	33

Abbildung 16: Durchschnittliche anliegende Wirkleistung am Drehstrommotor des Rotors nach Aufbau des Schüttkegels	34
Abbildung 17: Fließbettsichter der Firma AAGM.....	35
Abbildung 18: Kumulative Hydratationswärme des Ettringitzementes – schwarz) Referenz repräsentativ für die Vorversuche; braun) Charge die für den Industrierversuch hergestellt wurde; gelb) angepasste Charge die im restlichen Industrierversuch (Umlauf 2 bis 5) verwendet wurde	36
Abbildung 19: 8h Biegefestigkeit; 8 % Zement mit Soda & Zitronensäure; w/z-Wert = 0,5; 70 % Regeneratanteil – Formstofflabor) 4 min Mischzeit im Formstoffmischer „KitchenAid“, Formherstellung im Industrierversuch) Durchlaufmischer (Kapitel 6.1) – Die Biegefestigkeit für das 5. Regenerat wurde nicht gemessen, da kein 6. Umlauf stattfand	37
Abbildung 20: Ausbringen des Gemco-Schleifregenerators in Abhängigkeit der Anlagenparameter (n = 1)	38
Abbildung 21: Siebanalyse der Gemco-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter (n = 2).....	39
Abbildung 22: Siebanalyse der Gemco-Altsande (n = 2) – Es ist anzumerken, dass sich die Altsandproben 40 Hz & 70 Hz bei einem Spaltmaß von 25 mm überlappen sowie die restlichen Altsandproben bei 20, 40 und 70 Hz	40
Abbildung 23: links) Neusand QQS 60, rechts) Regenerat QQS 60 20 Hz - 15 mm	41
Abbildung 24: links) Regenerat QQS 60 40 Hz - 15 mm, rechts) Regenerat QQS 60 40 Hz - 25 mm.....	41
Abbildung 25: links) Regenerat QQS 60 40 Hz - 50 mm, rechts) Regenerat QQS 60 70 Hz - 15 mm.....	42
Abbildung 26: links) Regenerat QQS 60 70 Hz - 25 mm, rechts) Regenerat QQS 60 70 Hz - 50 mm.....	42
Abbildung 27: Schlammstoffgehalt (n = 3) der Gemco-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter (α = Regenerierungsgrad)	43
Abbildung 28: kumulativer Anteil der Kornklassen 0,02 – 0,125 mm (n = 2) der Gemco-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter (α = Regenerierungsgrad)	44
Abbildung 29: Restbindergehalt (n = 1) der Gemco-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter (α = Regenerierungsgrad)	45

Abbildung 30: Siebanalyse des QQS 60 bei dem Betrieb des Wöhr-Fliehkraftreinigers mit 50 Hz (n = 2) – Ausbringen nach 5 Durchläufen ca. 92 %.....	47
Abbildung 31: Siebanalyse des QQS 60 bei dem Betrieb des Wöhr-Fliehkraftreinigers mit 67 Hz (n = 2) – Ausbringen nach 1 Durchlauf ca. 85 %.....	47
Abbildung 32: Siebanalyse der Wöhr-Regenerate bei 50 Hz (n = 2).....	48
Abbildung 33: Siebanalyse der Wöhr-Regenerate bei 67 Hz (n = 2).....	49
Abbildung 34: links) Neusand QQS 60, rechts) Regenerat QQS 60 Gi I - 50 Hz	50
Abbildung 35: links) Regenerat QQS 60 AAGM I - 50 Hz, rechts) Regenerat QQS 60 AAGM II - 50 Hz.....	50
Abbildung 36: links) Regenerat QQS 60 AAGM III - 50 Hz, rechts) Regenerat QQS 60 AAGM IV - 50 Hz.....	51
Abbildung 37: links) Regenerat QQS 60 Gi II - 67 Hz, rechts) Regenerat QQS 60 Gi III - 67 Hz	51
Abbildung 38: links) Regenerat QQS 60 Gi IV - 67 Hz, rechts) Regenerat QQS 60 AAGM V - 67 Hz.....	52
Abbildung 39: Schlammstoffgehalt (n = 3) der Wöhr-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter (α = Regenerierungsgrad)	53
Abbildung 40: kumulativer Anteil der Kornklassen 0,02 – 0,125 mm (n = 2) der Wöhr-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter (α = Regenerierungsgrad)	54
Abbildung 41: Restbindergehalt (n = 1) der Wöhr-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter (α = Regenerierungsgrad)	55
Abbildung 42: Prinzipskizze Industrierversuch – 1. Umlauf beginnt mit der Formherstellung aus Neusand, 2. – 5. Umlauf Formherstellung mit 70 % Regenerat & 30 % Neusand.	56
Abbildung 43: Durchlaufwirbelmischer bei der Herstellung des Unterkastens - Formrezeptur: Formgrundstoff – Quarzsand QQS 60, 8 % Ettringitzement mit w/z-Wert = 0,5 entspricht 4 % Wasser sowie Additive	57
Abbildung 44: Zugesezte Mischschnecke	58
Abbildung 45: Zementschale an der Wand des Mixchers.....	58
Abbildung 46: links) Vollform-Modell B-Säulen Probekörper mit Anschnitt im Unterkasten, rechts) gewendeter Unterkasten	59
Abbildung 47: links) Aufgesetzter Oberkasten, rechts) Formen des Oberkastens.....	59
Abbildung 48: links) Abgussbereite Form, rechts) Form nach Abguss.....	59
Abbildung 49: Rohgussteil 1. Umlauf	61

Abbildung 50: Rohgussteil 2. Umlauf	61
Abbildung 51: Rohgussteil 3. Umlauf	62
Abbildung 52: Rohgussteil 4. Umlauf	62
Abbildung 53: Rohgussteil 5. Umlauf	62
Abbildung 54: Herausgebrochene Vererzung	63
Abbildung 55: REM-Aufnahmen Vererzung bei 1000-facher Vergrößerung	63
Abbildung 56: EDX-Mapping der Elementverteilung innerhalb der Vererzung bei 1000-facher Vergrößerung	64
Abbildung 57: Individuelles EDX-Mapping der Einzelemente zur linken Abbildung 50 bei 1000-facher Vergrößerung	65
Abbildung 58: Individuelles EDX-Mapping der Einzelemente zur rechten Abbildung 50 bei 1000-facher Vergrößerung	66
Abbildung 59: 8h Biegefestigkeit; 8 % Zement mit Soda & Zitronensäure; w/z-Wert = 0,5; 70 % Regeneratanteil	67
Abbildung 60: Siebanalyse (n = 2) des Industrierversuches am Wöhr-Fliehkraftreiniger mit 67 Hz	68
Abbildung 61: links) 1. Regenerat, rechts) 3. Regenerat	68
Abbildung 62: links) 5. Regenerat rechts) Neusand QQS 60	69
Abbildung 63: Schlämmstoffgehalt (n = 3) des Industrierversuches am Wöhr-Fliehkraftreiniger mit 67 Hz (α = Regenerierungsgrad, die Altsandprobe des 5. Regenerates stellt einen Erwartungswert dar)	70
Abbildung 64: kumulativer Anteil der Kornklassen 0,02 – 0,125 mm (n = 2) des Industrierversuches am Wöhr-Fliehkraftreiniger mit 67 Hz (α = Regenerierungsgrad, die Altsandprobe des 5. Regenerates stellt einen Erwartungswert dar)	70
Abbildung 65: Restbindergehalt (n = 3) des Industrierversuches am Wöhr-Fliehkraftreiniger mit 67 Hz (α = Regenerierungsgrad, die Altsandprobe des 5. Regenerates stellt einen Erwartungswert dar)	71
Abbildung 66: Regenerierungsgrad des Wöhr – Fliehkraftreinigers, des Knollenbrechers sowie der Gesamt-Regenerierungsgrad des Industrierversuches (Linien dienen zur Kennzeichnung des Verlaufs)	73
Abbildung 67: 8h Biegefestigkeit; 8 % Zement mit Soda & Zitronensäure; w/z-Wert = 0,5; 93,3 % Regeneratanteil	75

<i>Abbildung 68: Siebanalyse (n = 2) des Formstoffkreislaufes Gemco-Schleifregenerator 20 Hz</i>	76
.....	
Abbildung 69: links) 1. Regenerat, rechts) 3. Regenerat	76
Abbildung 70: links) 5. Regenerat rechts) Neusand QQS 60	77
Abbildung 71: Schlammstoffgehalt (n = 3) des Formstoffkreislaufes Gemco - Schleifregenerator 20 Hz (α = Regenerierungsgrad)	78
Abbildung 72: kumulativer Anteil der Kornklassen 0,02 – 0,125 mm (n = 2) des Formstoffkreislaufes Gemco-Schleifregenerator 20 Hz (α = Regenerierungsgrad)	78
Abbildung 73: Restbindergehalt (n = 3) des Formstoffkreislaufes Gemco-Schleifregenerator 20 Hz (α = Regenerierungsgrad)	79
Abbildung 74: Regenerierungsgrad des Gemco-Schleifregenerators mit 20 Hz, des Knollenbrechers sowie der Gesamt-Regenerierungsgrad des Formstoffkreislaufes Gemco- Schleifregenerator 20 Hz	80
Abbildung 75: Vergleich der Rohstoffkostenentwicklung von Furfurylalkohol und Ettringizement von April 2013 bis April 2023	83
Abbildung 76: Mehrkosten des Zementformstoffes gegenüber des Furanharzformstoffes bei der mechanischen Regenerierung im Formstoffkreislauf in unterschiedlichen Gießerei- Szenarien	85

Zusammenfassung

Ziel des DBU geförderten Projektes „RegoZem“ war die Entwicklung einer Methode zur Aufbereitung und Wiederverwendung von zementgebundenen Formstoffen, um so eine Grundlage für die Umstellung von Gießereibetrieben hin zu zementgebundenen Formstoffen zu liefern. Denn der Ettringitzementformstoff emittiert auf Grund seiner anorganischen Charakteristik keinerlei leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe wie BTEX und auch kein Schwefeldioxid. Durch eine Substitution besteht die Möglichkeit, die Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter und die Umwelt rund um die Gießerei nachhaltig zu verbessern.

Durch den Industrierversuch wurde nachgewiesen, dass mittels Regenerat ein Formstoffkreislauf aufgebaut werden kann, der sich zur Gussteilerzeugung eignet. Prinzipiell lässt sich durch mechanische Regenerierungsanlagen der auf dem Sandkorn verbliebende Zement entfernen, wobei der Restzement mit keiner Anlagenkonfiguration rückstandlos entfernt werden konnte. Auf Grund des Vergleiches der Formstoffkreisläufe des Industrierversuches (Wöhr-Fliehkraftreiniger im Durchlaufbetrieb arbeitend) mit dem des Gemco-Schleifregenerator (Chargenbetrieb) lässt sich aus technischer Sicht folgendes zum Aufbau eines Ettringitzement-Formstoffkreislaufes festhalten: Der aufwachsende Zement verschlechtert gleichzeitig die Regenerierung und die Festigkeit des Formstoffsystems. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Regenerierintensität ab dem 2. Umlauf erhöht werden muss, da hier neben dem neu zugegeben Binder zusätzlich der Restzement des Regenerats zu entfernen ist. Von da an kann die Intensität konstant gehalten werden und es bildet sich ein Komponentengleichgewicht. Das bedeutet, dass beim Einfahren des Zementformstoffsystems mit Neusand ab dem 2. Umlauf eine höhere Regenerierungsintensität notwendig ist. Es gibt demzufolge theoretisch ein Regenerierungsgrad₁ für den ersten Umlauf und einen Regenerierungsgrad_{2...∞} für die restlichen Umläufe. Dieser Wert ist prozessspezifisch und dementsprechend keine allgemein gültige Aussage möglich. Hierbei ist zu beachten, dass die Erhöhung der Regenerierintensität das Ausbringen verringert. Wodurch gegebenenfalls weniger Regenerat zur Verfügung steht wie es der Wiedereinsatzgrad zulässt. Aus wirtschaftlicher Sicht sollte der Regeneratanteil so hoch sein, wie es der Wiedereinsatzgrad ermöglicht. Das Festigkeitsniveau des Gemco-Schleifregenerator-Formstoffkreislaufes liegt trotz des höheren Regeneratanteils bei der Formstoffherstellung (93,3 %) in derselben Größenordnung wie das des Industrierversuch (70 %). Hierdurch lässt sich erkennen, dass sich ein kontinuierlicher Energieeintrag auf das Sandkorn bei gleichzeitiger Verwendung eines

Schleifkörpers besser zur Entfernung des Restzementes eignet als der in diesem Projekt untersuchte Durchlaufbetrieb. Die Ursache ist die stärkere Haftung des Restzementes auf dem Sandkorn sowie der höhere Bindergehalt im Vergleich zu den kaltharzgebundenen Formstoffen, für den der Wöhr-Fliehkraftreiniger ursprünglich konzeptioniert ist. Eine allgemeingültige Quantifizierung eines Formstoffkreislaufes ist nur schwer möglich, da der notwendige Gesamt-Regenerierungsgrad von der tatsächlichen Formstoffrezeptur und dem erzielbaren Regenerierungsgrad der in der Gießerei vorhandenen Anlagen (Knollenbrecher, Regenerierungsanlage) abhängt. Die Umstellung einer Gießerei kann daher als individuelle Aufgabenstellung betrachtet werden.

Das Projektziel wurde grundsätzlich erfüllt. Im industriellen Maßstab ist nachgewiesen, dass mittels Regenerats aus zementgebundenen Formstoffen Gussteile mit konstanter Qualität hergestellt werden können. Unter bestimmten Rahmenbedingungen, wie Neusandzugabe über 10 % im Furanharz-Formstoffkreislauf oder strenge Anforderungen in Hinblick auf Emissionen und Geruchsimmissionen auf Grund des Standortes, ist die Umstellung einzelner Gießereien schon jetzt lukrativ. Auf Grund der bisherigen Erfahrungen mit dem Ettringitzement ist der Prozessablauf des Formverfahrens sehr ähnlich zum Furanharz, sodass die Umstellung für die Belegschaft als unproblematisch einzustufen ist. An dieser Stelle ist noch anzumerken, dass diese Ergebnisse zum gegenwärtigen Zeitpunkt mit einem Formstoffbinder erzielt wurden, dem noch ein Prototypen-Status zugeordnet werden kann. In Hinblick auf die industrielle Anwendung ist von einer weiteren Optimierung durch den Hersteller auszugehen. Dies wurde bereits im Rahmen des Industrierversuches unter Beweis gestellt, in dem in kurzer Zeit die Aushärtungscharakteristik des Zementes auf die vorherrschenden Bedingungen angepasst wurde.

1. Einleitung

Der im Rahmen des Projektes „RapidZem“ entwickelte hydraulische Formstoffbinder, der sogenannte Ettringizement, eignet sich für den regulären Betrieb einer Vollformgießerei und hat sich darüber hinaus auch im Hohlformverfahren bewährt. Der Ettringizementformstoff kann sowohl in Chargenmischern als auch in Durchlaufmischern hergestellt werden und bietet eine ausreichend lange Verarbeitungszeit. Die Aushärtungscharakteristik dieses Formstoffsystems gewährleistet eine ausreichende Produktivität im Mittel- und Großguss (Gießgewicht zwischen 1,5 bis 200 t). Formen aus Ettringizementformstoff können nach spätestens acht Stunden abgegossen werden. Das Auspacken und das Entkernen ist vergleichbar mit kaltharzgebundenen Formstoffen und damit wesentlich einfacher als beim herkömmlichen Portlandzementformverfahren. Auch die erzielbare Oberflächengüte des Ettringizementformstoffes ist durch den Einsatz von Schlichte ähnlich zu den furanharzgebundenen Formstoffen. [1, 15]

Für den industriellen Einsatz des Ettringizementformstoffes ist es zwingend notwendig, dass dessen Regenerierbarkeit untersucht wird. Diese muss aus wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten nachgewiesen werden, um sicherzustellen das dieses Formstoffsystem den Ansprüchen eines modernen Formstoffes genügt und im Formstoffkreislauf gefahren werden kann. Ziel des Projektes „RegoZem“ ist es die Aufbereitung und Wiederverwendung von zementgebundenen Formstoffen zu untersuchen, um so eine Grundlage für die Umstellung von Gießereibetrieben hin zu zementgebundenen Formstoffen zu liefern. Die großflächige Substitution der kaltharzgebundenen Formstoffe durch den zementgebundenen Formstoff bietet eine vielversprechende Perspektive. Hierdurch können die umwelt- und gesundheitsschädlichen Emissionen wie Schwefeldioxid und flüchtigen Kohlenwasserstoffen (z.B. BTEX) erheblich reduziert werden. „Allein die BTEX-Emissionen könnten in Deutschland um mehr als 500 Tonnen pro Jahr reduziert werden. Obwohl Deutschland nur 5% der weltweiten Gusswerkstoffproduktion ausmacht, wird diese Reduzierung der schädlichen und geruchsintensiven Emissionen besonders in den Gießereien im unmittelbaren Arbeitsumfeld der Mitarbeiter auftreten und somit eine einzigartige Gelegenheit bieten, die Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter und die Umwelt rund um die Gießereien nachhaltig zu verbessern.“ [1]

2. Stand der Technik

2.1. Zementformstoff

2.1.1 Formstoffsystem

Der Zementformstoff besteht aus einem mineralischen Formgrundstoff (Korngrößenbereich 0,02 bis 2,0 mm) sowie Zement und Wasser als Formstoffbinder. Additive, welche die Aushärtung des Zements beeinflussen, können sowohl dem Zement als auch dem Anmachwasser zugegeben werden. Der Formgrundstoff macht mit einem Anteil von 87 % bis 94 % den größten Bestandteil des Zementformstoffes aus. Auf Grund der geringen Beschaffungskosten und seiner Kompatibilität mit allen Bindersystem ist Quarzsand der am häufigsten eingesetzte Formgrundstoff. Die in Deutschland vorkommenden Quarzsande haben einen SiO_2 Anteil von über 99 %. Je nach Anwendungsgebiet kommen auch Spezialsande wie Chromerz- oder Olivinsand etc. zum Einsatz. Im Gegensatz zum Beton bzw. Mörtel weist das Gefüge des Formstoffes eine deutlich höhere Porosität auf. Diese ist notwendig, damit die Form eine ausreichende Durchlässigkeit für die beim Gießen entstehenden Gase besitzt. Die zur Manipulation oder zum Abguss der Form notwendige Stabilität wird maßgeblich von der Festigkeit des Formstoffsystems bestimmt (*Abb. 1*). Das physikalische und chemische Formstoffverhalten ist ausschlaggebend zur Vermeidung von formstoffbedingten Gussfehlern. Die zuvor genannten Anforderungen müssen vor allem die Oberflächenschichten, welche den Formhohlraum bilden, erfüllen. Das entspricht ca. 10 bis 20 % der Formstoffes. Die dahinterliegenden Schichten haben lediglich eine Stützfunktion. Durch strengere Luftschadstoff- und Arbeitssicherheitsverordnungen können die Emissionen des Binders eines Formstoffsystems heutzutage ebenfalls als Anforderung betrachtet werden.

[1, 14, 23, 34]

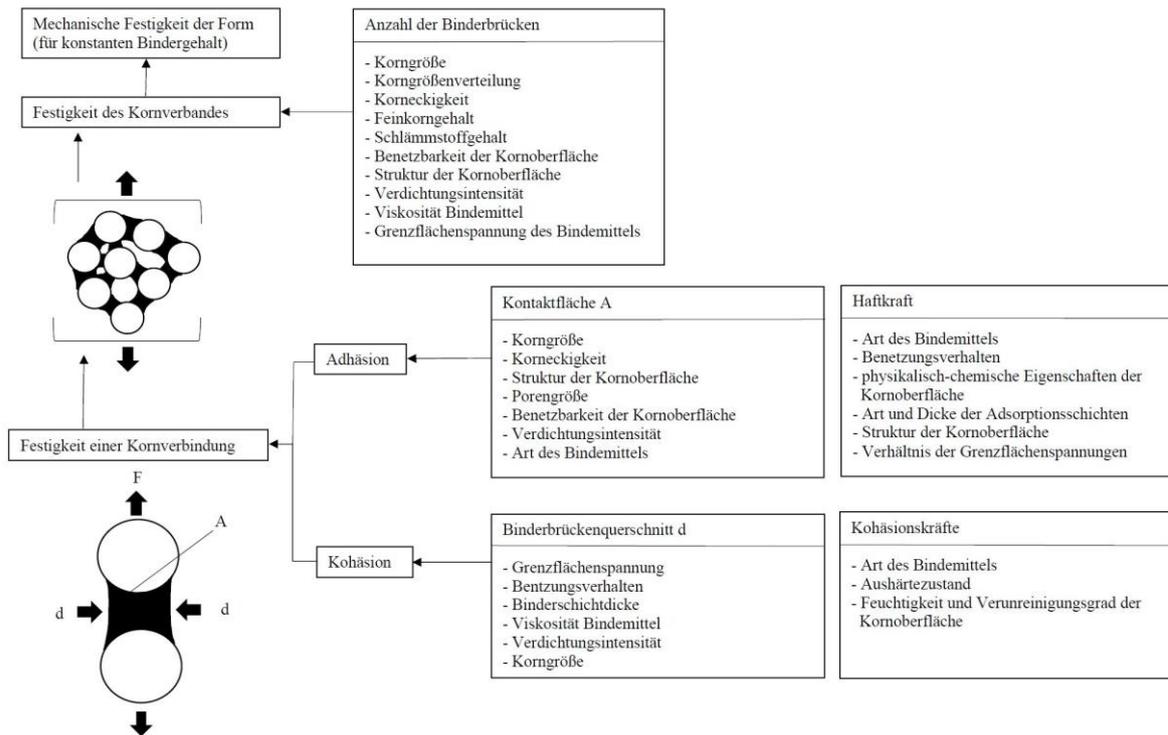


Abbildung 1 theoretische Einflussgrößen auf die Festigkeit des Formstoffsystems nach [14]

Aktuell ist das umweltfreundliche Zementformverfahren mit Portlandzement auf Grund seiner geringen Produktivität nur noch eine Nischenanwendung zur Herstellung von Schiffpropellern aus Aluminiumbronze. Auf Grund der langen Aushärtezeiten (Gießbereitschaft zwischen 36 und 72 h) wurde das Formverfahren im restlichen Großgussbereich weitestgehend durch kaltharzbundene Binder wie Furan- oder Phenolharz verdrängt. Darüber hinaus besitzen diese kaltselfhärtenden Formstoffsysteme weitere technologische Vorteile wie u.a. bessere Zerfallseigenschaften, Verarbeitbarkeit, Festigkeit und einen hohen Wiedereinsatzgrad des Regenerates. Andererseits entstehen bei der Verwendung von organischen Binder bei allen Arbeitsschritten in der Gießerei gesundheitsschädliche Emissionen; hierzu zählen Formaldehyd, Fufurylalkohol, Phenol, CO, SO₂, BTEX und polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Die Binderhersteller sind sich dieser Problematik bewusst und bemüht die Schadstoffpotenziale der Binder zu reduzieren. Die Substitution der Kaltharzverfahren durch Ettringitzement gebundenen Formstoff bietet die Möglichkeit zur Minderung der diffusen Emissionen. Vor allem beim Abguss (Tab. 1) entstehen außer Wasserdampf keine gesundheitsschädlichen Emissionen wie SO₂ und BTEX. Die bei der Zementherstellung anfallenden Menge an SO₂ und BTEX fällt gegenüber den Furanharz deutlich geringer aus. Bei einem Bindergehalt von 6 % liegt die Emission an CO₂ minimal über der von Furanharz, bei

einem geringerem Energieverbrauch. Bei einem Zementgehalt von 10 % ist die Emission von CO₂ gegenüber Furanharz um 38 % erhöht, während sich der Energieverbrauch kaum unterscheidet. [1, 5, 14] Den höheren Emissionen an CO₂ ab einem Bindergehalt von über 6 % steht die deutliche Einsparung an organischen Emissionen am Arbeitsplatz gegenüber.

Tabelle 1: Gesamtbetrachtung der Emissionen des Ettringizementes im Vergleich zum Furanharz (0,85 % Furanharz & 0,35 % p-Toluol-Sulfonsäure) bei der Herstellung und beim Abguss nach [1]

Herstellung	4 % Ettringizement	6 % - Ettringizement	8 % - Ettringizement	Furanharz
Energieverbrauch [MJ/kg]	0,29	0,44	0,59	0,58
CO ₂ [g/kg]	29,01	43,51	58,01	42,41
SO ₂ [mg/kg]				
Herstellung	6,50	9,74	12,99	0
Abguss	0	0	0	107,09
BTEX [mg/kg]				
Herstellung	0,13	0,20	0,27	0
Abguss	0	0	0	82,09

Der Ettringizement besitzt eine zum Furanharz vergleichbare Festigkeitsentwicklung. Der Zementformstoff weist nach ca. 1,5 Stunden die minimale Ausschalfestigkeit (15 N/cm²) und die Abgussfestigkeit (100 N/cm²) nach ca. 6 Stunden auf. Ab diesem Zeitpunkt beträgt das Festigkeitsniveau des Ettringizementes ca. die Hälfte vom Furanharz. Im Vergleich dazu erreicht das Furanharz bereits nach einer Stunde die Abgussfestigkeit (*Abb. 2*). Die Vorgabe, dass der Zementformstoff die Abgussfestigkeit nach spätestens 8 Stunden erreicht, hängt mit dem Produktionsablauf einer typischen Großguss-Gießerei zusammen. [1, 14] Die durch den Fertigungsprozess (Formverfahren, Gussteilsortiment, Kapazität etc.) vorgegebene Zeit zwischen Formherstellung und Abguss ist für jede Gießerei individuell. Für den potentiellen Einsatz des Ettringizementes im Mittel bis Großgussbereich ist die Aushärtungsgeschwindigkeit des Zementformstoffes, in Hinblick auf den Erhalt der Produktivität einer Gießerei, als ausreichend einzuschätzen.

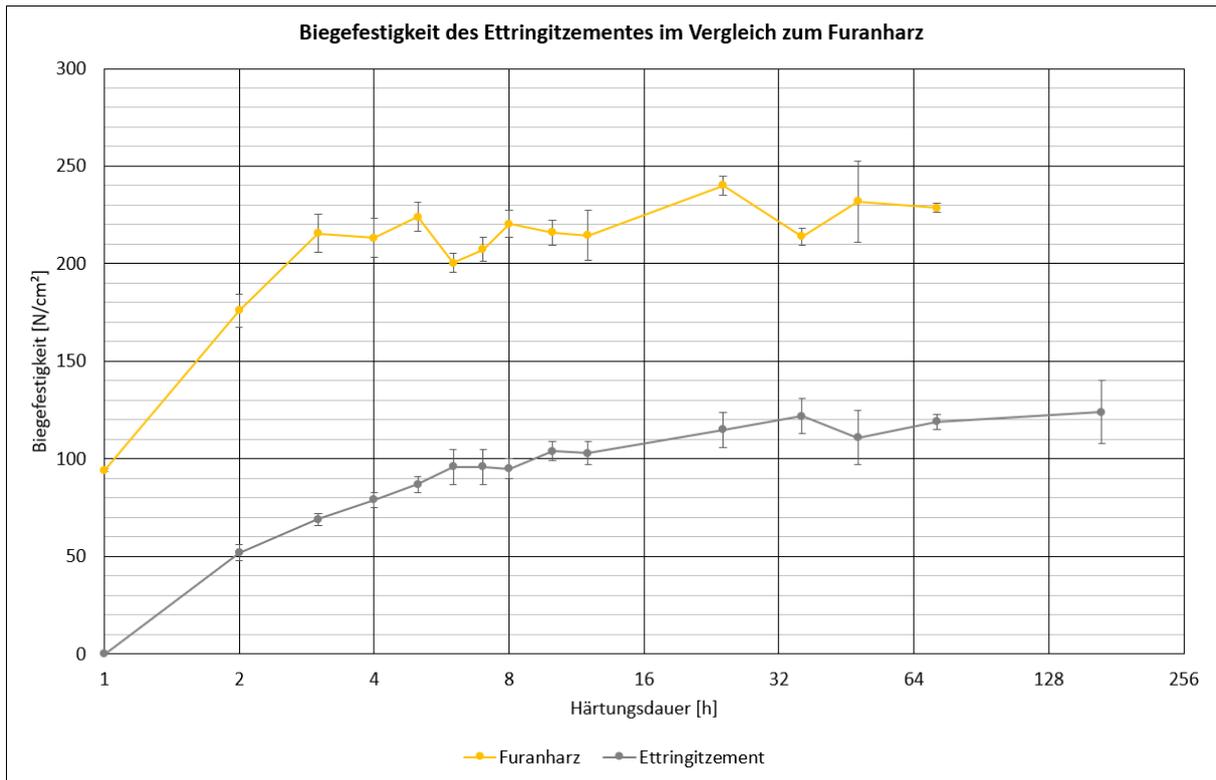


Abbildung 2: Festigkeitsentwicklung des Quarzsandes H 32 mit 10 % Ettringitzement im Vergleich zur Furanharz-Referenz [1]

Auf Grund seiner anorganischen Bindestrukturen weist der Zement, im Gegensatz zum Furanharz, auch bei Temperaturen über 400 °C noch Restfestigkeiten (Abb. 3) auf. Dadurch kann der Ettringitzement, trotz der vergleichsweise niedrigeren Biegefestigkeit, als Binder im Mittel- und Großguss verwendet werden. In der Praxis ist die Temperaturbelastung beim Großteil der Form unter 300 °C. Deshalb ist das Auspackverhalten einer ettringitzementgebundenen Form ähnlich zu bewerten wie die einer furanharzgebundenen Form und damit deutlich besser als bei Portlandzement gebundenen Formen. [1, 5, 14, 15]

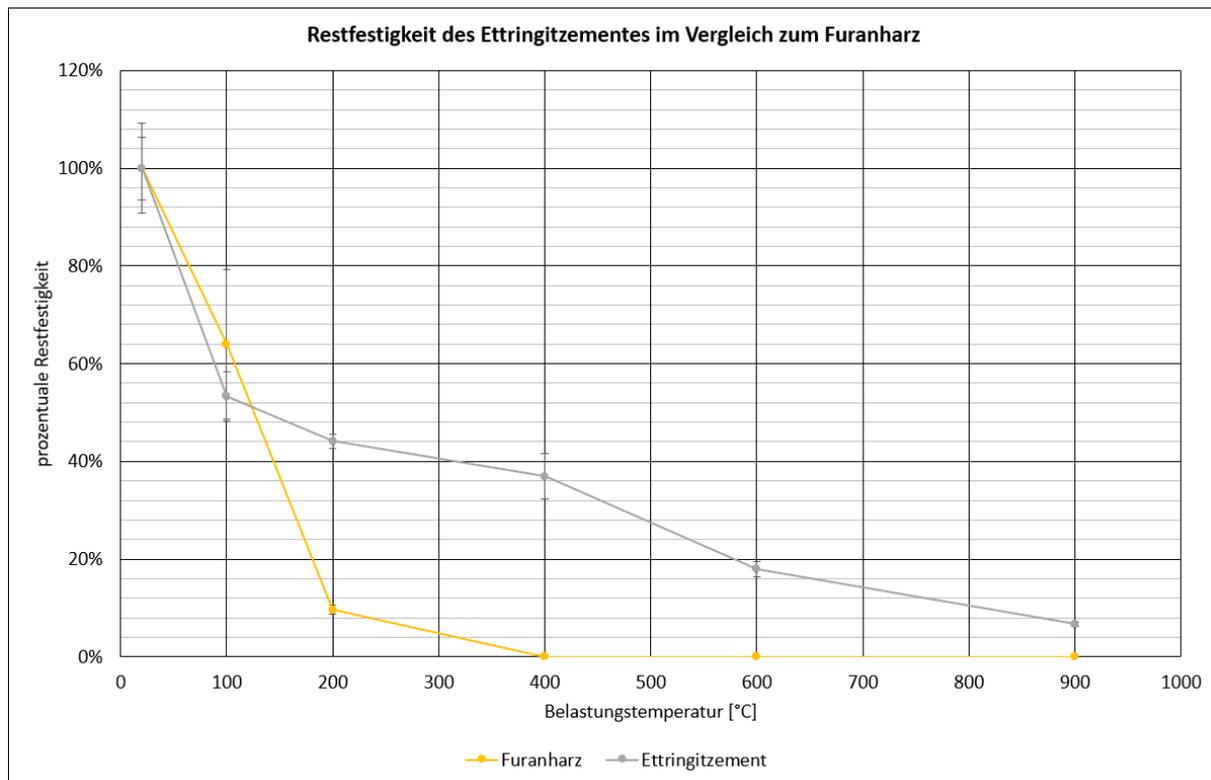


Abbildung 3: Restdruckfestigkeit des Quarzsandes H 32 mit 10 % Ettringizement (100 % = 195 N/cm²) im Vergleich zur Furanharz-Referenz (100 % = 777 N/cm²) [1]

Im Mittel- und Großgussbereich ist es üblich die Form händisch zu verdichten. Durch die damit verbundene höhere Verdichtung des Formstoffes werden höhere Biegefestigkeiten bei gleichem Zementgehalt erreicht. Bei einem Zementgehalt von 10 % besitzt der Formstoff (H 32 – mittlere Korngröße = 0,29 mm) bereits nach zwei bis drei Stunden Härtungsdauer die Abgussfestigkeit. Im Umkehrschluss kann bei handverdichteten Formen mit weniger Binder gearbeitet werden. Als Anlegeformstoff ist dies beim H32 bis zu einem Zementgehalt von 8 % als sinnig einzuschätzen. Für die in [15] hergestellten Glocken wurde diese Formstoffrezeptur erfolgreich verwendet. Bei 4 % Bindergehalt erreicht ein Formstoff mit H 32 auch bei handverdichteten Formen lediglich die minimale Ausschalfestigkeit und ist somit für den praktischen Gebrauch ungeeignet (Abb. 4). Im Projekt „RapidZem“ wurde bei den Abgussversuchen der gröbere Quarzsand QQS 60 (mittlere Korngröße = 0,60 mm) verwendet. Durch dessen geringere spezifische Oberfläche gegenüber H32, kann der Bindergehalt des Formstoffes für das gleiche Festigkeitsniveau reduziert werden (Abb. 5). [1, 14, 35]

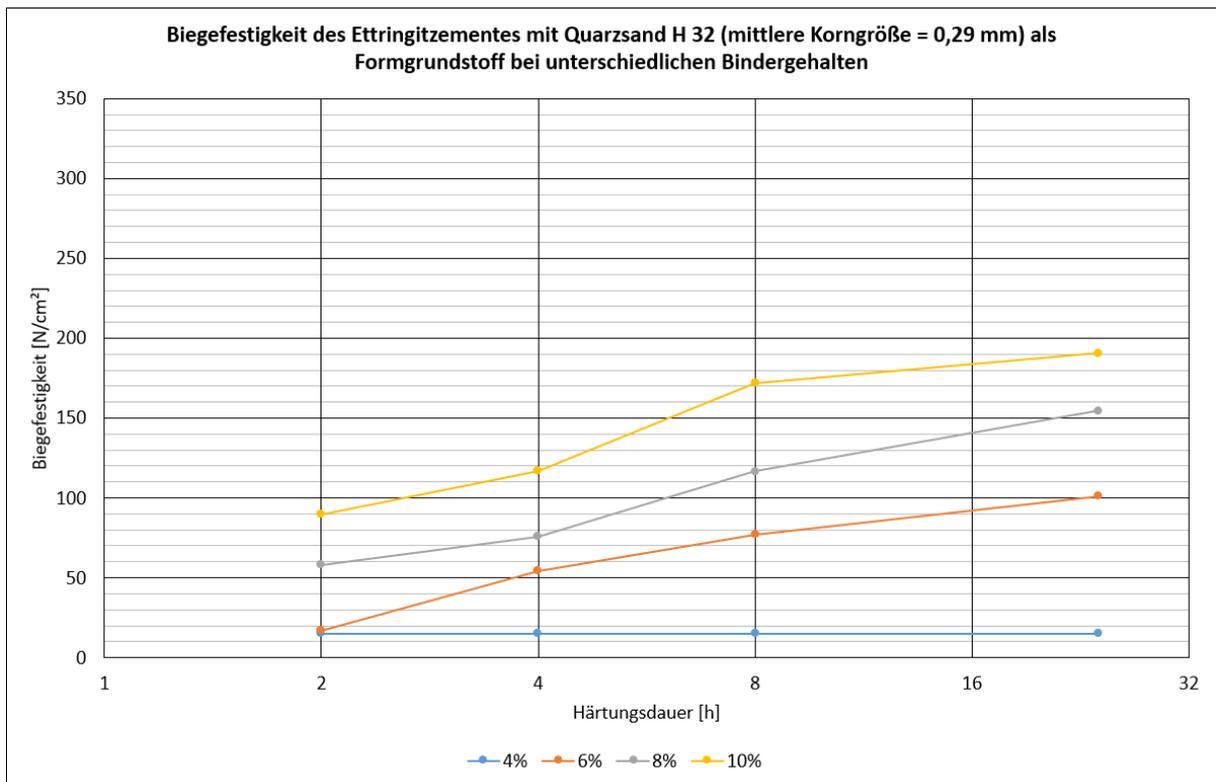


Abbildung 4: Biegefestigkeit eines handverdichteten Formstoffes mit H 32 als Formgrundstoff bei unterschiedlichen Bindergehalten nach [35]

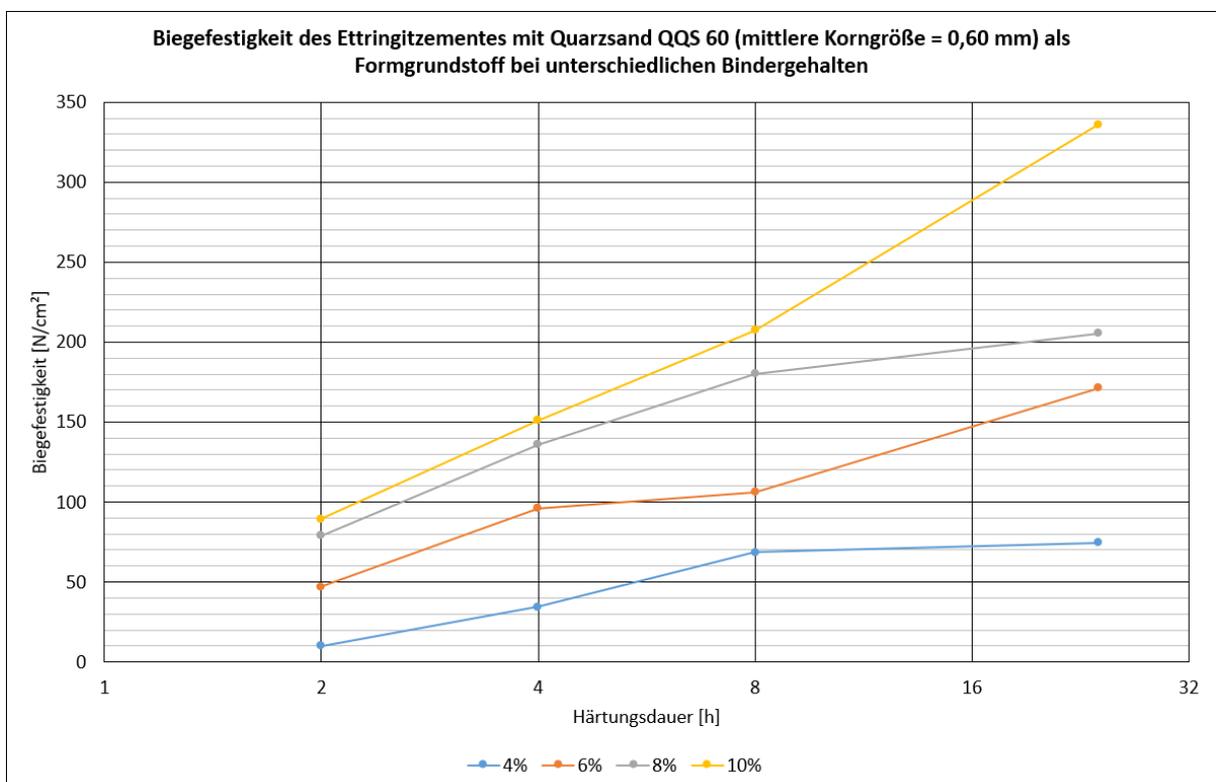


Abbildung 5: Biegefestigkeit eines handverdichteten Formstoffes mit QQS 60 als Formgrundstoff bei unterschiedlichen Bindergehalten nach [35]

Die Gasdurchlässigkeit des Zementformstoffes nimmt sowohl bei H 32, als auch bei QQS 60 mit steigendem Bindergehalt ab, wobei der Abfall bei gröberem Quarzsand stärker ausfällt. Auf Grund der größeren mittleren Korngröße liegt die Gasdurchlässigkeit des QQS 60 deutlich über der von H 32. Bei identischen Formgrundstoff liegt die Gasdurchlässigkeit des Ettringitzementformstoffes in derselben Größenordnung wie die des Furanharzformstoffes (Abb. 6). Auf Grund der zum Furanharz (Polykondensation) verschiedenen Aushärtungscharakteristik bildet der Zementformstoff (Hydratation) trotz des vermeintlich hohen Bindergehaltes eine ausreichende Gasdurchlässigkeit aus. [1, 14, 25, 35]

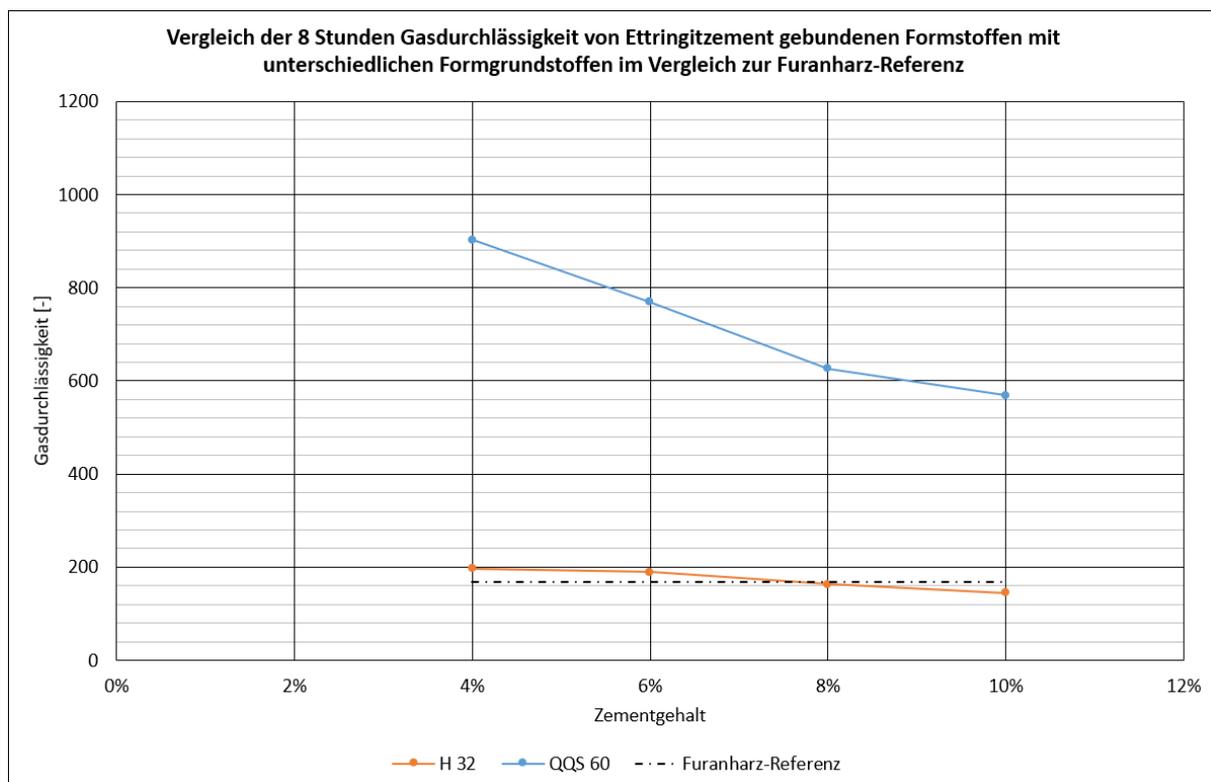


Abbildung 6: Vergleich der 8 Stunden Gasdurchlässigkeit von Ettringitzement gebundenen Formstoffen mit unterschiedlichen Formgrundstoffen im Vergleich zu einer Furanharz-Referenz [1, 35]

In den beiden Projekten [1, 15] wurden Gussteile aus Glockenbronze, GJS und GJL, mittels Zementformstoff gefertigt, welche die Qualitätsansprüche vergleichbar zum Furanharzverfahren erfüllten. Die getrockneten Zementformen können äquivalent zum Furanharzformstoff geschichtet werden. Als Trägerflüssigkeit der Schichte können sowohl Wasser als auch Alkohol verwendet werden. Die dabei verwendeten Feuerfeststoffe der Schichten waren Zirkonsilikat, Aluminiumoxid, Aluminiumsilikat und Graphit. Handelsübliche Schichten sind damit problemlos anwendbar. Entsprechend der Erkenntnis aus den Projekten „RapidZem“ und „Direktformverfahren zur Herstellung von hochpräzisen Läuteglocken“ kann

der Ettringitzement als Binder im Hohlformverfahren und Vollformverfahren eingesetzt werden. Darüber hinaus lassen sich auch gefräste Formen aus diesem Formstoff herstellen. Bei der Verwendung im Hohlformverfahren ist zu beachten, dass für die Dauermodelle Schutzlacke verwendet werden, die im basischen Milieu beständig sind. Als Fazit ist festzuhalten, dass der Ettringitzement ein geeigneter Binder für den Mittel- und Großgussbereich ist. Allerdings ist es für die Wirtschaftlichkeit des Zementformstoffes und im Sinne der Ressourcenschonung zwingend erforderlich, dass der Formgrundstoff zurückgewonnen werden kann und im Kreislauf gefahren werden kann. Dieser Punkt wurde im Rahmen des Projektes „RegoZem“ untersucht. [1, 14, 15]

2.1.2 Ettringitzement

Das im Projekt „RegoZem“ eingesetzte Bindemittel wurde bereits im Projekt „RapidZem“ entwickelt. Dabei musste ein hydraulischer Formstoffbinder gefunden werden, der einen für die Formherstellung geeigneten Härungsverlauf aufweist. Aufgrund der langsamen Festigkeitsentwicklung scheiden Portlandzemente vor diesem Hintergrund aus. [1, 25, 30] Ternäre Systeme bestehend aus Tonerdezement, Calciumsulfat und Portlandzement zeichnen sich dagegen durch eine sehr schnelle Festigkeitsentwicklung aus. Derartige Schnellzemente werden häufig für Vergussmassen, Spachtel oder Schnellestriche verwendet. Um Wechselwirkungen des im Portlandzement enthaltenen Sulfatträgers mit dem Calciumsulfat des ternären Systems zu vermeiden, wurde im Projekt „RapidZem“ reiner Portlandzement-Klinker eingesetzt. Als Calciumsulfat kam ein Halbhydrat zum Einsatz. Die erreichbaren 8-Stunden-Festigkeitswerte sind in *Abbildung 7* dargestellt. Die verwendete Zusammensetzung des Ettringitzementes im Projekt „RegoZem“ ist im Dreistoffdiagramm gekennzeichnet.

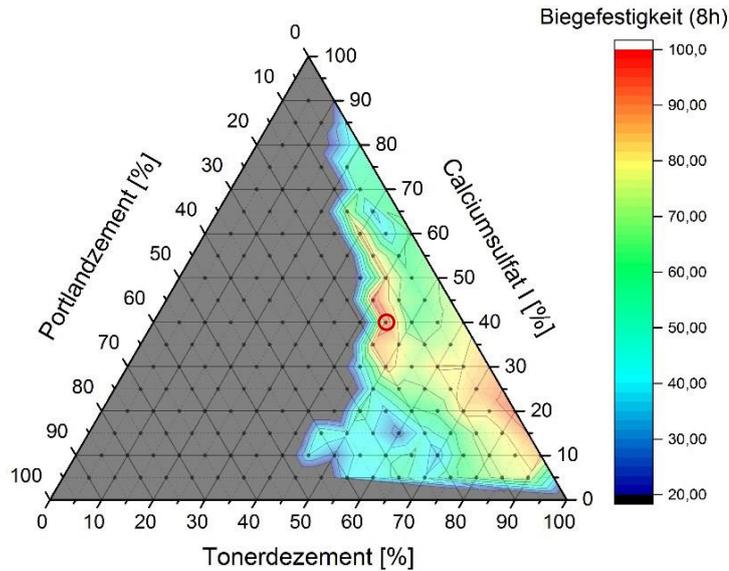
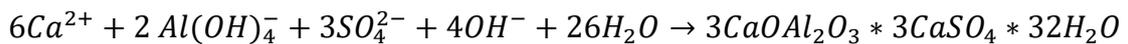


Abbildung 7: 8 Stunden Biegefestigkeit von Zementformstoffen im ternären System Tonerdezement – Calciumsulfat - Portlandzement [1]

Die Reaktionen im ternären System sind äußerst komplex und vielschichtig. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich in den ersten Stunden überwiegend Ettringit als dominierendes Hydratationsprodukt bildet:

(Formel 1)



Damit einher geht eine starke Wasserbindung (Ettringit besteht zu 46% aus Wasser) und eine erste Gefügeentwicklung. Ein wesentlicher Faktor für die Gefügeausbildung stellt das Aspektverhältnis der entstehenden Ettringitkristalle dar. Neben der Sulfatkonzentration nimmt auch der pH-Wert (Abb. 8) der Lösung Einfluss auf das Längen- zu Dickenverhältnis des Ettringits. [4, 18, 20, 25]

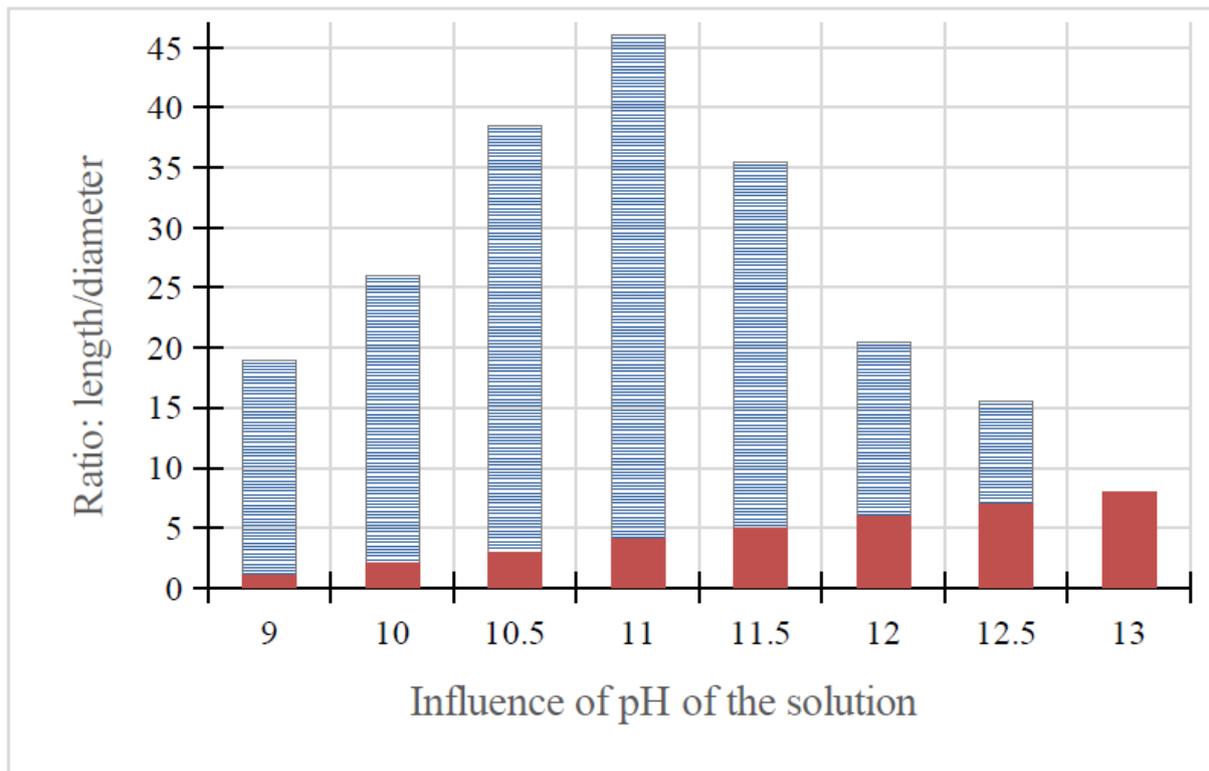


Abbildung 8: Änderung des Ettringithabitus in Abhängigkeit vom pH-Wert in der Reaktionslösung [18, 25]

Zur Gewährleistung einer guten Verarbeitbarkeit bei gleichzeitig schneller Festigkeitsentwicklung wird in der Praxis üblicherweise ein Wasser/Zement-Wert von ca. 0,5 angestrebt. Zur Verhinderung einer zu schnellen Erstarrung des Schellzementes im ternären System eignen sich Carbonsäuren z. B. Citronensäure, als Verzögerer [1, 20, 29]. Zur Beschleunigung der Festigkeitsentwicklung werden häufig Alkalicarbonate eingesetzt [20].

Die durch die XRD detektierten Gefügebestandteile (Abb. 9) des hydratisierten Spezialzementes sind Ettringit, Gips, Halbhydrat und Anhydrit. Silikat-haltige Hydratphasen sowie AH_3 , beides amorphe Phasen, konnten bei den gewählten Einstellungen für die Untersuchung nicht nachgewiesen werden. Diese können gegebenenfalls auf Grund ihres geringen Volumenanteils im Gefüge mittels XRD nicht nachgewiesen werden, hier liegt die Nachweisgrenze bei ca. 1 Vol.-% für kristalline Anteile. Dies wird bei Reflexüberlagerungen verschlechtert. Die Anwesenheit von Gips bedeutet, dass sich mehr Sulfat im System befindet, als zur Ettringitbildung notwendig ist. Das Anhydrit kommt aus dem Halbhydrat, es entsteht als Nebenprodukt bei dessen Herstellung. Die Anwesenheit von Halbhydrat und Anhydrit ist damit zu erklären, dass nach der Bildung von Ettringit nicht ausreichend Wasser zur Verfügung steht, um das verbliebene Halbhydrat bzw. Anhydrit komplett in Gips umzuwandeln. Der

Ettringizement ist damit erwartungsgemäß bei einem w/z-Wert von 0,5 nicht vollständig hydratisiert. Eine Änderung des w/z-Wert führt nach [1, 12] bei der Anwendung im Formstoffsystem zur Verschlechterung der Eigenschaften.

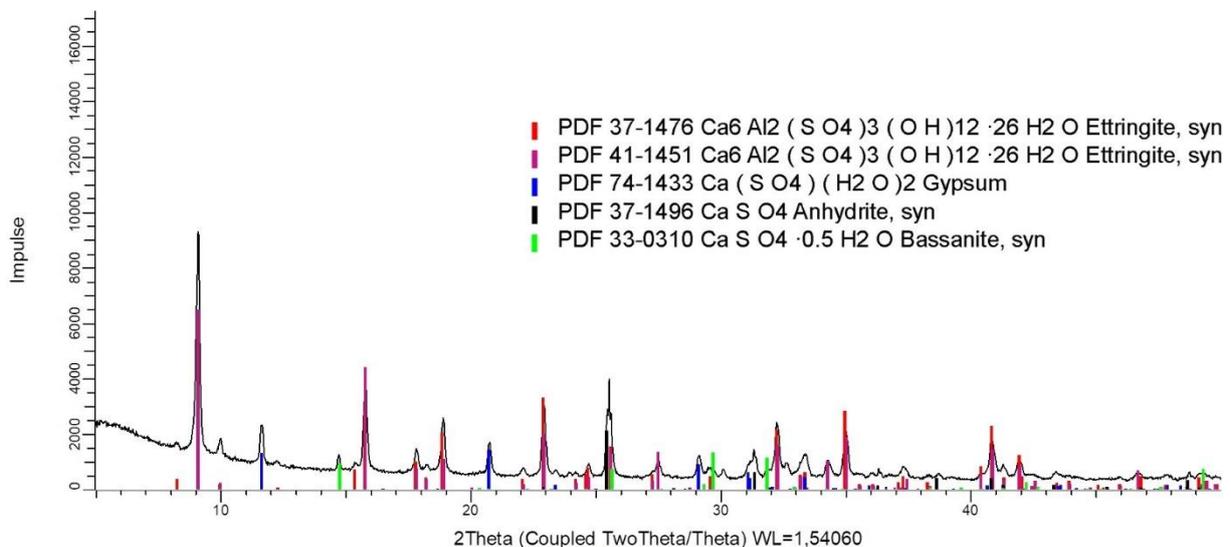


Abbildung 9: XRD des Ettringizementleims 40/45/15 (w/z-Wert = 0,5) [15]

2.2 Regenerierung

In der Gießereitechnik bedeutet die Regenerierung die Rückgewinnung des Formgrundstoffes aus einem anfallenden Altsand, mit dem Ziel diesen wieder als Formgrundstoff einzusetzen. Dieser wiedergewonnene Formgrundstoff wird als Regenerat bezeichnet. Die Regenerierung kommt vorrangig bei chemisch gebunden Formstoffen zum Einsatz, da die Bindefähigkeit des Harzes oder Zementes nach dem Einsatz irreversibel ist. Hierzu werden Prozessschritte aus der Aufbereitungstechnik verwendet. [3, 5, 14]

Die zunehmende Notwendigkeit der Regenerierung hat folgende Ursache: [13, 14, 16, 17]

- Verfügbarkeit geeigneter Quarzsande nimmt ab, dadurch ansteigende Beschaffungskosten
- Anstieg der Kosten für Transport von Neusand sowie Transport und Deponierung von Altsand bzw. Staub
- Probleme bei der Deponierung durch zunehmende Abfallmengen sowie gesetzliche Auflagen
- Ressourcen- und Umweltschonung

Die Verfahrensschritte der Altsandregenerierung sind in *Abbildung 10* dargestellt. Dabei wird die Regenerierung in einstufige und mehrstufige Regenerierung unterschieden. Vor der

Regenerierung wird der Altsand durch Zerkleinerung der Knollen auf seine Einzelkorngröße gebracht. Dabei wird das Überkorn durch Sieben abgeschieden. Dies geschieht beispielsweise in Prall- oder Kugelmühlen etc. In diesen Aggregaten wirken Schlag-, Scher-, Reib- und Prallbeanspruchungen auf die Knollen. Wenn die Kohäsionskräfte des Binders stärker sind als dessen Haftkräfte am Korn, wird in diesem Prozessschritt bereits ein Teil der Binderhülle entfernt. Ist dies der Fall, kann das Brechen der Altsandknollen als einstufige mechanische Regenerierung betrachtet werden. Bei den kaltharzgebundenen Formstoffsystemen reicht dieses meistens für die Wiederverwendung des Regenerates aus, im Gegensatz zu den ettringitzementgebundenen Formstoff. [1, 14]

Die zur Regenerierung eingesetzten Verfahren, werden nach [3, 14] in die vier Kategorien mechanische Regenerierung, pneumatische Regenerierung (Sonderform der mechanischen Regenerierung), Nassregenerierung und thermische Regenerierung eingeteilt (*Abb. 10*). Bei einer mehrstufigen mechanischen Regenerierung wird der kornvereinzelte Altsand in einer separaten Anlage einer mechanischen Belastung ausgesetzt, um die verbleibenden Binderhüllen zu entfernen. Dabei wird nun das Korn den eingangs erwähnten Schlag-, Scher-, Reib- und Prallbeanspruchungen ausgesetzt. Die Reduzierung der Binderhüllen ist dabei proportional zur Belastung. Diese ist jedoch nach oben limitiert, da es mit zunehmender Intensität auch zur Kornzerkleinerung kommt. Zur Verstärkung der Reibbeanspruchung werden in Regenerierungsanlagen keramische Schleifsteine eingesetzt. Auf der anderen Seite gibt es auch Anlagen die so konzipiert sind, dass hauptsächlich Korn-an-Korn-Reibung stattfindet, da dies besonders schonend für das Quarzkorn ist. Dieses Anlagenkonzept wird vor allem als zweite Regenerierungsstufe bei kaltharzgebundenen Formstoffen eingesetzt. Auch bei der pneumatischen Regenerierung wird der Binder durch Korn-an-Korn-Reibung in einem Prall- oder Blasrohr entfernt. Durch das Abbremsen des Sand-Luftgemisches an einer Haube oder Scheibe tritt jedoch auch eine Prallbelastung auf. Hierdurch tritt bei diesem Verfahren ein starker Kornverschleiß sowie ein hoher Wartungsaufwand der Regenerierungsanlage auf, was mit erhöhten Regeneratkosten verbunden ist. Auf Grund der anorganischen Binderstruktur des Ettringitzementes kann eine thermische Regenerierung ausgeschlossen werden. Ebenso wie eine Nassregenerierung, da während des Prozesses durch den hohen Sulfatgehalt des Binders belastete Abwässer anfallen. Hinzukommt, dass es durch die aufwendige Anlagentechnik in Verbindung mit der Entwässerung des Regenerates und dessen Trocknung die höchsten Regeneratkosten aufweist. [1, 14, 22, 31, 33]

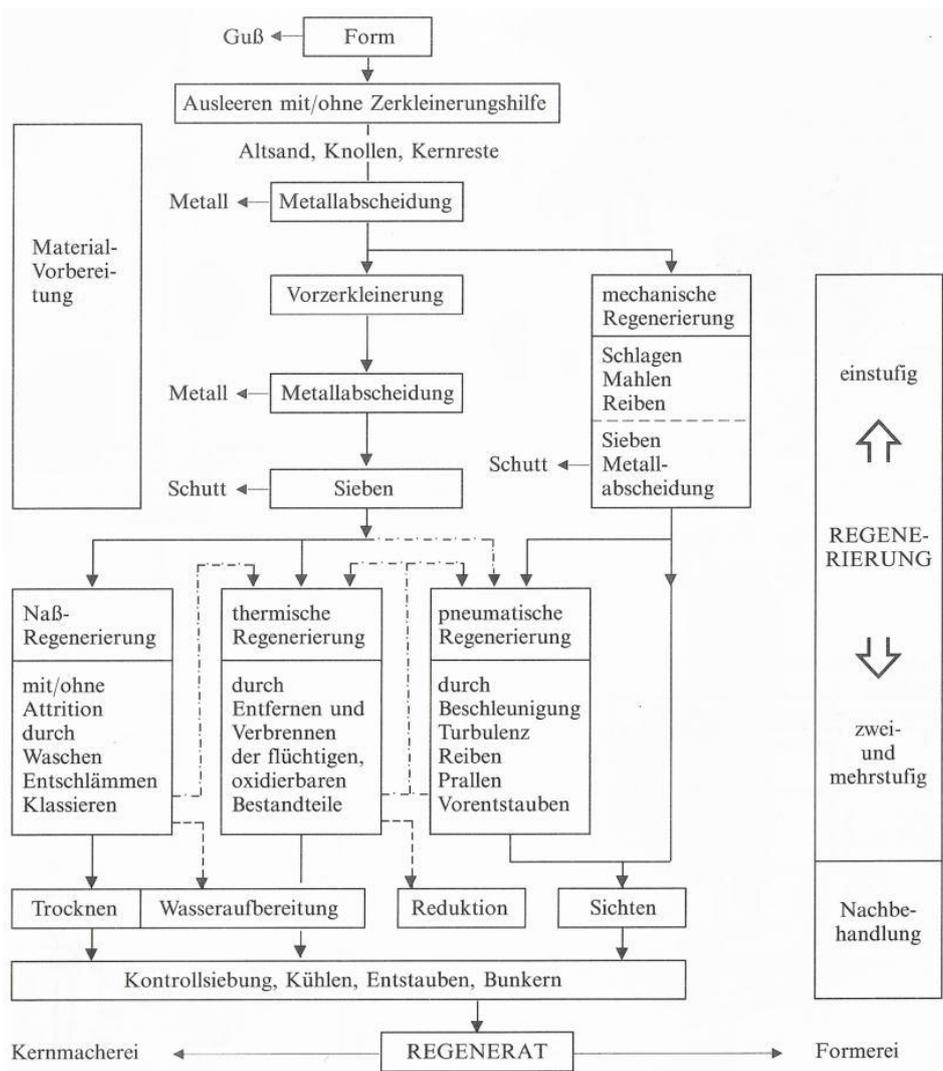


Abbildung 10: Verfahrensschritte der Altsandregenerierung [14]

Die Regenerierung und das Verhalten des Regenerates im Umlauf werden durch folgende Begriffe erläutert: [14]

- *Regenerierungsgrad α*

Dieser gibt die prozentuale Verringerung eines Störstoffes durch einmalige Regenerierung an. Die Schadstoffverminderung durch den Gießprozess kann beim Ettringitzement, auf Grund der anorganischen Binderstruktur, als vernachlässigbar angesehen werden.

Formel 2

$$\alpha = \frac{(P_A - P_E)}{P_A} * 100 [\%]$$

P_A Prüfwert, z.B. Restbindergehalt, im Ausgangszustand bzw. Altsand [%]

P_E Prüfwert im Regenerat [%]

- *Regeneratausbringen A*

Das Ausbringen ist die durch die Regenerierung zurückgewonnene Regeneratmenge in Bezug auf die Ausgangsmenge des Altsandes

Formel 3

$$A = \frac{m_1}{m_2} * 100 [\%]$$

m_1 Gewonnene Regeneratmenge

m_2 Eingesetzte Altsandmenge

- *Regeneratanteil R und Wiedereinsatzgrad W [%]*

Der Regeneratanteil gibt das Verhältnis von Regenerat zum Formgrundstoff an.

Der Wiedereinsatzgrad W gibt den Anteil des Regenerats am Formstoff an, der für einen spezifischen Prozess ohne Qualitätseinbußen möglich ist. Hierbei handelt es sich, um einen empirischen Grenzwert aus der Praxis, da dieser Wert vom Formstoffsystem und von der Formtechnologie beeinflusst etc. wird.

- *Komponentengleichgewicht G_∞*

Dieser Wert gibt an, wie sich der Restbindergehalt nach unendlichen vielen Umläufen einstellt. Dieser hängt vom Regenerierungsgrad, der Bindemittelzugabe und dem Regeneratanteil ab. Durch letzteren wird bestimmt wie stark der Schadstoff durch Neusandzugabe verdünnt wird.

Durch die Regenerierung fallen im Regenerat Feinanteile an, diese bestehen aus Binderresten, Quarzstaub und je nach Formstoffsystem zusätzliche Additive. Diese werden üblicherweise durch einen Schwerkraft-Gegenstromsichter entfernt. Die Trennung erfolgt dabei im Schwerefeld, hierbei wird sich die zunehmende Strömungswiderstandskraft gegenüber den Massenkräften bei abnehmender Partikelgröße zu Nutze gemacht. Durch eine an der Oberseite montierte Absaugung werden die durch den Luftstrom aufgetriebenen Partikel entfernt. Durch die Strömungsgeschwindigkeit der Luft wird der Trennschnitt bestimmt. Dieser ist entsprechend des gewünschten Kornbands zu wählen. Es ist zu beachten, dass mit abnehmender Partikelgröße die elektrostatische Aufladbarkeit zunimmt, was die Haftneigung der Partikel aneinander und an Wänden erhöht. Durch eine entsprechende Erdung der Anlagen kann dem entgegengewirkt werden. Je nach Anlagenkonzept ist nach der Regenerierung ein gesonderter Sichtprozess erforderlich. [14, 21, 28, 31, 33]

3 Durchführung

3.1 Untersuchung der Regenerate

Als Formgrundstoff wird auf Grund der vorteilhaften Kombination aus Gasdurchlässigkeit und Festigkeit der Quarzsand QQS 60 der Firma „Wolff & Müller Quarzsande“ eingesetzt. Der Nachteil, dass das Gussteil, bei der Verwendung gröberer Sande, eine erhöhte Oberflächenrauheit aufweist kann auf Grund des Vollformverfahrens vernachlässigt werden. Denn bei diesem Verfahren wird auf dem Vollformmodell eine dicke Schichteschicht aufgetragen und nicht direkt auf der Form. [14, 19] In *Abbildung 11* ist die Korngrößenverteilung des Quarzsandes QQS 60 im Vergleich zum H 32, ein Quarzsand mit einem für die Gießereiindustrie üblichen Kornband, dargestellt. Neben der gröberen mittleren Korngröße besitzt der QQS 60 mit 86 % einen höheren Gleichmäßigkeitsgrad als der H 32 mit 69 %.

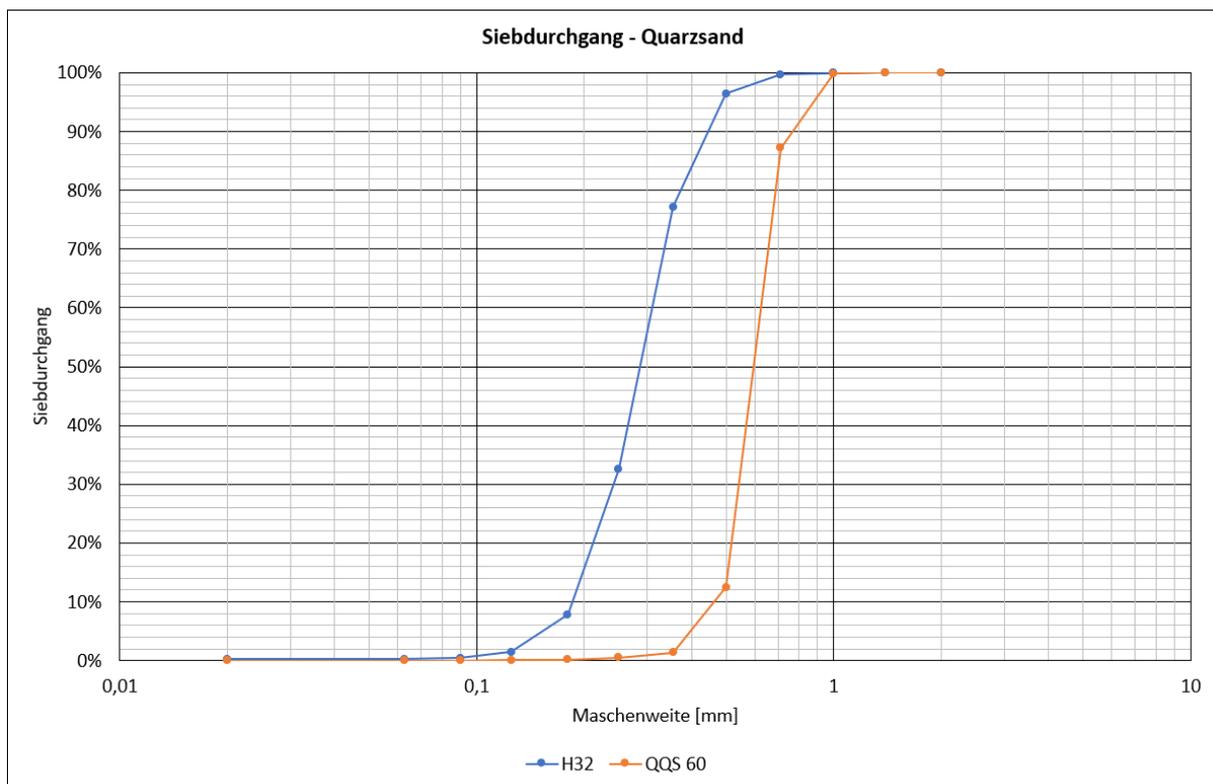


Abbildung 11: Vergleich der Siebanalysen der Neusande Haltern 32 (H32) – mittlere Korngröße = 0,29 mm & Gleichmäßigkeitsgrad = 69 % und Quedlinburger Quarzsand (QQS 60) – mittlere Korngröße = 0,60 mm & Gleichmäßigkeitsgrad = 86 %

Als relevante Prüfwerte der Altsand- und Regeneratproben haben sich folgende Formgrundstoffeigenschaften herauskristallisiert:

- *Granulometrische Eigenschaften entsprechend VDG-Merkblatt P27 [6]*

An Hand der Siebanalyse kann die Veränderung des Kornbandes während der Regenerierung bewertet werden. Außerdem wird der Anteil des Schlammstoffes (Partikelgröße < 0,02 mm) und der Anteil der Kornklassen 0,020 – 0,125 mm evaluiert. Diese haben auf Grund ihrer hohen spezifischen Oberfläche einem möglichen negativen Einfluss auf die Festigkeitsausbildung des Zementformstoffes im Formstoffkreislauf.

- *Restbindergehalt in Anlehnung an das VDG-Merkblatt P43 [9]*

Die Bestimmung des verbliebenen Zementes auf dem Quarzkorn (Restbindergehalt bzw. Restzement) nach der Regenerierung wurde mittels Waschen der Proben in Ortho-Phosphorsäure bestimmt. Dieses Verfahren wurde für tongebundene Formstoff entwickelt, um den Oolithisierungsgrad zu bestimmen. Auf Grund der Belegung des Fachbegriffes Oolithisierungsgrad für den auf den Quarzsand aufgebrannten Bindeton wird der Wert für den Zementformstoff wie o.g. als Restbindergehalt oder Restzement bezeichnet. Dieses Verfahren eignet sich nachweislich für den Ettringitzementformstoff (Abb. 12).

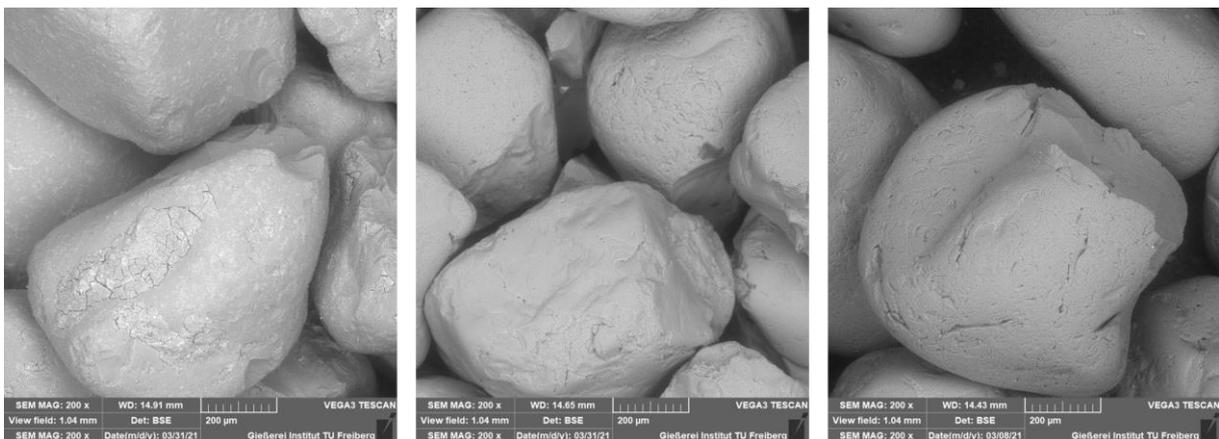


Abbildung 12: Vergleich des Einflusses von Ortho-Phosphorsäure auf den Restbindergehalt bei Ettringitzement gebundenen Formstoffen. links) Regenerat, Mitte) behandeltes Regenerat, rechts) Neusand. Beim Vergleich der 3 Abbildungen fällt auf, dass der Zement durch die Behandlung mit Ortho-Phosphorsäure rückstandslos vom Quarzsandkorn entfernt wurde.

Neben den Formgrundstoffeigenschaften muss der Einfluss des Regenerates auf die Festigkeit und Gasdurchlässigkeit des Formstoffes untersucht werden. Ziel ist es dabei mit einem so hoch wie möglichen Regeneratanteil die theoretische Mindest-Abgussfestigkeit von 100 N/cm² nach 8 Stunden zu gewährleisten. [14] Zur Aushärtung wurde der Formstoff mit 8 % Ettringitzement und einem konstanten W/Z-Wert von 0,5 hergestellt, wodurch sich folgende Zusammensetzung ergibt (Tab. 2):

Tabelle 2: Zusammensetzung des Ettringitzementformstoffes

Bestandteil	Anteil am Formstoff
Quarzsand	89,29 %
Ettringitzement	7,14 %
Wasser	3,57 %

Die Biegefestigkeit des Formstoffes wurde an 22,4 mm x 22,4 mm x 172 mm großen Biegeriegel entsprechend des VDG-Merkblattes P72 bestimmt. [10] Die Validierung der Gasdurchlässigkeit wurde in Anlehnung an die VDG-Merkblätter P38 und P41 an zylindrischen Prüfkörpern mit einem Durchmesser und einer Höhe von 50 mm durchgeführt. [7, 8]

3.2 Regenerierungsanlagen

3.2.1 Gemco-Schleifregenerator

Eine Anlage an der die Regenerierung des Zementformstoffes untersucht wurde ist der Gemco-Sandcleaner. Hier befördert ein Schaufelrad den Altsand, um einen vertikal eingebauten Schleifstein (Abb. 13). Die Hauptbelastung des Kornes erfolgt durch das Funktionsprinzip mit einer Scher- und Reibbeanspruchung. Die Entstaubung der Anlage ist direkt integriert, es ist kein gesonderter Sichtprozess notwendig. Der Gemco-Sandcleaner arbeitet im Chargenbetrieb mit einer Ausgangs-Altsandmasse von 150 kg.

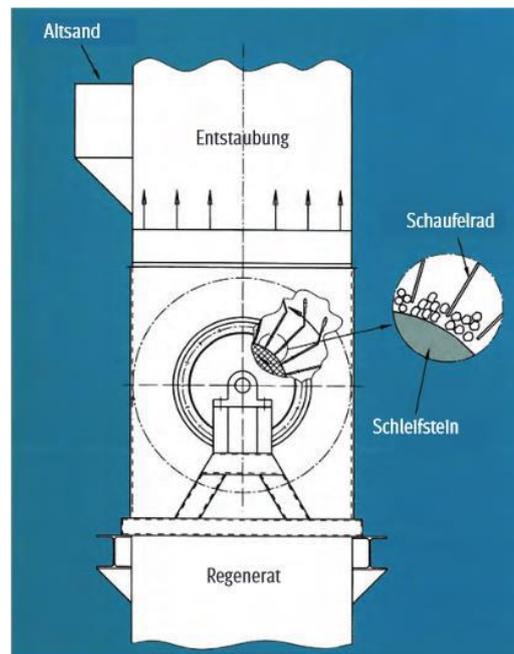


Abbildung 13: Prinzipskizze des Gemco-Schleifregenerators [33]

Zwischen Schaufelrad und Schleifstein befindet sich ein Spalt der zwischen 15 und 50 mm variiert werden kann. Des Weiteren wird die Drehzahl des Schleifsteins zwischen 20, 40 und 70 Hz variiert, was die Wirkleistung des Drehstrommotors erhöht. Über den eingetragenen Energiebetrag auf das Korn ist hierdurch keine quantitative Aussage möglich. Die Geschwindigkeit mit der der Altsand durch das Schaufelrad transportiert wurde war in allen Versuchen konstant (Abb. 14).

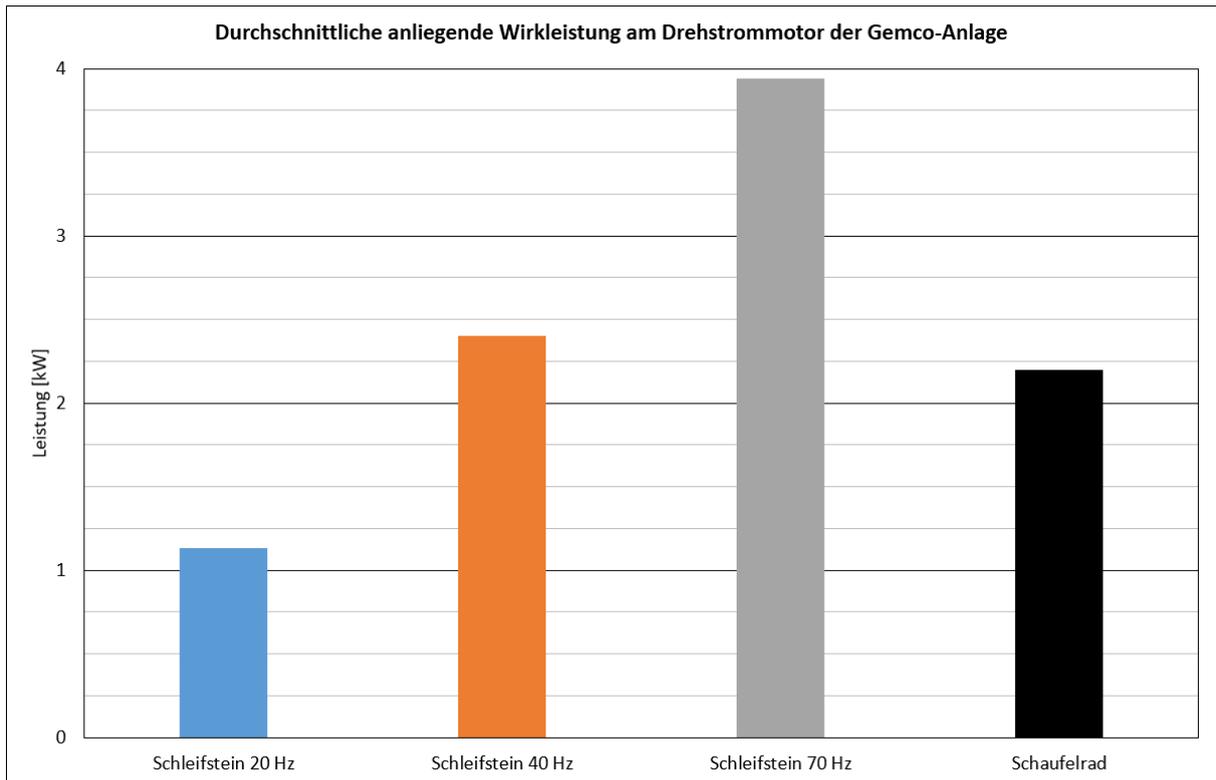


Abbildung 14: Durchschnittliche anliegende Wirkleistung am Drehstrommotor der Gemco-Anlage für den Schleifstein und das Schaufelrad

Ein Regenerierregime besteht aus den in *Tabelle 3* dargestellten Prozessschritten. Wobei der hauptsächliche Energieeintrag beim Schleifprozess stattfindet.

Tabelle 3: Regenerierregime Gemco-Schleifregenerator

Prozessschritt	Dauer [min]	Schleifstein	Schaufelrad
Vorentstauben	5	Ausgeschaltet	Bei jedem Prozessschritt in Betrieb
Schleifen	30	Eingeschaltet	
Nachentstauben	10	Ausgeschaltet	

3.2.2 Wöhr-Fliehkraftreiniger

Neben dem Gemco-Schleifregenerator wurde der Wöhr-Fliehkraftreiniger für Regenerierungsversuche verwendet, der im Durchlaufbetrieb arbeitet. Die eingesetzte Altsandmasse beträgt 500 kg, deren Zulauf rate kann über eine Dosieröffnung eingestellt werden und beträgt in der Versuchsreihe ca. 2 t/h. Das Regenerierregime beinhaltet fünf Durchläufe, die entsprechend der Durchsatzleistung ca. 15 min dauern. Im Normalbetrieb mit 50 Hz schleudert der Rotor (gelb, *Abbildung 15*) des Fliehkraftreinigers den aus dem Trichter zulaufenden Sand gegen die verschleißgeschützten Taschen des Statorringes (rot, *Abbildung 16*). Hierdurch baut sich in der Anlaufzeit ein Schüttkegel auf, über den die nachfolgenden Sandkörner durch die wirkenden Fliehkräfte über den Stator hinausgelangen und aus der Anlage fallen. Dadurch wird die Prallbelastung minimal gehalten und die auf dem Sandkorn befindlichen Binderreste werden hauptsächlich durch Korn-an-Korn-Reibung entfernt. Eine Erhöhung der Drehzahl auf 67 Hz hat zur Folge, dass die Quarzsandkörner aus dem Stator geschleudert werden bevor sich ein Schüttkegel im Stator bilden kann. Es bildet sich lediglich ein Schüttkegel im Rotor aus. Dadurch ändert sich die Reibbeanspruchung zu einer Prallbeanspruchung. Über die Häufigkeit eines Abpralls der Körner an der Innenwand des Wöhr-Fliehkraftreingers und einen damit verbundenen Wiedereintritt in den Stator bzw. Rotor kann bei beiden Einstellungen keine Aussage getroffen werden. Eine quantitative Angabe der Verweilzeit der Körner in der Anlage ist damit auch nicht möglich, es kann angenommen werden dass diese unter 30 Sekunden liegt.

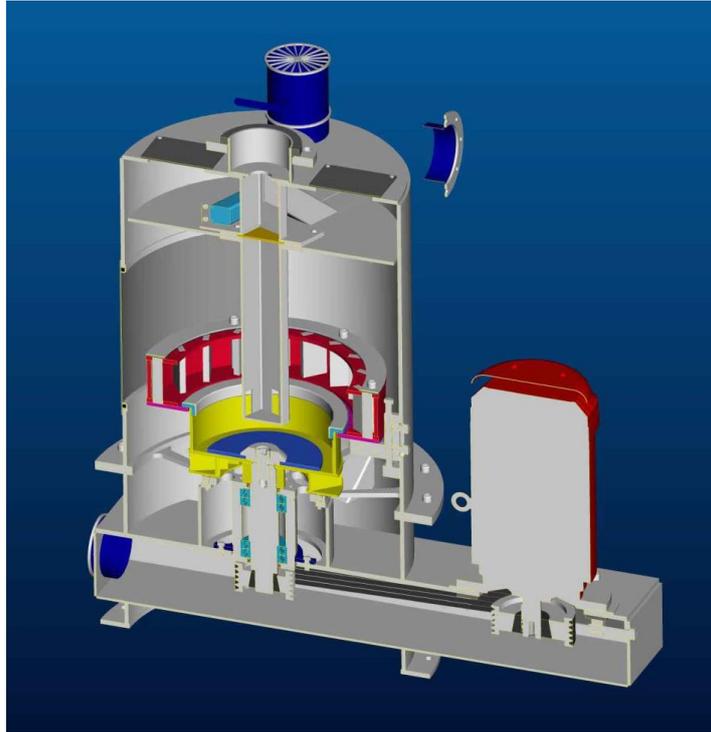


Abbildung 15: CAD-Modell des Wöhr-Fliehkraftreinigers

In *Abbildung 16* sind die anliegenden Wirkleistungen am Drehstrommotor für den jeweiligen Betriebsmodus angegeben. Deren Abnahme mit steigender Drehzahl lässt sich dadurch erklären, dass sich ein kleinerer Schüttkegel in der Anlage aufbaut. Dieser Sachverhalt zeigt die Komplexität, der bereits im vorherigen Kapitel angesprochenen Problematik, einer quantitativen Aussage bezüglich des Energieeintrags auf das Sandkorn an Hand der Wirkleistung, die in eine Anlage gesteckt wird. Im Falle des Wöhr-Fliehkraftreinigers ist nämlich auch keine qualitative Abschätzung möglich, da diese zum Schluss kommt, dass mit 50 Hz ein größerer Energieeintrag stattfindet als bei 67 Hz. Dies ist nicht der Fall (*Kapitel 5.1*).

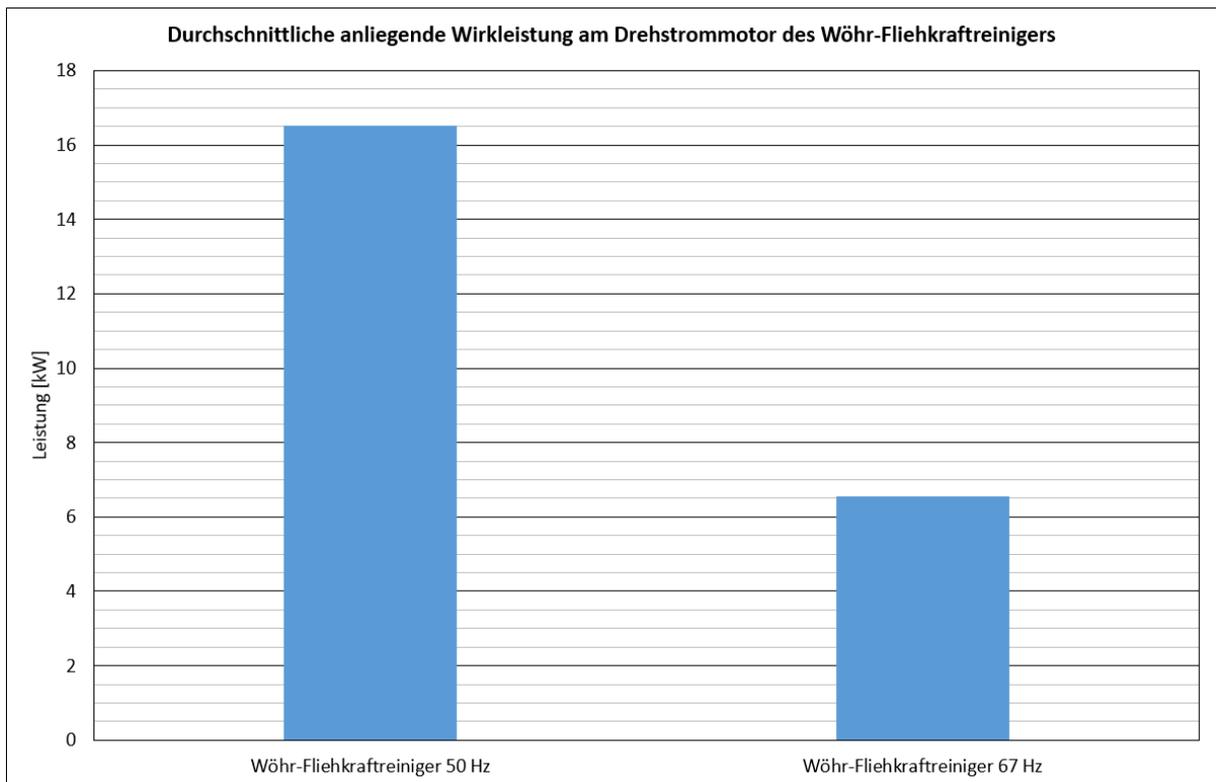


Abbildung 16: Durchschnittliche anliegende Wirkleistung am Drehstrommotor des Rotors nach Aufbau des Schüttkegels

Ein baugleiches Modell des Fliehkraftreinigers, steht sowohl am Gießerei-Institut, als auch bei dessen Hersteller der Aalener Gießereimaschinen GmbH. Im Rahmen dieser Arbeit wurden an beiden Anlagen Versuche durchgeführt. Die Probenkennzeichnung ist entsprechend der Standorte mit „Gi“ für Gießerei-Institut und „AAGM“ für Aalener Gießereimaschinen GmbH. Die im Wöhr-Fliehkraftreiniger integrierte Absaugung reicht nur, um die Staubemissionen entsprechend des Arbeitsschutzes zu minimieren. Zur Entstaubung im Sinne der Regenerierung gibt es einen separaten Fließbettsichter (Abb. 17), dieser Stand jedoch nur bei der AAGM zur Verfügung. Weshalb die Kennzeichnung der Proben Standort bedingt einen nachgelagerten Sichtprozess bedeuten; „Gi“-Regenerate wurde nicht separat entstaubt, „AAGM“-Regenerate wurden separat entstaubt. Die Sichtdauer betrug 20 min.



Abbildung 17: Fließbettsichter der Firma AAGM

4 Diskussion der Festigkeitsentwicklung des Ettringizementformstoffes

Beim Industrierversuch wurde zur Formstoffherstellung der ersten Form 100 % Neusand als Formgrundstoff verwendet. Durch die Prozessüberwachung wurde bemerkt, dass der Formstoff nach 8 Stunden lediglich die Ausschalfestigkeit besaß. Daraufhin wurden mittels Kalorimetrie die Hydratationswärmen des Zementes bei Schwenk Zement überprüft. Die Hydratationswärme kann als qualitatives Merkmal für die Festigkeitsentwicklung verwendet werden, sowohl in Hinblick auf den Betrag als auch auf die Geschwindigkeit. In *Abbildung 18* ist erkennbar, dass die Zementcharge für den Industrierversuch (braun) eine deutliche geringere Hydratationswärme im Vergleich zur Referenz entwickelt (schwarz). Durch die Verwendung von Soda und Zitronensäure als Additive konnte die Zementcharge (gelb) für die restlichen Umläufe verwendet werden. Dabei wurde die Hydrationsgeschwindigkeit in der ersten Stunde nahezu ausgebremst, wodurch der Zementformstoff eine längere Verarbeitungszeit erhält. Nach vier Stunden hat er die Referenz eingeholt. Bei acht Stunden hat der Ettringizement mit Soda & Zitronensäure die 1,35-fache Hydratationswärme entwickelt. Auf Grund der vorteilhaften Aushärtungscharakteristik will Schwenk Zement zukünftige Chargen mittels Kalorimetrie überprüfen und durch Additive anpassen. Hierbei handelt es sich um einen Erfahrungswert, den Schwenk Zement über die Zeit sammeln wird.

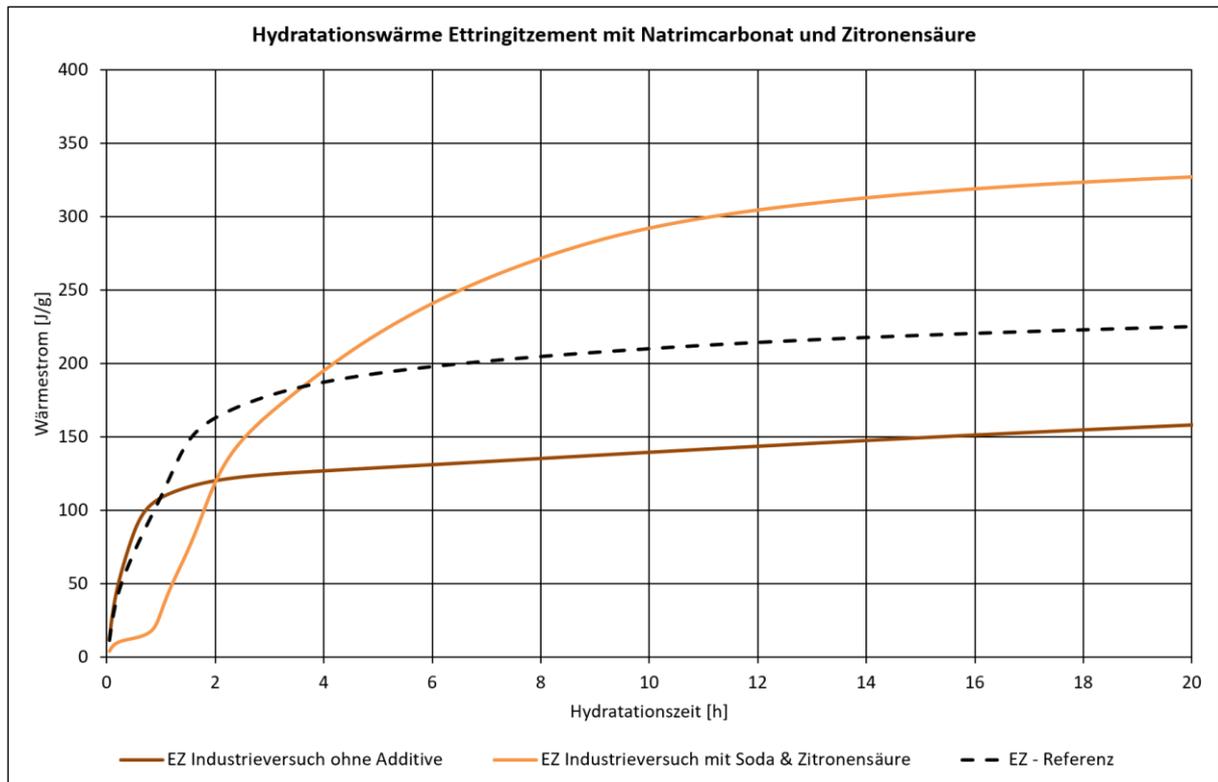


Abbildung 18: Kumulative Hydratationswärme des Ettringizementes – schwarz) Referenz repräsentativ für die Vorversuche; braun) Charge die für den Industrierversuch hergestellt wurde; gelb) angepasste Charge die im restlichen Industrierversuch (Umlauf 2 bis 5) verwendet wurde

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass sich die im Formstofflabor des Gießerei-Institutes ermittelten Biegefestigkeiten von denen aus der Prozessüberwachung im Industrierversuch unterscheiden, obwohl bei beiden der identische Binder verwendet wurde (Abb. 19). Die Erklärung ist, dass die Mischintensität bei der Formstoffherstellung im Formstofflabor nicht ausreicht, wenn Regenerat verwendet wird, da dieses einen höheren Energieeintrag benötigt. Im Vergleich dazu wurde der Formstoff im Industrierversuch mittels Durchlaufmischer hergestellt. Im Formstofflabor wurde der Zementformstoff entsprechend [1] am selben Formstoffmischer hergestellt. Im Projekt „RapidZem“ wurde zur Evaluierung des Ettringizementes als Formstoffbinder ausschließlich Neusand als Formgrundstoff verwendet. Ob der Energieeintrag des identischen Mixers für die Formherstellung mit Regenerat nicht ausreicht oder ob sich dieser systematische Fehler handelt, welcher sich schleichend über die Zeit, durch Abnutzungserscheinungen des Mixers, aufgebaut hat, kann nicht hinreichend beantwortet werden. Auf Grund dessen wurde auf die Darstellung der Biegefestigkeiten im Kapitel 5 verzichtet. Abschließend ist festzuhalten, dass der Industrierversuch mit dem Wöhr-Fliehkraftreiniger bei 67 Hz durchgeführt wurde, da der Formstoff mit 70 % Regeneratanteil

(Probe AAGM V) im Formstofflabor nach acht Stunden eine Biegefestigkeit von $120,5 \pm 10,1$ N/cm² erzielt hat.

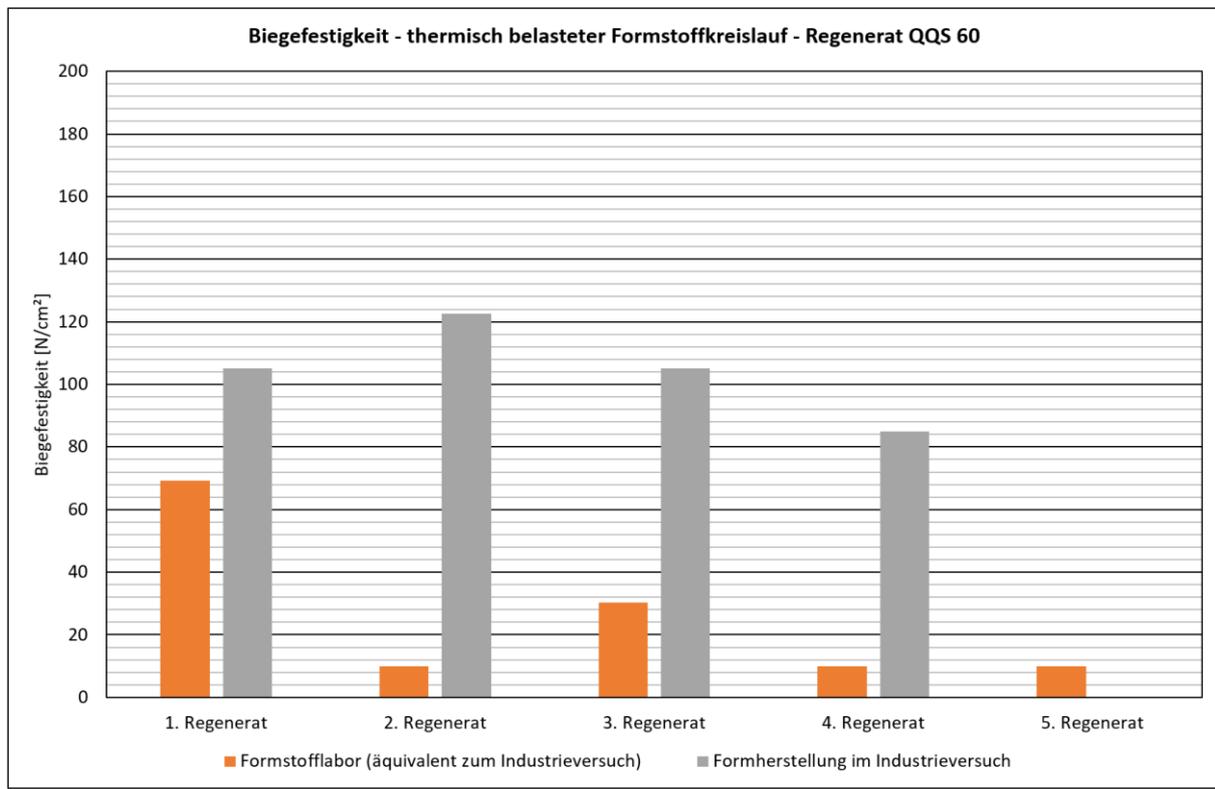


Abbildung 19: 8h Biegefestigkeit; 8 % Zement mit Soda & Zitronensäure; w/z-Wert = 0,5; 70 % Regeneratanteil – Formstofflabor) 4 min Mischzeit im Formstoffmischer „KitchenAid“, Formherstellung im Industrierversuch) Durchlaufmischer (Kapitel 6.1) – Die Biegefestigkeit für das 5. Regenerat wurde nicht gemessen, da kein 6. Umlauf stattfand

5 Einmaliger Regenerierprozess

5.1 Gemco-Schleifregenerator

Anhand des Ausbringens und der Siebdurchgangskurven (Abb. 20 & 21) lässt sich erkennen, dass eine Erhöhung der Frequenz den Formgrundstoff zunehmend beschädigt. Durch die Zerstörung des Kornbandes weichen die granulometrischen Eigenschaften des Regenerates bei 70 Hz signifikant vom Neusand QQS 60 ab. Der Energieeintrag bei 20 Hz ist relativ schonend für das Sandkorn, erkennbar am identischen Kurvenverlauf zwischen 20 Hz und Neusand. Erwartungsgemäß liegen die granulometrischen Eigenschaften der Regenerate bei 40 Hz zwischen 20 und 70 Hz. Dementsprechend ist es plausibel, dass das geringere Ausbringen von 40 Hz gegenüber 20 Hz technologisch bedingt ist.

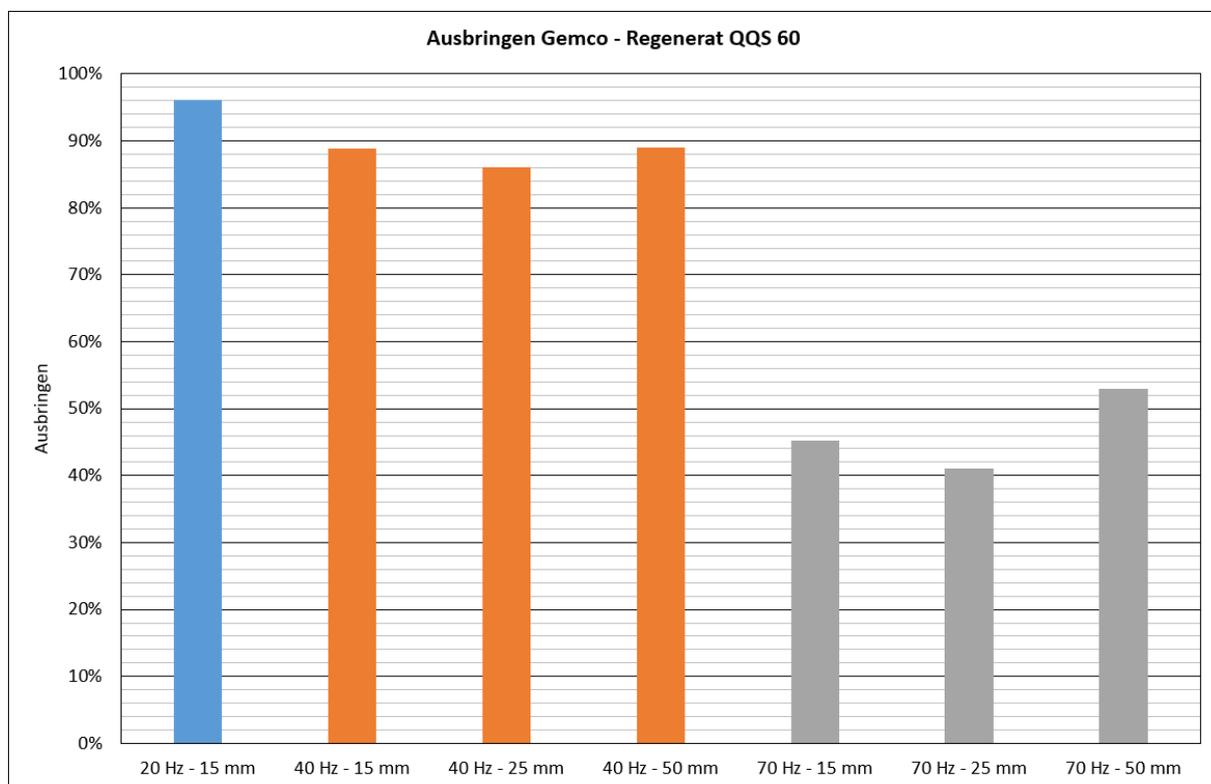


Abbildung 20: Ausbringen des Gemco-Schleifregenerators in Abhängigkeit der Anlagenparameter (n = 1)

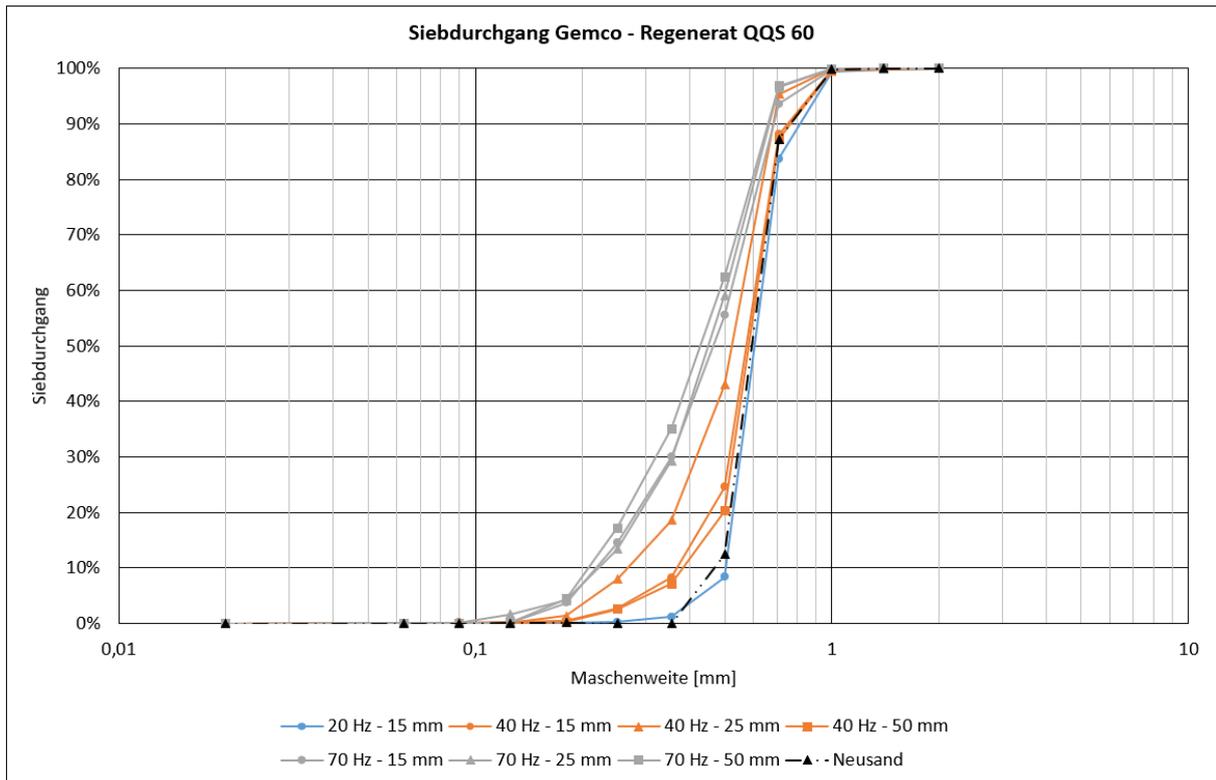


Abbildung 21: Siebanalyse der Gemco-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter ($n = 2$)

Durch die Variation des Spaltmaß wurde überprüft, ob die Größe des Spaltes zwischen Schaufelrad und Schleifstein die auf das Korn einwirkende Energie beeinflusst. Dem widerspricht der ähnliche Verlauf der Siebdurchgangskurven bei 70 Hz sowie bei 40 Hz für 15 mm und 50 mm (Abb. 22). Die signifikante Abweichung des Regenerat-Kornbandes bei 40 Hz und einem Spaltmaß von 25 mm lässt sich damit erklären, dass der Ausgangs-Altsand bereits ein abweichendes Kornverteilung zu den anderen Altsandproben besitzt (Abb. 21). Ein maßgeblicher Einfluss des Spaltmaßes auf den Regenerierprozess für den Gemco-Schleifregenerator ist demzufolge auszuschließen.

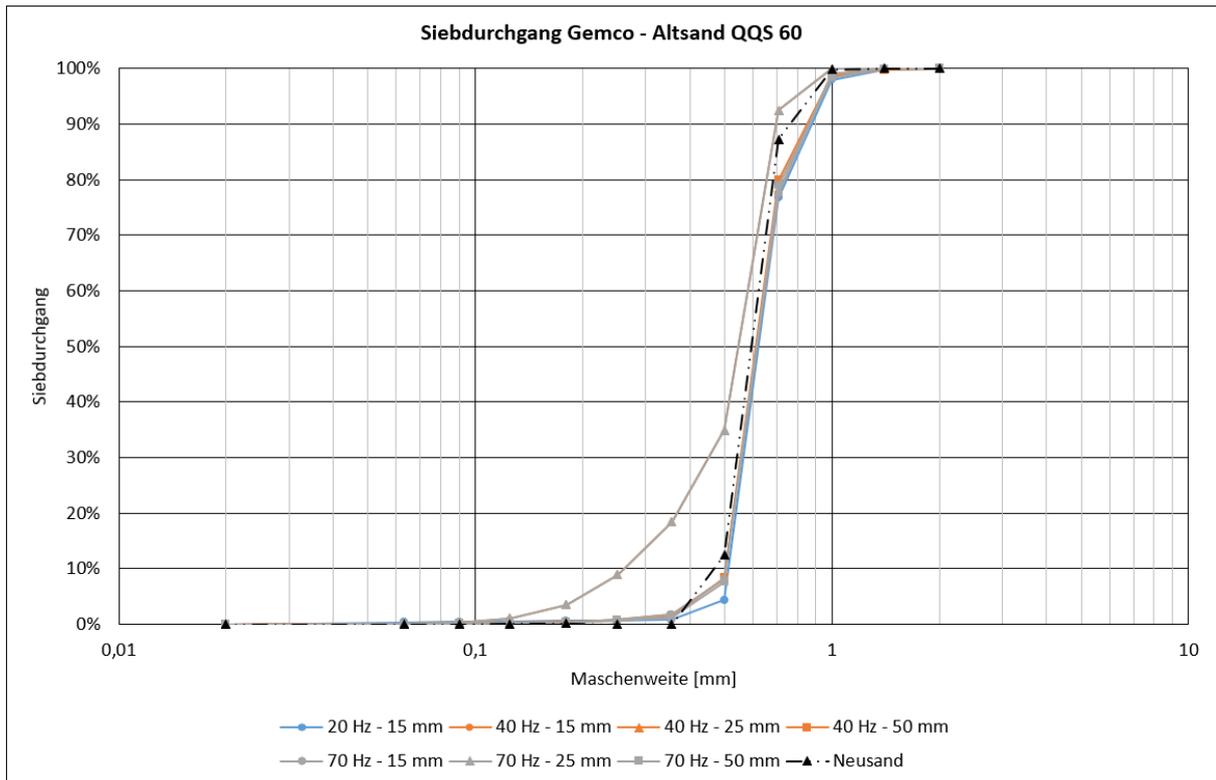


Abbildung 22: Siebanalyse der Gemco-Altsande ($n = 2$) – Es ist anzumerken, dass sich die Altsandproben 40 Hz & 70 Hz bei einem Spaltmaß von 25 mm überlappen sowie die restlichen Altsandproben bei 20, 40 und 70 Hz

Die REM-Aufnahmen bestätigen die Siebanalyse und zeigen eine Zerstörung der Körner mit zunehmenden Energieeintrag durch die Erhöhung der Frequenz. Das Regenerat 20 Hz hat analog zum Neusand kantengerundete Sandkörner, allerdings mit leichten Abplatzungen, bei 40 Hz nehmen diese zu. Bei 40 Hz – 25 mm und 70 Hz liegt ein großer Anteil splittriger und gebrochener Sandkörner vor, die teilweise deutlich unter der Korngröße des Neusandes liegen (Abb. 23 – 26). Die deutliche Abweichung der Kornform bei 40 Hz – 25 mm zu den anderen 40 Hz-Proben ist ebenfalls auf das Ausgangsmaterial zurückzuführen.

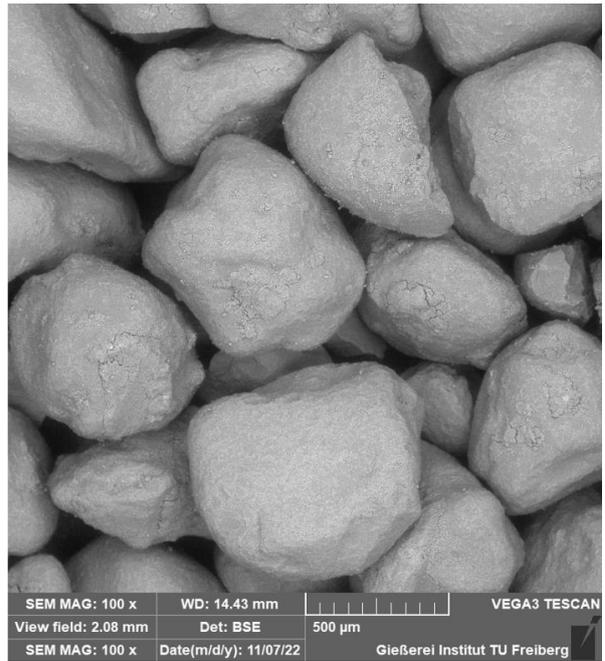
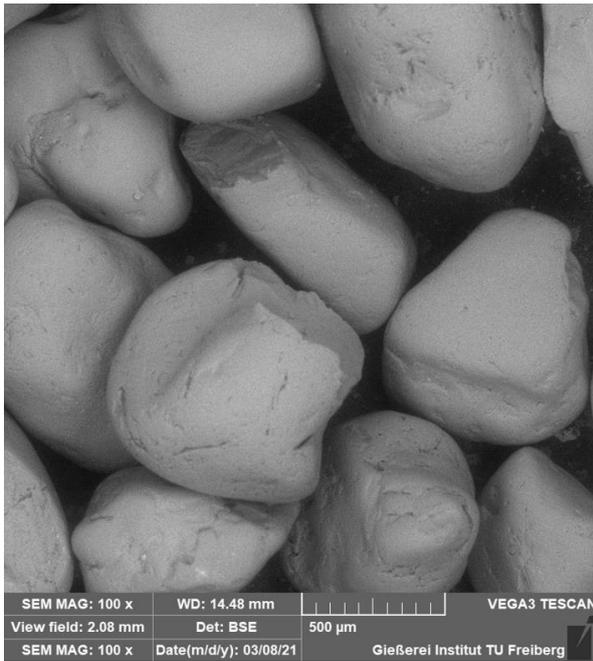


Abbildung 23: links) Neusand QQS 60, rechts) Regenerat QQS 60 20 Hz - 15 mm

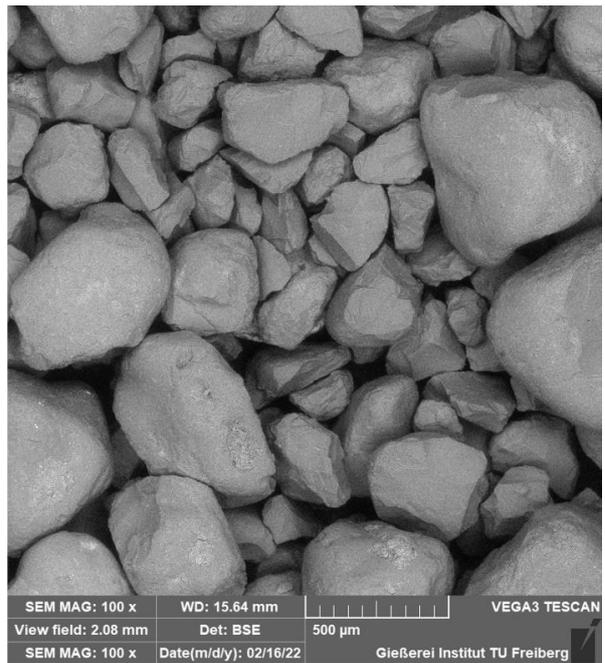
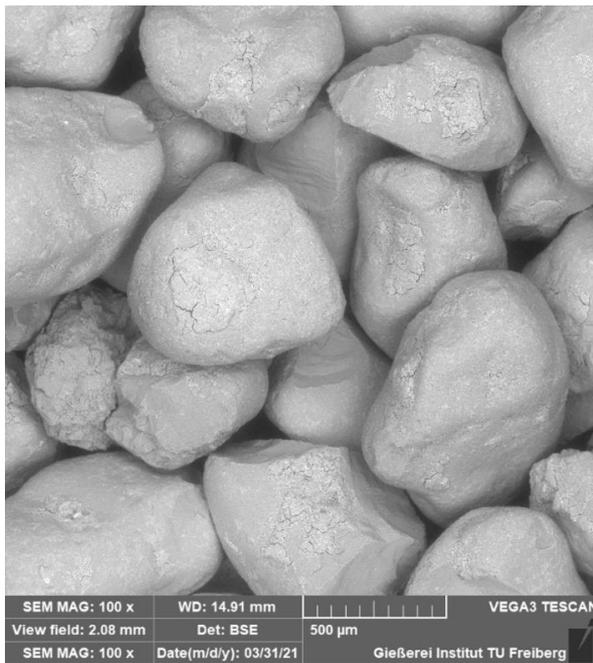


Abbildung 24: links) Regenerat QQS 60 40 Hz - 15 mm, rechts) Regenerat QQS 60 40 Hz - 25 mm

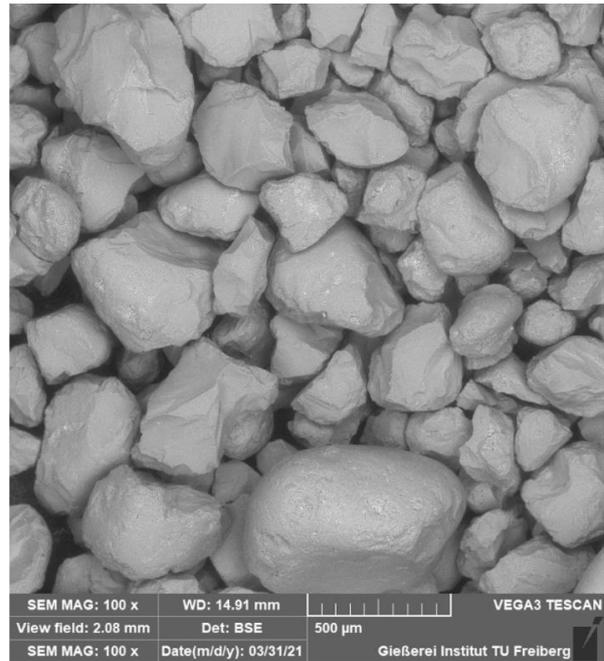
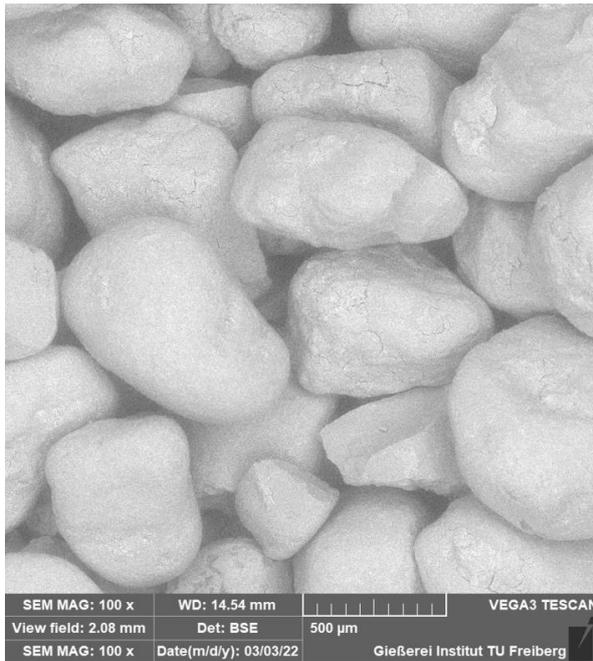


Abbildung 25: links) Regenerat QQS 60 40 Hz - 50 mm, rechts) Regenerat QQS 60 70 Hz - 15 mm

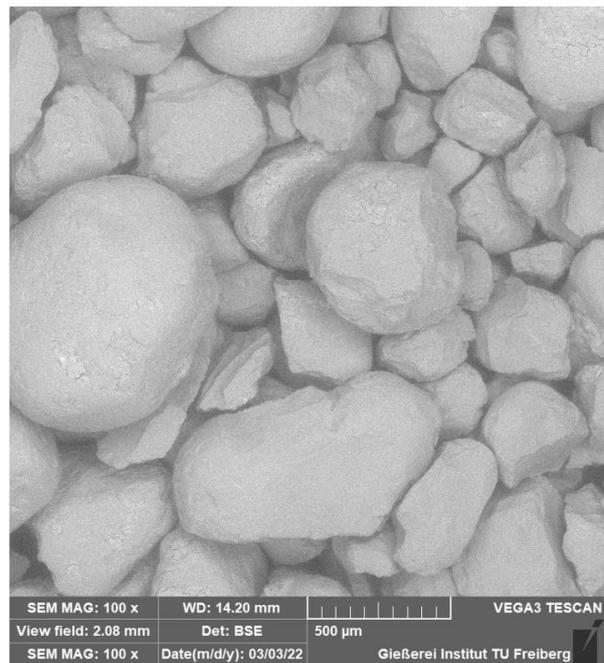
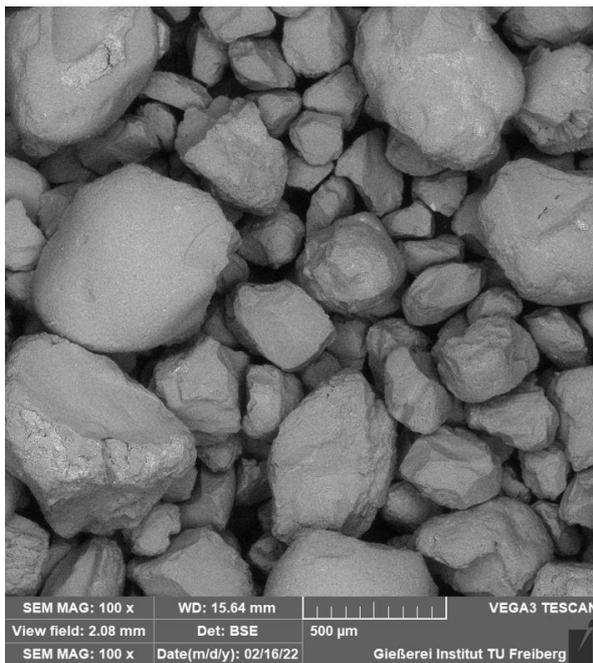


Abbildung 26: links) Regenerat QQS 60 70 Hz - 25 mm, rechts) Regenerat QQS 60 70 Hz - 50 mm

Bei allen drei Drehzahleinstellungen wurde der Schlammstoffgehalt gegenüber des Ausgangsgehaltes (Abb. 27) reduziert, ein Einfluss des Spaltmaßes ist nicht festzustellen. Der Schlammstoffgehalt liegt bei 20 Hz signifikant über den Werten bei 40 und 70 Hz. Hierfür gibt es zwei Erklärungen, welche die Hauptursache ist kann durch die Versuchsreihe nicht geklärt werden. Erstens hat der Altsand bei 20 Hz den höchsten Ausgangs-Schlammstoffgehalt. Zweitens wird durch die geringe Drehzahl im Prozess weniger Schlammstoff aufgewirbelt als

bei 40 bzw. 70 Hz. Der Einfluss der Frequenz des Schleifsteins auf den Schlammstoffgehalt wurde für die Gemco-Anlage bereits in [11] beobachtet. Allerdings für Bentonit gebundene Formstoffe. Es ist denkbar, dass eine längere Nachenstaubung ausreicht, um den restlichen Schlammstoff zu entfernen. Die in *Abbildung 26* dargestellten Mittelwerte für alle Regenerate liegen über dem üblichen Schlammstoffgehalt von QQS 60-Neusand ($\leq 0,1\%$).

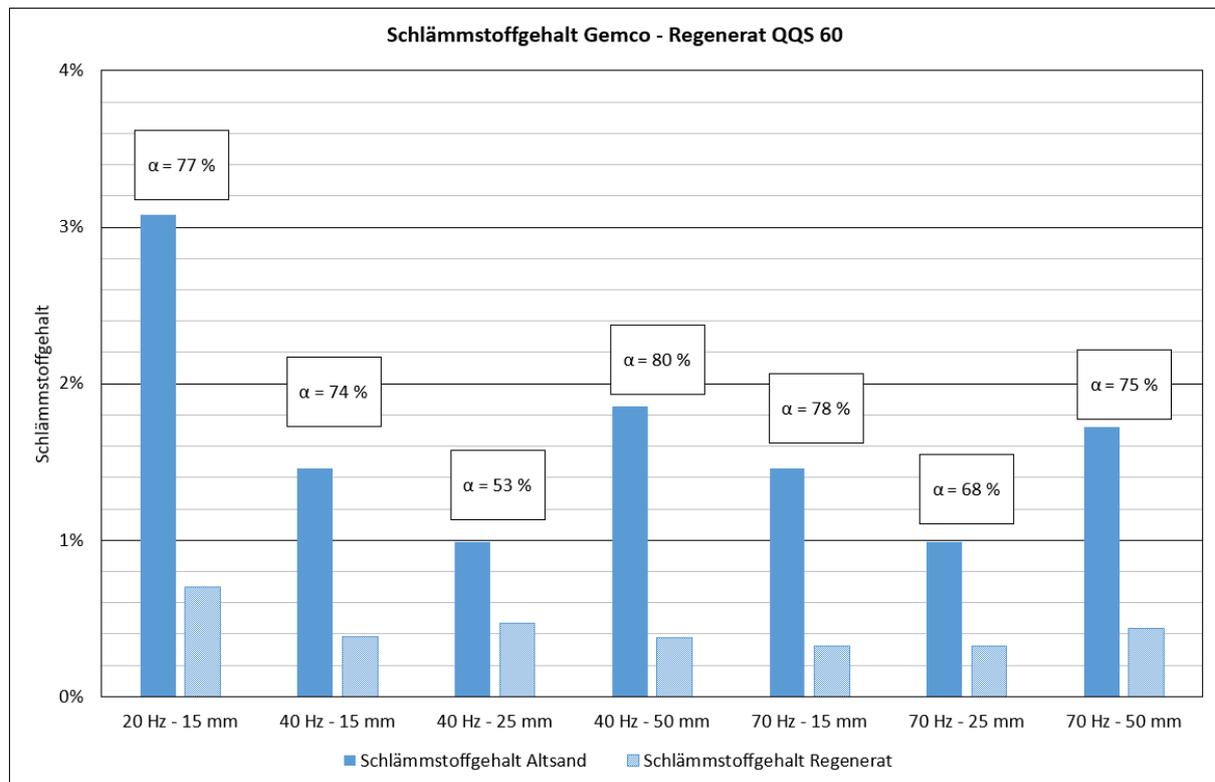


Abbildung 27: Schlammstoffgehalt ($n = 3$) der Gemco-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter ($\alpha =$ Regenerierungsgrad)

In *Abbildung 28* ist der kumulative Anteil der Kornklassen 0,02 mm – 0,125 mm dargestellt. Dieser Wert wird bei den Regeneraten durch die Absaugung verringert. Lediglich bei 70 Hz – 25 mm liegt der Anteil deutlich darüber und ist als Ausreißer einzustufen. Als Fazit ist für den Feinanteil festzuhalten, dass dieser bei dem gewählten Regenerierregime und den gegebenen Ausgangsgehalten durch die Entstaubung der Anlage bestimmt wird. Die Schwankungen können als Prozess gegeben eingeordnet werden. Dies gilt nicht für den Schlammstoffgehalt bei 20 Hz-15 mm.

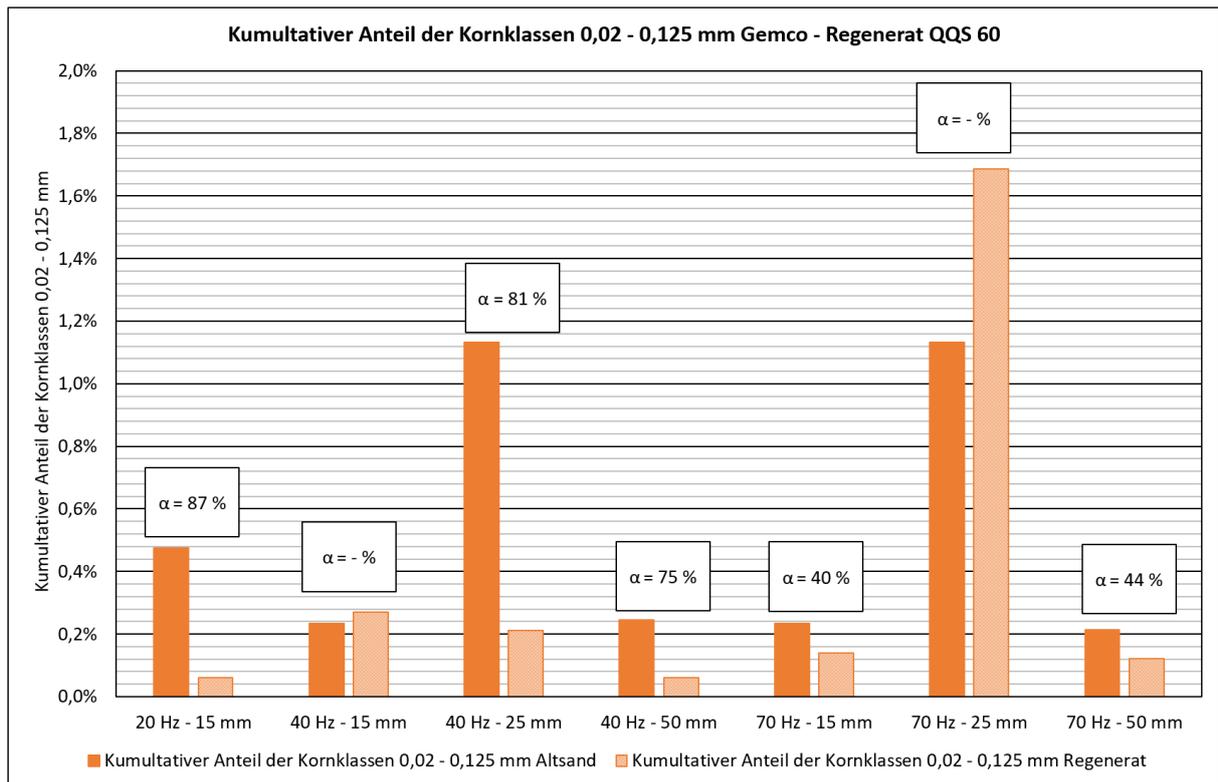


Abbildung 28: kumulativer Anteil der Kornklassen 0,02 – 0,125 mm (n = 2) der Gemco-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter (α = Regenerierungsgrad)

Bei allen Konfigurationen des Gemco-Schleifregenerators wird der Restbinder auf dem Sandkorn verringert, jedoch wurde bei keinem der Regenerate der Zement vollständig entfernt. Mit steigendem Restzement liegt nach der Regenerierung bei identischer Frequenz ein höherer Restbindergehalt beim Regenerat vor (Abb. 29). Der Restbindergehalt der Regenerate von 40 Hz – 25 mm und von 70 Hz werden zusätzlich durch den Kornbruch „reduziert“. Durch die Bruchflächen liegen zementfreie Oberflächen vor. Dies ist auch die Erklärung, weshalb das Regenerat 40 Hz – 25 mm trotz ähnlich großem Restzementausgangsgehalt einen geringeren Restbindergehalt aufweist als das Regenerat 40 Hz – 15 mm. Die eingangs erwähnte Problematik der mechanischen Regenerierung wird durch diese Versuchsreihe verdeutlicht, die Erhöhung der Regenerierintensität ist nach oben hin durch die zunehmende Kornzerkleinerung limitiert. Die Schwierigkeit bei der vollständigen Entfernung des Restzements besteht demzufolge nicht darin, die notwendige Energie einzubringen, sondern dass diese nicht hauptsächlich an der Grenzfläche Zement-Sandkorn wirkt.

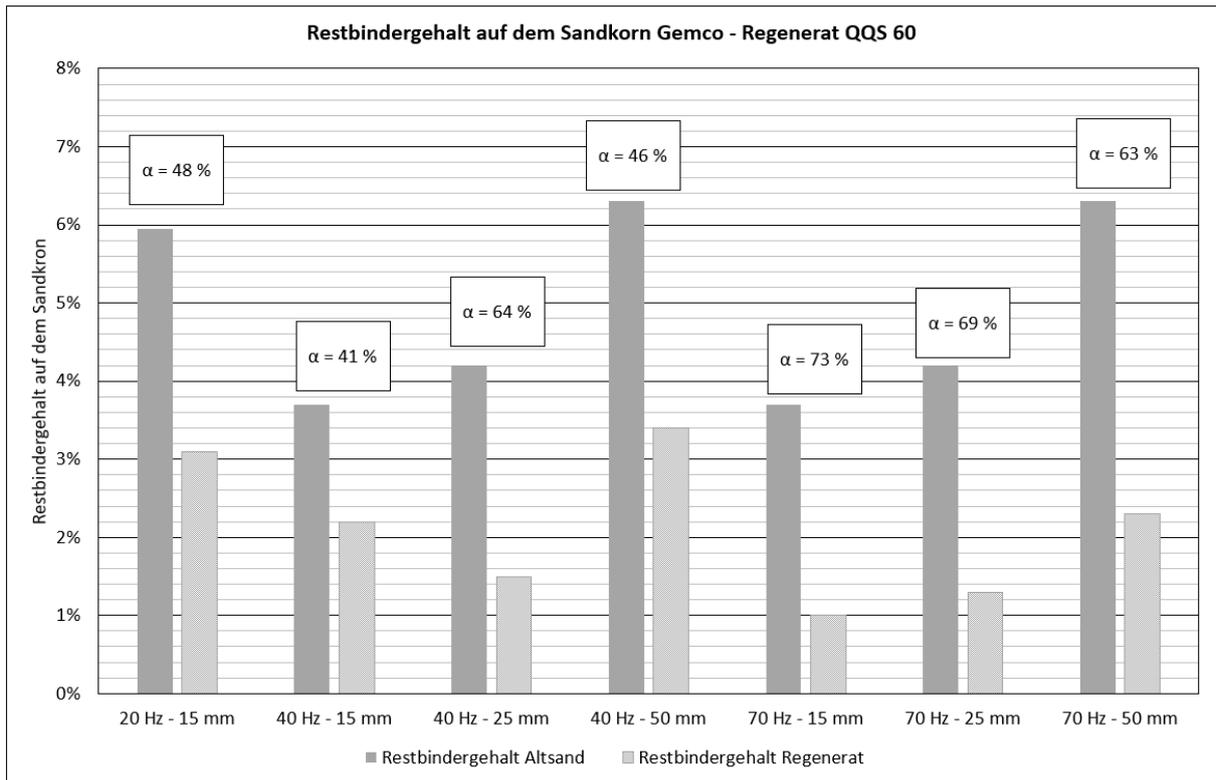


Abbildung 29: Restbindergehalt ($n = 1$) der Gemco-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter ($\alpha =$ Regenerierungsgrad)

5.2 Wöhr-Fliehkraftreiniger

Die untersuchten Einstellungen des Wöhr-Fliehkraftreinigers sind in *Tabelle 4* noch einmal dargestellt. In den Versuchen AAGM II – IV wurde noch zusätzlich Mahlhilfsmittel eingesetzt. Dieses besteht aus mehrwertigen Alkoholen und wird in der Zementindustrie verwendet, um die elektrostatische Aufladung beim Mahlen des Zementklinkers zu reduzieren.

Tabelle 4: Versuchsplan zur Untersuchung der Wöhr-Fliehkraftreinigers

Regenerat	Rotordrehzahl	Separate Sichtung nach jedem Durchlauf – kumulative Sichtdauer[min]	Verwendung Mahlhilfsmittel
Gi I	50 Hz	Nein	Nein
AAGM I	50 Hz	Ja – 100 min	Nein
AAGM II - III	50 Hz	Ja – 100 min	Ja
AAGM IV	50 Hz	Ja – 160 min	
Gi II - IV	67 Hz	Nein	Nein
AAGM V	67 Hz	Ja – 20 min	Nein

Beim Vergleich der *Abbildungen 30 & 31* ist erkennbar, dass durch die ähnlichen Siebkurven über alle 5 Umläufe bei 50 Hz, der Energieeintrag auf das Korn deutlich geringer ist als bei 67 Hz. Hier verkleinert sich das Kornband kontinuierlich mit jedem Durchlauf. Der Anstieg der Korngröße im 5. Umlauf bei 67 Hz (*Abb. 32*) lässt sich damit erklären, dass die Feianteile aus dem Ausgangs-Sand (4. Durchlauf) aufgewirbelt und von der Absaugung entfernt wurden. Diese befindet sich auf der Oberseite der Anlage. Beim Betrieb mit 67 Hz nimmt demzufolge die mittlere Korngröße mit jedem Durchlauf ab, bis das Kornband durch den Energieeintrag die Absaugung erreicht. Durch den vertretbaren Verschleiß des Sandes bei einfachem Durchlauf mit 67 Hz wurde diese Konfiguration für die Versuche gewählt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Absaugung der Anlage für den Normalbetrieb auf 50 Hz ausgelegt ist.

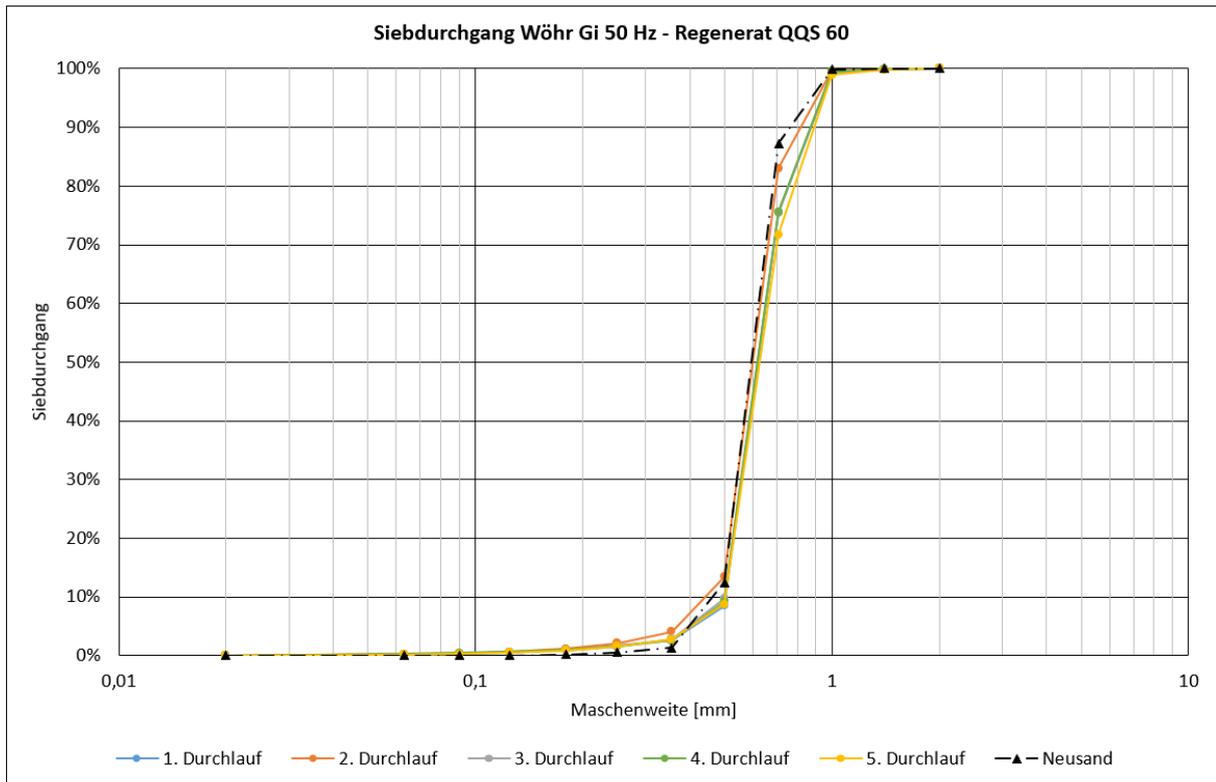


Abbildung 30: Siebanalyse des QQS 60 bei dem Betrieb des Wöhr-Fliehkraftreinigers mit 50 Hz ($n = 2$) – Ausbringen nach 5 Durchläufen ca. 92 %

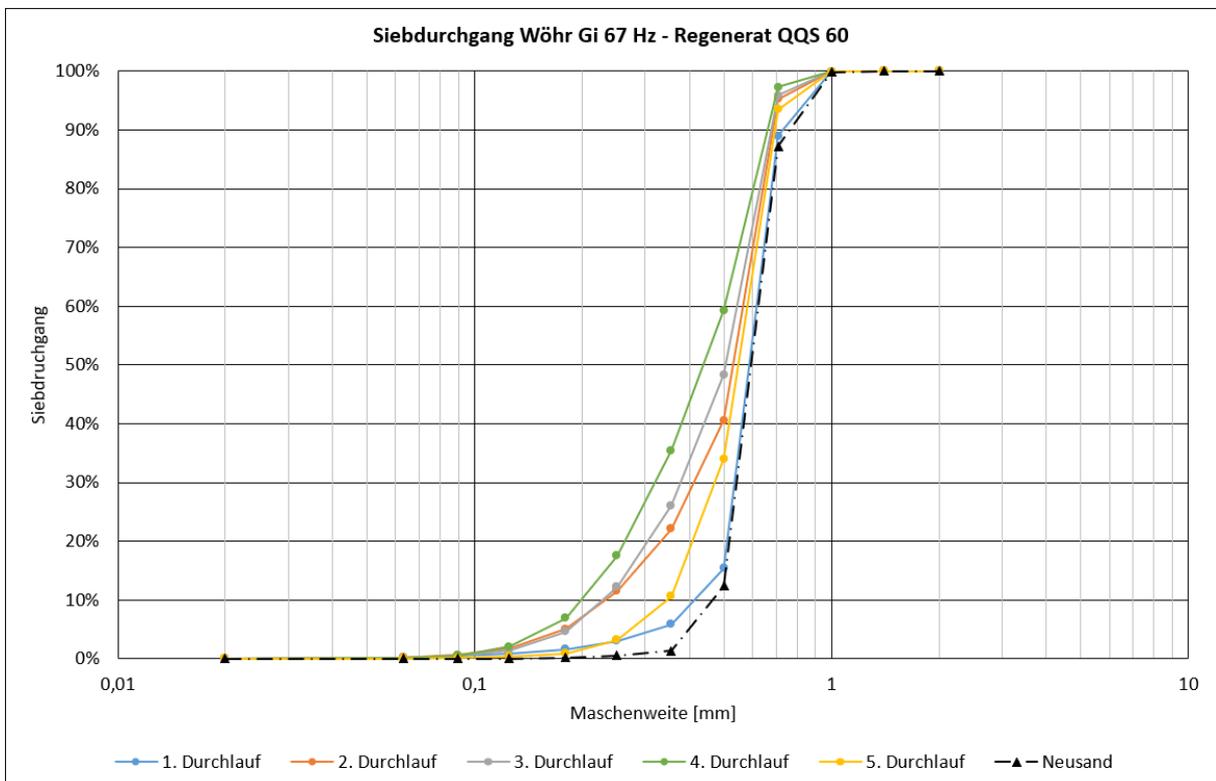


Abbildung 31: Siebanalyse des QQS 60 bei dem Betrieb des Wöhr-Fliehkraftreinigers mit 67 Hz ($n = 2$) – Ausbringen nach 1 Durchlauf ca. 85 %

Entsprechend *Abbildung 32* ist das Kornband der Regenerate bei einem Betrieb mit 50 Hz ähnlich zum Neusand. Demzufolge ist die im 50 Hz – Betrieb vorherrschende Korn-an-Korn-Reibung nachweislich „schonend“ für das Quarzkorn (*Abb. 33*). Die Abweichung der Siebkurve von AAGM I zu den restlichen Siebanalysen ist als Ausreißer einzustufen.

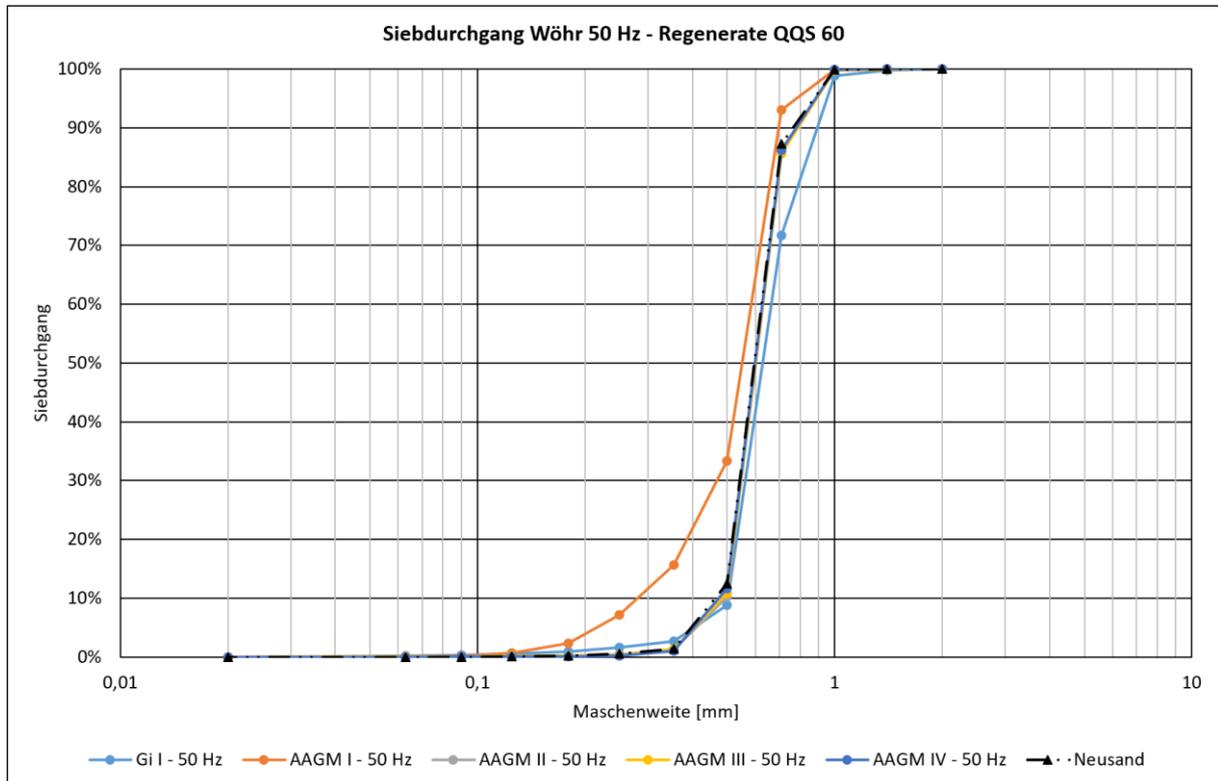


Abbildung 32: Siebanalyse der Wöhr-Regenerate bei 50 Hz (n = 2)

Neben dem stärkeren Verschleiß des Korns im Betrieb mit 67 Hz treten gleichzeitig größere Schwankungen der Siebkurven auf. Die Erklärung hierfür ist, dass es durch die Veränderung der Beanspruchung des Quarzkorns von Korn-an-Korn-Reibung zu Prallbelastung, bei gleichzeitiger Reduzierung der Regenerierzeit um 80 % (Ein Durchlauf statt fünf), zu einem unregelmäßigem Energieeintrag auf den Altsand kommt (*Abb. 33*).

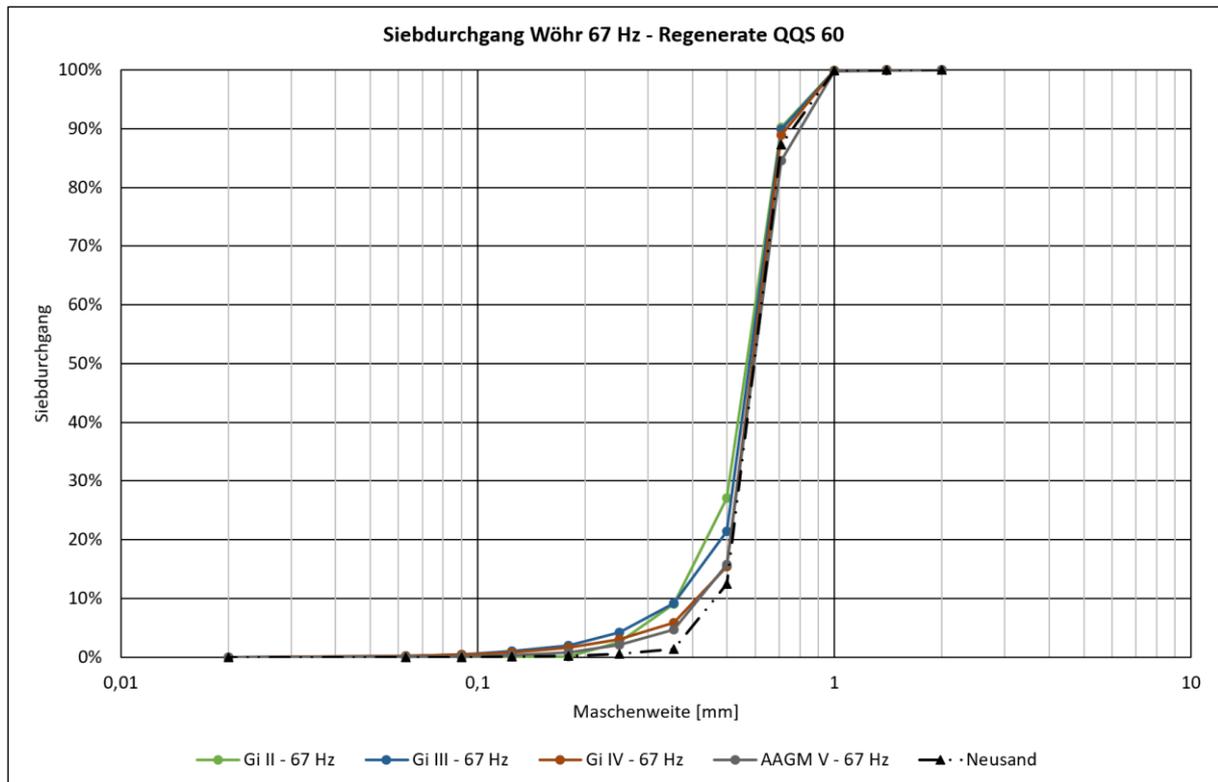


Abbildung 33: Siebanalyse der Wöhr-Regenerate bei 67 Hz (n = 2)

Die REM-Aufnahmen bestätigen die Siebanalysen. Die Kornform der 50 Hz – Versuche gleicht dem Neusand. Die gilt auch für AAGM I, was die Annahme spricht, dass es sich bei der Siebkurve um eine zufällige Abweichung handelt (Abb. 34 – 35). Bei 67 Hz bestätigt sich der durch die Siebkurven vermutete ungleichmäßige Energieeintrag. Vergleicht man die Abbildungen 38 – 39 fällt auf, dass sowohl Quarzkörner, die dem Gemco-Versuchen mit 70 Hz (Abb. 36 – 38) ähneln, als auch welche, die dem Neusand entsprechen.

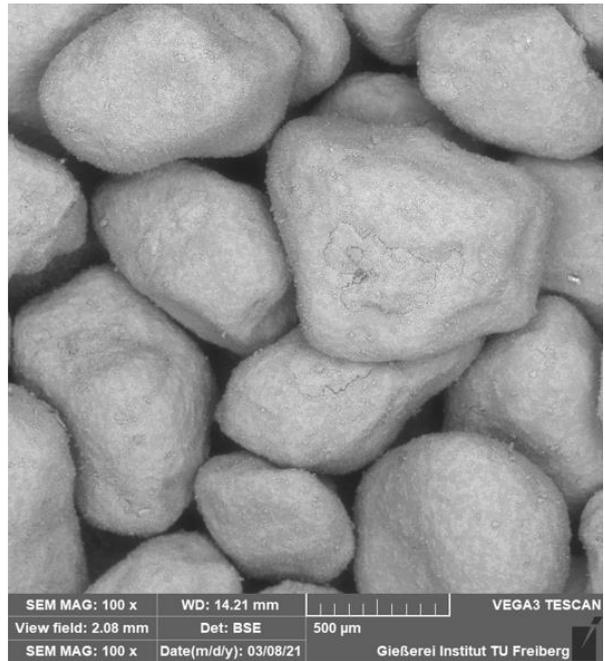
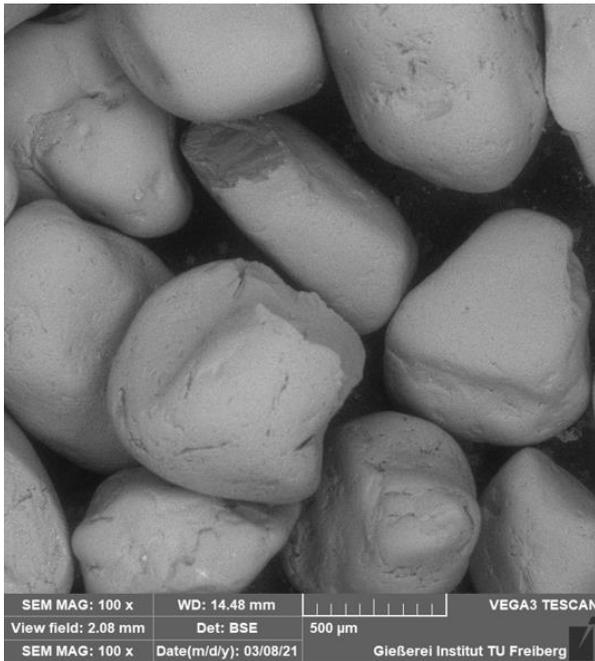


Abbildung 34: links) Neusand QQS 60, rechts) Regenerat QQS 60 Gi I - 50 Hz

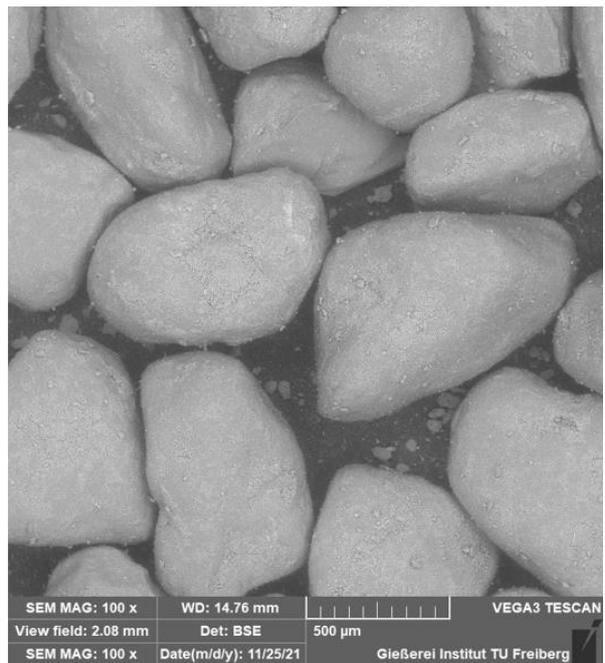
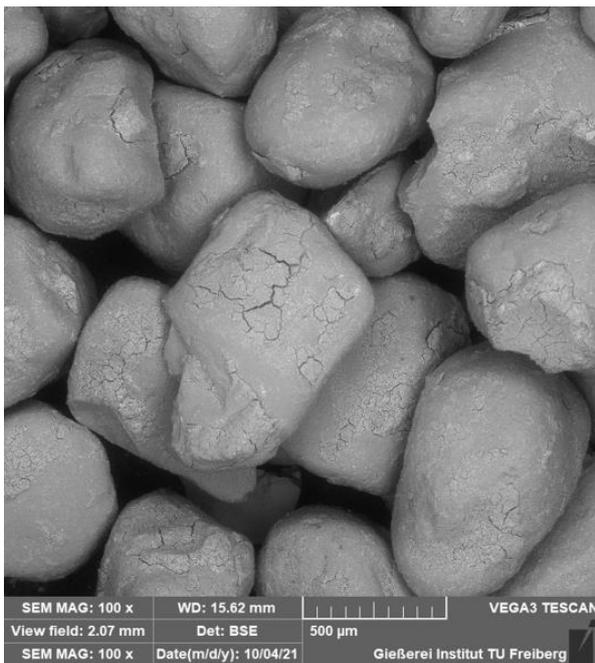


Abbildung 35: links) Regenerat QQS 60 AAGM I - 50 Hz, rechts) Regenerat QQS 60 AAGM II - 50 Hz

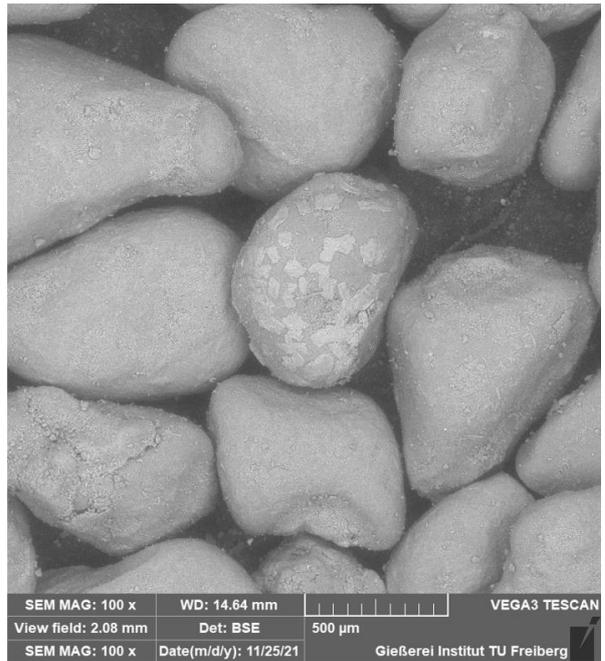
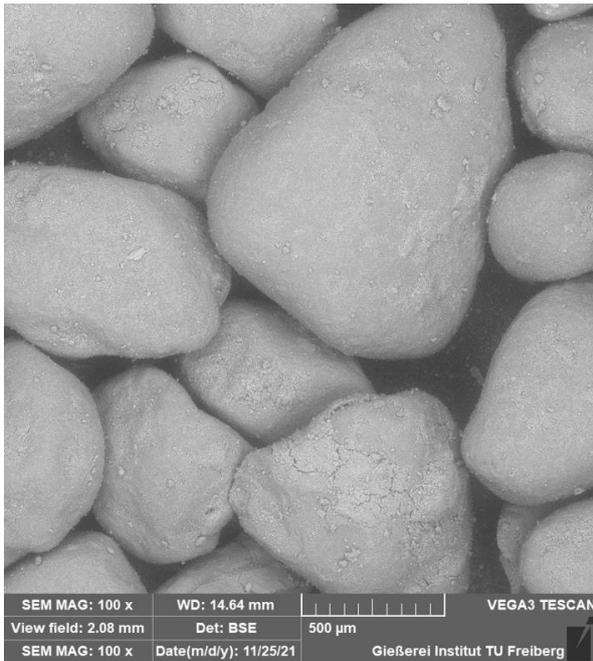


Abbildung 36: links) Regenerat QQS 60 AAGM III - 50 Hz, rechts) Regenerat QQS 60 AAGM IV - 50 Hz

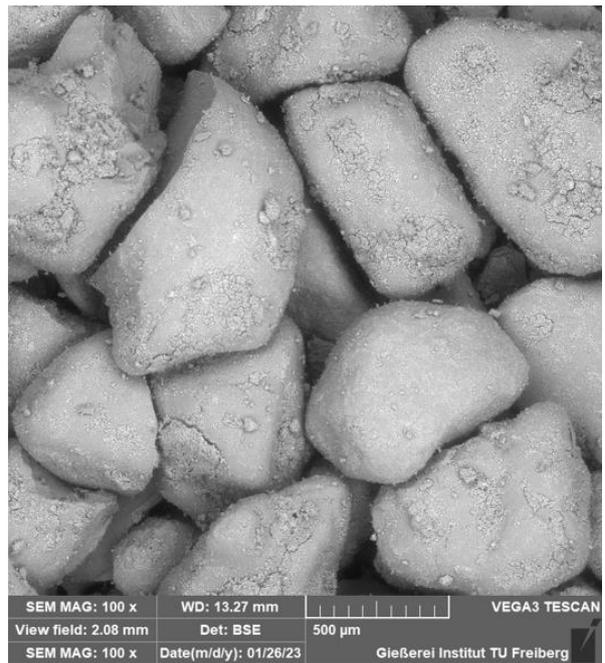
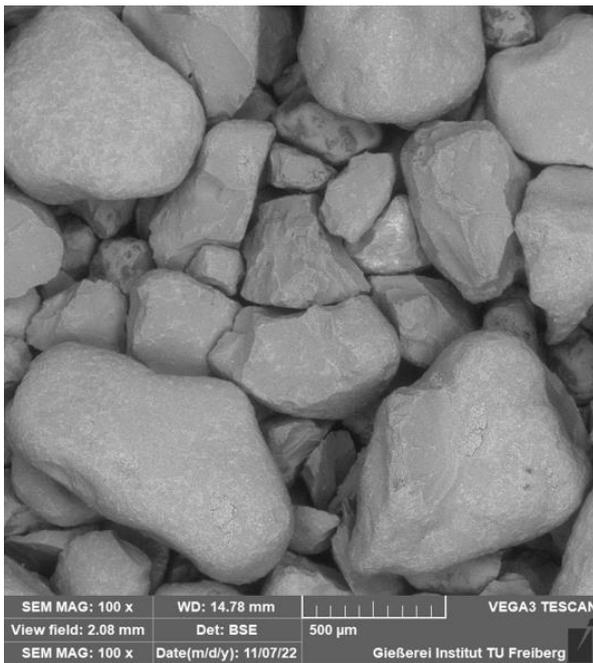


Abbildung 37: links) Regenerat QQS 60 Gi II - 67 Hz, rechts) Regenerat QQS 60 Gi III - 67 Hz

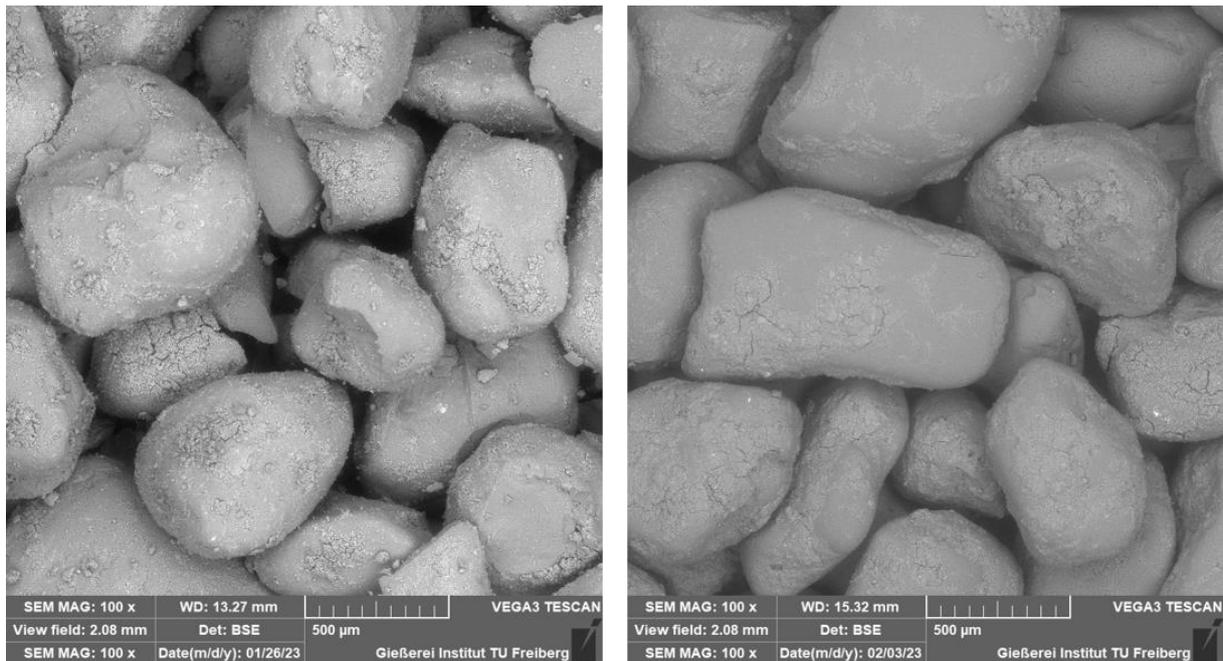


Abbildung 38: links) Regenerat QQS 60 Gi IV - 67 Hz, rechts) Regenerat QQS 60 AAGM V - 67 Hz

Sowohl die Absaugung des Wöhr-Fliehkraftreinigers, als auch der Fließbettsichter reduzieren den Schlammstoffgehalt des Altsandes (Abb. 39). Wenn eine Entstaubung lediglich über die Absaugung des Fliehkraftreinigers geschieht, unterliegt die Entfernung des Schlammstoffes dem zufälligen Einfluss, ob dieser bis in deren Wirkungsbereich geschleudert wird. Erkennbar daran, dass bei den Proben Gi II – IV deutliche Schwankungen auftreten. Bei identischer Anzahl an Durchläufen ist der Regenerierungsgrad bei einer Rotorfrequenz von 67 Hz, auf Grund des größeren Energieeintrags, höher. Der nachgelagerte Sichtprozess reduziert den Schlammstoffgehalt, erkennbar an den Proben Gi I und AAGM I. Der Fließbettsichter arbeitet allerdings weniger effizient als die Entstaubung der Gemco-Anlage. Dies ist daran zu erkennen, dass bei einem Ausgangs-Schlammstoffgehalt zwischen 2 % und 3 % (AAGM II – IV) trotz einer kumulativen Sichtdauer von 100 min bzw. 160 min, der Schlammstoffgehalt des Regenerates bei 1 % - 2 % liegt. Der Gemco-Schleifregenerator erreicht bei identischen Ausgangswert (20 Hz) mittels kontinuierlicher Entstaubung über 45 min einen Schlammstoffgehalt von 0,7 %. Dies spricht für eine notwendige Verbesserung des verwendeten Fließbettsichter für die Anwendung beim Zementformstoff.

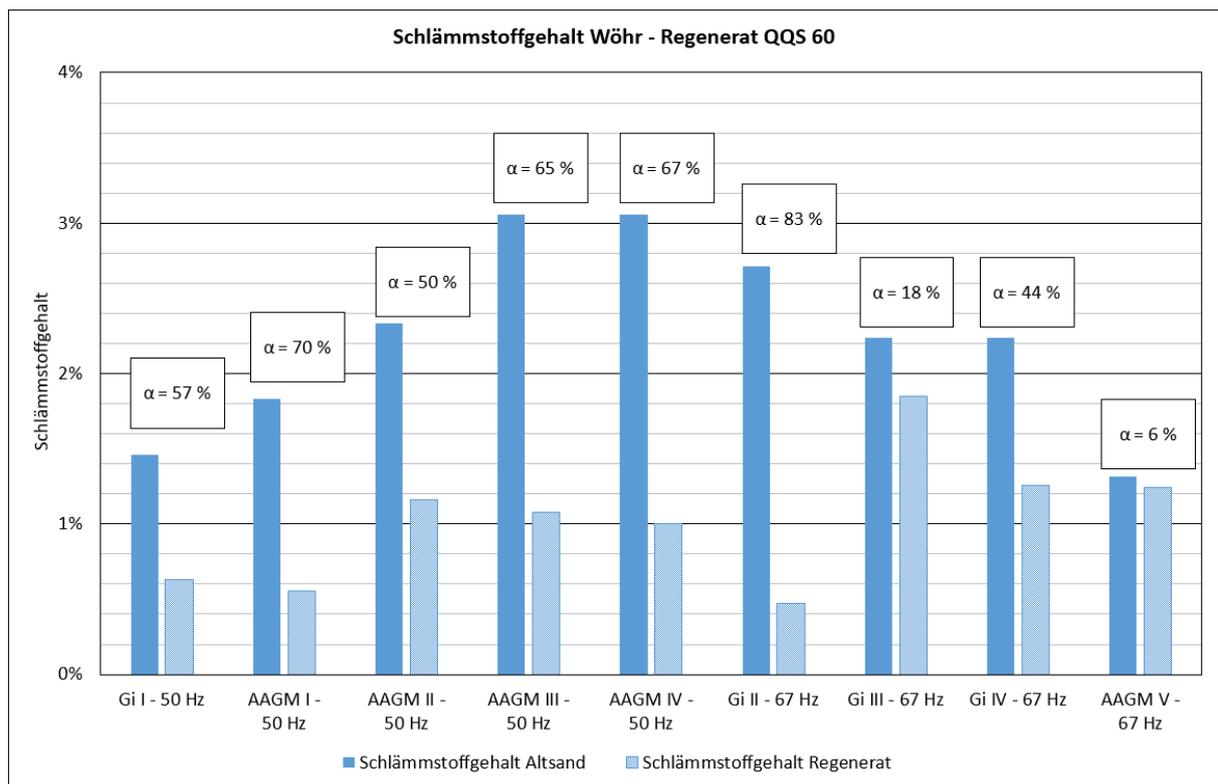


Abbildung 39: Schlammstoffgehalt ($n = 3$) der Wöhr-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter ($\alpha =$ Regenerierungsgrad)

Die Entfernung der Kornklassen 0,02 mm – 0,125 mm über die Entstaubung des Wöhr-Fliehkraftreinigers findet bei Betrachtung der Probe Gi I bei 50 Hz nicht statt. Bei 67 Hz kann dazu auf Grund der stark abweichenden Ergebnisse (Gi II - IV; AAGM V) keine Aussage getroffen werden. Das Entstauben im Fließbettsichter hat eine Reduzierung der Kornklassen 0,02 mm – 0,125 mm (AAGM I – IV) zur Folge (Abb. 40). Auf Grund der längeren Sichtzeit, ist auch bei diesen Kornklassen die Entstaubungseffizienz des Fließbettsichters deutlich schlechter als die der Gemco-Anlage. Auf Grund der durchgängig besseren Entstaubung (Schlammstoff & Korngröße < 0,125 mm) des Zementaltsandes durch den Gemco-Schleifregenerator, in zusätzlich kürzerer Zeit, ist aus technischer Sicht die Verwendung von Mahlhilfsmittel zur Entstaubung nicht erforderlich.

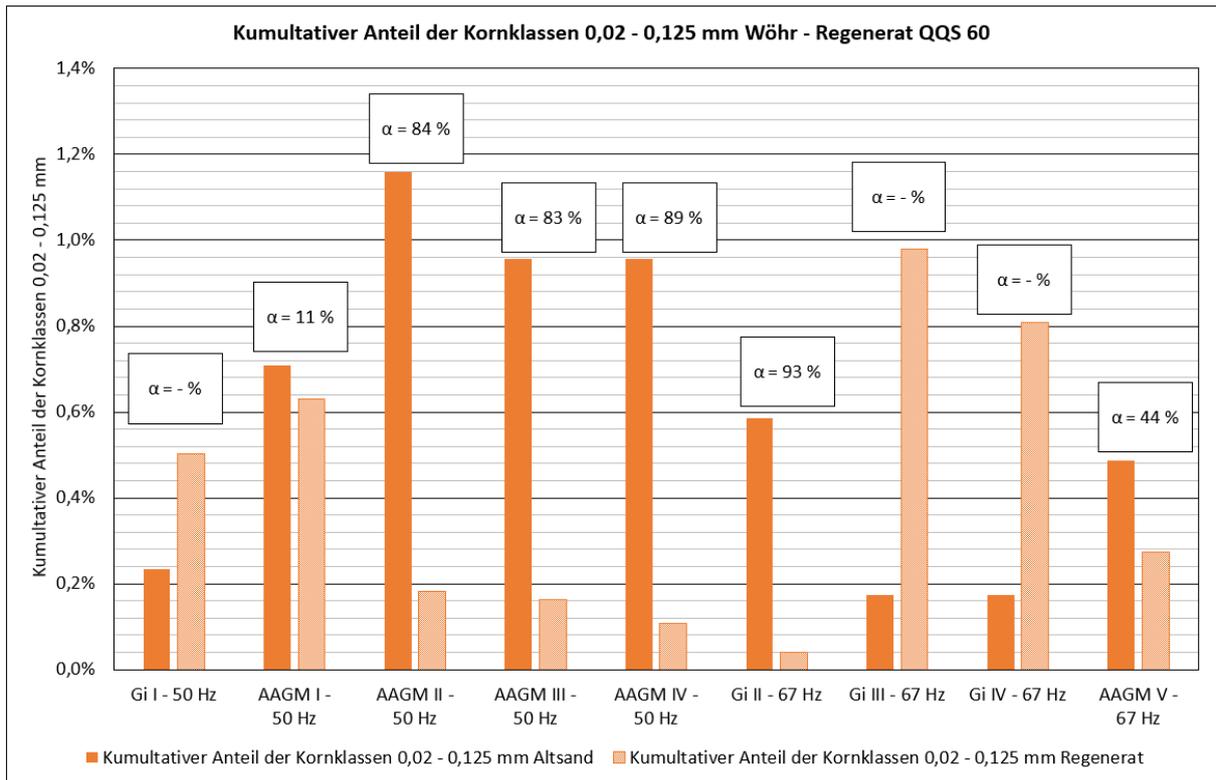


Abbildung 40: kumulativer Anteil der Kornklassen 0,02 – 0,125 mm (n = 2) der Wöhr-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter (α = Regenerierungsgrad)

Auch beim Wöhr-Fliehkraftreiniger wird der Restbindergehalt auf dem Sandkorn verringert, jedoch wurde bei keinem der Regenerate der Zement vollständig entfernt. Die Variation der Rotordrehzahl hat einen signifikanten Einfluss auf die Entfernung des Restzements, da die Regenerierzeit bei 67 Hz um Faktor 5 geringer ist (Abb. 41). Die Schwankungen der Werte bei 50 Hz und 67 Hz sind durch den Durchlaufbetrieb zu erklären. Durch die um Faktor 60 (Schätzung) geringere Verweilzeit der Körner in der Anlage kommt es im Gegensatz zum Gemco-Schleifregenerator nicht zum kontinuierlichen Energieeintrag. Bei 67 Hz kommt außerdem noch hinzu, dass die Prallbeanspruchung wie eingangs erwähnt zufälligen Einflüssen unterliegt wie bspw. einfacher oder mehrfacher Aufprall, Aufprall gegen den Stator oder gegen die Außenwand, erfolgt der Energieeintrag direkt aufs Korn oder auf den Binder.

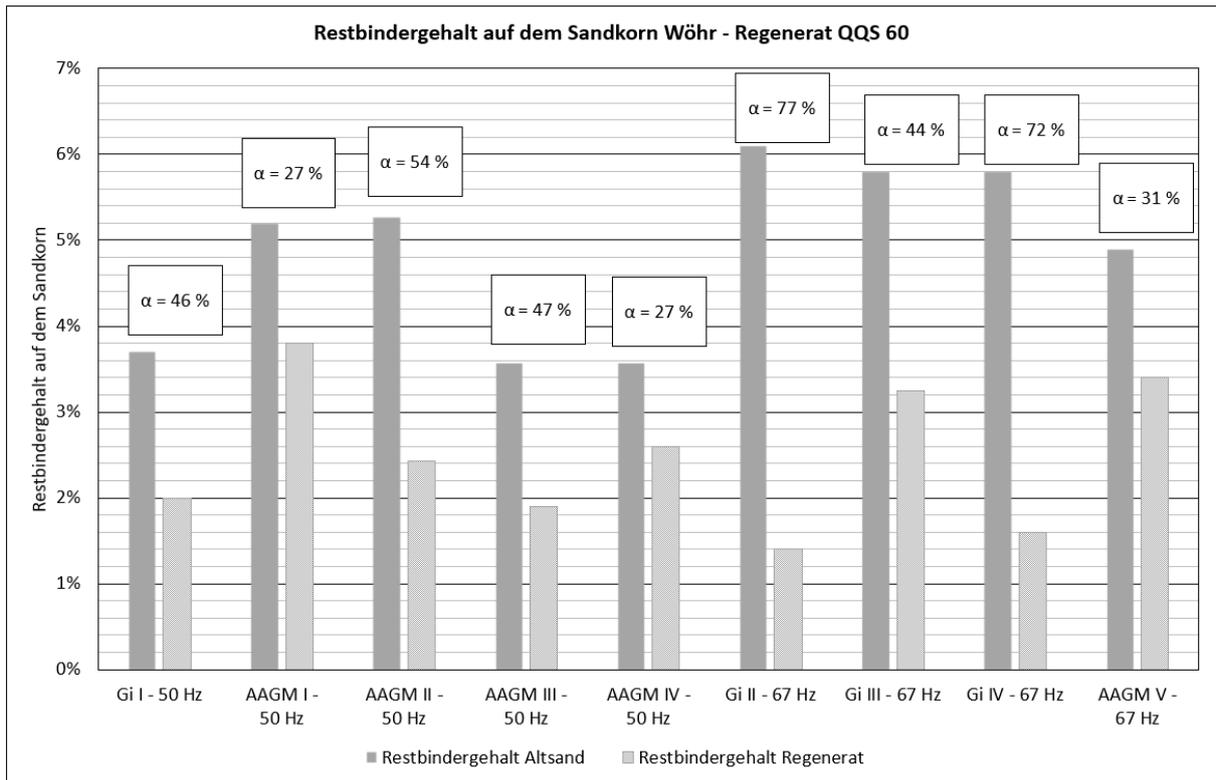


Abbildung 41: Restbindergehalt ($n = 1$) der Wöhr-Regenerate in Abhängigkeit der Anlagenparameter ($\alpha =$ Regenerierungsgrad)

Die im Formstofflabor überprüfte Festigkeit der Probe AAGM V lag mit 70 % Regeneratanteil nach acht Stunden bei $120,5 \pm 10,1 \text{ N/cm}^2$. Das Regenerierregime (67 Hz, 20 min Sichten) der Probe AAGM V weist zusätzlich das nötige Ausbringen (85%) auf, um einen Formstoffkreislauf mit 70% Regeneratanteil aufzubauen.

6 Industrierversuch – Formstoffkreislauf

6.1 Durchführung

Entsprechend *Abbildung 42* wurde der Formstoffkreislauf für zementgebundene Formstoff unter Industrie nahen Bedingungen evaluiert. Hierzu wurden fünf Umläufe durchgeführt, da im ersten Umlauf noch kein Regenerat vorhanden war mussten 100 % Neusand als Formgrundstoff verwendet werden. Auf Grund der gesammelten Erfahrungen aus den Vorversuchen wurde in den restlichen Umläufen mit 70 % Regenerat und 30 % Neusand gearbeitet. Die Form fasste mit Ober- und Unterkasten ca. 3,5 t Formstoff. Als Gussteil wurde ein 1 t schwerer B-Säulen-Probekörper verwendet. Die EPS-Vollformmodelle wurden im hauseigenen Modellbau von Römheld & Moelle hergestellt. Die Abgüsse erfolgten in GJL 250 bei ca. 1370 °C. Zur Regenerierung wurden der im *Kapitel 3.2.2* vorgestellte Fliehkraftreiniger sowie Fließbettsichter verwendet. Bevor die gesonderte Regenerierung stattfand wurden die Altsandknollen mittels Vibrationsknollenbrecher kornvereinzelnd. Die Altsandproben wurden im Anschluss an das Knollenbrechen genommen und die Regeneratproben nach dem Sichten.

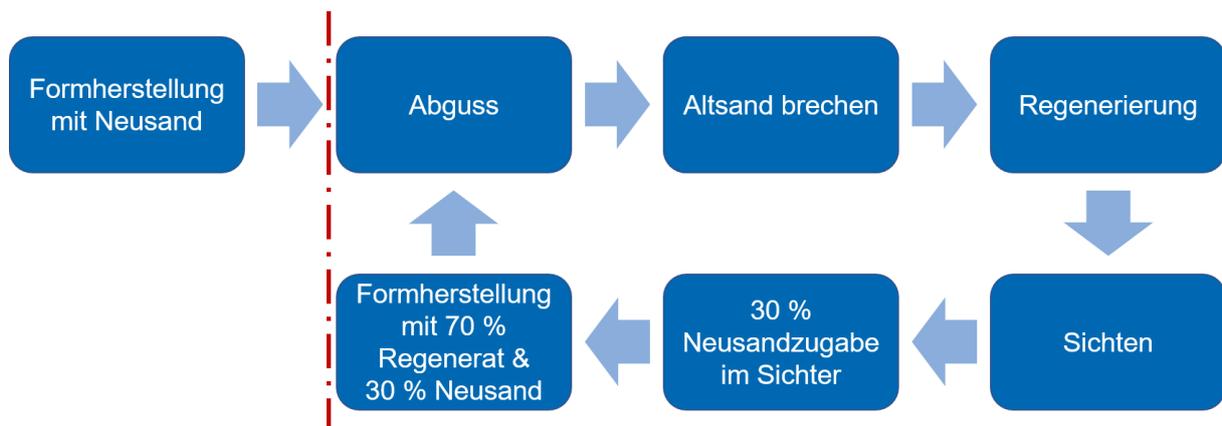


Abbildung 42: Prinzipskizze Industrierversuch – 1. Umlauf beginnt mit der Formherstellung aus Neusand, 2. – 5. Umlauf Formherstellung mit 70 % Regenerat & 30 % Neusand.

Zur Herstellung des Formstoffes wurde ein Durchlaufwirbelmischer der Firma AAGM (*Abb. 43*) verwendet. Das Sand-Dosiersystem des Sandmischers ist nur für die Nutzung einer Sandsorte ausgelegt, sodass der Formgrundstoff aus Regenerat und Neusand vorgemischt werden mussten. Das Mischen der 70 % Regenerat und 30 % Neusand erfolgte chargenweise im Fließbettsicher. Entsprechend der Vorversuche wurden zur Herstellung des Formstoffes 8 % Zement und 4 % Wasser verwendet. Entsprechend *Kapitel 4* wurden ab dem zweiten Umlauf die Additive Soda und Zitronensäure verwendet, da die erste Form nach 18 Stunden Aushärtung lediglich eine Festigkeit von schätzungsweise 15 N/cm² besaß. Mit der

Versuchsreihe wurde dennoch fortgeföhren und die Form abgegossen, da es sich um eine relativ einfache Gussteilgeometrie handelt und der Formstoff mit Erreichen der Ausschalfestigkeit zumindest eine gewisse Festigkeit besaß.



Abbildung 43: Durchlaufwirbelmischer bei der Herstellung des Unterkastens - Formrezeptur: Formgrundstoff – Quarzsand QQS 60, 8 % Ettringizement mit w/z-Wert = 0,5 entspricht 4 % Wasser sowie Additive

Der verwendete Durchlaufmischer wird handelsüblich für kunstharzgebundene Formstoffe verwendet und wurde für Zementformstoffe leicht modifiziert. Es wurde eine Dosierschnecke für die Zugabe des Zementes eingesetzt. Prinzipiell hat sich diese Technik auch für die Herstellung des Zementformstoffes bewährt, die Formen konnten aus technischer Sicht ohne Probleme gefüllt werden. Mit dem Zementformstoff betrieben, erreicht der Mischer jedoch nicht dieselbe Produktivität wie mit kunstharzgebundenen Formstoff. Das hängt damit zusammen, dass der „eigenständige“ Verschleißschutz des Mixers, indem sich eine Sandschicht zwischen Außenwand und Welle aufbaut, jenen zusetzt (Abb. 44 & 45). Der Durchlaufmischer musste zwischen der Herstellung der Formkästen mit viel händischen Aufwand gesäubert werden. Im Vergleich dazu reicht bei der Verwendung von kunstharzgebundenen Formstoffen, je nach Auslastung, bereits eine wöchentliche Reinigung aus. Es gibt bereits mehrere mögliche Lösungsansätze für dieses Problem: Der Einbau eines

Spülgangs mit Wasser, Validierung von Trennmitteln oder Untersuchung anderer Mischwellen-Geometrien.



Abbildung 44: Zugesezte Mischschnecke



Abbildung 45: Zementschale an der Wand des Mixers

In Abbildung 46 – 48 ist die Entstehung der Form dargestellt. Entsprechend des Verfahrensablaufes wurden die Vollformmodelle geschichtet. Dabei wurde das Modell zuerst mit einer Aluminiumsilikat-Schichte (hellrot – *Abb. 47*) überzogen, die thermisch stark belasteten Bereiche wurden noch zusätzlich mit einer Zirkonsilikat-Schichte überzogen (weiß – *Abb. 47*). Die während des Abgusses entstehenden Flammen sind auf die Vergasung des Vollformmodells zurückzuführen (*Abb. 49 rechts*).



Abbildung 46: links) Vollform-Modell B-Säulen Probekörper mit Anschnitt im Unterkasten, rechts) gewendeter Unterkasten



Abbildung 47: links) Aufgesetzter Oberkasten, rechts) Formen des Oberkastens

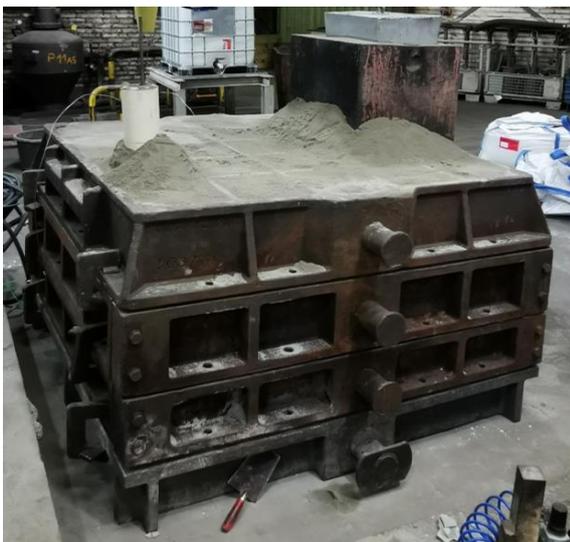


Abbildung 48: links) Abgussbereite Form, rechts) Form nach Abguss

6.2 Rohgussteile

Der Abguss der fünf B-Säulen-Probekörper lief ohne Komplikationen. Die Visuelle Prüfung der Gussteile erfolgte nach dem Strahlen. An der Gussteiloberfläche treten formstoffbedingte Gussfehler auf (Abb. 49 – 53). Diese sind, wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung, an allen fünf Gussteilen zu finden, es handelt sich um Vererzungen und Oberflächenblasen [2]. Am stärksten sind die Oberflächenfehler beim ersten und vierten Umlauf ausgeprägt. Die Schwankungen des Fehlerbilds sind als zufällige Einflüsse einzuordnen. Die Entstehung der Vererzung und der Oberflächenblasen ist auf dieselbe Ursache zurückzuführen, den Kontakt der auf dem Vollformmodell eingetrockneten Schlichte mit dem Wasser aus dem frischen Zementformstoff. Das Anmachwasser weicht die Schlichte auf, sodass diese potentiell die notwendige Abriebfestigkeit verliert und beim Kontakt mit der Schmelze aufreißt. Dadurch kann diese hinter die Schlichte fließen und den Formstoff penetrieren. Durch den verwendeten Quarzsand QQS 60 wird die Penetration begünstigt. Bei ausreichend großen thermischen Eintrag folgt eine Reaktion des Formstoffes mit dem Gusseisen und es kommt wie in dieser Versuchsreihe zur Vererzung [2]. Zu Oberflächenblasen kommt es, wenn die durch den frischen Zementformstoff eingebrachte Feuchtigkeit aus der Schlichte verdampft und Gasblasen entstehen. Beide Fehler sind mit der Kombination aus Vollformverfahren und Zementformstoff zu begründen, da bereits getrocknete Schlichte erneut mit Wasser in Berührung kommt. Wird im Gegensatz dazu die ausgehärtete Form geschlichtet, wie es bei Dauermodellen der Fall ist, kann die Schlichte problemlos auf den bereits hydratisierten Formstoff aufgetragen werden. Wodurch diese ohne Qualitätseinbußen eingesetzt werden kann [1]. Als Abstellmaßnahme der Oberflächenfehler beim Vollformverfahren müsste aus formstoffseitiger Sicht der Wassergehalt reduziert werden. Dabei sollte der w/z-Wert von 0,5, weitestgehend unverändert bleiben. Demzufolge ist eine Verringerung des Wassergehaltes immer mit einer Reduzierung des Zementgehaltes verbunden [1, 12]. Weitere Abstellmaßnahmen sind eine stärkere Schlichteschicht auftragen, in Absprache mit den Schlichteherstellern ein weniger Wasser empfindliches Bindermittel in der Schlichte verwenden oder der Auftrag einer hydrophoben Schicht auf die Schlichte. Es ist noch anzumerken, dass von in Gießereien beim Furanharzformstoff vereinzelt dieselbe Wechselwirkung zwischen Schlichte und Formstoff beobachtet wurde. Das Wasser bildet sich beim Furanharz durch die Polykondensation während der Aushärtung [14]. Das Projekt „RegoZem“ hatte die Aufgabe die Machbarkeit einer wirtschaftlichen

Zementformstoffregenerierung sowohl für das Vollformverfahren, als auch für das Hohlformverfahren zu untersuchen. Daher der theoretische Richtwert von ca. 100 N/cm² als Abgussfestigkeit. Auf Grund der Erkenntnisse aus den Industrierversuchen kann der Richtwert für die Abgussfestigkeit im Vollformverfahren reduziert werden, denn es wurden fünf vergleichbare B-Säulenprobekörper abgegossen. Obwohl die erste Form eine Festigkeit ca. 15 N/cm² aufwies und diese bei den anderen 4 Umläufen zwischen 90 – 120 N/cm² lag. Es ist jedoch noch anzumerken, dass die verwendete Geometrie relativ klein und einfach gehalten ist, bei größeren bzw. komplexeren Modellen sind höchstwahrscheinlich andere Festigkeiten notwendig. Hierzu müssen praktische Erfahrungen gesammelt werden die Abbildung eines Gussteilsortiments ist im Rahmen eines Projektes nicht möglich. Für das Hohlform kann keine Aussage getroffen werden, hier ist der Empfehlung aus der Literatur zu folgen. [14]



Abbildung 49: Rohgussteil 1. Umlauf



Abbildung 50: Rohgussteil 2. Umlauf



Abbildung 51: Rohgussteil 3. Umlauf



Abbildung 52: Rohgussteil 4. Umlauf



Abbildung 53: Rohgussteil 5. Umlauf

Einer Vererzung geht immer eine Penetration voraus, um die Gussfehler voneinander zu unterscheiden kann eine EDX-Analyse durchgeführt werden. Diese wurde an der in *Abbildung 54* dargestellten Vererzung durchgeführt. Ein Teil der Vererzungen konnte händisch von den Gussteilen entfernt werden, da an diesen Stellen die Schlichte zwar von der Schmelze hinterlaufen wurde, aber noch intakt war.



Abbildung 54: Herausgebrochene Vererzung

In *Abbildung 55* ist eine REM-Aufnahme der Vererzung bei der das EDX-Mapping durchgeführt wurde dargestellt.

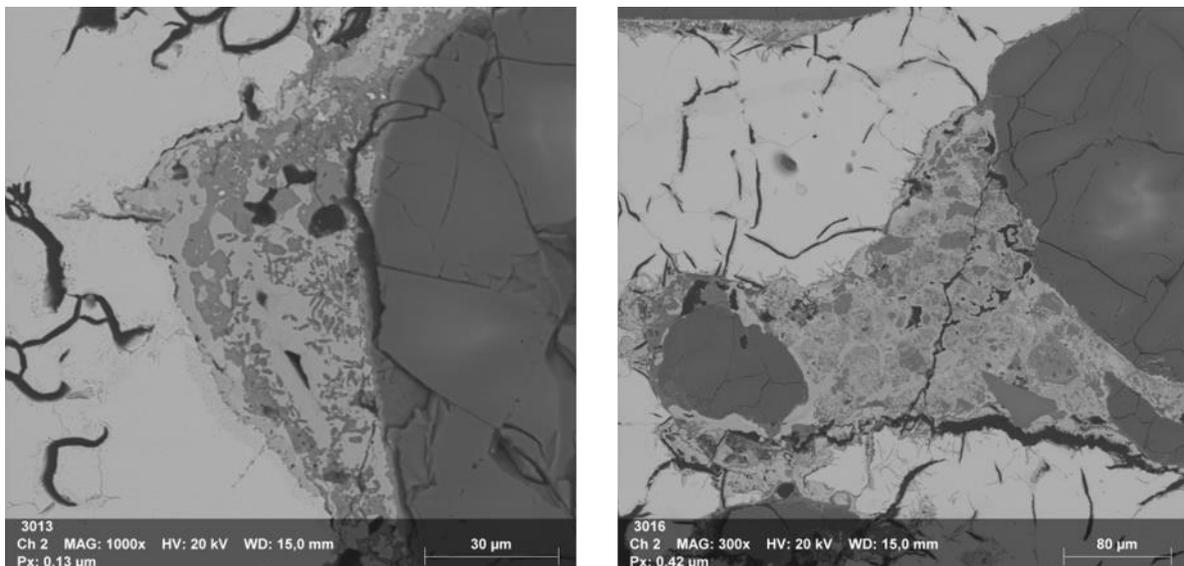


Abbildung 55: REM-Aufnahmen Vererzung bei 1000-facher Vergrößerung

An Hand des EDX-Mappings ist zu erkennen, dass es sich um eine Vererzung handelt. Augenscheinlich reagiert die Schmelze nur mit den Hydratphasen des Zementes, da in den REM-Aufnahmen eine deutliche Abgrenzung des Eisens von den Quarzsandkörnern zu beobachten ist (*Abb. 56 – 58*).

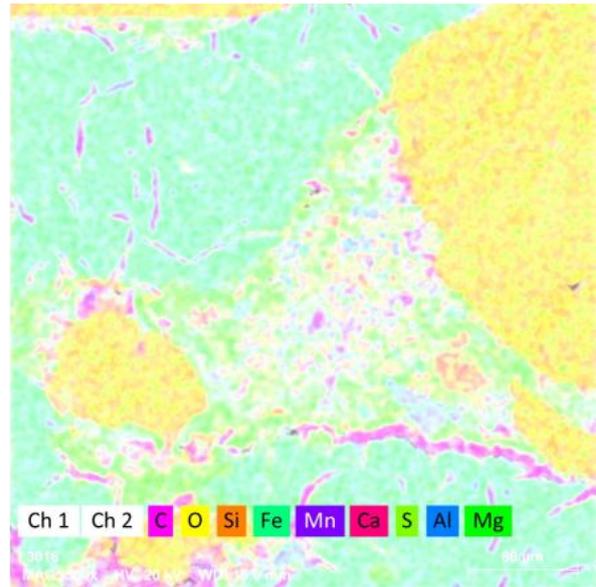
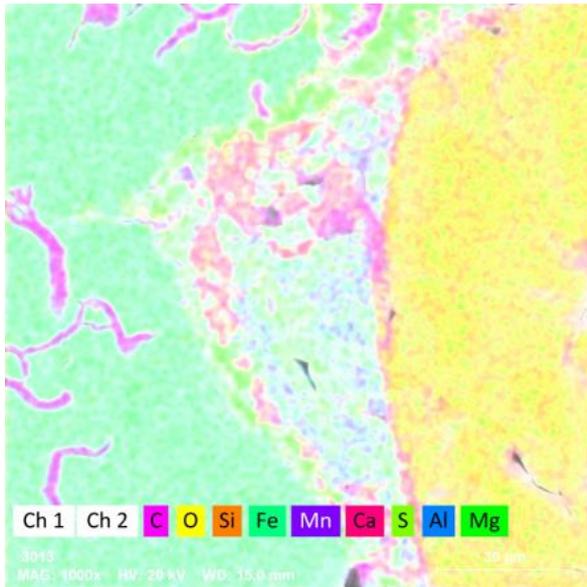


Abbildung 56: EDX-Mapping der Elementverteilung innerhalb der Verzweigung bei 1000-facher Vergrößerung

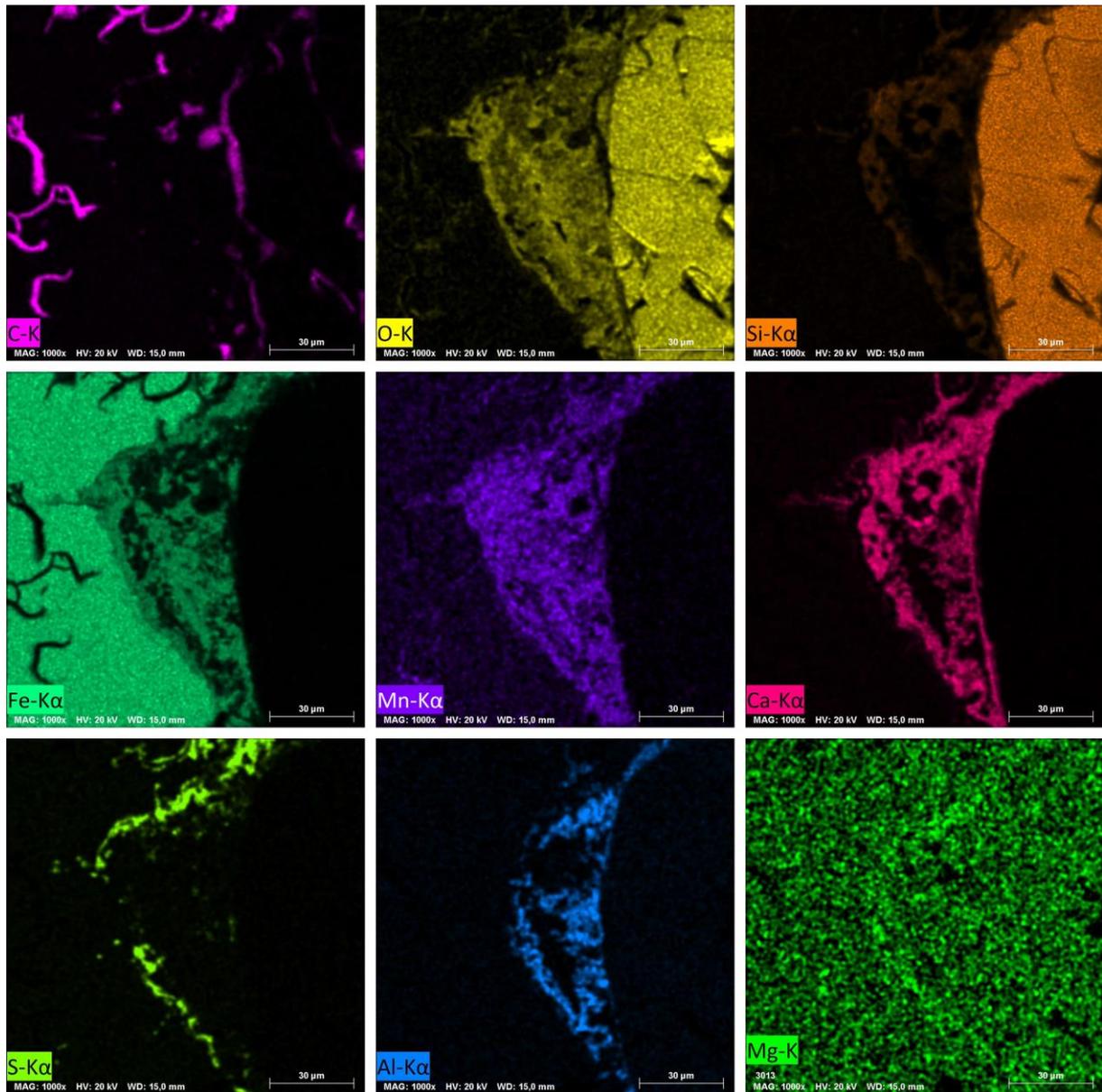


Abbildung 57: Individuelles EDX-Mapping der Einzelemente zur linken Abbildung 50 bei 1000-facher Vergrößerung

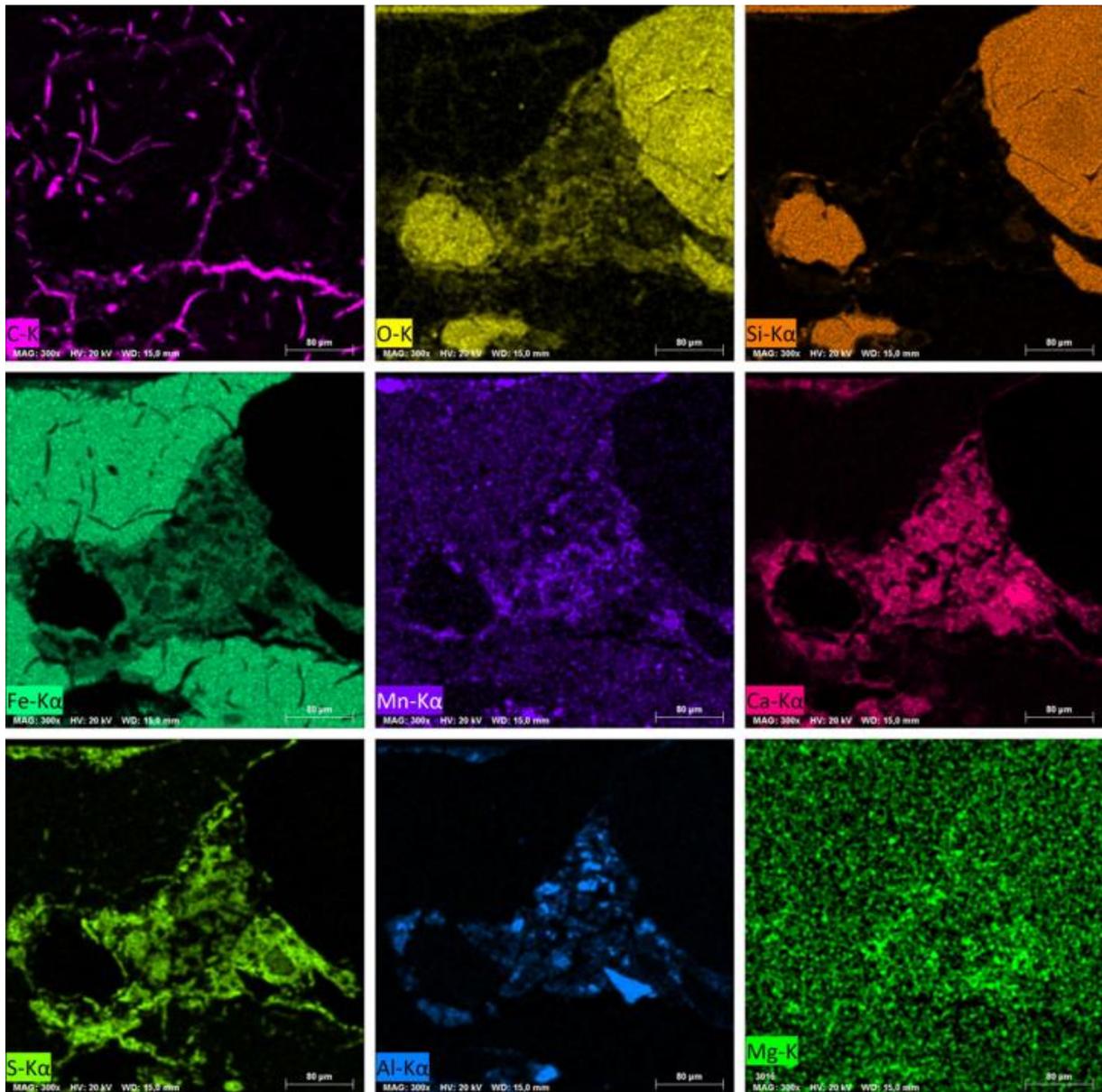


Abbildung 58: Individuelles EDX-Mapping der Einzelemente zur rechten Abbildung 50 bei 1000-facher Vergrößerung

Abschließend ist festzuhalten, dass die aufgetretenen Gussfehler nicht zwangsläufig zum Ausschuss führen, aber eine Mehrarbeit in der Putzerei bedeuten. Die Oberflächenfehler sind außerdem nicht grundsätzlich auf die Verwendung von Zement-Regenerat zurückzuführen. Sondern auf die Verwendung von Zementformstoff und können durch Abstellmaßnahmen beseitigt werden. Im Industrierversuch wurde dementsprechend nachgewiesen, dass der Zementformstoff im Formstoffkreislauf gefahren werden kann.

6.3 Eigenschaften des Regenerats und dessen Einfluss auf die Formstoffeigenschaften

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt liegt die 8 h Biegefestigkeit der Formstoffe bei 70 % Regeneratanteil zwischen 90 und 120 N/cm² (Abb. 59). Die Gasdurchlässigkeit des Formstoffes lag bei allem Umläufen über 600 Gd. Das ist die Messgrenze des bei Römheld & Moelle vorliegenden Messgerätes. Demzufolge ist ein negativer Einfluss auf die Gasdurchlässigkeit durch den Einsatz von Regenerat auszuschließen.

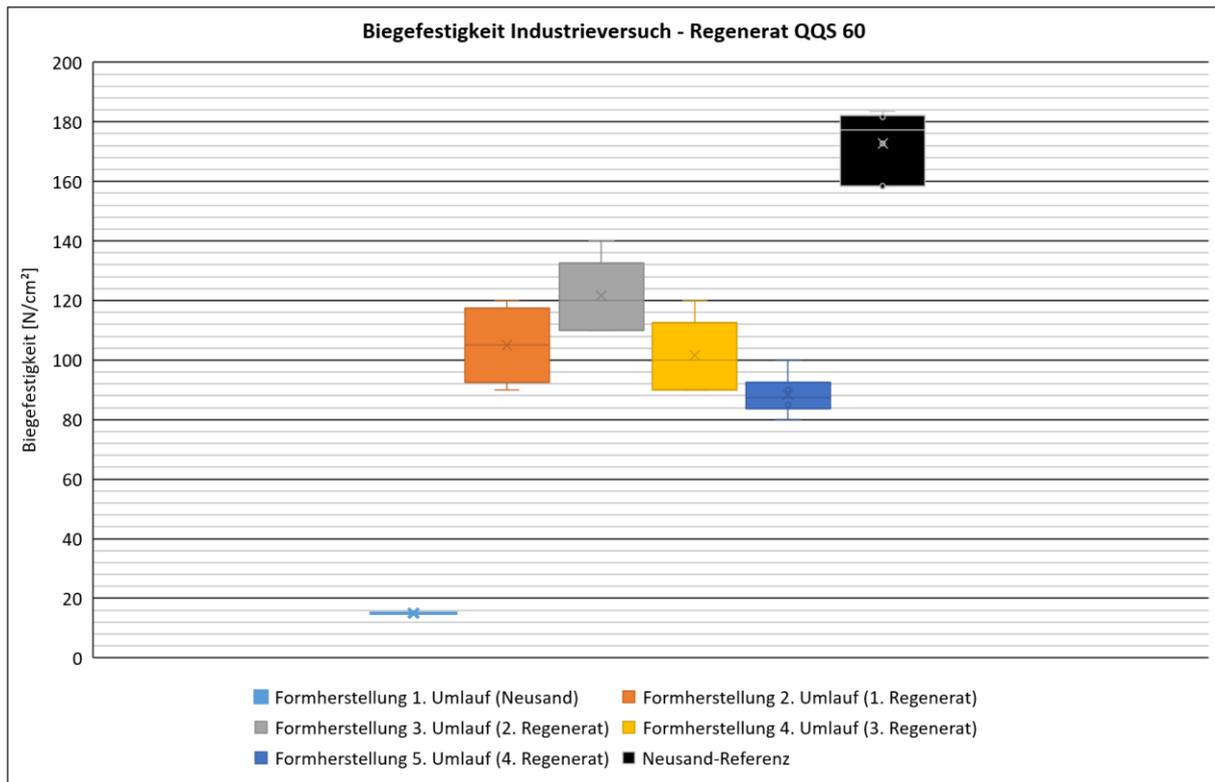


Abbildung 59: 8h Biegefestigkeit; 8 % Zement mit Soda & Zitronensäure; w/z-Wert = 0,5; 70 % Regeneratanteil

Die Siebanalyse der Regenerate zeigt eine Zunahme der mittleren Korngröße mit jedem Umlauf. Zusätzlich liegt der Anteil der Kornklassen 0,180 bis 0,355 mm ab dem 1. Umlauf deutlich über der des Neusandes (Abb. 60). Der Anstieg der mittleren Korngröße lässt mit einem stetigen Aufwachsen des Zementes mit jedem Umlauf erklären, den erhöhten Anteil der Kornklassen 0,180 bis 0,355 mm durch den Verschleiß der Körner durch die Regenerierung. Diese Annahmen werden durch die REM-Aufnahmen bestätigt (Abb. 61 – 62).

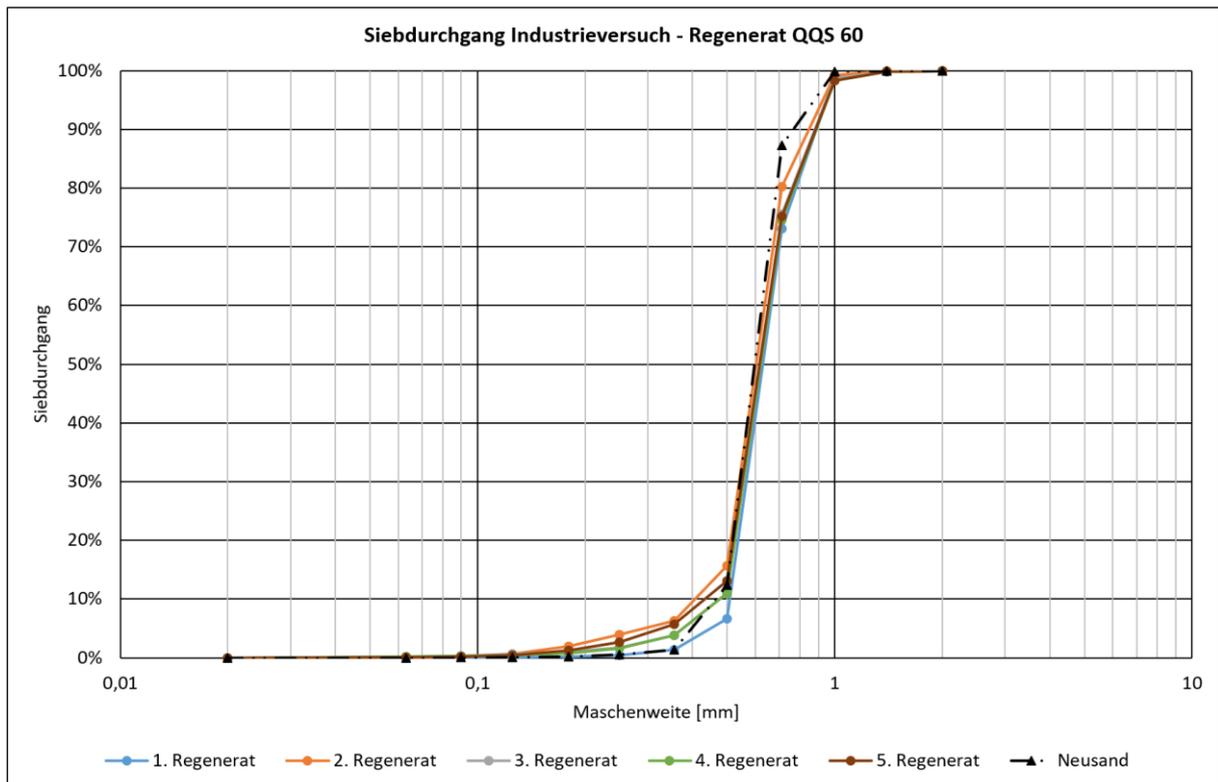


Abbildung 60: Siebanalyse (n = 2) des Industrierversuches am Wöhr-Fliehkraftreiniger mit 67 Hz

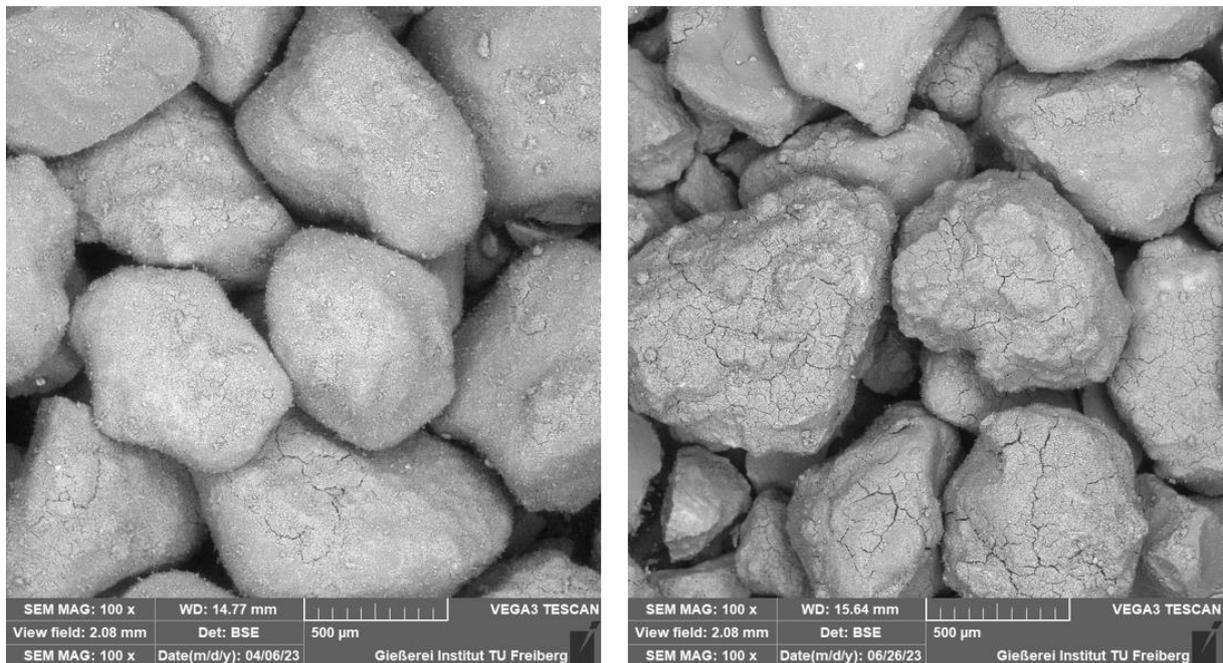


Abbildung 61: links) 1. Regenerat, rechts) 3. Regenerat

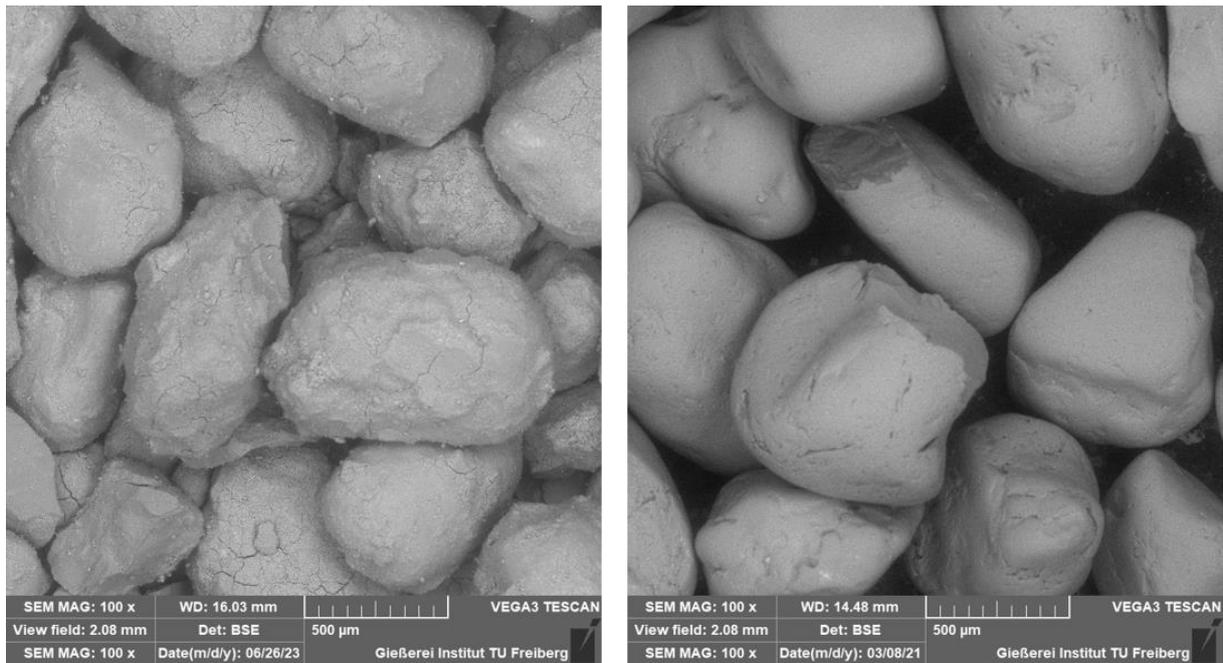


Abbildung 62: links) 5. Regenerat rechts) Neusand QQS 60

Die Feinanteile wurden durch das Regenerierregime des Industrieversuches entfernt (Abb. 63 & 64). Durch die unterschiedlichen Ausgangswerte sind die schwankenden Werte der Regenerate als prozessbedingt einzustufen. Im Zusammenhang mit den Festigkeitseigenschaften des Formstoffes ist dem Schlammstoffgehalt, als auch dem Kornklassenanteil 0,02 – 0,125 mm bei den vorliegenden Gehalten kein signifikanter Einfluss nachzuweisen. Das bedeutet, dass das Zementformstoffsystem im Gegensatz zu harzgebundenen Formstoffsystemen einen höheren Schlammstoffgehalt bzw. Feinanteil im Regenerat toleriert [11, 14]. Die plausibelste Ursache hierfür ist, dass beim Zementformstoff deutlich höhere Bindergehalte eingesetzt werden als bspw. beim Furanharz.

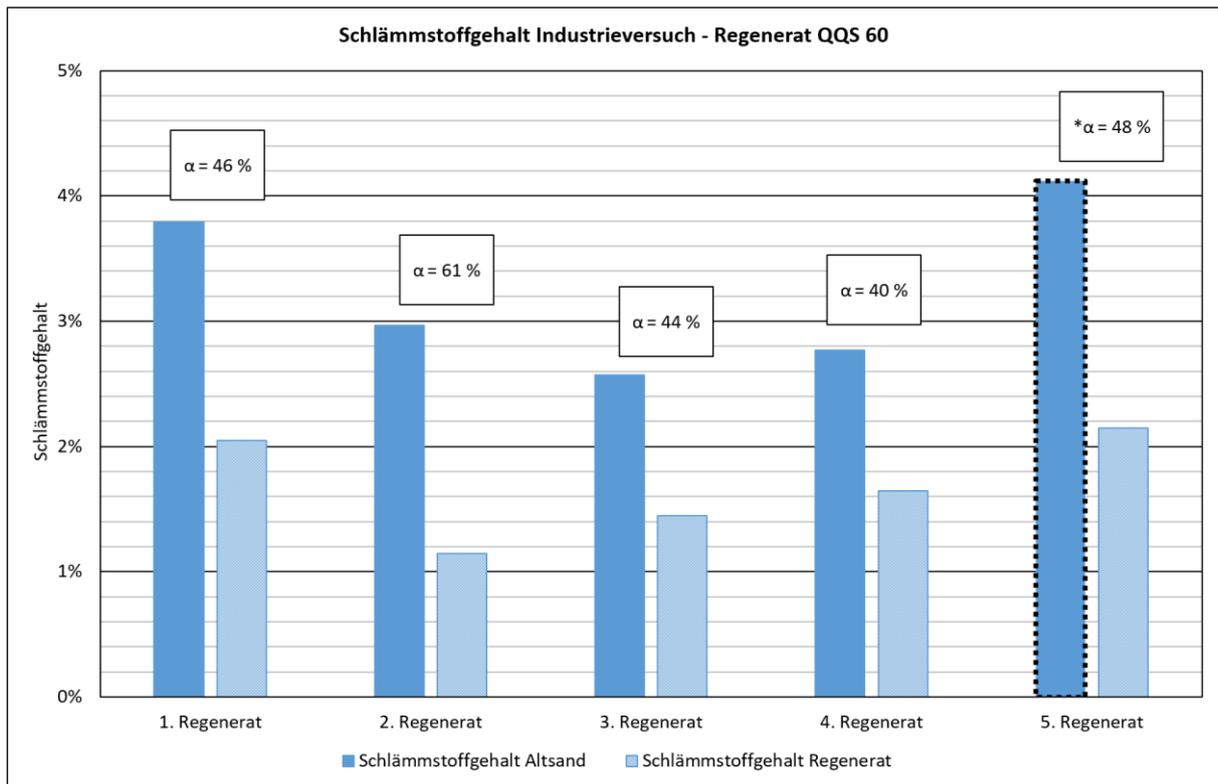


Abbildung 63: Schlammstoffgehalt ($n = 3$) des Industrierversuches am Wöhr-Fliehkraftreiniger mit 67 Hz ($\alpha =$ Regenerierungsgrad, die Altsandprobe des 5. Regenerates stellt einen Erwartungswert dar)

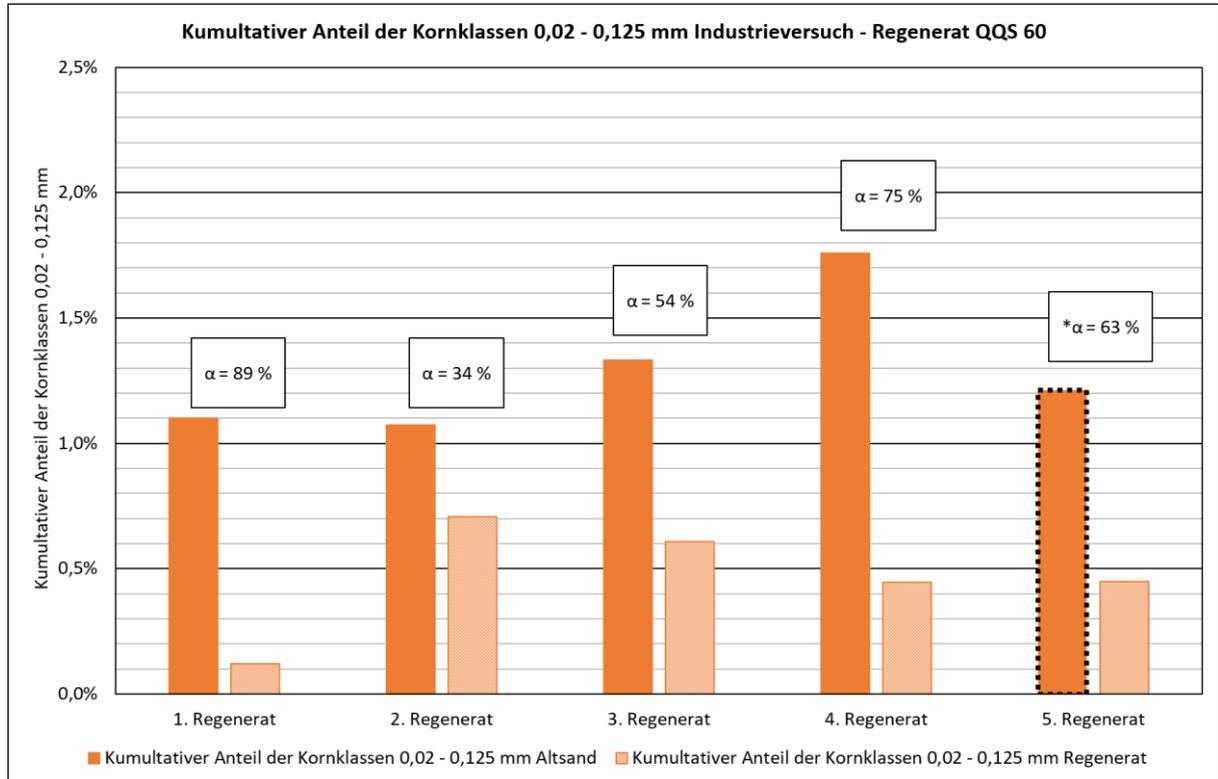


Abbildung 64: kumulativer Anteil der Kornklassen 0,02 – 0,125 mm ($n = 2$) des Industrierversuches am Wöhr-Fliehkraftreiniger mit 67 Hz ($\alpha =$ Regenerierungsgrad, die Altsandprobe des 5. Regenerates stellt einen Erwartungswert dar)

Der Restbindergehalt steigt wie bereits durch die Siebanalyse und die REM-Aufnahmen vermutet mit jedem Umlauf an (Abb. 65) und ist demzufolge der Grund für die Verringerung der Biegefestigkeit.

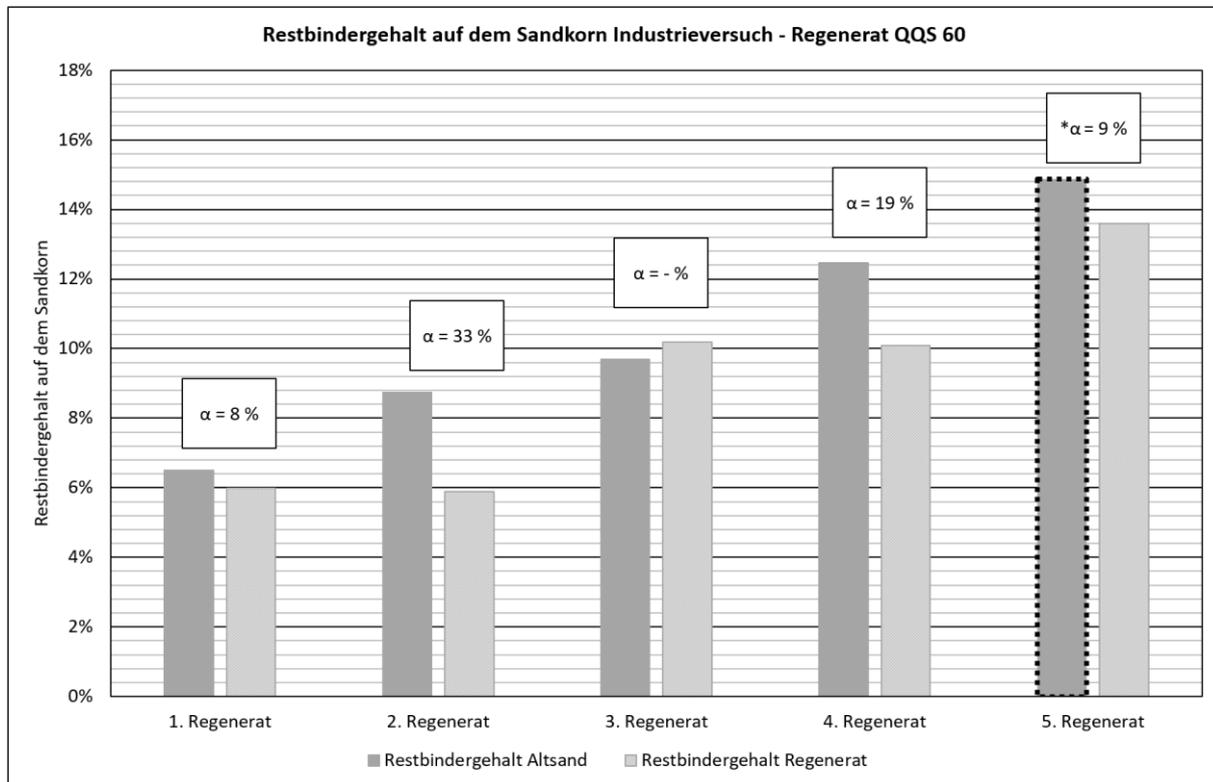


Abbildung 65: Restbindergehalt ($n = 3$) des Industrierversuches am Wöhr-Fliehkraftreiniger mit 67 Hz ($\alpha =$ Regenerierungsgrad, die Altsandprobe des 5. Regenerates stellt einen Erwartungswert dar)

6.4 Auswertung der Anlagenparameter in Bezug auf den Restbindergehalt

Das Ausbringen des Wöhr-Fliehkraftreinigers lag für den Industrierversuch bei durchschnittlich bei 91 %. Wie bereits angemerkt ist das Knollenbrechen eine einstufige mechanische Regenerierung, wenn durch diesen Prozess Binder entfernt wird. Dies ist beim Zementformstoff der Fall (*Abb. 66*). Das Knollenbrechen macht beim Industrierversuch den größten Anteil der Gesamt-Regenerierung aus. Allerdings werden hauptsächlich die Binderbrücken entfernt, was tendenziell weniger Energieeintrag erfordert als das Entfernen der am Sand haftenden Zementreste. Mit fortschreitendem Umlauf nimmt der Regenerierungsgrad des Knollenbrechers linear ab, da der Zement aufwächst. Dies sorgt gleichzeitig für eine schlechtere Entfernung des Restbinders. Auf Grund der Abnahme des Regenerierungsgrad stellt sich außerdem kein Komponentengleichgewicht ein, hierzu ist ein konstanter Regenerierungsgrad notwendig. Der Anteil des Fliehkraftreinigers am Gesamt-Regenerierungsgrad ist marginal und unterliegt deutlichen Schwankungen. Der Industrierversuch bestätigt damit den diskontinuierlichen Energieeintrag des Fliehkraftreinigers. Außerdem wird aufgezeigt, dass eine diskontinuierliche Prallbeanspruchung des Korns auf Grund des hohen Bindergehaltes nicht für die Regenerierung des Zementformstoffes geeignet ist. Im Umkehrschluss ist der Gemco-Schleifregenerator, auf Grund des Chargenbetriebes und den Energieeintrag durch den Schleifstein, besser geeignet für die Regenerierung des Zementformstoffes. Zur Validierung dieser Aussage wurden Folgeversuche an der dieser Anlage durchgeführt. Vor allem in Hinblick auf die betriebswirtschaftliche Optimierung des Zementformstoffsystems, da ein Formstoffkreislauf mit 70 % Regeneratanteil nicht wirtschaftlich (*Kapitel 9*) ist.

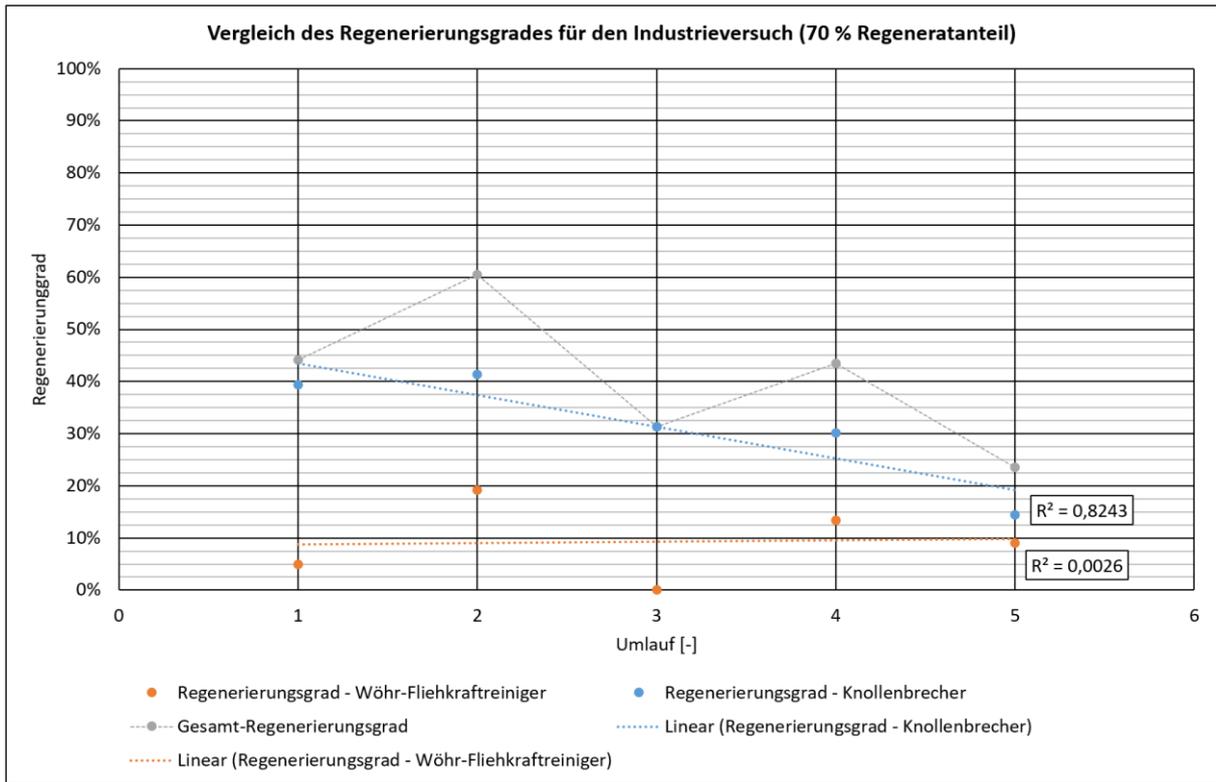


Abbildung 66: Regenerierungsgrad des Wöhr – Fliehkraftreinigers, des Knollenbrechers sowie der Gesamt-Regenerierungsgrad des Industrierversuches (Linien dienen zur Kennzeichnung des Verlaufs)

7 Formstoffkreislauf – Chargenbetrieb

Auf Grund des Gesamt-Regenerierungsgrades von 70 % im Vorversuch mit 20 Hz bei gleichzeitigem Erhalt des Kornbandes (*Kapitel 5.1*) wurde der Umlaufversuch mit 20 Hz durchgeführt. Es wurde dieselbe Charge Ettringizement wie im Industrierversuch mit entsprechenden Additivgehalten verwendet. Der Formstoff wurde mittels eines Chargenmischers hergestellt.

Die Eckdaten des Versuches sind in *Tabelle 5* dargestellt.

Tabelle 5: Eckdaten des Formstoffkreislaufs Gemco-Schleifregenerator 20 Hz – mit konstanter Regenerierzeit

Prozessschritt	Dauer [min]
Vorentstauben	5
Schleifen	30
Nachentstauben	10
Regeneratanteil	93,3 %

Die Festigkeit im einfachen Umlauf (1. Regenerat) liegt trotz des erhöhten Regeneratanteils nach 8 h bei durchschnittlich $121,7 \text{ N/cm}^2$ (*Abb. 68*) und liegt damit leicht über dem Wert aus dem Industrierversuch mit 70 % Regeneratanteil. Eine mögliche Erklärung hierfür ist der geringere Restbindergehalt (*Abb. 67*) und das bei der Gemco-Anlage mit 20 Hz durch den kontinuierlichen Energieeintrag weniger Schwankungen des Restzementes im Regenerat auftreten. Dennoch nimmt mit zunehmendem Umlauf die Biegefestigkeit ab und pendelt sich bei ca. 70 N/cm^2 bis zum 5. Regenerat ein. Auch bei dieser Versuchsreihe ist kein negativer Einfluss auf die Gasdurchlässigkeit des Formstoffes festzustellen.

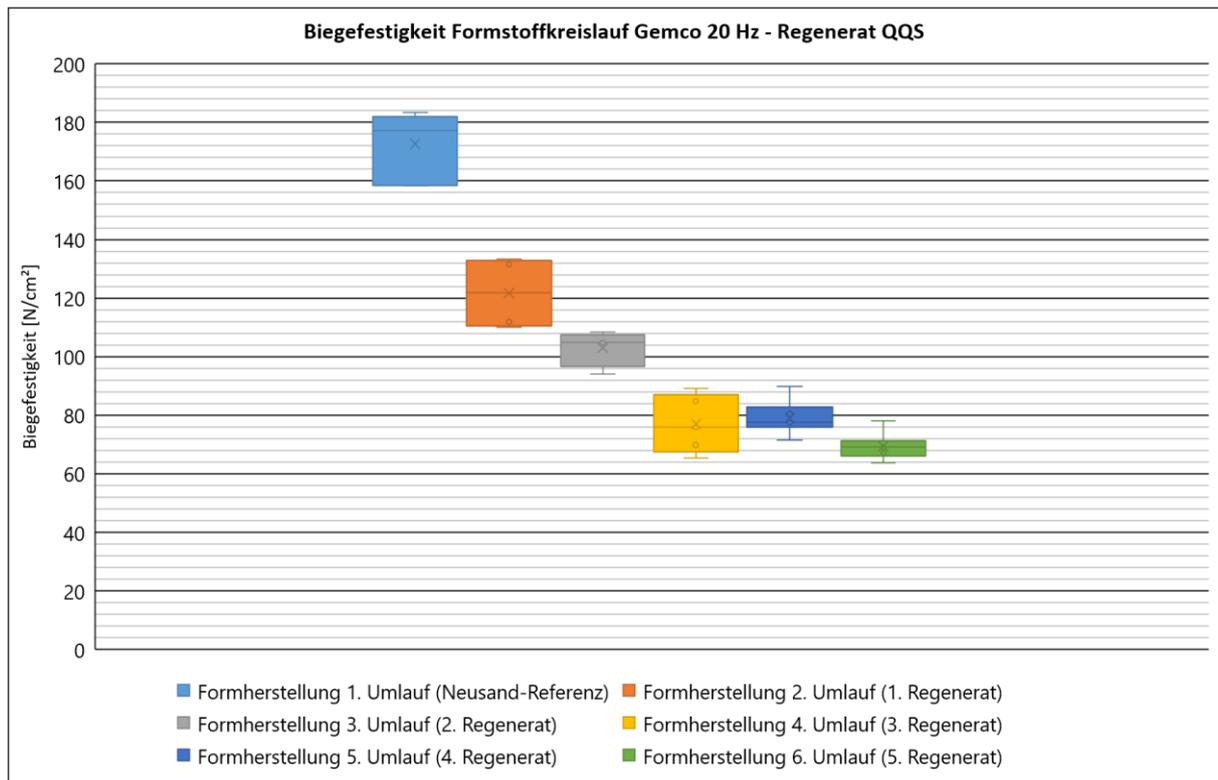


Abbildung 67: 8h Biegefestigkeit; 8 % Zement mit Soda & Zitronensäure; w/z-Wert = 0,5; 93,3 %
Regeneratanteil

Auch bei diesem Umlaufversuch zeigt die Siebanalyse der Regenerate eine Zunahme der mittleren Korngröße, was sich ebenfalls mit stetigem Aufwachsen des Zementes erklären lässt. Die REM-Aufnahmen bestätigen dies (Abb. 68 – 70).

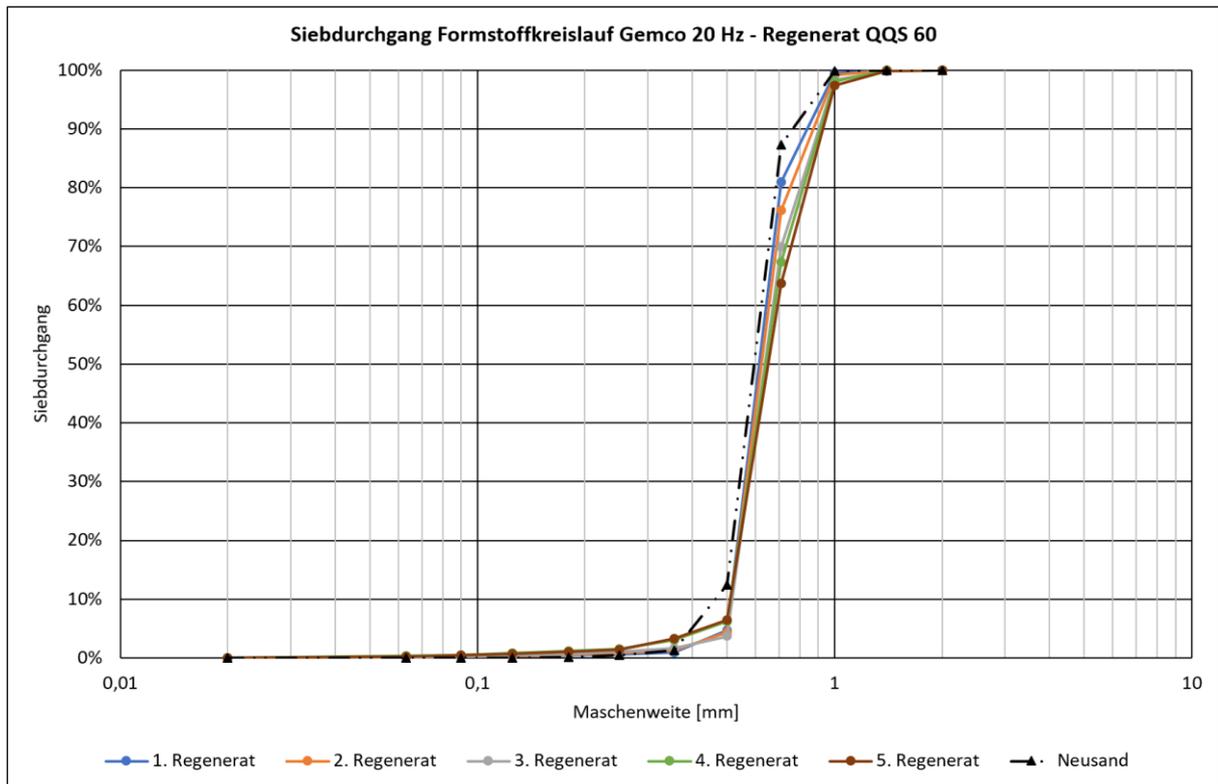


Abbildung 68: Siebanalyse (n = 2) des Formstoffkreislaufes Gemco-Schleifregenerator 20 Hz

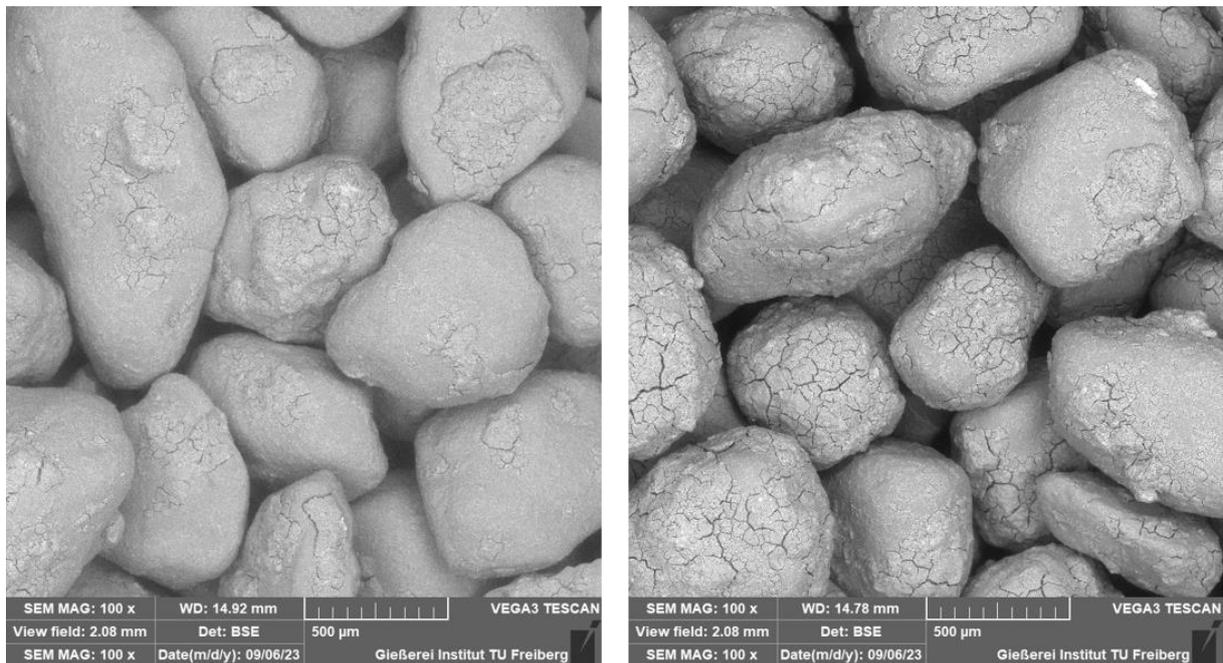


Abbildung 69: links) 1. Regenerat, rechts) 3. Regenerat

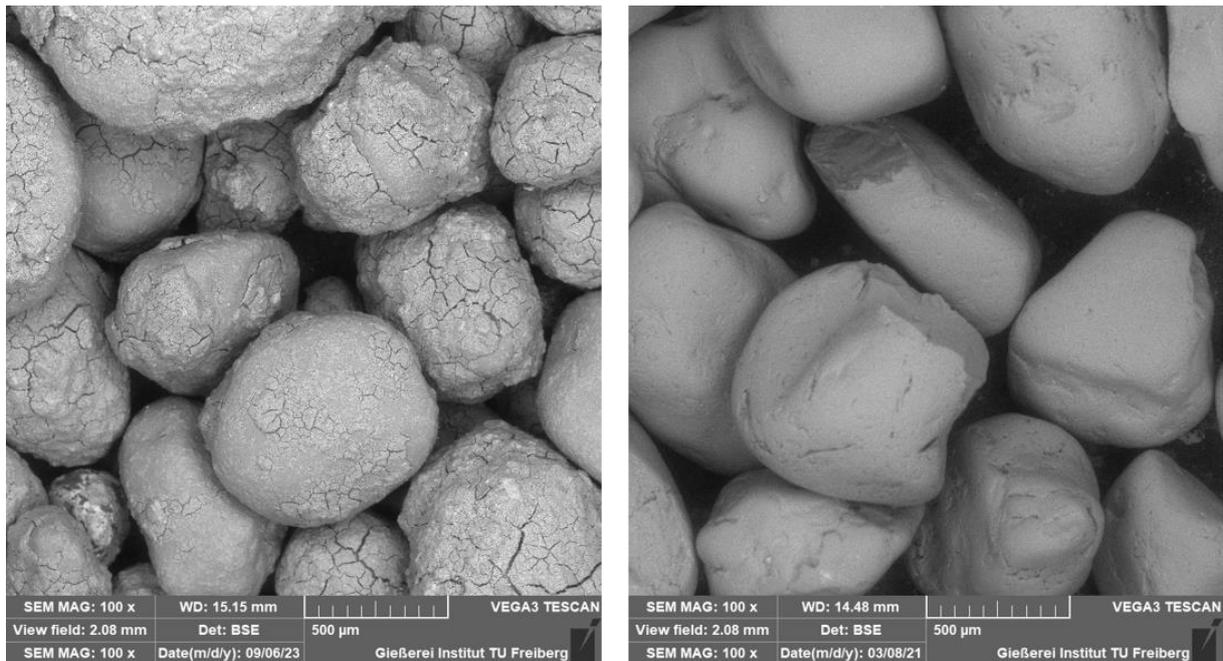


Abbildung 70: links) 5. Regenerat rechts) Neusand QQS 60

Die Entstaubung der einmaligen Regenerierung (1. Regenerat) entspricht ca. dem Vorversuch des Gemco-Schleifregenerators mit 20 Hz. Mit fortschreitendem Umlauf nimmt der Regenerierungsgrad ab, was dafürspricht, dass mit zunehmenden Restbindergehalt die Entstaubung erschwert wird (Abb. 71 – 72). Auch in dieser Versuchsreihe ist bei den vorliegenden Versuchsparametern kein signifikanter Einfluss der Feianteile nachzuweisen. Der höchste gemessene Schlammstoffgehalt beträgt 3 % (3. Regenerat) und liegt damit um 33 % über dem höchsten gemessenen Schlammstoffgehalt des Industrieversuches.

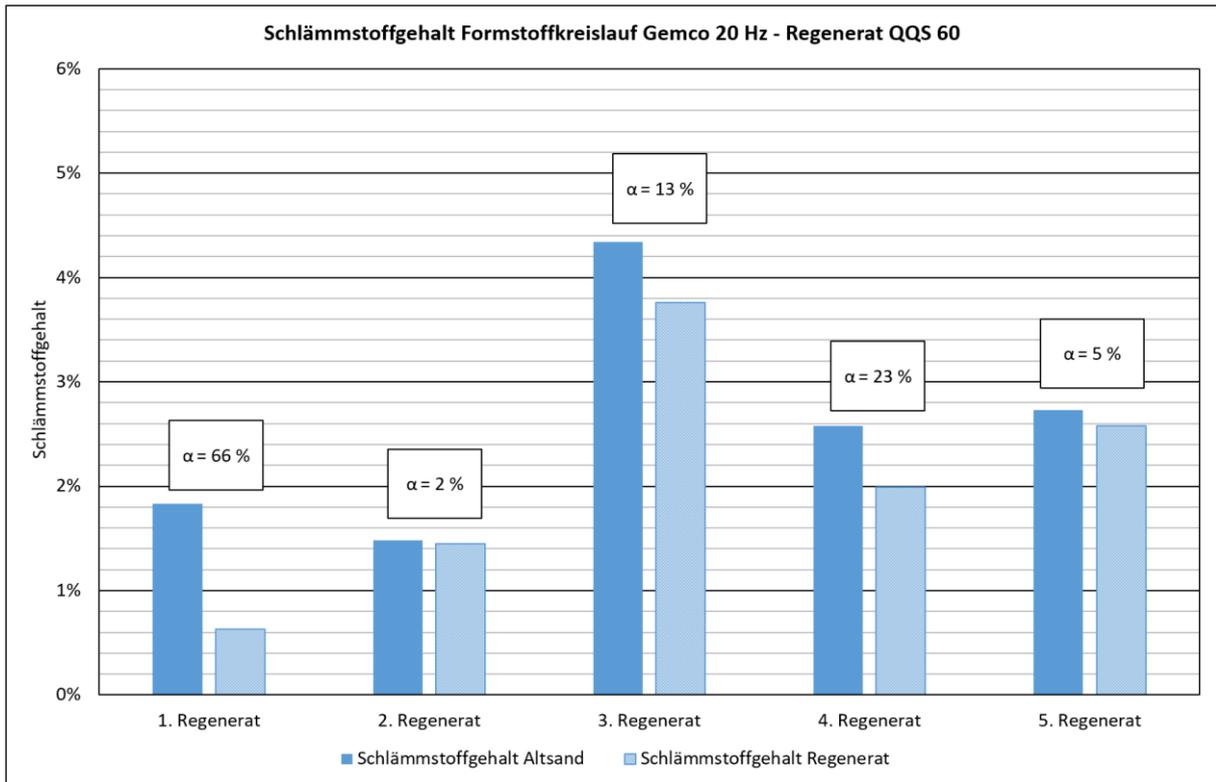


Abbildung 71: Schlammstoffgehalt ($n = 3$) des Formstoffkreislaufes Gemco -Schleifregenerator 20 Hz ($\alpha =$ Regenerierungsgrad)

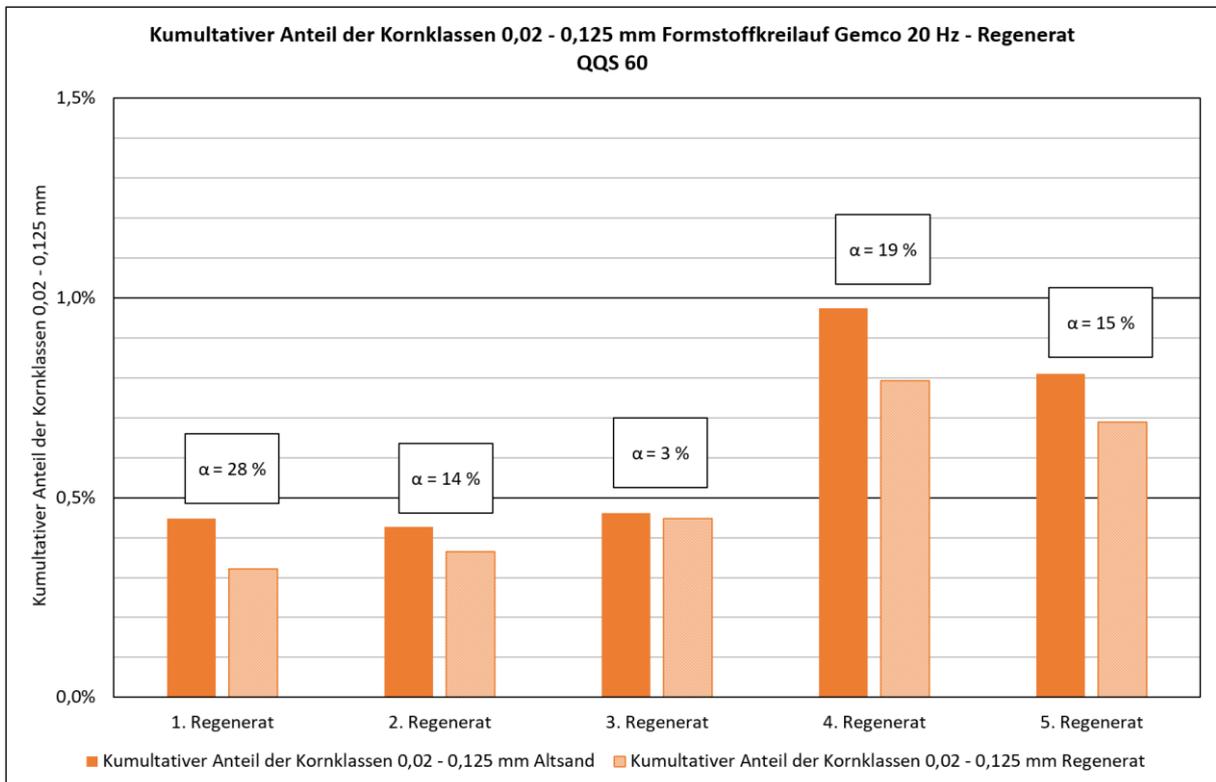


Abbildung 72: kumulativer Anteil der Kornklassen 0,02 – 0,125 mm ($n = 2$) des Formstoffkreislaufes Gemco-Schleifregenerator 20 Hz ($\alpha =$ Regenerierungsgrad)

Der Restbindergehalt steigt wie bereits durch die Siebanalyse und die REM-Aufnahmen vermutet mit jedem Umlauf an (Abb. 73) und ist auch bei dieser Versuchsreihe Grund für die Verringerung der Biegefestigkeit. Gegenüber dem Vorversuch wurde nach einmaliger Regenerierung weniger Zement entfernt als beim Vorversuch.

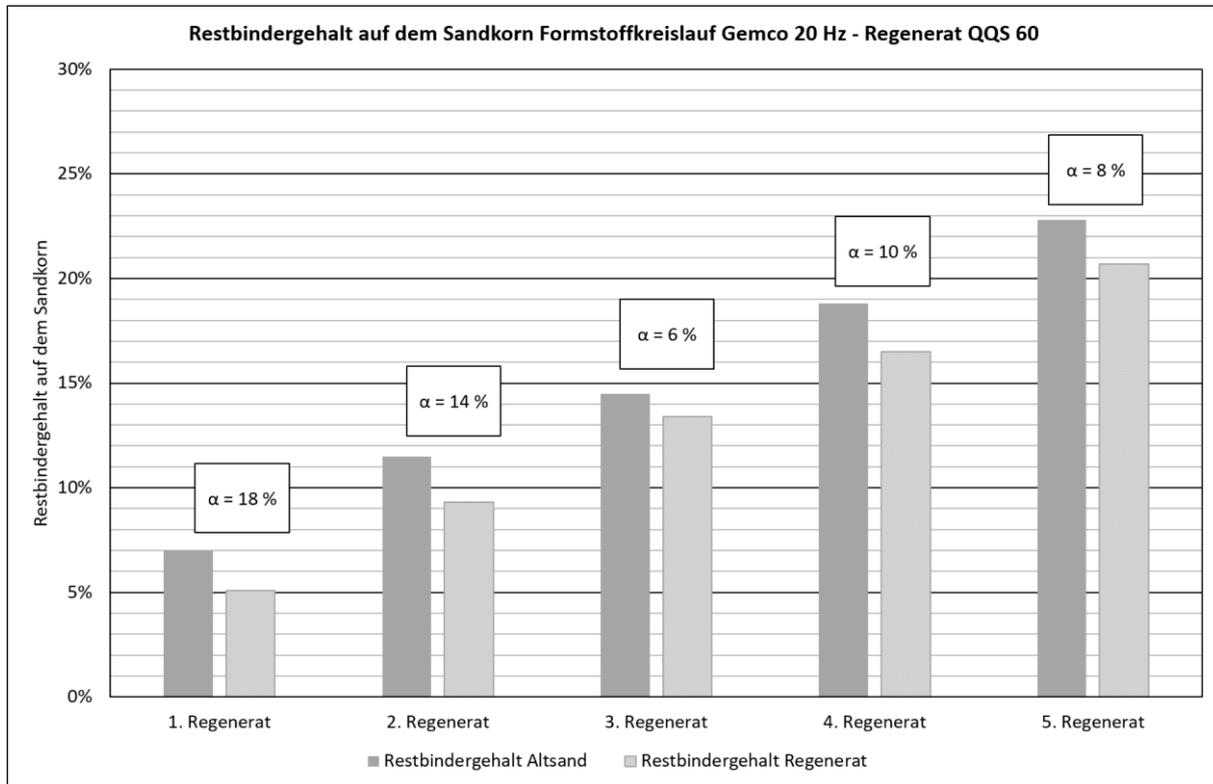


Abbildung 73: Restbindergehalt ($n = 3$) des Formstoffkreislaufes Gemco-Schleifregenerator 20 Hz ($\alpha =$ Regenerierungsgrad)

Das durchschnittliche Ausbringen dieser Versuchsreihe liegt bei ca. 95 %. Auch in dieser Versuchsreihe hat der Knollenbrecher den hohen Anteil am Gesamt-Regenerierungsgrad. Der Regenerierungsgrad nimmt sowohl beim Knollenbrecher, als auch bei der Gemco-Anlage 20 Hz linear ab (Abb. 74). Was bestätigt, dass der aufwachsende Zement gleichzeitig die Regenerierung verschlechtert. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Regenerierintensität ab dem 2. Umlauf erhöht werden muss, da hier neben dem neu zugegeben Binder zusätzlich der Restzement des 1. Regenerats entfernt werden muss. Von da an kann die Intensität konstant gehalten werden und es bildet sich ein Komponentengleichgewicht. Anders ausgedrückt, es gibt es theoretisch ein α_1 für den ersten Umlauf und ein $\alpha_{2...∞}$ für die restlichen Umläufe. Dieser Wert ist Prozess spezifisch, es ist demzufolge keine allgemein gültige Aussage möglich. Hierbei ist zu beachten, dass die Erhöhung der Regenerierintensität das Ausbringen verringert. Wodurch gegebenenfalls weniger Regenerat zur Verfügung steht wie es der

Wiedereinsatzgrad zulässt. Aus wirtschaftlicher Sicht sollte der Regeneratanteil so hoch sein, wie es der Wiedereinsatzgrad ermöglicht.

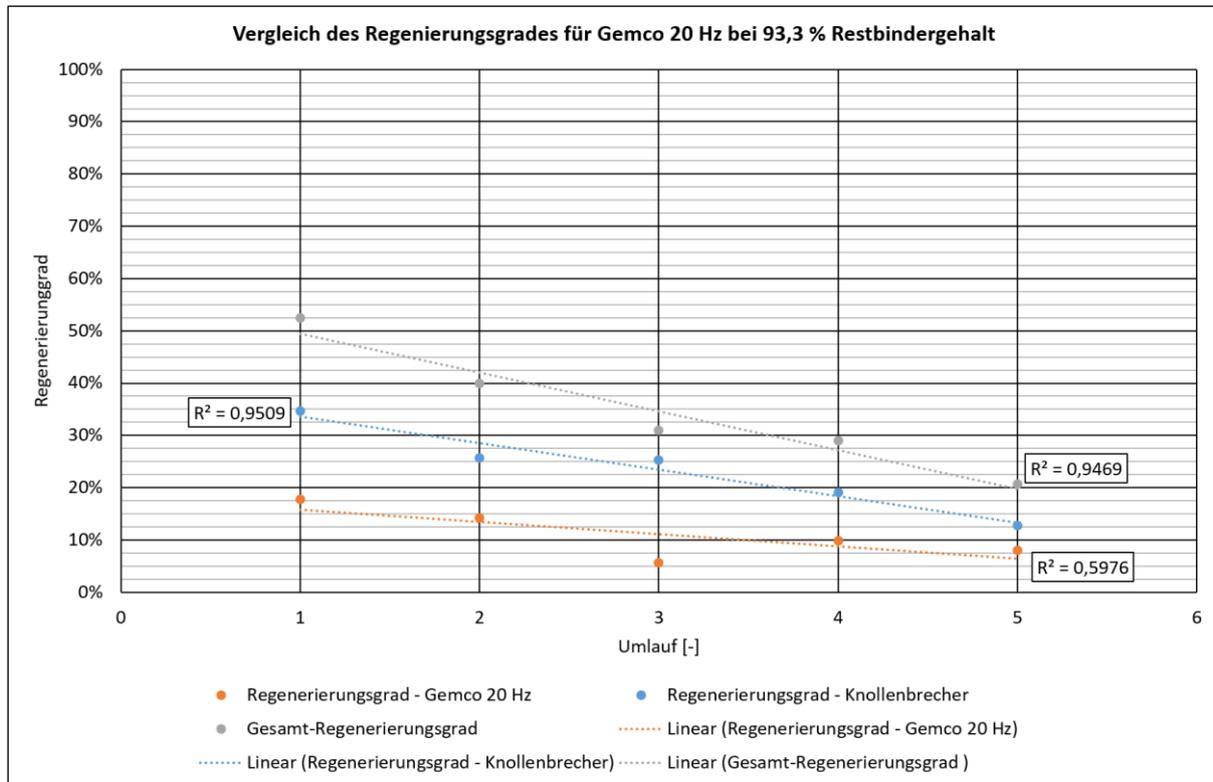


Abbildung 74: Regenerierungsgrad des Gemco-Schleifregenerators mit 20 Hz, des Knollenbrechers sowie der Gesamt-Regenerierungsgrad des Formstoffkreislaufes Gemco-Schleifregenerator 20 Hz

Das Festigkeitsniveau dieses Formstoffkreislaufes liegt trotz des höheren Regeneratanteils bei der Formstoffherstellung (93,3 %) in derselben Größenordnung wie das des Industrierversuch (70 %). Hierdurch lässt sich erkennen, dass sich ein kontinuierlicher Energieeintrag auf das Sandkorn bei gleichzeitiger Verwendung eines Schleifkörpers besser zur Entfernung des Restzementes eignet als der in diesem Projekt untersuchte Durchlaufbetrieb. Die Ursache ist die stärkere Haftung des Restzementes auf dem Sandkorn sowie der höhere Bindergehalt im Vergleich zu den kaltharzgebundenen Formstoffen, für den der Wöhr-Fliehkraftreiniger ursprünglich konzeptioniert ist. Eine allgemeingültige Quantifizierung eines Formstoffkreislaufes ist nur schwer möglich, da der notwendige Gesamt-Regenerierungsgrad von der tatsächlichen Formstoffrezeptur und dem erzielbaren Regenerierungsgrad der in der Gießerei vorhandenen Anlagen abhängt. Die Umstellung einer Gießerei kann daher als individuelle Aufgabenstellung betrachtet werden. Es ist jedoch festzuhalten, dass beim Einfahren des Zementformstoffsystems mit Neusand wie bereits o.g. ab dem 2. Umlauf ein höhere Regenerierungsintensität notwendig ist. Hierzu sollte die Regenierzeit (Zeitdauer der

Regenerierung) mitberücksichtigt werden, deren Erhöhung ist für das Kornband die schonendste Variante den Energieeintrag zu erhöhen.

8 Entsorgungskonzept

Zur Aufstellung eines Entsorgungskonzeptes wurden beim Industrierversuch Altsandproben und Proben (jeweils 1., 3. und 4. Umlauf) des bei der Regenerierung anfallenden Staubes entsprechend LAGA & DepV analysiert. Sowohl der Altsand, als auch der Staub müssen ab dem 3. Umlauf nach DepV entsorgt werden. Eine Einordnung nach DK 0, welche in [1] angegeben wird, kann auf Grund der Erkenntnisse des Industrierversuches ausgeschlossen werden. Die organischen Anteile in den Proben sind auf die Anwendung des Zementformstoffes im Vollformverfahren zurückzuführen. Lediglich beim Staub des ersten Umlaufes hat dies einen Einfluss auf die Einordnung in die Klassen der DepV (Tab. 6). Der Großteil der Sandabfälle wird in Handformgießereien in Form von Staub nach DK II entsorgt. Bei der Entsorgung von Staub sind die beiden Formstoffsysteme demzufolge als identisch einzuordnen. Die Entsorgung des Zement-Altsandes fällt auf Grund der geringen Deponieklasse kostengünstiger aus. Im Gesamtbild ist die Entsorgung des Zementformstoffsystems ähnlich wie die des Furanharzformstoff einzuordnen.

Tabelle 6: Kritische Kennwerte in Hinblick auf die Entsorgung der anfallenden Abfälle des Estrichformstoffsystems – 1) Einzige Probe, die durch organische Rückstände aus der Verbrennung des Vollformmodells einer höheren Deponieklasse zugeordnet wird (DK II statt DK I).

Probe (Umlauf)	Phenol [µg/l]	Sulfat [mg/l]	Σ gelöster Feststoffe [mg/l]	Verwertung / Entsorgung nach
Altsand (1)	67	190	-	Z2
Altsand (3)	110	760	1500	DK I
Altsand (4)	110	610	1600	DK I
Staub (1)	320	6,9	1300	DK II ¹⁾
Staub (3)	360	1200	3100	DK II
Staub (4)	240	1300	4000	DK II

Die Gießereialtsande des Ettringizementformstoffes könnten nach Aussage der Fa. Schwenk Zement dem Brennprozess des Portlandzementklinkers als Korrekturmaterial zugegeben werden. Dabei darf der Sulfatgehalt des Portlandzementes nicht überschritten werden. Dieser richtet sich nach den Ausgangsstoffen des Brennprozesses, da es sich dabei um natürliche Rohstoffe handelt (Kalk und Ton bzw. Kalkmergel) ist diese Größe chargenabhängig. Der Richtwert für den Maximalbetrag des Sulfatgehaltes liegt bei ca. 5 %. Daraus ergibt sich ein maximaler Restzementgehalt für den Gießereialtsand von ca. 25,2 %, bei alleiniger Verwendung als Korrekturmaterial. Hier muss der Schlammstoffgehalt mitberücksichtigt werden, da sich dieser aus Quarz und Ettringizement zusammengesetzt. Alle Altsande des Industrierversuches liegen unter dem Grenzwert. Der durchschnittliche Ettringizementgehalt des Staubes liegt bei ca. 67 % deutlich über dem Grenzwert. Der Sulfatgehalt der Stäube und Altsande des Ettringizementformstoffes kann jedoch mittels anderer Korrekturmaterialien wie bspw. Quarzsand verdünnt werden. Es ist jedoch nicht möglich, dass bei einer Umstellung der in fragekommenden Sektoren der deutschen Gießereiindustrie der gesamte Altsand des Ettringizementformstoffes als Korrekturmaterial eingesetzt werden kann. Dafür wären die anfallenden Altsandmengen zu groß.

9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Zur Einordnung der Wirtschaftlichkeit des Ettringizementformstoffes werden die Mehrkosten des Zementformstoffsystems je Tonne Formstoff gegenüber dem Furanharzformstoffsystem berechnet. In *Abbildung 75* sind die Kosten beider Rohstoffe dargestellt. Die Daten des Furfurylalkohol stammen aus dem Einkauf einiger Gießereien. Der Preis des Härters ist im Gegensatz zum Furfurylalkohol stabil und wurde deshalb für die Betrachtung als konstant erachtet und beträgt 1250 €/t. Als Kalkulationsgrundlage für den Ettringizement wurden die in [1] dargelegten Werte verwendet, zusätzliche wurde ein linearer Kostenanstieg von 50 % über die letzten 10 Jahre mit einkalkuliert. Dies ist eine Abschätzung aus der Zementpreisentwicklung.

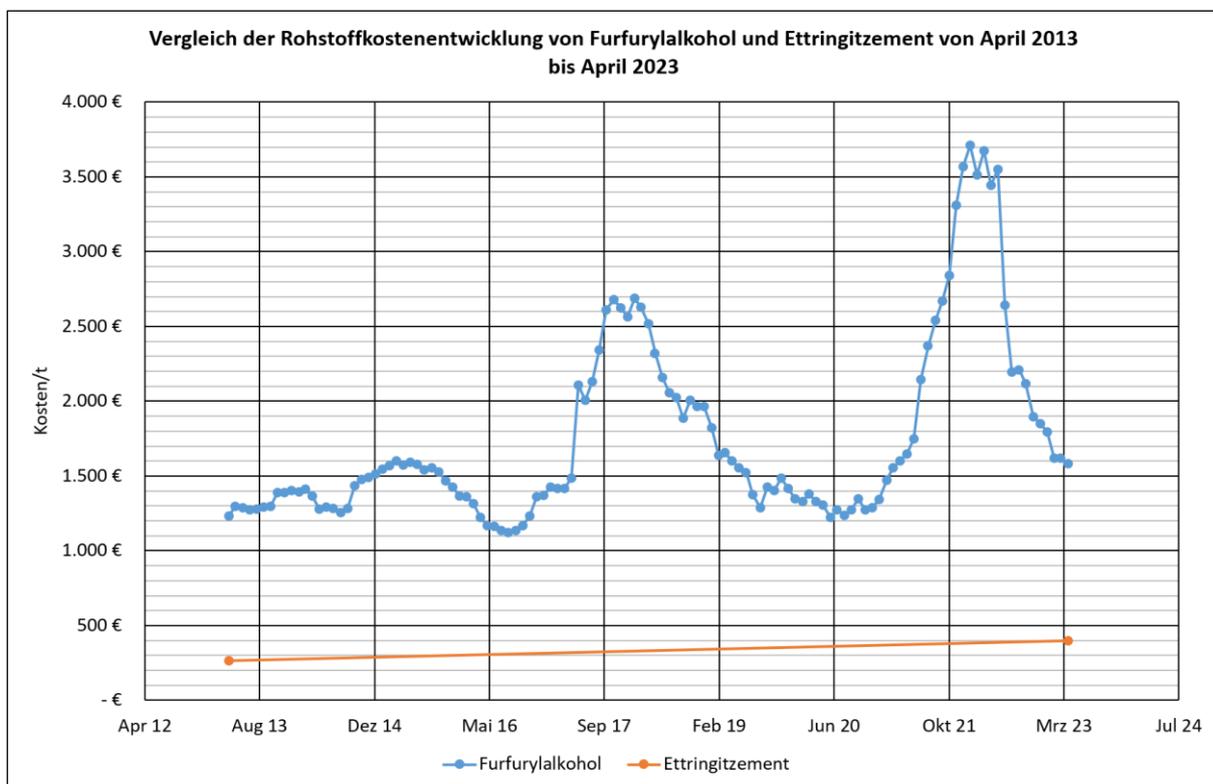


Abbildung 75: Vergleich der Rohstoffkostenentwicklung von Furfurylalkohol und Ettringizement von April 2013 bis April 2023

Die Wasser- und Abwasserkosten beziehen sich auf dem Raum Freiberg [27, 32]. Die Energiekosten sind der Durchschnittspreis über alle Verbrauchsklassen der Nicht-Haushaltsverbraucher für 2021. Auf Grund der erfolgreichen Versuche im Formstoffkreislauf mit Gemco-Anlage 20 Hz wurde an Hand dieser Anlage die Kosten für einmalige Regenerierung kalkuliert. Diese liegen bei 3,64 €/t Formstoff [26]. Es ist denkbar, dass größere

Regenerierungsanlagen eine höhere spezifische Wirkleistung haben und damit geringere Regenerierungskosten. Auf Grund *Kapitel 8 Entsorgungskonzeptes* wurde sowohl für den Staub und den Altsand des Furanharzes, als auch für den Ettringitzementstaub und -Ettringitzementaltsand Deponieklasse 2 angenommen, da es im Raum Freiberg keine DK II gibt wurde mit den 104 €/t Entsorgungskosten der DK III gerechnet [24].

Zur Bestimmung der Mehrkosten wird der Zementformstoff mit 3 verschiedenen Szenarien des Furanharzformstoffsystem verglichen.

Tabelle 7: Formstoffzusammensetzung der 3 Szenarien der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Vergleich zum Zementformstoff

	Zementformstoff 93,3 % Regeneratanteil	Furanharz Eisengießerei 2,5 % Neusandzugabe	Furanharz Aluminiumgießerei 10 % Neusandzugabe	Furanharz Aluminiumgießerei 20 % Neusandzugabe
Neusand	6,0%	2,5 %	9,9 %	19,8 %
Regenerat	83,3 %	96,3 %	88,9	79,0 %
Binder + Härter	10,7 %	1,4 %	1,4 %	1,4 %

Auf Grund des höheren thermischen Energieeintrags von Gusseisen auf den Formstoff, weist der Furanharzformstoff, wenn es in Eisengießereien eingesetzt wird einen höheren Regenerierungsgrad auf. Dadurch reicht das Knollenbrechen inklusive Sichten als einstufige mechanische Regenerierung aus, um einen Formstoffkreislauf mit 2,5 % Neusandzugabe zu fahren. Es entstehen keine weiteren Regenerierungskosten, weshalb diese auf der Seite des Furanharzformstoffes vernachlässigt wurden. Auf der anderen Seite wird in Aluminiumgießereien auf Grund des geringeren thermischen Energieeintrags der Schmelze eine zweite mechanische Regenerierstufe benötigt. Je nach Anlagenverlust wird hier teilweise mit 20 % Neusandzugabe gearbeitet. Dieser Wert ist sicherlich nicht der Erwartungswert wurde aber bereits in produzierenden Betrieben beobachtet [31]. Für die Regenerierung in Aluminiumgießereien wurden die Regenerierungskosten identisch zum Zementformstoff angenommen.

Auf Grund der geringen Neusandzugabe ist der in der Eisengießerei verwendete Furanharzformstoff günstiger als der Zementformstoff, unabhängig von den Schwankungen des Furfuryl-Alkohols. Bei 10 % Neusandzugabe in Aluminiumgießereien liegt, der Zementformstoff in der gleichen Größenordnung des Furanharzformstoffes in Abhängigkeit des Furfuryl-Preises. Über einer Neusandzugabe von 10 % weist der Zementformstoff eine zunehmende Wirtschaftlichkeit auf. Zumal in diesem Szenario in keine Regenerierungsanlage investiert werden muss, solange sich die vorhandene zur Regenerierung des Zementformstoffsystems eignet (Abb. 76).

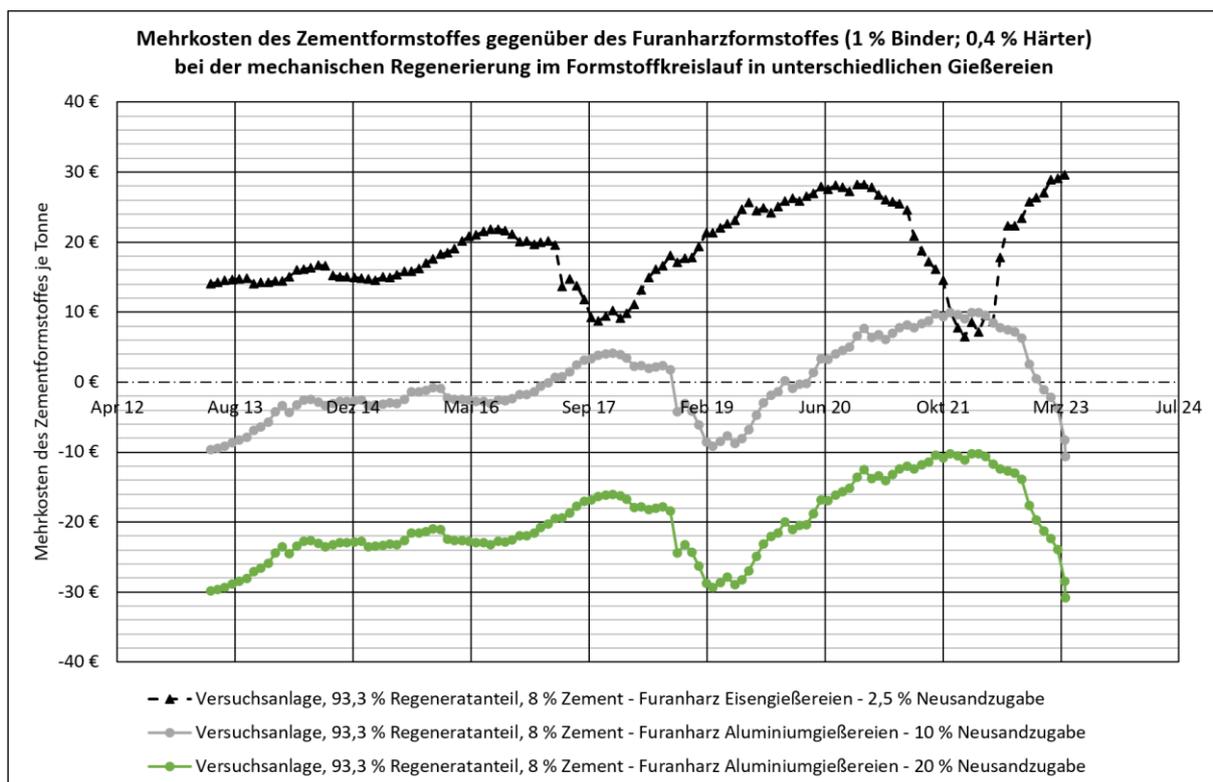


Abbildung 76: Mehrkosten des Zementformstoffes gegenüber des Furanharzformstoffes bei der mechanischen Regenerierung im Formstoffkreislauf in unterschiedlichen Gießerei-Szenarien

Abschließend lässt sich festhalten, je höher die Neusandzugabe beim Furanharz ist, desto wirtschaftlicher ist der Zementformstoff. Es gibt auch Eisengießereien, wo die Neusandzugabe höher als 2,5 % ausfällt, jedoch reicht auch hier für den notwendigen Regeneriergrad die einstufige mechanische Regenerierung, wodurch nach aktuellem Stand eine wirtschaftliche Anwendung des Zementformstoffes im Eisenbereich nicht möglich ist. Allerdings ist anzumerken, dass der Zementformstoff eine umweltfreundliche und ökologische Alternative zur Aufrechterhaltung des Produktionsbetriebs darstellt und zwar für Eisengießereien die sich

durch ihren Standort mit strengeren Auflagen in Hinblick auf Emissionen und Geruchsmissionen zukünftig Einschränkungen oder gar einem eventuellen Anwendungsverbot der kaltharzgebundenen Formstoffsysteme konfrontiert sehen.

10 Fazit

Ziel des Projektes „RegoZem“ war die Entwicklung einer Methode zur Aufbereitung und Wiederverwendung von zementgebundenen Formstoffen, um so eine Grundlage für die Umstellung von Gießereibetrieben hin zu zementgebundenen Formstoffen zu liefern. Dieses Ziel wurde grundsätzlich erfüllt. Im industriellen Maßstab ist nachgewiesen, dass mittels Regenerats aus zementgebundenen Formstoffen Gussteile mit konstanter Qualität hergestellt werden können. Die entstandenen Oberflächenunregelmäßigkeiten können auch bei furanharzgebundenen Formen auftreten und für die Ursachen im Zementformstoff wurden Abstellmaßnahmen ausgearbeitet. Auch die Mischtechnik für kaltharzgebundene Formstoffsysteme kann aus technischer Sicht prinzipiell für den Ettringitzementformstoff verwendet werden. Jedoch ist die Produktivität des Zementformverfahrens beim Einsatz handelsüblicher Kaltharz-Durchlaufmischer geringer, auch für diese Aufgabenstellung gibt es bereits Lösungsansätze. Zur Regenerierung des Ettringitzementformstoffes können handelsübliche Anlagen verwendet werden. Hier empfehlen sich mechanische Regenerierungsanlagen die im Chargenbetrieb mit eingebauten Schleifkörpern wie beispielsweise einem keramischen Schleifstein arbeiten.

Der Ettringitzementformstoff erreicht gegenüber dem Furanharzformstoff, welcher den Stand der Technik in Mittel- und Großgießereien darstellt, keine uneingeschränkte Wirtschaftlichkeit. Ab einer Neusandzugabe von 10 % in einem Furanharz-Formstoffkreislauf erreicht der in diesem Projekt untersuchte Ettringitzement-Formstoffkreislauf (Wiedereinsatzgrad von 93,3 %), je nach Kosten des Furfuryl-Alkohols, eine Kostenneutralität. Auf Grund des thermischen Eintrags der Gießhitze liegt die Neusandzugabe bei Eisengießereien meist deutlich unter 10 %. Das Zementformverfahren kommt demzufolge für Gießereien in Frage, die auf Grund ihrer Infrastruktur oder die Legierungen vergießen, die einen geringen thermischen Eintrag als Eisenlegierungen haben und somit im Furanharz-Formstoffkreislauf über 10 % Neusandzugabe haben. Die Amortisation von Neuanschaffungen zur Umstellung einer Gießerei wie beispielsweise Regenerierungsanlagen muss für den konkreten Fall gesondert betrachtet werden.

Unabhängig von der reinen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stellt der Ettringitzement bereits schon heute eine Alternative zum Furanharz dar und zwar für Gießereien die sich an ihrem Standort mit verschärften Anforderungen gegenüber Emissionen und Geruchsausbreitung

konfrontiert sehen. Diese können zukünftig zu Beschränkungen oder sogar einem eventuellen Verbot des Einsatzes von kaltharzgebundenen Formstoffsystemen führen. Da der Ettringitzement beim Abguss keinerlei leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe wie BTEX und auch kein Schwefeldioxid emittiert, kann durch dessen Einsatz diese Problematik umgangen werden.

Unter den zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen ist die Umstellung einzelner Gießereien schon jetzt lukrativ. Auf Grund der bisherigen Erfahrungen mit dem Ettringitzement ist der Prozessablauf des Formverfahrens sehr ähnlich zum Furanharz, sodass die Umstellung für die Belegschaft als unproblematisch einzustufen ist. An dieser Stelle ist noch anzumerken, dass diese Ergebnisse zum gegenwärtigen Zeitpunkt mit einem Formstoffbinder erzielt wurden, dem noch ein Prototypen-Status zugeordnet werden kann. In Hinblick auf die industrielle Anwendung ist von einer weiteren Optimierung durch den Hersteller auszugehen. Dies wurde bereits im Rahmen des Industrieversuches unter Beweis gestellt, in dem in kurzer Zeit die Aushärtungscharakteristik des Zementes auf die vorherrschenden Bedingungen angepasst wurde.

Literaturverzeichnis

- [1] *Althausse C., Dunkel S., Erler H., Naas J., Neumann T., Schmidt Peter.* Entwicklung von hydraulisch gebundenen Gießereiformstoffen für handgeformte Großgussteile aus Gusseisenwerkstoffen. Mainz; 31.04.2020.
- [2] *Baier J., Grefhorst C., Kleinmann W., Klöppen M., Podobed, O.* Handbuch der Gußfehler. Formsandbeeinflussbare Fehler und deren Vermeidung; 2010.
- [3] *Berndt H.* Planung von Regenerierungsanlagen zur Altsandrückgewinnung. Düsseldorf: Gießereiverlag GmbH; 1979.
- [4] *Bier T. A.* 12. Composition and properties of ternary binders. In: Pöllmann H. Cementitious Materials: De Gruyter; 2017, 353–376.
- [5] *Bührig-Polaczek A.* Handbuch Urformen. München: Hanser; 2014.
- [6] *Bundesverband der Deutschen Gießereiindustrie.* VDG-Merkblatt P27. Prüfung von Formgrundstoffen - Bestimmung der granulometrischen Kennwerte; 10/1999.
- [7] *Bundesverband der Deutschen Gießereiindustrie.* VDG-Merkblatt P38. Prüfung von tongebundenen Formstoffen - Bestimmung der Festigkeit; 05/1997.
- [8] *Bundesverband der Deutschen Gießereiindustrie.* VDG-Merkblatt P41. Prüfung von tongebundenen Formstoffen - Bestimmung der Gasdurchlässigkeit; 02/1996.
- [9] *Bundesverband der Deutschen Gießereiindustrie.* VDG-Merkblatt P43. Prüfung von tongebundenen Formstoffen - Bestimmung des Oolithisierungsgrades; 04/1997.
- [10] *Bundesverband der Deutschen Gießereiindustrie.* VDG-Merkblatt P72. Bindemittelprüfung - Prüfung von kaltselbsthärtenden, kunstharzgebundenen feuchten Formstoffen mit Härterzusatz; 10/1999.
- [11] *Döhring T.* Gegenüberstellung von verschiedenen Grünsand-Regeneratoren und Einfluss unterschiedlicher Regenerate auf die Kerneigenschaften. Freiberg; 02.2021.
- [12] *Dunkel S., Erler H., Schmidt Peter.* Zwischenbericht - Entwicklung von hydraulisch gebundenen Gießereiformstoffen für handgeformte Großgussteile aus Gusseisenwerkstoffen. Freiberg; 08.08.2019.
- [13] *Elsner H.* Aktuelle BGR-Studie zur Versorgung mit Baurohstoffen: Sand – in Deutschland reichlich vorhanden und trotzdem knapp.
<https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/muellentsorgung-zu-wenig-deponien-deutschland-weiss-nicht-mehr-wohin-mit-dem-abfall/22755388.html>.

- [14] *Flemming E., Tilch W.* Formstoffe und Formverfahren. Mit 118 Tabellen, 1. Aufl. Leipzig, Stuttgart, Weinheim: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH; 2001.
- [15] *Föttsch F.* Direktformverfahren zur Herstellung von hochpräzisen Glocken; 03/2022.
- [16] *Handelsblatt.* Zu wenig Deponien - Deutschland weiß nicht mehr wohin mit dem Abfall. <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/muellentsorgung-zu-wenig-deponien-deutschland-weiss-nicht-mehr-wohin-mit-dem-abfall/22755388.html>.
- [17] *Janson M.* Sand wird immer teurer. <https://de.statista.com/infografik/12844/sand-erzeugerpreisindex/>.
- [18] *Kharchenco I., Alekseev Vyacheslav.* Effect of ettringite morphology on properties of expanding cement systems. E3S Web of Conferences 110, 01037. 2019.
- [19] *Kotov R.* Modellierung der Formstoffströme beim Vollformgießen. Freiberg; 11/2008.
- [20] *Lea's Chemistry of Cement and Concrete: Elsevier; 2019.*
- [21] *Müller W.* Mechanische Grundoperationen und ihre Gesetzmäßigkeiten. München: Oldenbourg; 2008.
- [22] *Pentz G.* Regenerieren von Gießereimischsanden und Verwertung der anfallenden Stäube. Freiberg; 28.10.2022.
- [23] *Quarzwerke GmbH.* Giessereisande. <https://www.quarzwerke.com/maerkte/giesserei>.
- [24] *Scheeser C.* Entsorgung Gießereisand Einhaltung der Grenzwerte DepV DK III/ -staub AVV 100909 Leistungsort: 09599 Freiberg. Freiberg. 22.11.2022.
- [25] *Stark J., Wicht B.* Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff. Basel: Birkhäuser; 2000.
- [26] *Statistisches Bundesamt.* Erdgas- und Stromdurchschnittspreise für das 1. Halbjahr 2022. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-Strom-Durchschnittspreise/>.
- [27] *Statistisches Landesamt.* 110/2020. Kaum veränderte Trinkwasser - und Abwassergebühren - aber große regionale Unterschiede in Sachsen; 01.09.2020.
- [28] *Stieß M.* Mechanische Verfahrenstechnik, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer; 2009 [erschienen] 2008.
- [29] *Unsin J., Spencer N. J., Hofmann F.-J.* Ettringitbildende Bindemittelkomponente - EP1785405B1. 13.11.2006.
- [30] *Verein Deutscher Zementwerke e.V.* Zement Taschenbuch, 51. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik; 2008.
- [31] *Wagner P.* Regenerierung von kaltharzgebundenen Formstoffen. Freiberg; 29.10.2021.

- [32] *Wasserzweckverband Freiberg*. Tarifblatt Wasser; 01.01.2020.
- [33] *Wjinker D.* Erfahrungen beim Regenerieren von Grünsand-Kernsandgemisch im Grünsandformverfahren. *Gießerei-Praxis*. 10/2014: 447–458.
- [34] *Wolff & Müller Quarzwerke GmbH*. Giessereisande. <https://www.wm-quarzsande.de/branchen/giesserei>.
- [35] *Yu H., Zhang B.* Validierung von zementgebundenen Formstoffen und deren Regeneraten; 01.04.2022.