



Gemeinsamer Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 03EN2027A-B

Vorhabenbezeichnung:

Rohmehl-Siebung: Energieoptimierte Feinstabsiebung von Zement-Rohmehl zur Bewertung prozessrelevanter Kennwerte

Berichtszeitraum:

01.12.2019 - 28.02.2023

Laufzeit des Vorhabens:

01.12.2019 - 28.02.2023

03EN2027A	VDZ Technology gGmbH (VDZ)
03EN2027B	thyssenkrupp Industrial Solutions AG (tkIS)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Teil I: Kurzdarstellung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte	4
1.4.1	Siebtechnik	6
1.4.2	Erwarteter Einfluss der Feinsiebung auf den Energiebedarf	7
1.4.3	Einfluss der Siebklassierung auf den Ofen-Brennprozess	7
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen (außerhalb des Projektes)	10
2	Teil II: Eingehende Darstellung	11
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	11
2.2	Versuchs- und Projektplanung	11
2.2.1	Ergebnisse der Vorversuche im Technikum bei Haver Niagara (03.04. und 16.06.2020)	12
2.3	Implementierung / Installation der Feinsiebanlage zur Klassierung des Mühlenaustrags (AP1)	15
2.4	Variation der Betriebseinstellungen zur Klassierung des Mühlenaustrags (AP2)	17
2.4.1	Demonstrationsperiode (AP2)	23
2.5	Semi-kontinuierlicher Mahlkreislauf (AP3)	27
2.5.1	Versuchsaufbau und -ablauf der Klassierversuche	29
2.5.2	Ergebnisse der Klassierversuche	32
2.6	Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs der Rohmaterial-Klassierung (AP4)	38
2.6.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	42
2.7	Klinkerbrennprozess (AP5)	43
2.7.1	Versuchsprogramm	43
2.7.2	Untersuchungsergebnisse	44
2.7.3	Einfluss der Siebklassierung auf den thermischen Brennstoffenergiebedarf	50
2.8	Zusammenfassung	50
3	Literaturverzeichnis	52
4	Anhang	53
4.1	Abbildungsverzeichnis	53
4.2	Tabellenverzeichnis	54
A	Abbildungen	55
B	Tabellen	62

1 Teil I: Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die Zementherstellung ist ein energieintensiver Produktionsprozess, bei dem besonders in den Mahlprozessen ein signifikantes Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz vorhanden ist. Der niedrige energetische Wirkungsgrad der Mahlkreisläufe soll aus diesem Grund mithilfe innovativer Technologien, die in den letzten Jahren im Bereich der Siebtechnik entwickelt worden sind, verbessert werden.

Hochgeschwindigkeitssiebe sollen dabei Windsichter, die derzeit in der Zementindustrie unter anderem für die Klassierung des Rohmaterials eingesetzt werden, ersetzen. Durch den Wegfall der pneumatischen Förderung des Rohmaterials beim Windsichter kann der Energiebedarf für die Rohmaterialklassierung reduziert werden. Darüber hinaus wird ein weiteres Potenzial dahingehend gesehen, dass die elektrische Energieeffizienz der Mühle und die thermische Energieeffizienz des Klinkerbrennprozesses verbessert werden können. Aufgrund der erhöhten Trennschärfe der Siebklassierung gegenüber der Sichtklassierung wird ein verringerter Grobkornanteil im Rohmehl (Brenngut im Klinkerbrennprozess) erwartet, was sich positiv auf die Brennbarkeit und folglich den thermischen Energiebedarf auswirken würde.

Es wird erwartet, dass durch den Einsatz von Feinsiebmaschinen in der Zementindustrie eine elektrische Energieeinsparung von circa 5 kWh/t_{Rohmaterial} und eine thermische Einsparung von circa 70 MJ/t_{Klinker} zu erreichen sind.

In diesem Forschungsprojekt sollen erstmalig technisch-wissenschaftliche Erkenntnisse über die Feinabsiebung von trockenen Zement-Rohmaterialien ermittelt werden. Hierbei soll sowohl der Einfluss auf den elektrischen Energiebedarf bei der Aufbereitung des Rohmaterials, als auch die Auswirkungen auf den Brennprozess experimentell untersucht werden.

1.2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben steht im Kontext des siebten Energieforschungsprogramms der Bundesregierung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ und soll einen Beitrag zur Erreichung der darin definierten politischen Ziele leisten.

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das durch Mahlen und Mischen von verschiedenen Haupt- bzw. Nebenbestandteilen hergestellt wird. Einer der wichtigsten Hauptbestandteile des Zements ist der Zementklinker, der durch die Vermahlung von verschiedenen Rohstoffen im anschließenden Brennprozess produziert wird. Der spezifische elektrische Energieaufwand für die Zementherstellung betrug im Mittel in Deutschland im Jahr 2021 112,1 kWh/t_{Zement}, wobei mehr als 70 % auf die Aufbereitung bzw. Mahlung des Rohmaterials und auf die Fertigmahlung von Zement entfallen [1].

Die Ursache des hohen elektrischen Energiebedarfs für die Aufbereitung des Rohmaterials in den Mahlanlagen der Zementindustrie kann auf die verhältnismäßig geringe Trenneffizienz bei der Materialklassierung sowie insbesondere auf den hohen elektrischen Energiebedarf für den pneumatischen Materialtransport zurückgeführt werden. Bei der Aufbereitung des Rohmaterials für den Klinkerherstellungsprozess wird das Rohmaterial zuerst gebrochen, anschließend in der Mühle zerkleinert und klassiert. Zu diesem Zweck werden gegenwärtig Windsichter in der Zementindustrie eingesetzt. Nach der Klassierung des Rohmaterials wird das Rohmehl beim Klinkerbrennprozess in den Ofenmehlsilos zwischengelagert und anschließend dem Zyklonvorwärmer aufgegeben. Nach dem Zyklonvorwärmer wird das Material in den Drehrohren geführt und zum Klinker gebrannt.

Der pneumatische Energiebedarf für den Materialtransport, der beim Betrieb des Windsichters für den Klassierprozess benötigt wird, führt jedoch zu einem hohen elektrischen Energiebedarf. Durch den Einsatz von Feinsieben kann die pneumatische Förderung des Rohmaterials, die beim Einsatz von Windsichtern bei der Rohmaterialaufbereitung angewendet wird, entfallen. Darüber hinaus wird ein weiteres

Optimierungspotential dahingehend gesehen, dass die elektrische Energieeffizienz der Mühle sowie die thermische Energieeffizienz des Klinkerbrennprozesses bei der Siebklassierung wie in **Kapitel 1.1** beschrieben, verbessert werden können.

Das Grobgut wird nach der Klassierung wieder in die Rohmühle zurückgeführt und wiederholt aufgemahlen. Der Bypass (unklassierter Anteil) sowie die geringe Trennschärfe bei der Sichtklassierung verursachen zusätzlich eine anteilige Rückführung des Feingutes in die Rohmühle. Hierdurch wird das Feingut übermahlen. Diese Übermahlung des Feingutes führt zu einem erhöhten Energiebedarf durch eine übermäßige Feingutbeanspruchung in der Mühle. Sie erschwert zudem bei einer zu hohen Mahlfeinheit des Feingutes das Abscheiden des Rohmaterials im Zyklonvorwärmer beim Klinkerbrennprozess. Die Feingutrückführung in die Mühle ist daher ein Gesichtspunkt, der in den Mahlkreisläufen der Zementindustrie zu einem erhöhten elektrischen Energiebedarf führen kann.

Die Klassierung des Rohmaterials nach dem Mahlprozess hat außerdem eine wesentliche Bedeutung für den nachgeschalteten Klinkerbrennprozess. Bei einem hohen Grobkornanteil und einer inhomogenen Verteilung des Feingutes reduziert sich die Reaktionsgeschwindigkeit der Festkörperreaktionen und verschlechtert hierdurch die Brennbarkeit des Rohmaterials im Brennprozess, welche durch einen Mehraufwand an thermischer Energie kompensiert werden muss. Die thermische Energieeffizienz des Brennprozesses wird hierdurch verringert und der notwendige Brennstoffbedarf steigt.

Aus diesem Grund soll in diesem Forschungsvorhaben der Einsatz der Feinsiebung in der Zementindustrie im Hinblick auf eine Steigerung der Energieeffizienz im gesamten Klinkerherstellungsprozess erstmalig untersucht werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung sowie der Ablauf der Arbeitspakete sind in **Abbildung 1-1** dargestellt. Die dreijährige Projektlaufzeit vom 01.12.2019 bis zum 30.11.2022 wurde um 3 Monate kostenneutral bis zum 28.02.2023 verlängert, wie im Balkenzeitplan angegeben. Das Projekt wurde in fünf einzelne Arbeitspakete untergliedert, welche gemeinsam von den Projektpartnern tkIS und VDZ bearbeitet wurden.

Projektmonat	2019 2020 2021 2022 2023																																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
Versuchs- und Projektplanung (AP1)	tk IS																																							
	VDZ																																							
Implementierung / Installation der Feinsiebanlage (AP1)	tk IS																																							
	VDZ																																							
Variation der Betriebseinstellungen zur Klassierung des Mühlenaustrags und Demonstrationsperiode (AP2)	tk IS																																							
	VDZ																																							
Semi-kontinuierlicher Mahlkreislauf (AP3)	tk IS																																							
	VDZ																																							
Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs der Rohmaterial-Klassierung (AP4)	tk IS																																							
	VDZ																																							
Klinkerbrennprozess (AP5)	tk IS																																							
	VDZ																																							
GESAMT																																								

Abbildung 1-1 Balkenzeitplan für das Projekt Rohmehl-Siebung

1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte

In der Zementindustrie werden üblicherweise Kalkstein und Ton als Rohmaterialien für die Klinkerherstellung genutzt. Daneben kommen bei Bedarf Korrekturstoffe wie z.B. Sand oder Eisenerz hinzu. Dieses Materialgemisch wird mit Brechern vorgebrochen und als sogenannter Rohstein den Rohmühlen zugeführt. Drei verschiedene Mühlentypen kommen üblicherweise als sogenannte „Rohmühlen“ in der

Zementindustrie zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um Walzenschüsselmühlen und Gutbettwalzenmühlen, die das Rohmaterial unter Druck zerkleinern sowie Kugelmühlen, die das Material zusätzlich durch Schlag zerkleinern (vgl. **Abbildung 1-2**).

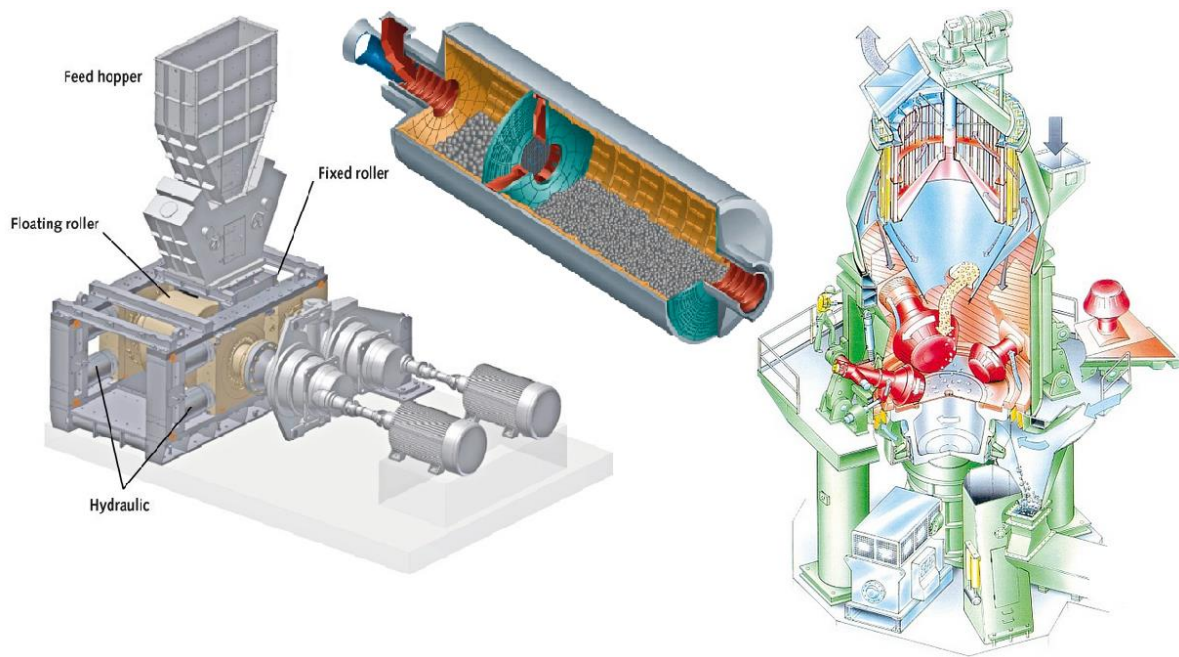


Abbildung 1-2 Von links nach rechts: Gutbettwalzenmühle, Kugelmühle, Walzenschüsselmühle mit integriertem Korbsichter

Im Rohmühlenkreislauf werden die Rohmaterialien nach der Zerkleinerung in der Mühle klassiert. Windsichter gehören zu den mechanischen Trennapparaten, die derzeit in der Zementindustrie im geschlossenen Kreislauf nach der Mahltrocknung, für die Klassierung des Rohmaterials eingesetzt werden.

Die Sichtklassierung des Aufgabematerials basiert auf den Massen- und Strömungskräften, die durch den konstruktiven Aufbau des Windsichters auf das Fein- bzw. Grobkorn wirken. Durch den (verglichen zum Grobkorn) geringeren Einfluss von Massen- und Trägheitskräften auf das Feinkorn wird das Aufgabematerial im Windsichter in Grob- und Feinfraktion aufgeteilt. Anschließend wird das Feinkorn durch den größeren Einfluss der Strömungskräfte („Schleppverhalten der Luft“) von der Luft bzw. dem Gas mitgeführt und aus dem Sichter hertransportiert. Das Grobkorn gelangt nach der Sichtung wieder in die Mühle zurück und wird mit dem Aufgabematerial wiederholt aufgemahlen.

Die Bauformen der Windsichter, die in den Zementwerken eingesetzt werden, hängen sehr stark von dem vorliegenden Zerkleinerungsprozess des Aufgabematerials ab. Je nachdem, welches Verfahren für die Rohmahlung angewendet wird, kommen hauptsächlich der Korbsichter, der Zyklonluftsichter, der Umluftsichter und der statische Sichter zum Einsatz (vgl. **Abbildung 1-3** und **Abbildung 1-4**).

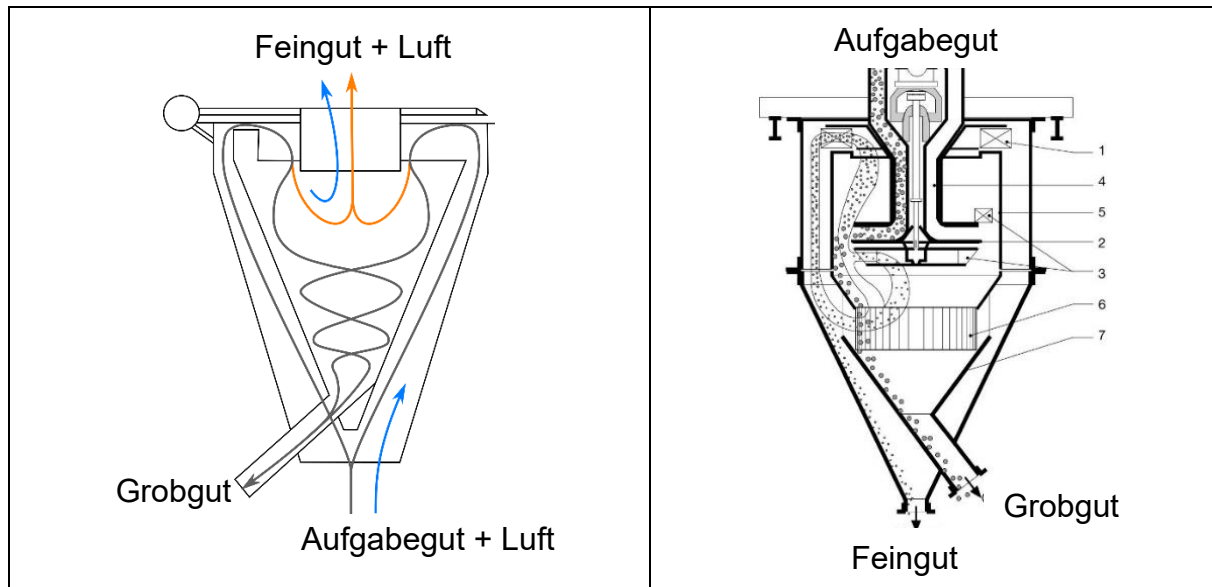


Abbildung 1-3 Von links nach rechts: Statischer Sichter und Umluft-Sichter

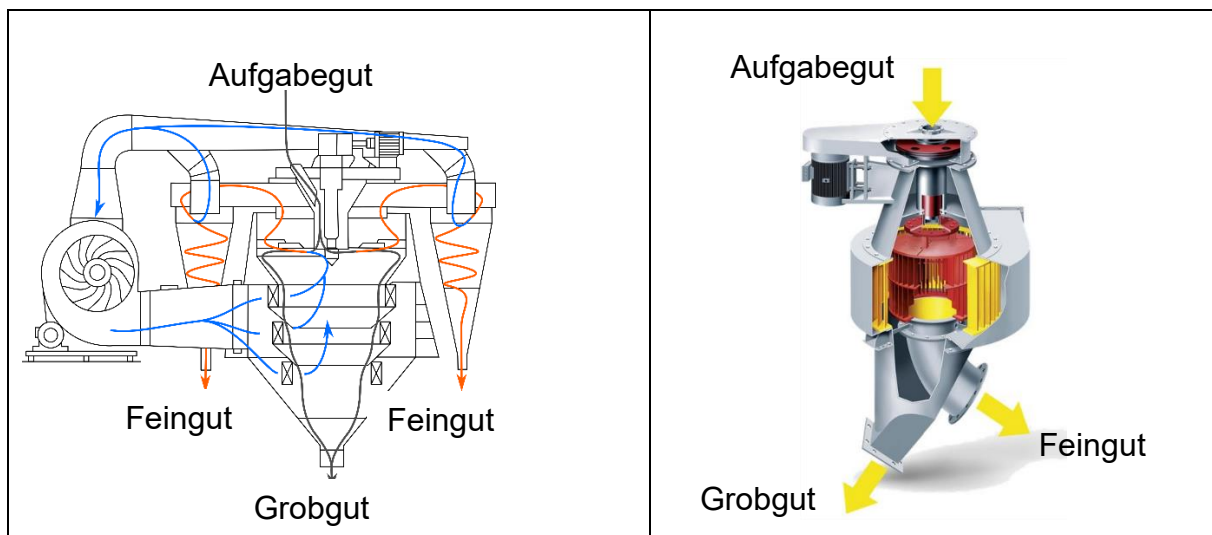


Abbildung 1-4 Von links nach rechts: Zyklonumluft-Sichter und Stabkorbsichter (Dynamischer Sichter)

1.4.1 Siebtechnik

Der Einsatz der Trockensiebung in der Zementindustrie wurde bislang durch die geringe Durchsatzleistung der Siebe und die niedrigen Standzeiten der Sieboberflächen verhindert. Durch die Entwicklung moderner Hochgeschwindigkeitssiebmaschinen ist es mittlerweile möglich, eine Klassierung im Bereich von 90 – 150 μm auch bei hohen Massenströmen (Siebflächenbelastungen) zu realisieren. Vorversuche haben gezeigt, dass beim Einsatz einer Vier-Deck-Siebmaschine (mit einer Siebgröße von 3,6 m^2) für die Klassierung von Quarzsand mit Hilfe eines Hochgeschwindigkeitssiebes ein Siebdurchgang von bis zu 12 t/h erreicht werden kann. Weiterhin gibt es bereits kleintechnische Versuchsergebnisse eines Siebmaschinenherstellers bei der Absiebung von Quarzsand unter Einsatz von Kunststoff- und Drahtsiebgeweben mit einer Siebmaschenweite von 90 μm [2].

Neben dem konstruktiven Aufbau der Siebmaschinen wird der Siebdurchsatz zusätzlich durch die Entwicklung von Kunststoff-Siebbelägen verbessert. Die Entwicklung der Siebbeläge stagnierte in der Vergangenheit. Insbesondere die Standzeit von feinen Siebgeweben nahm in der Vergangenheit bei abnehmenden Siebmaschenweiten und Drahtdurchmessern deutlich ab. Durch die Entwicklung moderner Kunststoff-Siebbeläge ist es hingegen möglich, eine verhältnismäßig große offene Siebfläche zu

gewährleisten, die einen hohen Durchsatz und eine geringe Siebgebeverstopfung durch die Siebmaschengeometrie ermöglichen [3]. Außerdem können die Standzeiten der Siebbeläge gegenüber herkömmlichen Drahtgeweben erhöht werden.

Ein weiterer Vorteil von den in der Feinsiebung eingesetzten direkt erregten Siebmaschinen besteht zudem im verringerten elektrischen Energiebedarf. Darüber hinaus ist im Vergleich zu Windsichtern keine Luftdispersion des Aufgabematerials notwendig. Die erreichbare Trennschärfe kann durch die rein auf geometrischen Kriterien basierende Klassierung weiterhin verbessert werden [4]. Als bisherige Nachteile der Siebklassierung gegenüber der Sichtklassierung sind hauptsächlich geringere Standzeiten und Durchsätze zu nennen. Gerade diese Nachteile konnten in den letzten Jahren durch die Entwicklung moderner Hochgeschwindigkeitssiebmaschinen und die Entwicklung der Kunststoff-Siebbeläge kompensiert werden.

1.4.2 Erwarteter Einfluss der Feinsiebung auf den Energiebedarf

Es wird erwartet, dass durch den Wegfall der pneumatischen Förderung und durch die Steigerung der Mühleneffizienz, eine Reduktion des elektrischen Energiebedarfs um 20 % bei der Aufbereitung der Zement-Rohmaterialien (Mahlung und Klassierung der Zement-Rohmaterialien) bei Einsatz von Feinsieben zu erreichen ist. Für die Mahlung und Klassierung der Zement-Rohmaterialien werden im Mittel in Deutschland ca. 23 kWh/t_{Rohmaterial} eingesetzt. Bei einer elektrischen Energieeinsparung von 20 % können demnach ca. 5 kWh/t_{Rohmaterial} eingespart werden. In Deutschland können etwa 20 % der deutschen Rohmaterialmahanlagen auf Siebtechnik umgerüstet werden. Durch eine elektrische Energieeinsparung von ca. 5 kWh/t_{Rohmaterial} ist bei einer deutschlandweit mittleren Jahresgesamtproduktion von 35 Mio. t Zement unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Klinker-Zement Anteils von 72 % im Jahr 2021, eine elektrische Energieeinsparung von 40 GWh pro Jahr theoretisch möglich [5].

Ferner wird erwartet, dass durch die verbesserte Energieeffizienz des Klinkerbrennprozesses, der thermische Energiebedarf (im Mittel ca. 3.500 MJ/t_{Klinker}), der für die Klinkerherstellung benötigt wird, um circa 2 % (70 MJ/t_{Klinker}) verringert werden kann. Hierdurch ist bei einer deutschlandweit mittleren Jahresgesamtproduktion von 25 Mio. t Klinker, eine thermische Energieeinsparung von 350 TJ pro Jahr theoretisch möglich.

1.4.3 Einfluss der Siebklassierung auf den Ofen-Brennprozess

Die vollständige Calcinierung und Sinterung des Brennguts, bei dem die zementtypischen Klinkerphasen entstehen, läuft im Drehrohrofen bei Brenngut-Temperaturen von etwa 850 bis 1450 °C ab. Bei der Erhitzung des Brennguts bilden sich zunächst Dicalciumsilicat ($2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$, kurz Belit oder C_2S) und verschiedene Calciumaluminat- und Calciumaluminatferrit-Verbindungen. Ab 1280 °C entsteht eine Teilschmelze im Brenngut, die Tricalciumaluminat ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, kurz C_3A), Calciumaluminatferrit ($2 \text{ CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$, kurz $\text{C}_2(\text{A},\text{F})$) und gelöstes freies Calciumoxid (CaO) enthält. Im Verlauf der Sinterung bilden sich aus dem festen Dicalciumsilicat und dem in der Schmelze gelösten Calciumoxid das für die Festigkeitseigenschaften des Zements bedeutsame Tricalciumsilicat ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$, kurz Alit oder C_3S).

Damit das Brenngut (Rohmehl) in der technologisch festgelegten Verweilzeit und bei den entsprechenden Brenntemperaturen zu Klinker gebrannt werden kann, muss die Feinheit und die Homogenität des Rohmehls dem Brennprozess angepasst werden. Eine ungleichmäßige Kornfeinheit des Rohmaterials (breite Korngrößenverteilung) hat hierbei einen negativen Einfluss auf die Homogenität des Rohmehls.

Neben der Homogenität des Rohmehls haben Grobkorngehalte $> 90 \mu\text{m}$ einen maßgeblichen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeiten beim Brennprozesses. Bei einem zunehmenden Grobkorngehalt des Rohmehls steigt bei sonst gleichen Bedingungen der CaO-Gehalt (Freikalkgehalt), welcher auf eine unvollständige Reaktion der Klinkermineralien (durch niedrige Reaktionsgeschwindigkeit) zurückzuführen ist. Die Reaktionsgeschwindigkeit von Festkörperreaktionen verhält sich umgekehrt proportional zur Korngröße der Partikel (vgl. **Abbildung 1-5**).

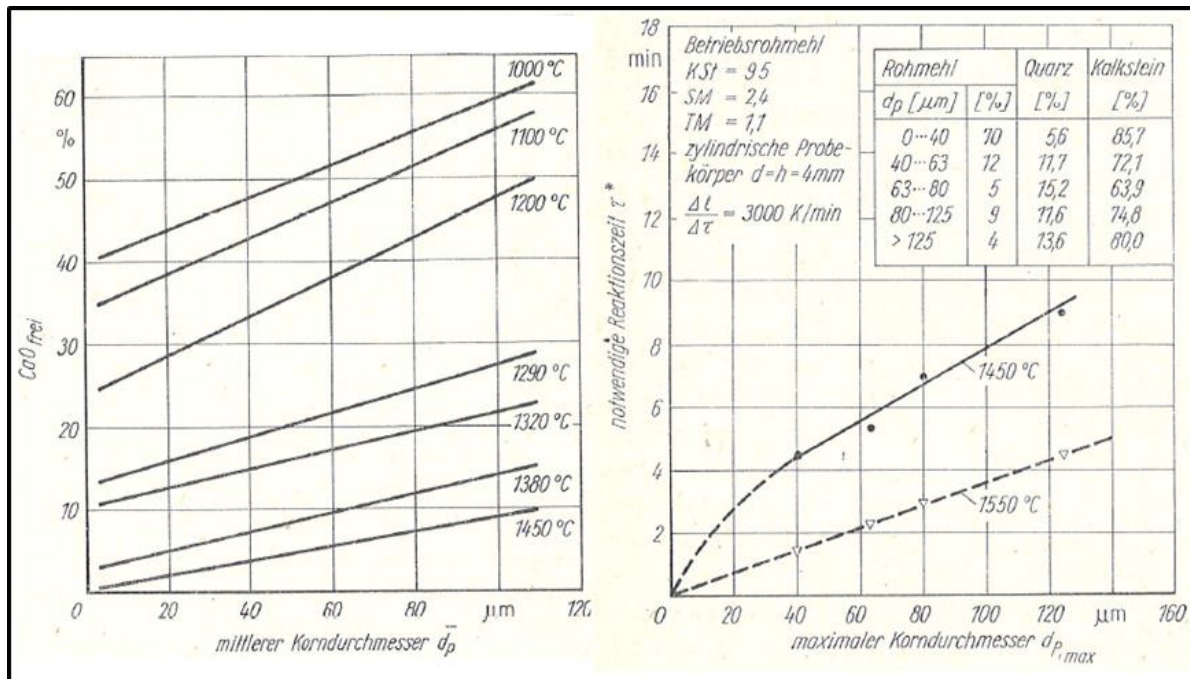


Abbildung 1-5 Links: Einfluss der Korngröße auf den Freikalkgehalt; Rechts: Abhängigkeit der Reaktionszeit von der maximalen Korngröße [6]

Freies CaO oder auch Freikalk genannt, ist der Anteil an CaO, der im Klinkerbrennprozess nicht an SiO_2 , Al_2O_3 oder Fe_2O_3 gebunden wird. Höhere Gehalte an freiem CaO im Klinker sind unerwünscht, da sie Kalktreiben hervorrufen und hierdurch die Raumbeständigkeit des Zements bzw. Betons beeinträchtigen können. Die Ursache hierfür liegt in der Reaktion von Calciumoxid mit Wasser, bei der Calciumhydroxid entsteht, welche mit einer Volumen-Ausdehnung verbunden ist. Durch diese Ausdehnung können Rissbildungen entstehen, wenn die zementgebundenen Baustoffe eine gewisse Mindestfestigkeit erreicht haben.

Das in **Abbildung 1-5** dargestellte Diagramm zeigt, dass bei der Vergrößerung des mittleren Korndurchmessers ein signifikanter Anstieg des Freikalk-Gehaltes zu erkennen ist. In dieser Abbildung ist auch zu erkennen, dass die Reaktionszeit und der Freikalk-Gehalt im System durch eine Brenntemperaturerhöhung verringert werden und somit die Qualität des Klinkers verbessert werden können. Durch die Erhöhung der Brenntemperatur im System wird jedoch der energetische Wirkungsgrad des Brennprozesses reduziert.

Ein hoher Grobkorngehalt im Rohmehl kann außerdem zur unregelmäßigen Anreicherung des Dicalciumsilicat-Minerals (Belit-Minerals) im Klinker führen. Diese entstehen hauptsächlich aus größeren Quarzkörnern im Rohmehl, die während des nachfolgenden Brandes oft nicht vollständig resorbiert werden können. Hierdurch entstehen scharf begrenzte Nester im Klinker, die als Belitnester bezeichnet werden (vgl. **Abbildung 1-6**).

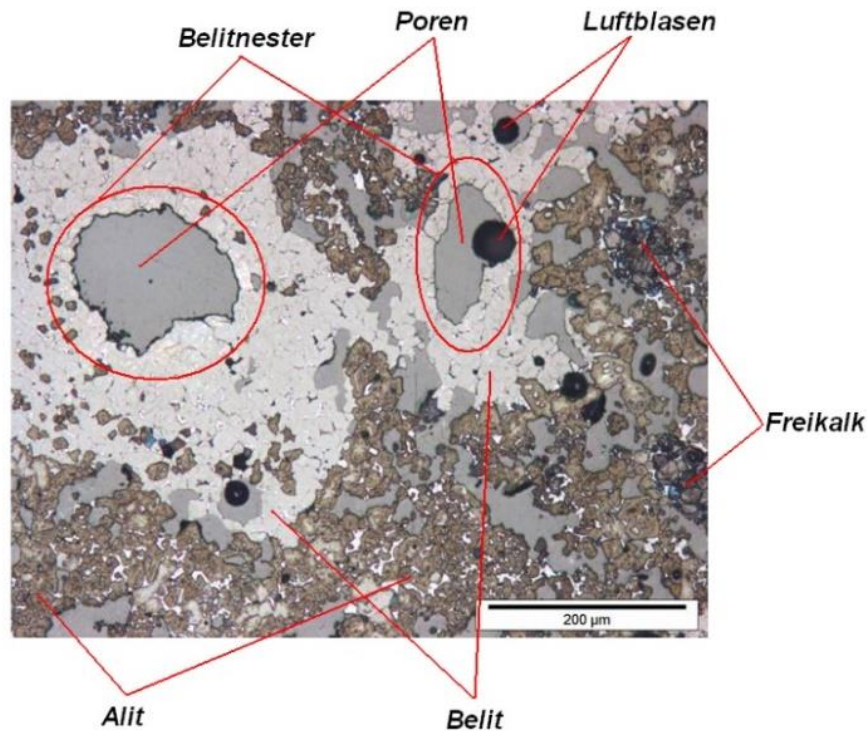


Abbildung 1-6 Darstellung von Belitnestern mithilfe der mikroskopischen Untersuchung von Zementklinkern

Aufgrund der inhomogenen Verteilung des Belit-Mineral in den Belitnestern kann deren abschließende Reaktion zu dem für die Festigkeitseigenschaften des Zements bedeutsamen Tricalciumsilicat (Alit) nicht in vollem Umfang erfolgen.

Zusammengefasst führt ein zunehmender Grobkorngehalt des Rohmaterials zu einem Anstieg des Freikalk-Gehalts und der Bildung von Belitnestern im Klinker. Grobe CaO-reiche Partikel führen dabei häufig zu einem Anstieg des Freikalkgehalts im Klinker, während grobe SiO₂-reiche Partikel zu einem Anstieg des Belitgehaltes führen. Die Qualität des Klinkers wird hierdurch eingeschränkt.

Der hohe Siebgütegrad und die hohe Trennschärfe, die bei der Siebklassierung von Rohmehl erreicht werden können, ermöglichen es perspektivisch den Grobanteil des Rohmehls im Brennprozess zu verringern. Die resultierende enge Korngrößenverteilung würde folglich die Homogenität und damit die Brennbarkeit des Rohmaterials verbessern. Daher wird mit einer möglichen Steigerung der thermischen Energieeffizienz des Klinkerbrennprozess gerechnet.

Für den Vergleich der Trenneffizienz (Trennschärfe) von unterschiedlichen Klassierverfahren sind in **Abbildung 1-7** die Trompkurven verschiedener Klassiermethoden für ein spezifisches Aufgabematerial vergleichend dargestellt. Die Trompkurve, auch die Trenn(grad-)kurve genannt, beschreibt bei einem gegebenen Trennprozess die Trenngüte der Partikel in Abhängigkeit von ihrer Partikelgröße. Diese Trennfunktion gibt an, welcher Massenanteil einer Korngröße bei der Klassierung nach der Aufgabe ins Grobgut gelangt.

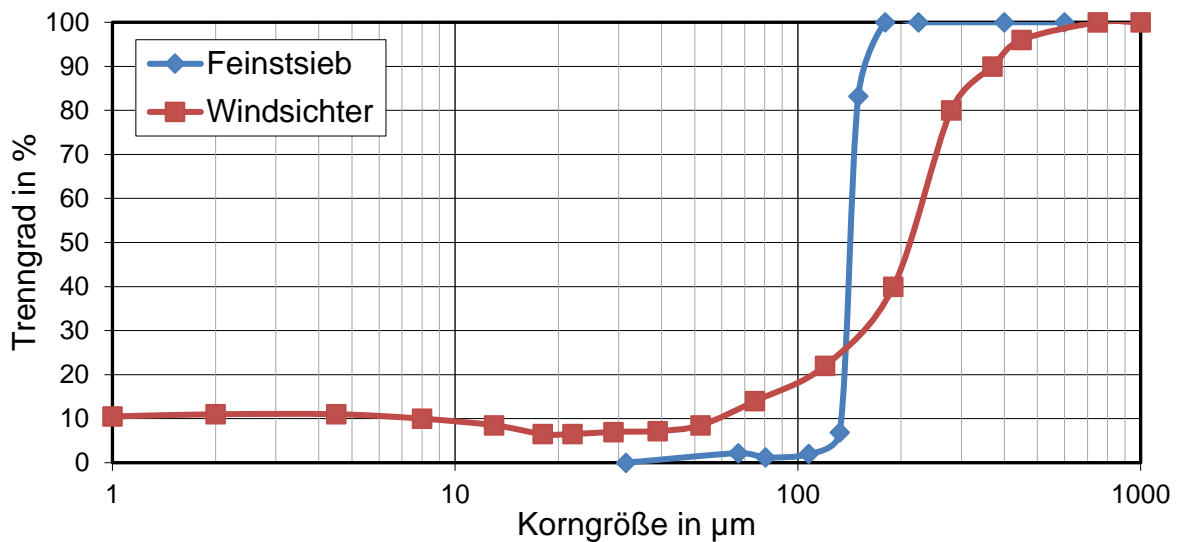


Abbildung 1-7 Vergleich der Trompkurven von verschiedenen Klassierverfahren

Für den Vergleich der beiden Klassierverfahren wurden aus Versuchsergebnissen, die bei der Absiebung eines Quarzsandes mithilfe eines Hochgeschwindigkeitssiebes ermittelt worden sind, sowie aus Ergebnissen mit einem Windsichter zwei Trompkurven erstellt. Diese Trompkurven sind in **Abbildung 1-7** gegenübergestellt.

Die Trenngrad- bzw. Trompkurve kennzeichnet hierbei den Massenanteil des Aufgabematerials auf den Klassierapparat, welcher durch den Klassierprozess ins Mühlenrückgut gelangt. Anhand des typischen Trompkurven-Verlaufs ist zu erkennen, dass der Feinanteil (Korngröße $\leq 90 \mu\text{m}$), der nach der Windsichtung ins Grobgut gelangt, zuerst abnimmt und dann aufgrund von Agglomerationseffekten wieder ansteigt. Jedoch ist der Feinanteil, der sich nach der Siebung im Grobgut befindet, deutlich geringer. Dies wird durch den jeweiligen Flächenanteil unterhalb der Trompkurve unter $90 \mu\text{m}$ deutlich.

Eine weitere wichtige Information, die aus **Abbildung 1-7** zu entnehmen ist, bezieht sich auf die Neigung der beiden Trenngradkurven. Hierbei gilt, je steiler der Kurvenverlauf, desto höher ist die Trennschärfe des Klassierprozess. Der Vergleich der beiden Trompkurven zeigt, dass bei der Klassierung des Quarzsandes mithilfe des Feinsiebes eine steilere Trompkurve resultiert. Basierend auf dem Vergleich der beiden Trenn(grad-)kurven ist davon auszugehen, dass das Feinsieb bei der Klassierung der Zement-Rohmaterialien eine deutlich höhere Klassiergüte als der Windsichter aufweisen wird. Folglich wird erwartet, dass die elektrische Energieeffizienz der Mahlkreisläufe zur Rohmahlung und die thermische Energieeffizienz des Klinkerbrennprozesses signifikant verbessert werden können.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen (außerhalb des Projektes)

Im Rahmen des Projektes wurde der Siebmaschinenhersteller in Bezug auf einen optimierten Siebmaschinenbetrieb sowie bei Störungen im Betrieb kontaktiert. Der Kontakt wurde hierbei genutzt, um konkrete Fragestellungen in Bezug auf die Fine-Line Siebmaschine zu beantworten.

2 Teil II: Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.2 Versuchs- und Projektplanung

Zu Beginn des Projekts wurde die Versuchs- und Zeitplanung vorgenommen. Die Inhalte der Versuchsplanung haben sich dabei an den im Forschungsantrag festgelegten Arbeitspaketen sowie dem vorab definierten Arbeitsumfang der experimentellen Versuche orientiert.

Nach der rückwirkenden Projektfreigabe des Projektes „Rohmehl-Siebung“ zum 01.12.2019 fand am Dienstag, den 14.01.2020 das Kick-off Meeting beim Industrie-Projektpartner thyssenkrupp Industrial Solutions AG (tkIS) am Forschungs- und Entwicklungsstandort in Ennigerloh statt. Hier wurde mit den Projektpartnern VDZ und Phoenix Zement über die Implementierung der Siebdemonstratoranlage im Zementwerk von Phoenix Zement gesprochen und über mögliche Hersteller, welche die entsprechende Siebtechnologie im Pilot-Maßstab zur Verfügung stellen können. Neben dem US-Unternehmen Derrick wurde schlussendlich mit der Haver Niagara GmbH ein deutsches Unternehmen gefunden, mit dem das Projekt zusammen realisiert wurde. Nach der Vorstellung des Projektes am 03.03.2020 bei Haver Niagara in Münster wurden erste Siebversuche im Technikum von Haver Niagara eingeplant und das Versuchsmaterial dafür von Phoenix Zement aus dem industriellen Prozess Ende März 2020 bereitgestellt. Die Ergebnisse dieser Versuche werden im nachfolgenden Abschnitt aufgegriffen, da diese für die Auswahl der Pilot-Siebanlage entscheidend waren und somit später die direkt erregte „Fine-Line“-Technologie ausgewählt wurde.

Von dem im ersten Projektantragsentwurf geplanten Vorhaben, die Siebdemonstratoranlage bei Phoenix Zement im Zementwerk zu installieren, wurde in der Projektplanungsphase aus verschiedenen Gründen Abstand genommen. Zum einen konnte die Frage nach der Betreiberpflicht sowie anderer rechtlicher Fragen einer solchen Demonstratoranlage, die nicht Eigentum von Phoenix Zement gewesen wäre, nicht zufriedenstellend geklärt werden. Die aus Vorversuchen im Technikum von Haver Niagara gewonnenen Erkenntnisse zeigten mehrere Optimierungsansätze auf, die sich nur eingeschränkt im industriellen Umfeld mit schwankenden Betriebsbedingungen bewerten lassen. Ferner wurde nach dem ersten Gespräch mit Haver Niagara deutlich, dass bei den vorherrschenden Prozessbedingungen bei Phoenix Zement und Prozesstemperaturen über 100°C die Elektromotoren der Siebmaschinen zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht betrieben werden können.

Daraus resultierend wurde die Planung des Arbeitspaket 1 (AP1) angepasst und die Siebdemonstratoranlage gemäß der Beschreibung in der aktualisierten Vorhabenbeschreibung bei tkIS im Technikum installiert. Die konkrete Vorgehensweise hierzu wurde mit Haver Niagara, VDZ und tkIS bei einer Telefonkonferenz am 20.05.2020 abgestimmt. Weitere Abstimmungsgespräche fanden am 09.07.2020 und 14.07.2020 statt.

Das gemahlene Rohmaterial (Kugelmühlenprodukt) für die Vorversuche wurde aus dem industriellen Prozess bei Phoenix Zement ausgeschleust und räumlich getrennt im Technikum von thyssenkrupp Industrial Solutions der Siebmaschine zugeführt. Damit wird gewährleistet, dass nur abgekühltes Rohmaterial auf die Siebmaschine aufgegeben wird, um die innenliegenden Motoren der Fine-Line-Siebmaschine nicht zu beschädigen. Der Aufbau der industriellen Mahlanlage und die Installation der Versuchsanlage sind in **Abbildung 2-1** anhand eines Fließbildes dargestellt.

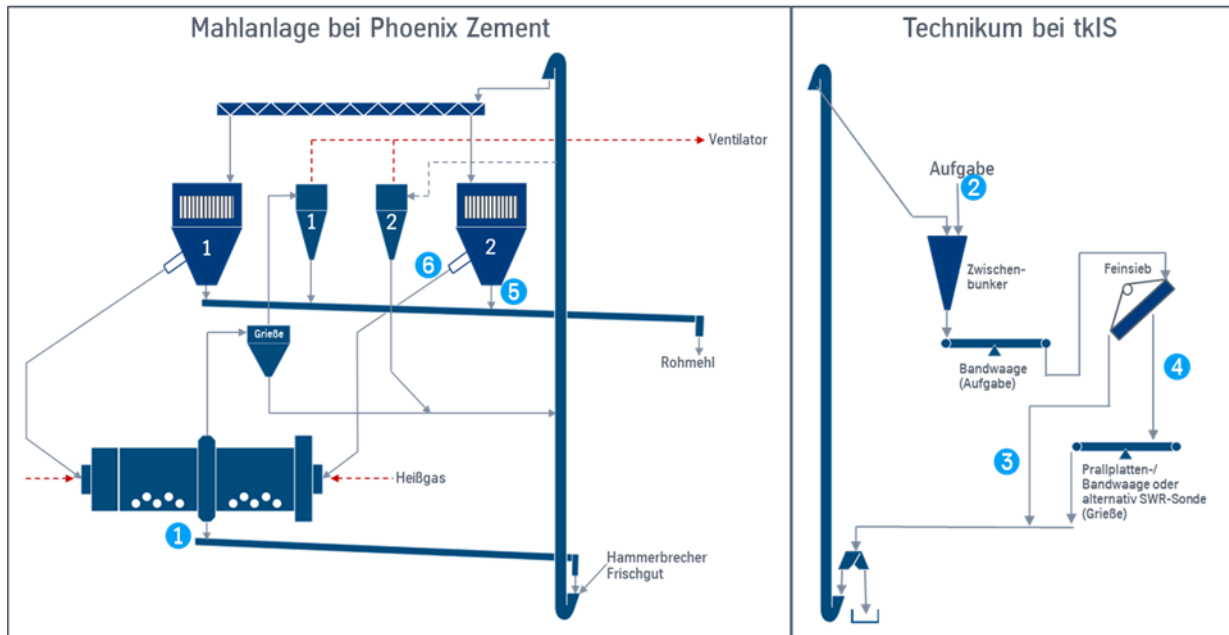


Abbildung 2-1 Aufbau der Rohmahanlage bei Phoenix Zement (links) und des geplanten Versuchsaufbaus bei tkIS (rechts)

Aus dem Rohmaterial-Strom (1), der im Klinkerherstellungsprozess nach der Rohmühle üblicherweise in den Windsichter gelangt, wurde ein Teil (des Massenstroms) abgezweigt und per Lastwagen zum Technikum von tkIS transportiert. Hier wurde das ausgeschleuste Material einem Aufgabebunker zugeführt (2) und mit einer Dosierbandwaage auf ein Hochgeschwindigkeitssieb aufgegeben. Das Feingut (4) und das Grobgut (3) wurden anschließend in einem Auffangbehälter ausgeschleust (Batch-Versuch) oder gelangten mit dem Becherwerk wieder zum Aufgabebunker zurück (Kreislaufversuch). Somit hatte der Aufbau der Pilotanlage keinen signifikanten Einfluss auf die im Zementwerk notwendigen Abläufe. Nach Abschluss der im Arbeitspaket 2 geplanten Versuche, wurde das Fine-Line Sieb für die weiteren Untersuchungen an den VDZ übergeben und im Technikum des VDZ installiert.

2.2.1 Ergebnisse der Vorversuche im Technikum bei Haver Niagara (03.04. und 16.06.2020)

Zur Auswahl, welche Siebtechnologie am besten für die Klassierung von trockenem Rohmehl geeignet ist, wurden Vorversuche im R&D Center bei Haver Niagara durchgeführt. Für die 21 Versuche wurde das Mühlenausgangsprodukt von Phoenix Zement verwendet und unterschiedliche Siebmaschinentypen und Siebbeläge getestet.

Neben der Bestimmung der maximalen Aufgabeeleistung, bzw. der maximal möglichen spezifischen Flächenbelastung (in $t / (m^2h)$) wurden die Korngrößenverteilungen des Siebüberlaufs und Siebdurchgangs ermittelt, um somit die Trennfunktion der Klassierung sowie die Fehlkornanteile bewerten zu können. Der typische Versuchsaufbau für derartige Untersuchungen ist in **Abbildung 2-2** zu sehen.



Abbildung 2-2 Fine-Line-Siebmaschine HE500x1250 im R&D Center von Haver Niagara

Die Zielrückstände auf 90 µm und 200 µm wurden von VDZ und tkIS gemeinsam festgelegt, um ein Rohmehl mit ausreichender Homogenität sicherzustellen und sollten 20 % auf 90 µm und 0,2 % auf 200 µm nicht überschreiten. In **Tabelle 2-1** sind die jeweils besten Siebergebnisse zu sehen, wenn bei der Siebung das Siebgewebe nicht überschüttet wird und somit ein möglichst geringer Fehlkornanteil im Überlauf (Uk/Üb) angestrebt wird.

Tabelle 2-1 Ergebnisse Vorversuch R&D Center Haver Niagara – ohne Überschüttung

Maschine	Siebmaschine 1	Siebmaschine 1	Siebmaschine 2	Fine-Line	Fine-Line
Versuch	4	12	16	20	25
Siebgewebe	Gummisieb- belag	Drahtsieb- belag	Drahtsieb- belag	Drahtsieb- belag	Gummi- siebbelag
Maschenweite [mm]	0,1 x 3	0,118 x 0,4	0,106 x 0,355	0,118 x 0,355	0,1 x 3
Spez. Aufgabeleistung [t / (m²h)]	1,6	1,0	0,8	1,6	1,6
Kornverteilung Überlauf [%]	97,8	60,1	58,2	63,1	77,1
Kornverteilung Durchgang [%]	20,2	39,9	41,8	36,9	22,9
Fehlkornanteil Uk/Üb 90 µm [%]	15,66	1,99	2,23	2,13	9,96
Fehlkornanteil Üb/Dg 90 µm [%]	6,27	25,06	30,18	ca. 22	13,84

Zur Erzielung höherer spezifischer Aufgabelleistungen wurde nach Abstimmung zwischen VDZ und tkIS eine Überschüttung des Siebgewebes zugelassen, so dass der Fehlkornanteil Unterkorn im Überlauf (Uk/Üb) bis zu 15 % betragen durfte. Die in **Tabelle 2-2** aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass deutlich höhere spezifische Aufgabelleistungen erzielt werden konnten. Das beste Siebergebnis konnte bei Einhaltung der Qualitätsrandbedingungen mit der Fine-Line-Technologie erzielt werden (2,86 t/(m²h) mit einem Fehlkornanteil des Überkorns im Durchgang (Üb/Dg) von ca. 22 % auf 90 µm und 0,18% auf 200 µm.

Tabelle 2-2 Ergebnisse Vorversuch R&D Center Haver Niagara – mit Überschüttung bis zu 15% Uk/Üb

Maschine	Siebmaschine 1	Siebmaschine 1	Siebmaschine 2	Fine-Line	Fine-Line
Versuch	4	10	15	21	26
Siebgewebe	Gummsieb- belag	Drahtsieb- belag	Drahtsieb- belag	Drahtsieb- belag	Gummsieb- belag
Maschenweite [mm]	0,1 x 3	0,118 x 0,4	0,106 x 0,355	0,118 x 0,355	0,1 x 3
Spez. Aufgabelleistung [t / (m ² h)]	1,6	2,3	0,96	2,86	2,1
Kornverteilung Überlauf [%]	79,8	66,9	62,4	70,1	81,2
Kornverteilung Durchgang [%]	20,2	33,1	37,6	29,9	18,8
Fehlkornanteil Uk/Üb [%]	15,66	9,39	9,84	12,27	14,63
Fehlkornanteil Üb/Dg 90 µm [%]	6,27	25,92	ca. 30	ca. 22	ca. 14
Fehlkornanteil Üb/Dg 200 µm [%]	0,41	0,18	0,48	0,18	0,35

Auf dieser Versuchsbasis wurde die Entscheidung getroffen, für die weiteren Untersuchungen im Technikum bei tkIS und später beim VDZ eine Pilot-Fine-Line-Siebmaschine (Siebbelag wird durch innenliegende Elektromotoren direkt erregt) bei Haver Niagara zu nutzen.

2.3 Implementierung / Installation der Feinsiebanlage zur Klassierung des Mühlenausstrags (AP1)

In Anknüpfung an die Erkenntnisse der Voruntersuchungen und den daraus resultierenden Entschlüssen wurde mit dem Aufbau der Siebversuchsanlage im Technikum von tkIS im August 2020 begonnen. Im ersten Schritt wurde ein 3D-Anlagenmodell erstellt, um eine effiziente und kostensparende Integration der Siebanlage in das bestehende Versuchsgerüst mit einer Vielzahl von bereits vorhandenen Maschinen- und Anlagenkomponenten zu gewährleisten. Die präzise Einplanung des Siebversuchsstandes war unentbehrlich, damit bereits vorhandenes Equipment, wie Dosier- und Entstaubungsanlagen, optimal für dieses Projekt genutzt werden konnten und gleichzeitig der Betrieb von bestehenden Versuchsanlagen möglich war.

Für die Aufstellung der Siebanlage und Verknüpfung mit den Transportaggregaten war eine Anpassung des Stahlbaus notwendig. Sowohl die Gewährleistung von Zugänglichkeit und Arbeitsschutzanforderungen als auch die erhöhten statischen und dynamischen Belastungen durch die Siebanlage erforderten eine Begutachtung des Stahlgerüsts. Unter Nutzung von technischen Berechnungen wurden die Umbaumaßnahmen definiert und der Stahlbau an den kritischen Stellen gezielt angepasst. Besondere Sorgfalt wurde dabei auf die Entkopplung des schwingenden Siebs zum Stahlbau gelegt.

Gegenüber der bestehenden Einbausituation war eine Drehung der Bandwaage um 180° und neue Anbindung an den Aufgabebunker notwendig. Als Ergebnis der Einplanung wird in der **Abbildung 2-3** die Siebmaschine in Verbindung mit der Aufgabebandwaage, dem Umlaufbecherwerk, den Produktauffangbehältern und der Entstaubungsleitung dargestellt.

Ein weiteres Detail der Anlagenplanung ist die Verwendung eines Bunkeraufsatzfilters für die zusätzliche Entstaubung des Siebes und des Umlaufbecherwerks, so dass die abgesaugten Feinpartikel wieder dem Aufgabebunker zugeführt werden. Dies war insbesondere bei den Langzeitversuchen mit geschlossenem Materialkreislauf relevant, um eine konstante Materialzusammensetzung zu gewährleisten.

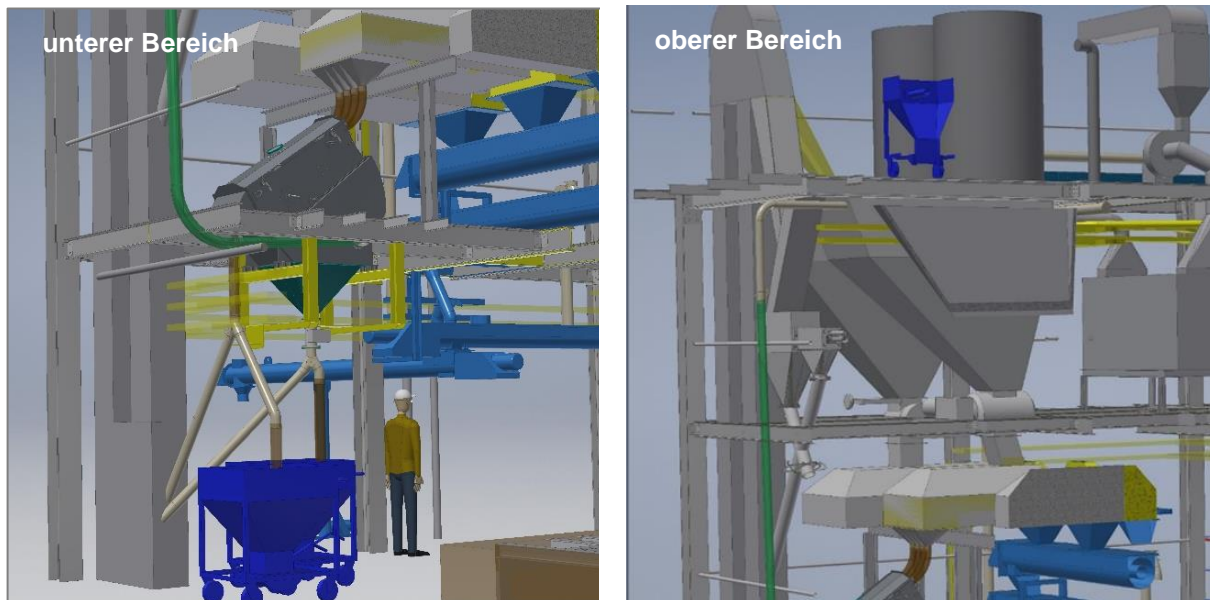


Abbildung 2-3 Einplanung der Siebmaschine in das Versuchsgerüst (Technikum tkIS)

Darüber hinaus musste eine flexible Verbindung zwischen dem Abwurf der Bandwaage und dem Sieb konzipiert werden, um verschiedene Siebneigungen auszugleichen und eine homogene Materialverteilung über der Siebbreite zu ermöglichen. In der **Abbildung 2-4** wird die gewählte Lösung bestehend aus

vier flexiblen Kunststoffrohren inklusive der zwei verstellbaren Materialleitbleche im oberen Bereich des Aufgabetrichters dargestellt.

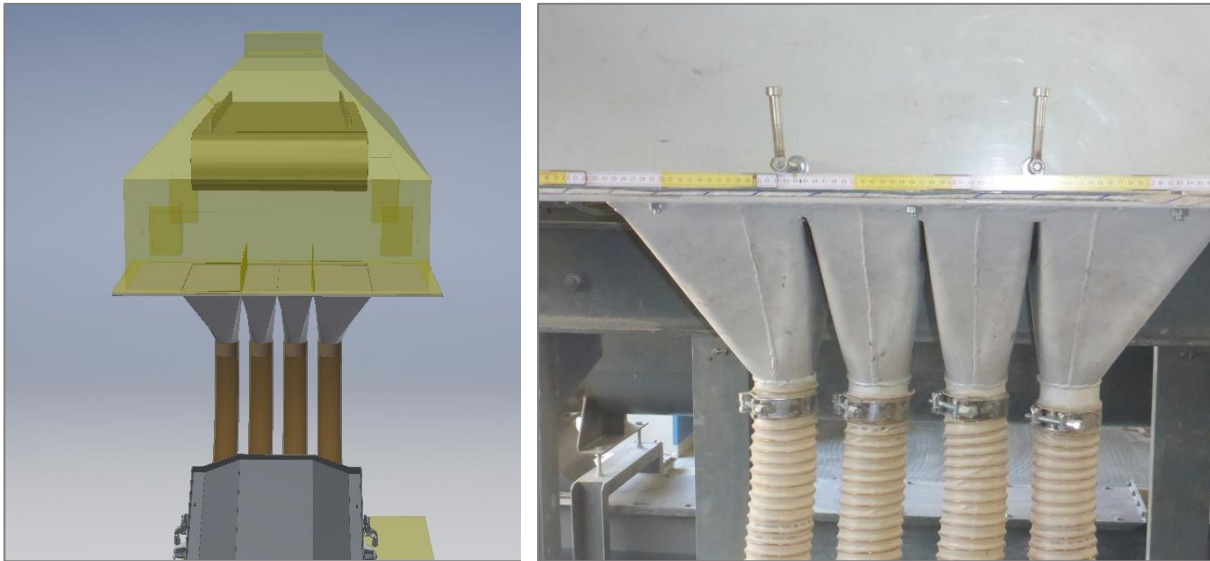


Abbildung 2-4 Homogenisierung der Materialverteilung und flexible Verbindung zwischen Bandwaage und Sieb
Links: 3D-Modell. Rechts: Foto des Trichters mit Verbindungsrohren zum Sieb

Das für die weiteren Arbeitspakete benötigte Versuchsmaterial wurde während des stabilen Betriebs der Rohmehlanlage im Zementwerk Phoenix (Phoenix Zementwerke Krogbeumer KG & Co. KG) entnommen. Insgesamt wurden mit Hilfe eines Saugwagens 6 t Zwischenprodukt ausgeschleust. Bei diesem Zwischenprodukt handelt es sich um den Austrag der Kugelmöhlen, das anschließend auf den Sichter aufgegeben wird (vgl. **Abbildung 2-5**).

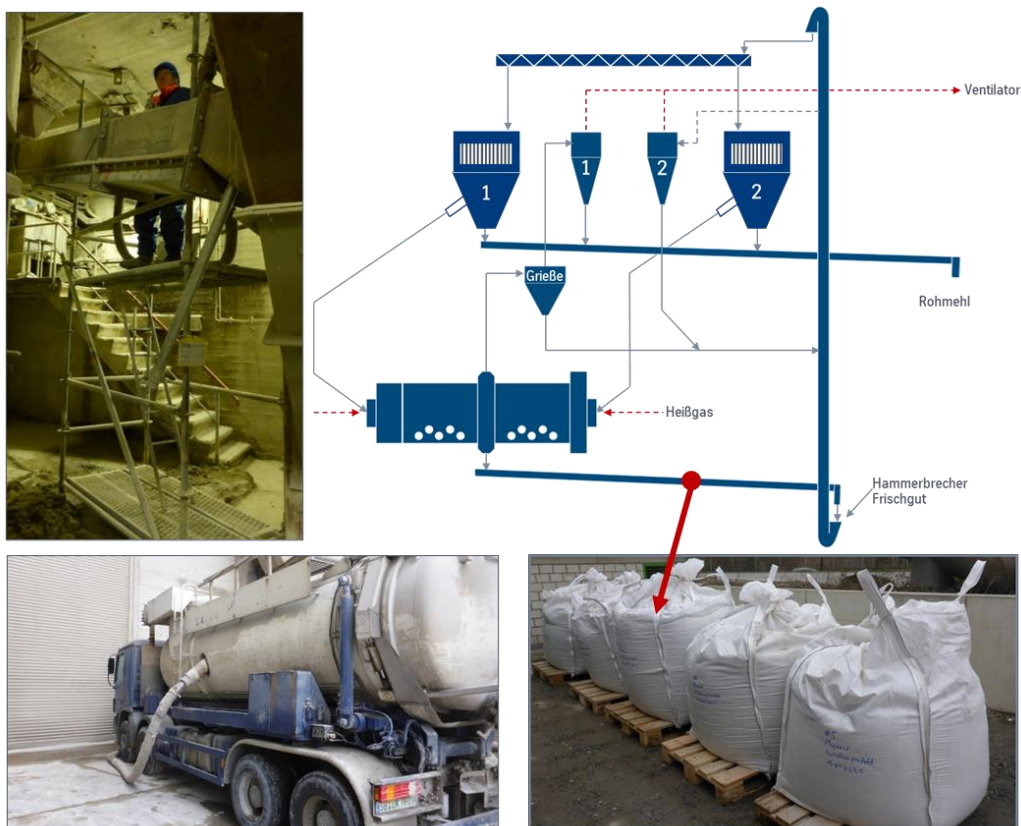


Abbildung 2-5 Entnahme des Zwischenproduktes aus der Rohmehlanlage des Zementwerkes Phoenix

Damit ist sichergestellt, dass für die Siebversuche ein Aufgabematerial mit ähnlichen Eigenschaften (chem. Zusammensetzung und Partikelgrößenverteilung) im Vergleich zu einem Industrie-Sichter zum Einsatz kam. Die Partikelgrößenverteilung dieser Rohmaterialmischung besitzt eine mittlere Partikelgröße von 48 µm mit einer maximalen Partikelgröße von 1,3 mm (vgl. **Abbildung 2-6**).

Neben dem Material für die Siebversuche wurden auch Proben für eine Sichterbewertung entnommen. Da es sich im vorliegenden Fall um einen älteren Sichter der ersten Generation handelt, ergab die Auswertung einen entsprechend hohen Bypass von circa 50 %. Entsprechend ist aufgrund der anteiligen Feingutrückführung in die Kugelmühle mit einem leicht erhöhten Rohmehlanteil (Produkt) in der entnommenen Probe zu rechnen. Dennoch ist das aus dem Mahlkreislauf entnommene Probenmaterial repräsentativ für viele Bestandsanlagen in Deutschland und weltweit.

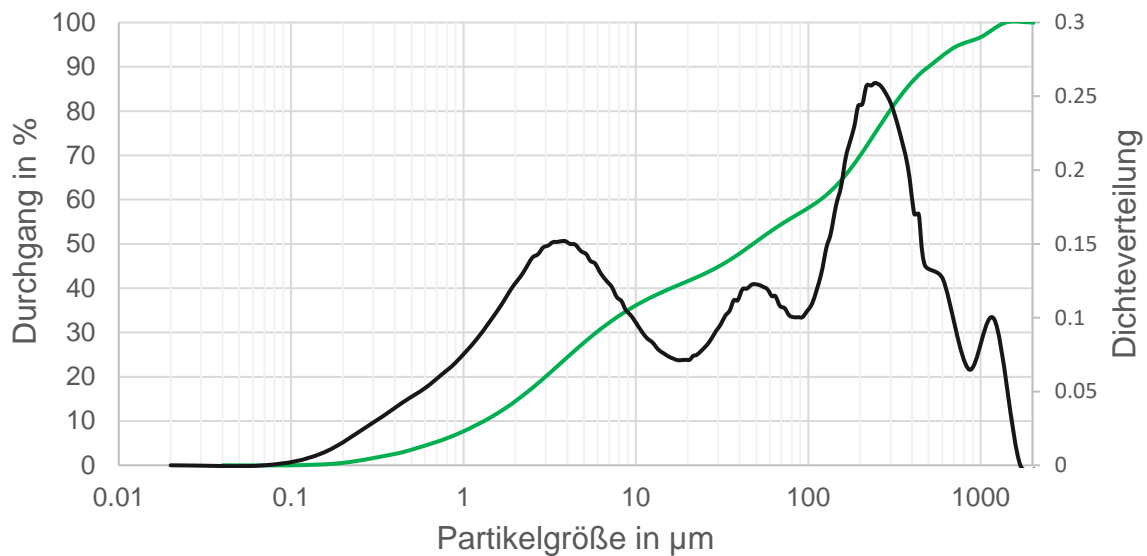


Abbildung 2-6 Partikelverteilungen des Zwischenprodukts der Industriemahlanlage (Durchgang und Dichteverteilung) für die Siebversuche.

2.4 Variation der Betriebseinstellungen zur Klassierung des Mühlenausgangs (AP2)

Die Siebmaschine wurde im April 2021 erstmalig mit Material beaufschlagt. Während der Inbetriebnahme erfolgten mehrere Modifikationen zur Optimierung des Siebprozesses. Erforderlich waren u.a. Anpassungen am Verteilerblech zur gleichmäßigen Materialverteilung über die Siebbreite und der Einbau von mechanischen Austragshilfen am Aufgabebunker zur kontinuierlichen Materialzufuhr. Gelegentlich traten im Betrieb Resonanzen an den Antrieben auf, die durch eine geringfügige Drehzahlanpassung an einem Antriebsmotor abgestellt werden konnten.

Nachdem ein zuverlässiger Betrieb der Siebanlage gewährleistet war, begann die Parameterstudie. Je Versuchseinstellung wurden circa 150 – 200 kg Material auf das Sieb aufgegeben und in Überlauf und Durchgang separiert. Die durchschnittliche Versuchszeit betrug circa 4 Minuten. Damit wurde sichergestellt, dass sich die kurzen An- und Abfahrphasen nicht auf das Ergebnis auswirken. Nach Beendigung eines Versuches wurden die beiden Probenbehälter (Siebüberlauf und Siebdurchgang) in einem Rhönrad homogenisiert und wieder dem Aufgabebunker zugeführt (vgl. **Abbildung 2-7**). Regelmäßige Analysen bestätigten eine unveränderte Partikelgrößenzusammensetzung des Aufgabegutes und damit konstante Rahmenbedingungen für die Parameterstudie.



Abbildung 2-7 Probenaufbereitung. Links: Auffangbehälter für Siebdurchgang und Siebüberlauf. Rechts: Rhönrad zur Homogenisierung.

Das definierte Ziel dieses Arbeitspakets war die Ermittlung von optimalen Betriebsparametern im Rahmen eines Versuchsprogramms, bei dem folgende Einflussgrößen untersucht werden:

- verschiedene Siebbeläge
- unterschiedliche Siebbelastungen (verschiedene Aufgabemengen auf der Siebfläche)
- verschiedene Neigungswinkel
- verschiedene Amplituden/Frequenzverhältnisse der beiden Antriebe (direkte Anregung des Siebbelags)

Die **Abbildung 2-8** zeigt das Versuchsprogramm mit den gewählten Sieb- und Betriebsparametern.

Drahtsieb
0,118 x 0,355 mm

PU-Sieb
0,125 x 3,0 mm

PU-Sieb
0,1 x 3,0 mm

	Drahtsieb 0,118 x 0,355 mm	PU-Sieb 0,125 x 3,0 mm	PU-Sieb 0,1 x 3,0 mm
Aufgabemenge [t/h]	1,0 / 2,0 / 2,5 / 3,0	2,2 / 2,5	2,5
Aufgabeleistung [t/(h*m²)]	1,9 – 5,5	5,3 – 5,7	5,7
Siebneigung [°]	25 / 30 / 35 / 40	25 / 30 / 35 / 40 / 45	35 / 40
Drehzahl Drive 1 und 2 [rpm]	2000 / 3000 / 3600	2000 / 3000 / 3600 + Kombination	2000
Anzahl Versuche	16	19	3

Abbildung 2-8 Versuchsprogramm mit Angabe der variierten Betriebsparameter (Parameterstudie)

Zu Beginn dieser Studie wurden unterschiedliche Aufgabeleistung und Siebneigungen bei Verwendung des Drahtgewebes (0,118 x 0,355 mm) getestet. Die **Abbildung 2-9** zeigt die Siebdurchgänge (Produktmenge) bezogen auf Partikel kleiner 90 µm bzw. kleiner 125 µm. Zur besseren Einordnung sei erwähnt, dass in den Siebdurchgängen mit dem untersuchten Rohmaterial und Siebelägen generell circa 95% der Partikel kleiner als 125 µm (bzw. 90% im Partikelbereich 0 – 90 µm) waren, so dass damit hinreichend genau die gesamte Produktmenge (Feingutanteil) charakterisiert wird.

Bei einer geringen spezifischen Siebleistung von 1,9 t/(m²h), die einer Siebaufgabe von 1,0 t/h entspricht, wurde ein Siebdurchgang von 0,42 t/h ermittelt. Es gelangte kaum Unterkorn in den Siebüberlauf, was sich in einer hohen Klassiereffizienz von circa 80% ausdrückt. Mit einer weiteren Erhöhung der Aufgabemenge bzw. der spezifischen Siebleistung nahm die Klassiereffizienz bis auf circa 30% ab, da mehr Unterkorn in den Siebüberlauf gelangte. Hierbei ist ein wichtiger Aspekt, dass die Qualität des Siebdurchgangs immer die Anforderungen erfüllte, da unabhängig von der spezifischen Siebleistung kaum Überkorn (Partikel >200 µm) im Durchgang nachweisbar war. Die Qualität des Siebdurchgangs und damit des Produktes (Rohmehl) war mit höherer Materialaufgabe immer sichergestellt.

Ein weiteres Resultat ist der absolute Anstieg der Produktmenge bis auf 3,0 t/h bei gleicher Siebfläche. Es stellte sich ein Optimum der abgeseibten Produktmenge bei einer spez. Siebleistung von 5,5 t/(m²h) ein. Eine weitere Erhöhung der Aufgabemenge führte zu keiner zusätzlichen Erhöhung der Feingutausbringung bzw. des Produktmassesstroms.

Die konventionelle Bewertung des Siebprozesses anhand der Klassiereffizienz weist den besten Siebbetrieb bei möglichst geringer Beaufschlagung des Siebs aus. Eine geringe spez. Siebleistung ist aber im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit kaum für große Durchsätze (>150 t/h) anwendbar, wie sie bei Rohmahlanlagen im Zementwerk typisch sind. Demgegenüber führen höhere spezifische Siebleistungen zur Verringerung der erforderlichen Siebfläche und damit der Anzahl von installierten Siebmaschinen.

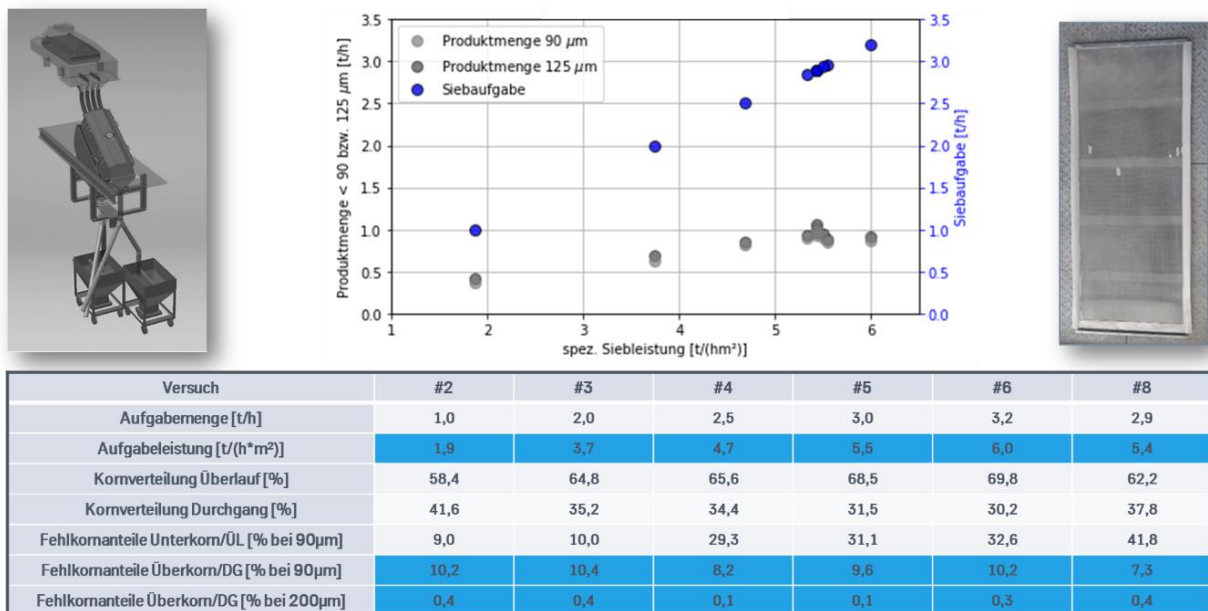


Abbildung 2-9 Siebdurchgang (Produktmenge) in Anhängigkeit von der spez. Siebleistung (Drahtgewebe 0,118 * 0,355 mm).

Der vermeintliche Nachteil einer geringeren Klassiereffizienz führt zu einem höheren Feingutanteil im Überlauf. Ein größerer Materialanteil wird rezirkuliert und erneut der Mühle zugeführt. Da im Mahlaggregat meist auch eine Trocknung stattfindet, kann dieser Umstand bei der Rohmehlsiebung jedoch auch zur Anhebung der zulässigen Aufgabefeuchte genutzt werden. Im Vergleich zur Rohmehlsichtung

mit Umlauffaktoren von 2,5 -3,0 (Verhältnis: Sichteraufgabe zu Frischgut / Fertiggut) ist die rezirkulierte Materialmenge bei einer Rohmehlsiebung dennoch etwas niedriger.

Nach dem Drahtgewebe (0,118 x 0,355 mm) erfolgten im Anschluss die Versuche mit dem PU-Sieb (0,125 x 3,0 mm). Die PU-Gewebe wurden speziell für die verwendete Siebmaschine angefertigt und im Vergleich zu den Drahtgeweben lagen kaum Betriebserfahrungen vor. Die ersten Versuchseinstellungen zeigten einen deutlichen Abfall in der spezifischen Siebleistung und Feingutmenge. Dies war in erster Linie auf eine beeinträchtigte Anregung des Siebgewebes durch Antriebstraversen zurückzuführen. Konstruktive Anpassungen der Gewebeverspannung und die Positionierung des Gewebes innerhalb des Siebrahmens führten zu einer signifikanten Betriebsverbesserung. Nach der Modifizierung und Optimierung konnte für das getestete PU-Gewebe (0,125 x 3,0 mm) die spezifische Siebleistung bis auf 5,5 t/(m²h) erhöht werden. Die optimale spezifische Siebflächenbeladung unterschied sich nicht zwischen dem getesteten Draht- und PU-Gewebe.

Die Abhängigkeit der ausgebrachten Feingutmenge von der Siebneigung wird in der **Abbildung 2-10** für das Drahtgewebe als auch für das PU-Gewebe dargestellt. Dieser Vergleich fand bei beiden Geweben mit einheitlicher spez. Siebleistung von 5,5 t/(m²h) statt. Die Grafik gibt sehr deutlich den erhöhten Feingutaustrag nach Optimierung (grün) verglichen zum Zustand vor der Modifikation (rot) des PU-Gewebes wieder. Darüber hinaus liegt die günstigste Siebneigung sowohl für das Draht- als auch für das PU-Gewebe im Bereich von 30 – 35 °. Obwohl bei dem Drahtgewebe der maximale Feingutanteil um 2 % höher lag, besteht kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der erreichbaren Siebleistung. Die PU-Gewebe reagieren jedoch sensibler auf eine Anpassung der Siebneigung.

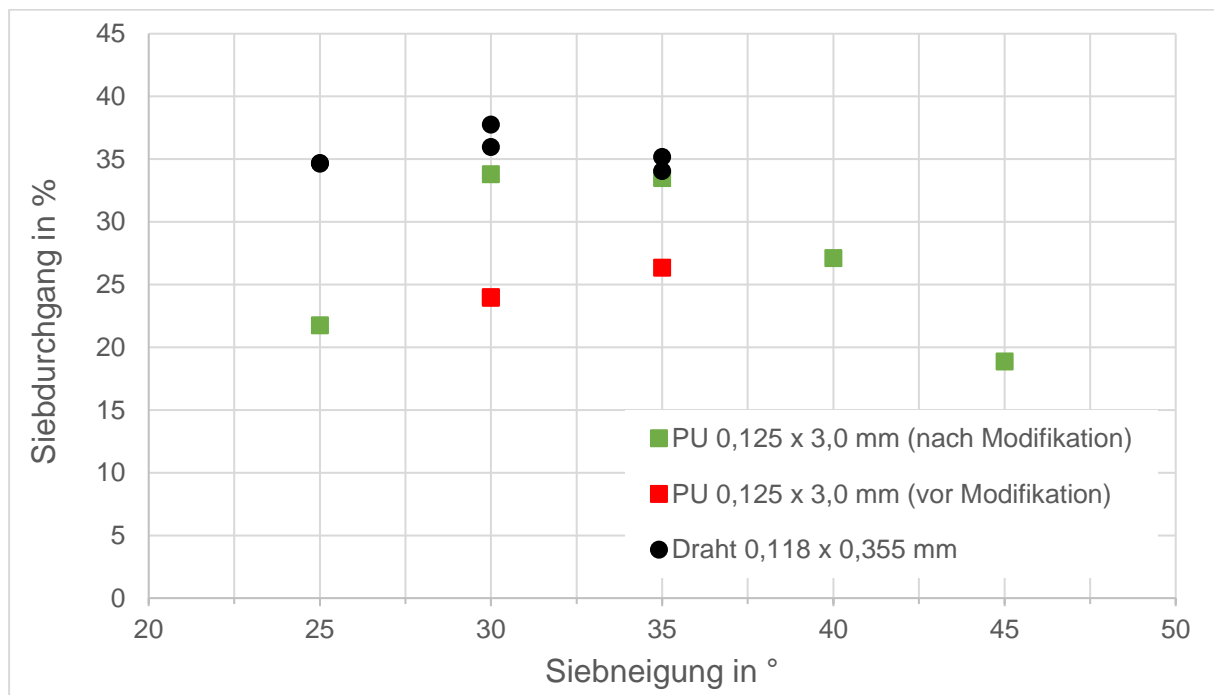


Abbildung 2-10 Siebdurchgang in Anhängigkeit von Siebneigung für das Drahtgewebe 0,118 x 0,355 mm und PU-Gewebe 0,125 x 3,0 mm.

Trotz unterschiedlicher Maschenweiten bei den getesteten Siebgeweben wurden nur geringe Unterschiede bei den Rückstandswerten im Siebdurchgang detektiert (**Tabelle 2-3**). In Bezug auf den Grobgutanteil (Partikel größer als 125 µm und 200 µm) sind die abgesiebten Rohmehle für beide Gewebearten gleichwertig.

Tabelle 2-3 Rückstandswerte des Siebdurchgangs (Produktmenge) für Draht- und PU-Gewebe basierend auf Messungen mit einem Laserdiffraktometer (Malvern)

Siebgewebe		Draht: 0,118 x 0,355 mm	PU: 0,125 x 3,0 mm
Durchgang (Feingut)	R90 µm in %	9,93	8,83
	R125 µm in %	5,58	5,11
	R200 µm in %	1,53	1,62

Eine Gegenüberstellung der Trennkurven beider Siebgewebe veranschaulicht die zuvor beschriebenen Ergebnisse (vgl. **Abbildung 2-11**). Die Trennkorngröße liegt bei beiden Geweben nahezu gleichwertig bei 125 µm. Dennoch ist der Bypass beim Drahtgewebe mit circa 20% etwas niedriger als beim PU-Gewebe mit circa 30%, was sich in der leicht erhöhten Durchgangsmenge beim Drahtgewebe ausdrückt.

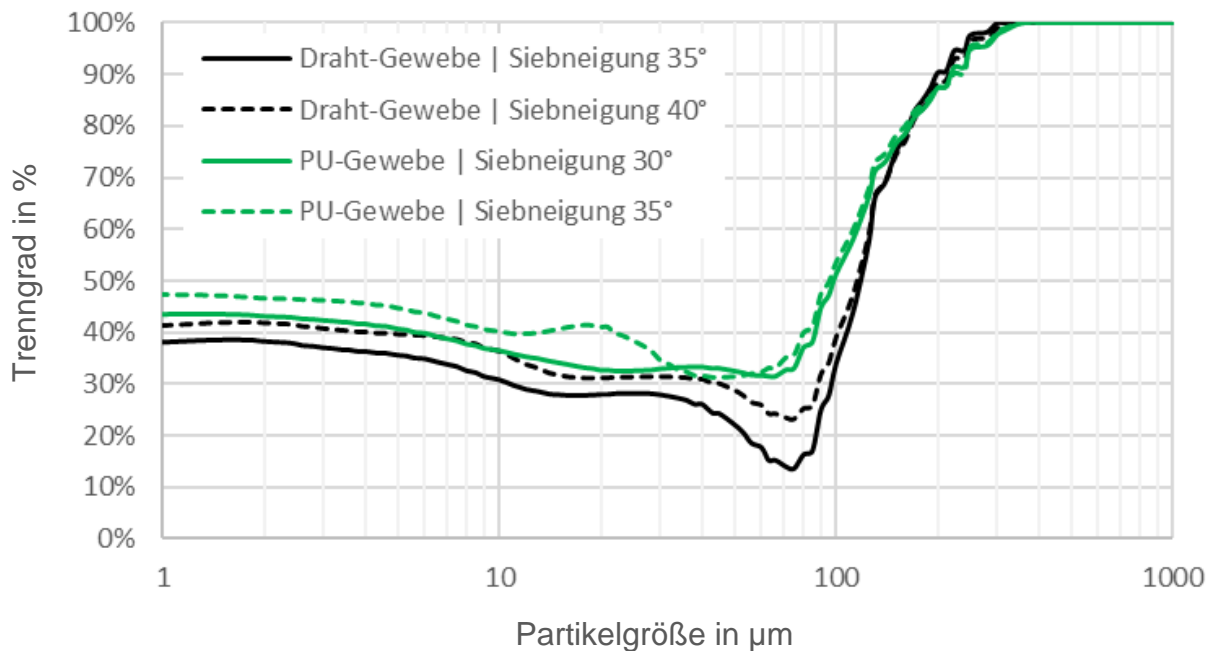


Abbildung 2-11 Trenngradkurve für Draht- und PU-Gewebe bei gleicher spez. Siebbelastung von 5,5 t/(m³h)

Weiterhin wurden die beiden Antriebstraversen zur Anregung des Siebgewebes mit verschiedenen Frequenzen betrieben. Hierbei konnte die Motordrehzahl des Unwuchtmotors für jede Antriebstraverse bis auf maximal 3600 Umdrehungen pro Minute (UpM) verstellt werden. Die besten Ergebnisse wurden bei der niedrigsten Motordrehzahl von 2000 UpM ermittelt. Mit Anhebung der Anregungsfrequenz nahm der Feingutaustrag deutlich ab (vgl. **Abbildung 2-12**). Die unterschiedlichen Frequenzen beeinflussten kaum die Rohmehlqualität (Spritzkorn). Dennoch waren mit den höchsten Durchgangswerten sogar die geringsten Spritzkornanteile verknüpft.

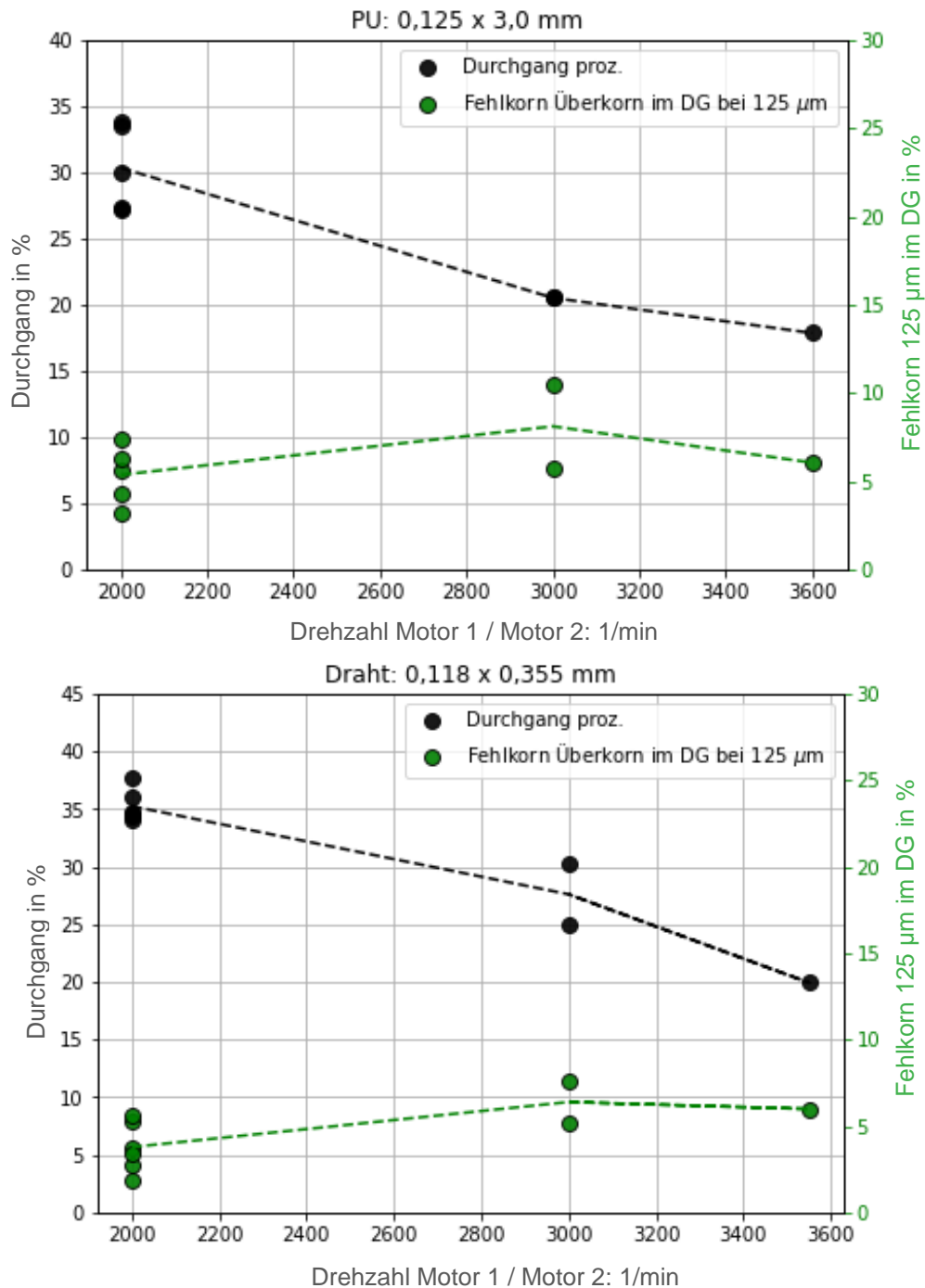


Abbildung 2-12 Durchgang und Fehl Kornanteil 125 µm in Abhängigkeit von Anregungsdrehzahl (für beide Motoren gleich). Oben: Drahtgewebe. Unten: PU-Gewebe.

Einige Versuchseinstellungen erfolgten mit unterschiedlichen Drehzahlvorgaben an der oberen und der unteren Antriebstraverse. In diesen Fällen verhielt sich die Siebanlage ähnlich zum Betrieb mit einheitlichen Drehzahlen, wobei die höhere Drehzahl immer maßgeblich die Versuchsergebnisse bestimmte. Dementsprechend führte dies im untersuchten Drehzahlbereich 2000 bis 3600 UpM immer zu einer Verschlechterung gegenüber dem Betrieb mit gleicher Drehzahl von 2000 UpM an beiden Antriebstraversen. Eine Anregung des Siebgewebes mit unterschiedlichen Frequenzen im oberen und unteren Siebbereich ist bei der getesteten Siebmaschine nicht vorteilhaft.

2.4.1 Demonstrationsperiode (AP2)

Nach Abschluss der Batch-Versuche wurde der Langzeit-Betrieb der Siebversuchsanlage vorbereitet. Bereits bei der Installation der Siebmaschine im Technikum von thyssenkrupp wurde berücksichtigt, dass ein Dauerbetrieb mit einem kontinuierlichen Materialumlauf möglich ist. Dies ist eine Voraussetzung für die Verschleißuntersuchung der Siebgewebe. Insbesondere für die verwendeten PU-Gewebe gibt es für das untersuchte Siebmaterial kaum Informationen zu den erreichbaren Standzeiten, die wiederum für eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit unerlässlich sind. Aus diesem Grund wurde mit einem PU-Gewebe ein Dauerversuch gestartet. Dabei wurden die optimalen Betriebsparameter (Siebneigung, Aufgabemenge und Anregungsfrequenz) aus der vorhergehenden Parameterstudie berücksichtigt.

Eine Herausforderung beim Dauerbetrieb war die Entmischung des Siebgutes und die daraus resultierenden Transportprobleme. Im kontinuierlichen Betrieb der Siebanlage kam es wiederholt zu Verstopfungen in den Rohrleitungen zum Umlaufbecherwerk, auf dem Siebdeck und im Bereich der Siebaufgabe (vgl. **Abbildung 2-13**). Dies ist auf die Entmischung bzw. unzureichende Homogenisierung des Siebguts während des kontinuierlichen Kreislaufbetriebs zurückzuführen. Die anschließende Montage von Klopf- und Belüftungseinrichtungen führte zu einer deutlichen Verbesserung. Zudem war eine permanente manuelle Belüftung des Aufgabebunkers mit Hilfe von Belüftungslanzen erforderlich, um einen störungsfreien und konstanten Betrieb zu ermöglichen.



Abbildung 2-13 Gestörter Materialtransport im Umlaufbetrieb. Links: Materialzufuhr zum Umlaufbecherwerk. Mitte: Verstopfte Überlaufleitung. Rechts: Überfülltes Sieb aufgrund zugesetzter Überlaufleitung.

Im Zeitraum von Oktober 2021 bis März 2022 wurde das Sieb insgesamt ca. 115 Betriebsstunden im stabilen Betrieb gefahren und regelmäßig der Verschleiß des Siebgewebes bestimmt (vgl. **Abbildung 2-14**).

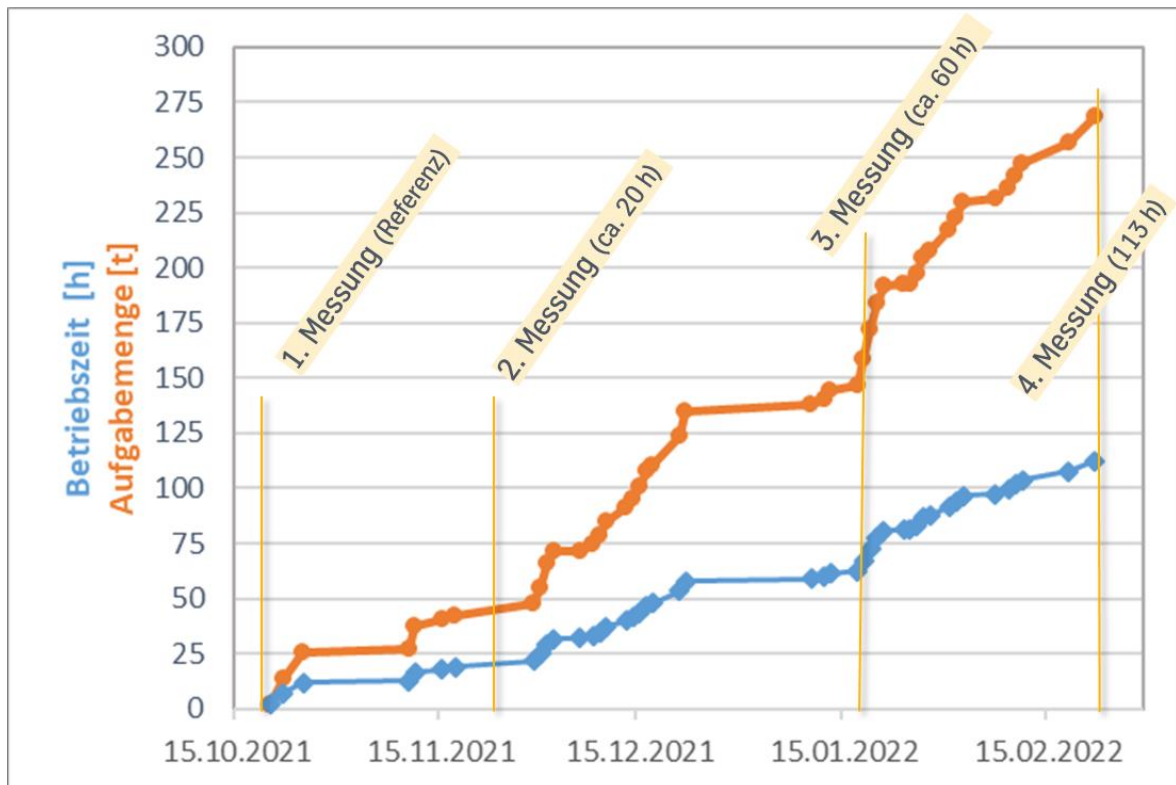


Abbildung 2-14 Betriebsdauer der Kreislaufversuche und Zeitpunkte der Verschleißmessungen.

Hierbei wurde das PU-Sieb 0,125 x 3,0 mm mit einer Siebneigung von 30°, einer Sieb-Anregungsdrehzahl von 2000 UpM und mit einer permanent hohen Aufgabemenge von 2,5 t/h betrieben.

Zur Messung des Verschleißes wurden mehrere Messgeräte und Messmethoden bewertet. Mit dem Ziel bei möglichst hoher Messgenauigkeit den Verschleißfortschritt des Siebgewebes zu bestimmen, fiel die Entscheidung auf die Nutzung eines Mikroskops mit digitaler Bildverarbeitung. Auf dem Siebbelag wurde im oberen, mittleren und unteren Siebabschnitt jeweils ein Messpunkt markiert, so dass mit dem hochauflösenden Mikroskop immer die gleichen Bereiche des Siebbelags vermessen wurden. Die **Abbildung 2-15** zeigt das Lichtmikroskop und die Anordnung der Messpunkte auf dem Siebbelag.

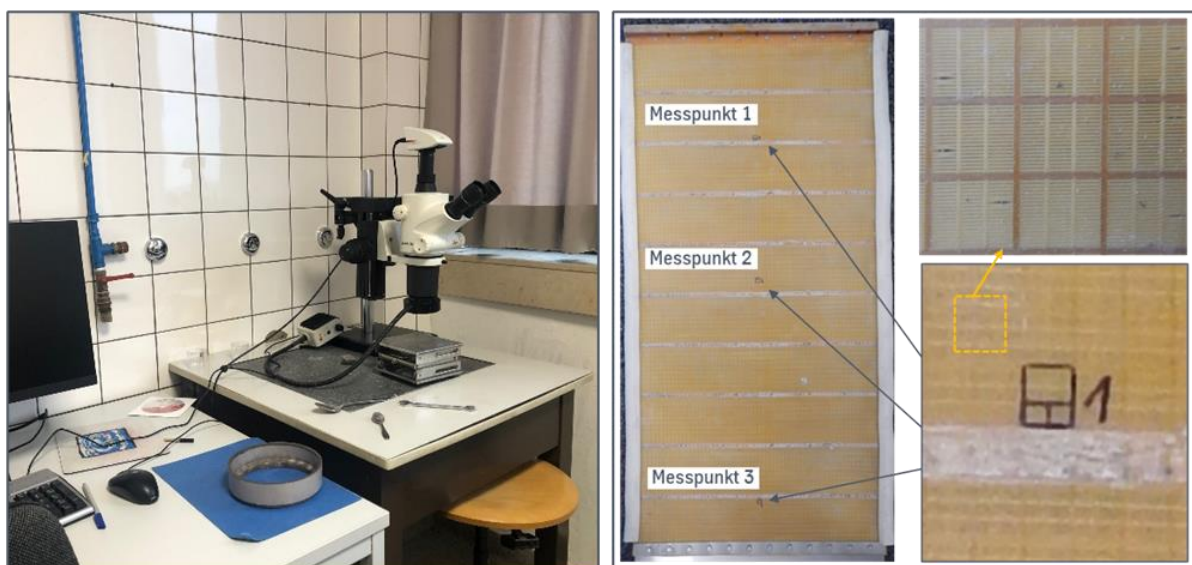


Abbildung 2-15 Verschleißmessung des Siebgewebes. **Links:** Lichtmikroskop. **Rechts:** Siebgewebe mit Kennzeichnung der Messpunkte inkl. vergrößerte Darstellung einzelner Siebbereiche

Nach Ausbau und Reinigung des PU-Siebbelags wurden die Messpunkte detailliert im Labor analysiert. Die Aufnahme eines Messpunktes beinhaltet die Vermessung von mindestens 10 Sieblamellen, bei denen pro Lamelle mehrfach die Stegbreite bestimmt wurde. Die **Abbildung 2-16** zeigt die mikrometergenaue Bestimmung des Materialverlustes an einem Messpunkt durch mehr als 100 Einzelmessungen.

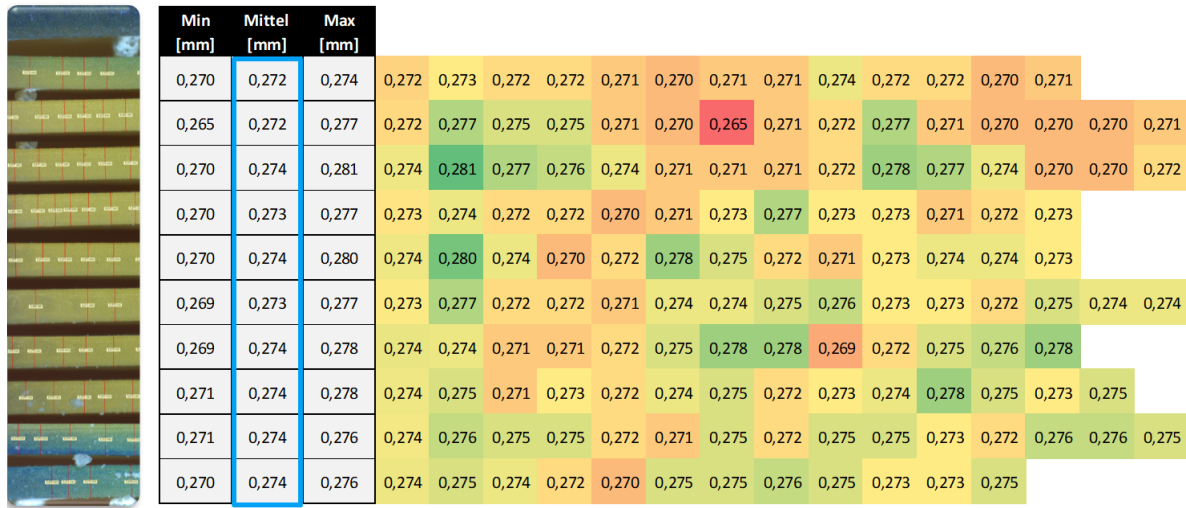


Abbildung 2-16 Messung der Lamellendicke des PU-Siebbelags an einem Messpunkt.

Die **Tabelle 2-4** gibt die ermittelten Verschleißraten wieder, die auf den Medianwerten der Messreihen basieren. Die rot gekennzeichneten Werte zeigen eine scheinbare Zunahme der Stegbreite an. Dies folgt aus der Messtoleranz und unterstreicht den sehr geringen Verschleiß an der Messstellen.

Generell ist der Verschleiß des Siebgewebes im oberen Bereich des Siebes (Aufgabeseite) trotz der höchsten Materialbelastung kaum nachweisbar und nimmt bis zum Siebüberlauf kontinuierlich zu. Erklären lässt sich dies mit dem Effekt, das gröbere Partikel im oberen Siebbereich von Feingut getragen werden und kaum in Berührung mit dem Siebgewebe kommen. Im weiteren Siebverlauf steigt die Kontaktwahrscheinlichkeit von größeren Partikeln mit dem Siebgewebe, so dass dadurch auch die Verschleißrate ansteigt. In den Mikroskopaufnahmen wurde dies durch eine erhöhte Anzahl an Klemmkorn (zwischen zwei Lamellen verklemmte Partikel) bestätigt.

Tabelle 2-4 Ermittelter Verschleiß für die Messpunkte 1-3

		Betriebszeit		
		Referenz	28 Stunden	80 Stunden
Verschleißrate	Messpunkt 1 (Aufgabeseite)	0 µm (Lamellendicke: 272,3 µm)	-0,3 µm (Lamellendicke: 272,0 µm)	+0,2 µm (Lamellendicke: 272,5 µm)
	Messpunkt 2 (Siebmitte)	0 µm (Lamellendicke: 277,5 µm)	+ 0,5 µm (Lamellendicke: 278,0 µm)	- 1,1 µm (Lamellendicke: 276,6 µm)
	Messpunkt 3 (Siebüberlauf)	0 µm (Lamellendicke: 263,6 µm)	- 0,4 µm (Lamellendicke: 263,2 µm)	-3,3 µm (Lamellendicke: 260,2 µm)

Die dargestellten Verschleißraten beziehen sich auf eine Betriebsdauer von 80 Stunden, bei der das Polyurethan-Siebgewebe mit einer Aufgabemenge von 2,5 t/h beaufschlagt wurde. Unter der Annahme, dass sich die Breite der Sieblamellen ausgehend von 275 µm bis auf 150 µm im Dauerbetrieb abnutzen kann, erfolgte eine Standzeitprognose des getesteten Siebgewebes (vgl. **Abbildung 2-17**). Damit errechnet sich eine Standzeit von ca. 9000 Betriebsstunden im mittleren Bereich des Siebgewebes und ca. 3000 Stunden im unteren Bereich des Siebgewebes.

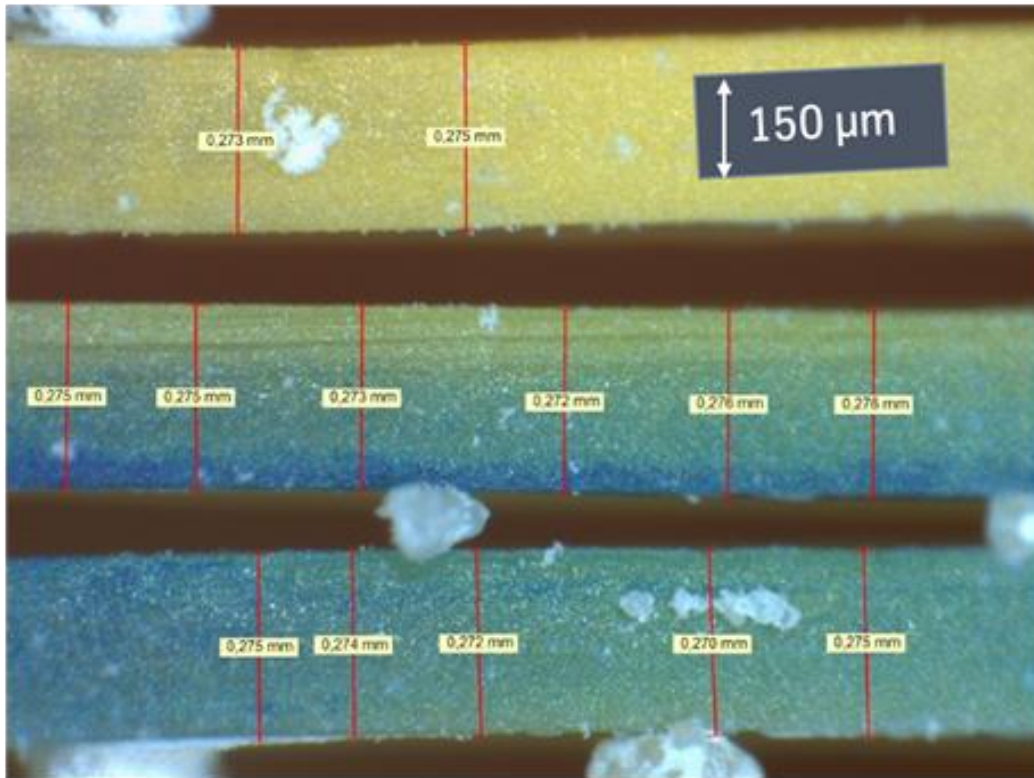


Abbildung 2-17 Lamellenbreite mit Markierung der minimalen Breite (Ende Lebensdauer)

In der industriellen Ausführung der Siebmaschine „Haver Niagara Fine Line“ besteht die Siebfläche aus drei Segmenten, die je nach Verschleißzustand unabhängig voneinander ausgetauscht werden können. Damit wird ein Potential von bis zu 6000 Betriebsstunden aufgezeigt (basierend auf einer gemittelten Standzeit), sofern die Versuchsergebnisse auf die Industriesiebmaschine direkt übertragbar sind.

2.5 Semi-kontinuierlicher Mahlkreislauf (AP3)

Im dritten Arbeitspaket wurden Klassierversuche mit insgesamt vier verschiedenen (davon drei synthetisch hergestellten) Rohmaterialien durchgeführt, die aus den vier Einzelkomponenten Kalkstein, Ton, Quarz sowie Korund als Korrekturstoff zusammengemischt wurden. Die untersuchten Rohmehlvariationen sind in **Tabelle 2-5** aufgeführt. Der Korund dient dabei als Korrekturkomponente für den Aluminiumgehalt im Rohmehl.

Tabelle 2-5 Untersuchte Rohmehlvariationen*

	Mergel+Kalkstein	Kalkstein	Quarz	Ton
Rohmehl 1	Industrie			
Rohmehl 2		grob (<2-3 mm)	grob (< 1mm)	grob (< 4mm)
Rohmehl 3		fein (< 1mm)	grob (< 1mm)	grob (< 4mm)
Rohmehl 4		grob (<2-3mm)	fein (<800 µm)	grob (< 4mm)

* (mit Korund als Korrekturkomponente < 1 %)

Für die Vorbereitung der Klassierversuche wurde danach im ersten Schritt eine Teilmenge des vorhandenen Kalksteinmergels eines deutschen Zementherstellers getrocknet. Gleichfalls wurden der Kalkstein sowie der Ton getrocknet. Im nächsten Schritt wurden die Komponenten Kalksteinmergel und Kalkstein sowie Ton auf eine maximale Aufgabekorngröße von circa 3 mm in einem Walzenbrecher vorgebrochen. Im Anschluss daran wurde das Ausgangsmaterial auf eine spezifische Zwischenproduktfeinheit in Anlehnung an das industrielle Zwischenprodukt aus dem Zementwerk für die nachfolgenden Sieb- und Sichtversuche aufgemahlen. Als maßgebliche Zielgröße der Zwischenproduktfeinheit wurden die für Rohmehl charakteristischen Siebrückstände auf 90 µm und 200 µm genutzt.

In der nachfolgenden **Abbildung 2-18** ist schematisch die Vorgehensweise für die Vorbereitung und Durchführung der Klassierversuche dargestellt. Diese Vorgehensweise wurde für die kleintechnische Umsetzung eines semi-kontinuierlichen Mahlkreislaufs im Technikum des VDZ genutzt. Die Versuchsschritte zwei bis fünf wurden in vier aufeinander folgenden Durchgängen für die Herstellung der drei unterschiedlichen synthetischen Rohmehle (Rohmehle 2-4) in Anlehnung an einen geschlossenen, industriellen Mahlkreislauf im semi-kontinuierlichen Verfahren wiederholt. Die Zielsetzung der wiederholten Versuchsschritte bestand in der Einhaltung der chemischen Zusammensetzung der final im letzten Versuchsdurchgang hergestellten Rohmehle gegenüber der Ausgangsmaterialmischung. Auf diese Weise sollte eine Anreicherung der verhältnismäßig schwer mahlbaren Einzelkomponente Quarz im Rückgut des Klassierprozess (Siebüberlauf, Sichtergrobgut) durch die wiederholte Aufmahlung des Grobmaterials zusammen mit Frischmaterial auf der Batch-Kugelmühle reduziert werden.

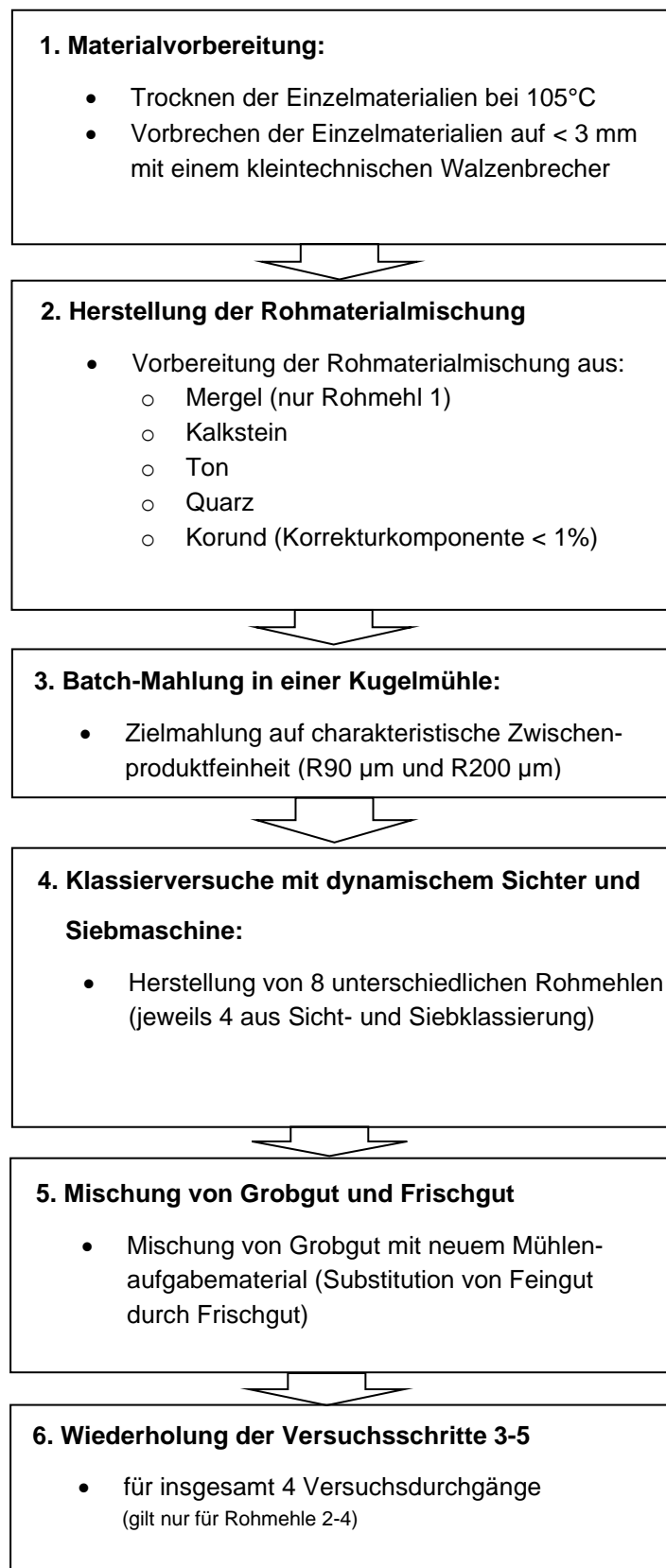
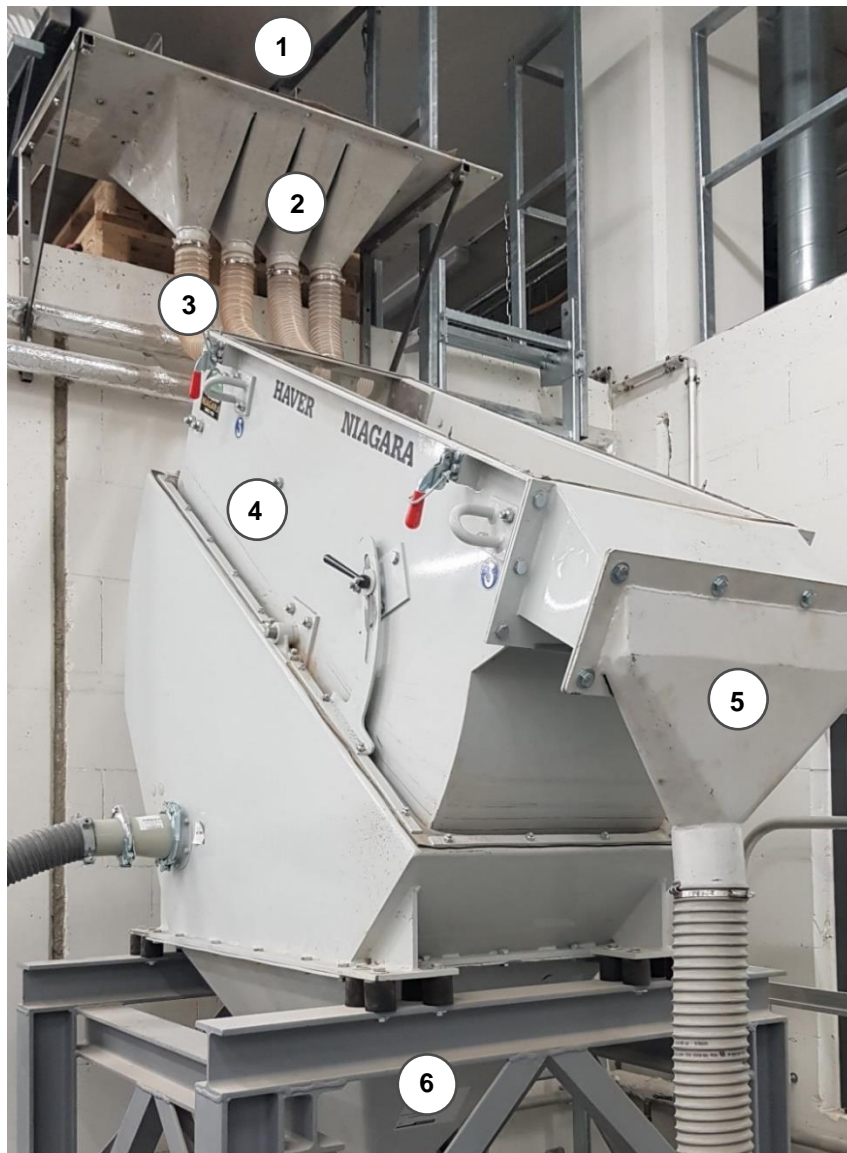


Abbildung 2-18 Schematische Darstellung der Vorgehensweise für die durchgeführten Klassiersversuche im VDZ-Technikum

2.5.1 Versuchsaufbau und -ablauf der Klassierversuche

In **Abbildung 2-19** ist der Aufbau der für die Versuchsdurchführung genutzten Vibrations-Siebmaschine im VDZ-Technikum zu sehen. Die Materialaufgabe auf die geneigte Vibrations-Siebmaschine erfolgt über einen darüber angeordneten Aufgabebunker mit einer Schwingförderrinne unterhalb des Bunkers. Im Anschluss an die Schwingförderrinne fällt das Material in einen Aufgabetrichter und wird über vier flexibel angebrachte Kunststoffschläuche der Siebmaschine zugeführt. Im Einlaufbereich der Siebmaschine befindet sich ein Metallblech mit einem Staurand zur Vergleichmäßigung der Materialaufgabe, bevor das Material auf das zur Vibration angeregte darunter liegende Siebgewebe fällt. Das längs eingespannte Siebgewebe wird von zwei unabhängigen und mit einem Frequenzumrichter drehzahlregelbaren Unwuchtmotoren mittels Schlagleisten direkt in Schwingung versetzt. Es handelt sich folglich um eine für die Feinsiebung geeignete direkt erregte Siebmaschine, bei welcher das Siebgehäuse nicht mitschwingt. Die Neigung des Siebgewebes ermöglicht einen Materialtransport über die Siebfläche bis zum Auslauftrichter für den Siebüberlauf. Das abgesiebte Material - der Siebdurchgang - wird in einem Behälter unter dem darunter befindlichen Durchgangstrichter aufgefangen, während das Siebgrobgut – der Siebüberlauf – in einem weiteren Behälter aufgefangen wurde. Über die seitlich angeschlossene Absaugung erfolgt die Entstaubung der Siebmaschine. Auf diese Weise wird ein Unterdruck unter dem Siebgewebe aufgebaut, der in Abhängigkeit der Materialfeinheit auch eine siebunterstützende Wirkung für eine erhöhte Feingutausbringung im Bereich der Feinstabsiebung ausüben kann.



- 1 Aufgabebunker mit Schwingförderrinne
- 2 Aufgabetrichter
- 3 PU-Schläuche für Materialzuführung
- 4 Entstaubung
- 5 Siebüberlauf
- 6 Siebdurchgang

Abbildung 2-19

Siebmaschinenaufbau im VDZ-Technikum

In **Abbildung 2-20** ist das auf der Siebmaschine eingesetzte längs gespannte Polyurethan-Siebgewebe mit einer Maschenweite von $125\ \mu\text{m} \times 3\ \text{mm}$ sowie im oberen Bereich das Aufgabebloch mit Staurand zu sehen. An den Außenseiten befinden sich jeweils Abdichtgummilippen zur Vermeidung eines Grobkornbypass in den Siebdurchgang.

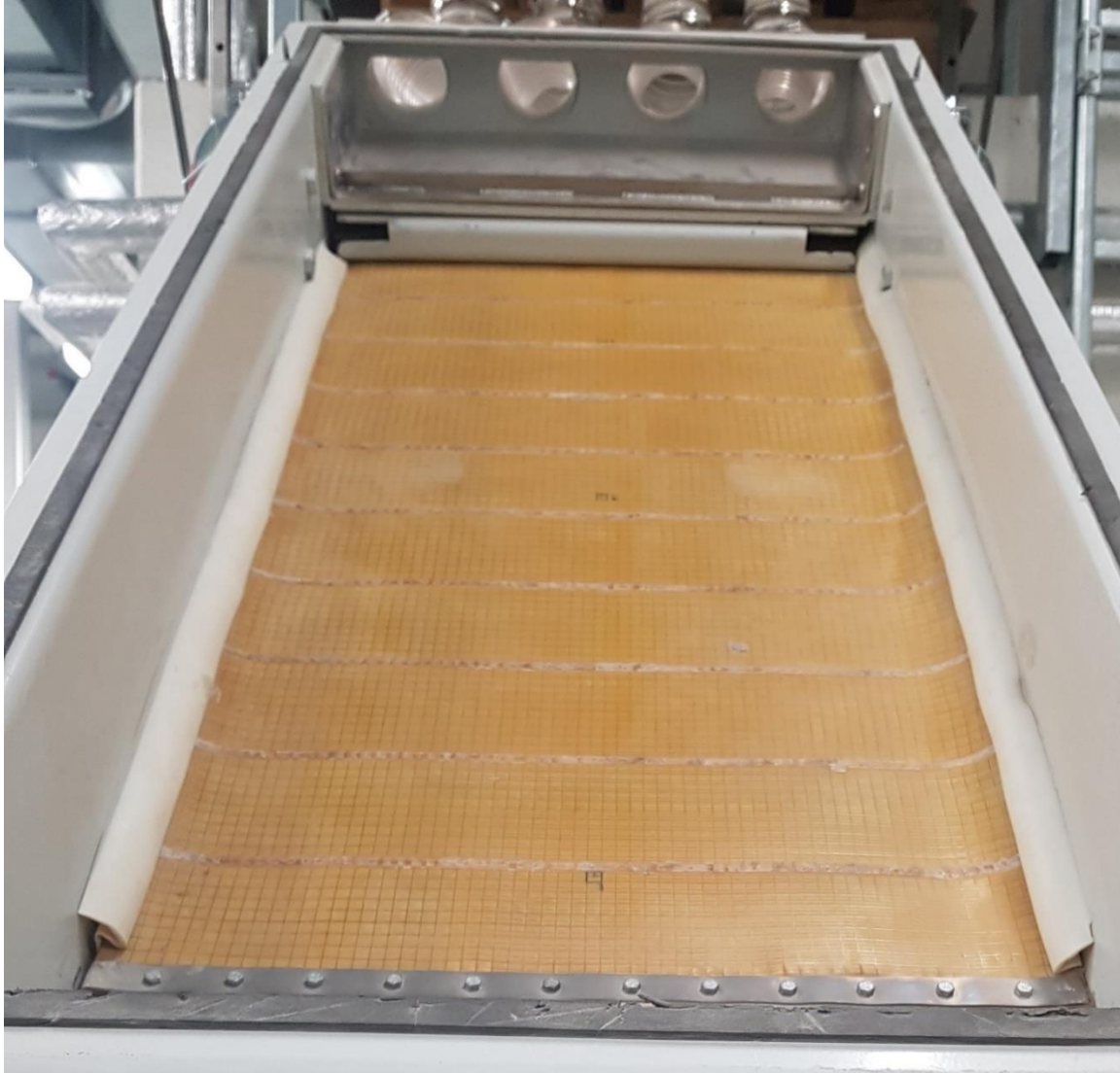


Abbildung 2-20 Eingesetztes PU-Siebgewebe mit einer Langmasche ($0,125\ \mu\text{m} \times 3\ \text{mm}$)

Abbildung 2-21 zeigt nachfolgend den Aufbau, der für die Sichtversuche genutzten kleintechnischen Umlaufmahlanlage des VDZ. Für die Materialaufgabe wurde analog zu den Siebversuchen die gleiche Schwingförderrinne genutzt. Das Zwischenprodukt wurde im Anschluss über einen Rohrkettenförderer auf den dynamischen Stabkorbsichter (dritte Generation) aufgegeben. Das Sichterfeingut wurde nachfolgend in einem Zyklon abgeschieden, sowie das Sichtergrubgut nach der Rückgutbandwaage direkt aufgefangen.

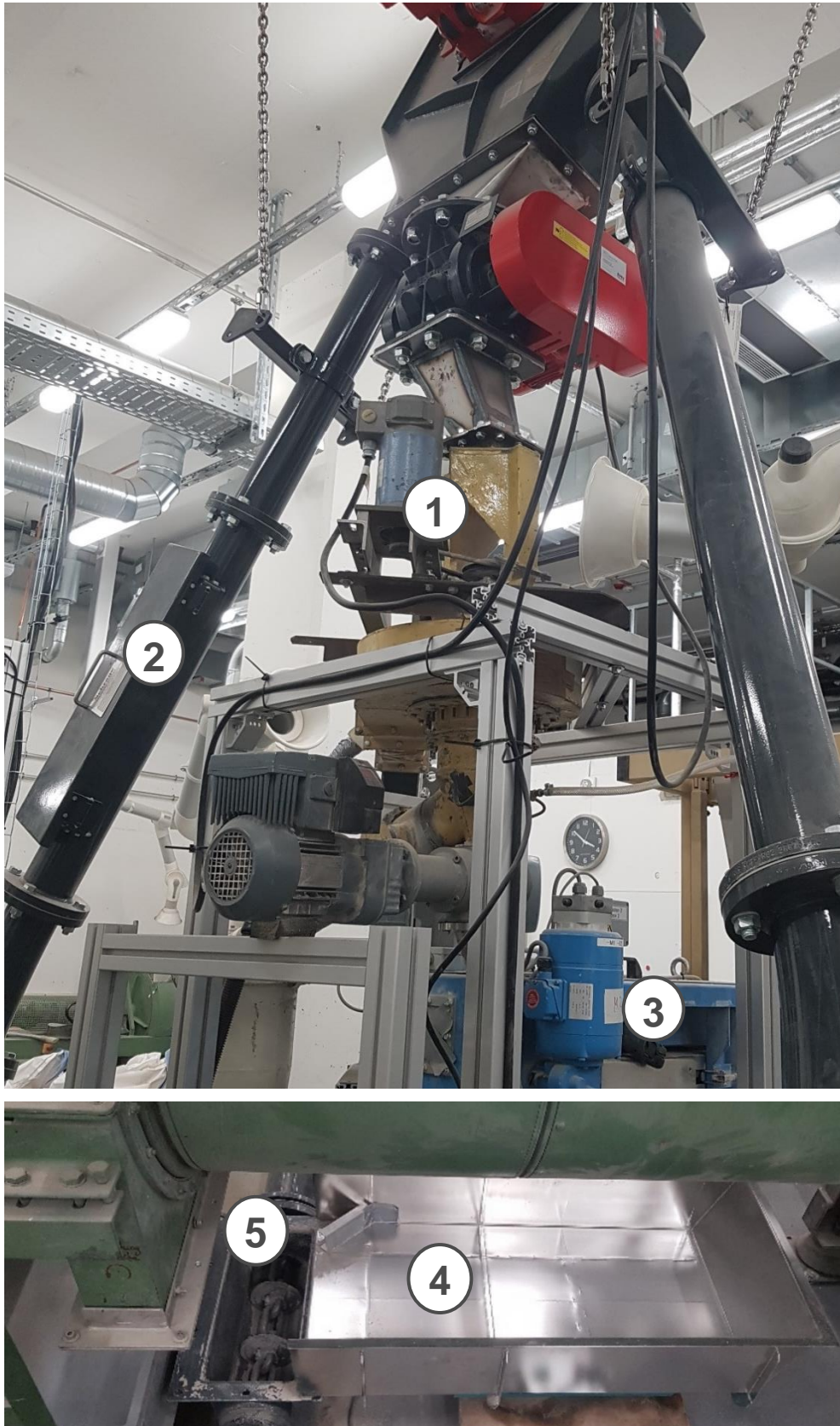


Abbildung 2-21 Oben: Rohrkettenförderer mit Materialaufgabe auf dyn. Sichter; (1) Stabkorbsichter, (2) Rohrkettenförderer, (3) Grobgutbandwaage
unten: Materialaufgabe auf Rohrkettenförderer (4) über Schwingförderrinne (4) für Sichtversuche

2.5.2 Ergebnisse der Klassierversuche

In **Tabelle 2-6** sind die Versuchseinstellungen der Siebversuche aufgeführt. Die Antriebsdrehzahl der beiden Unwuchtmotoren und folglich die Anregungsfrequenz des Siebgewebes kann hierbei separat über zwei vorhandene Frequenzumrichter gesteuert werden und wurde auf eine Drehzahl von 2.000 Umdrehungen pro Minute eingestellt, welche bereits bei den vorangegangenen Siebversuchen im zweiten Arbeitspaket als Optimum im Hinblick auf die erzielbare maximale Feingutausbringung identifiziert wurde. Die spezifische Siebflächenbeladung wurde auf einen Mittelwert von 5 t/hm² eingestellt, wobei hier in Abhängigkeit der Materialfördergeschwindigkeit und Materialschichthöhe auf der Schwingförderrinne geringe Unterschiede der spezifischen Beladung zu verzeichnen sind. Bei der eingestellten Filterfrequenz von 20 Hz für die Entstaubung der Siebmaschine unterhalb des Siebgewebes wurde ein vergleichsweise geringer Unterdruck von 1 mbar in der Abluft-Rohrleitung gemessen. Die Versuchseinstellungen aller durchgeführten Siebversuche sind in im Anhang in **Tabelle B- 1**, **Tabelle B- 2**, **Tabelle B- 3** sowie **Tabelle B- 4** zusammengefasst.

Tabelle 2-6 Versuchseinstellungen Siebversuche (finaler Versuchsschritt)

Rohmehl	RM1	RM2	RM3	RM4
Einstellung Schwingförderrinne [%]	73	70	75	70
Antriebsdrehzahl (Antrieb 1+2) [UpM]	2.000	2.000	2.000	2.000
Filterfrequenz Entstaubung [Hz]	20	20	20	20
Versuchsdauer [s]	107	115	115	116
Aufgabe [t/hm²]	5.3	4.6	4.9	4.9

In **Tabelle 2-7** sind darüber hinaus die Versuchseinstellungen der Sichtversuche im finalen Versuchsschritt (Rohmehle 2 bis 4) sowie für Rohmehl 1 (industrielles Referenzrohmehl) dargestellt. Während der Sichtluftvolumenstrom bei allen Versuchen konstant gehalten wurde, wurde die Sichterzahl zur Regelung der Produktfeinheit geringfügig variiert. Darüber hinaus wurde die Fördergeschwindigkeit der Schwingförderrinne jeweils bei unterschiedlichen Rohmehlen geringfügig angepasst. Insgesamt wurden für die kleintechnischen Sichtversuche im Verhältnis zu industriellen Windsichtern deutlich geringere spezifische Aufgabebeladungen der Sichtluft (in kg/m³) eingestellt, um die für Rohmehl charakteristischen Trennschnitte und Produktfeinheiten auf der Technikumsanlage zu erreichen. Die Versuchseinstellungen aller Sichtversuche sind in **Tabelle B- 5**, **Tabelle B- 6**, **Tabelle B- 7** und **Tabelle B- 8** zusammengefasst.

Tabelle 2-7 Versuchseinstellungen Sichtversuche (finaler Versuchsschritt)

Rohmehl	RM1	RM2	RM3	RM4
Einstellung Schwingförderrinne [%]	11	11	14	17,5
Einstellung Sichter [UpM]	296	290	302	302
Umfangsgeschwindigkeit Stabkorb [m/s]	2.3	2.3	2.4	2.4
Volumenstrom Ventilator [m³/h]	389	389	389	389
Versuchsdauer [min]	71	81	71	55
Aufgabe [kg/h]	30	26	30	38

In **Abbildung 2-24** sind die resultierenden Korngrößenverteilungen der mittels Sieb- und Sichtklassierung hergestellten Rohmehle im Vergleich dargestellt. Die Trennkorngröße kennzeichnet diejenige Partikelgröße, bei welcher die Wahrscheinlichkeit im Klassierprozess jeweils ins Grob- bzw. Feingut zu gelangen, jeweils 50 % entspricht. Diese ist bei der Sichtklassierung gegenüber der Siebklassierung reduziert und liegt bei der Sichtklassierung im Mittel bei 60 µm, während sie bei der Siebklassierung im Mittel bei 103 µm liegt (vgl. **Abbildung 2-22** und **Abbildung 2-23**). Eine Ursache hierfür ist insbesondere die geringere Trennschärfe und die daraus resultierenden breitere Korngrößenverteilung bei der Sichtklassierung. Die charakteristischen Siebrückstände von 90 µm und insbesondere 200 µm als Zielwerte bei der Rohmahlung werden dadurch maßgeblich beeinflusst.

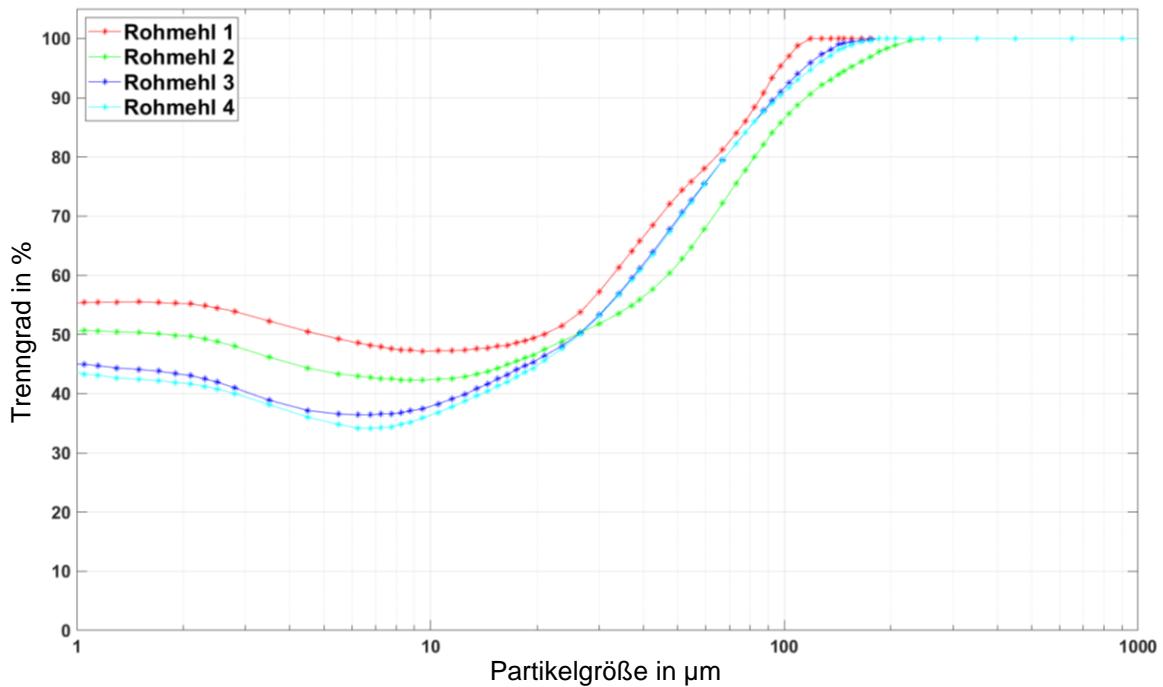


Abbildung 2-22 Trenngradkurven Sichtversuche (finaler Versuchsschritt)

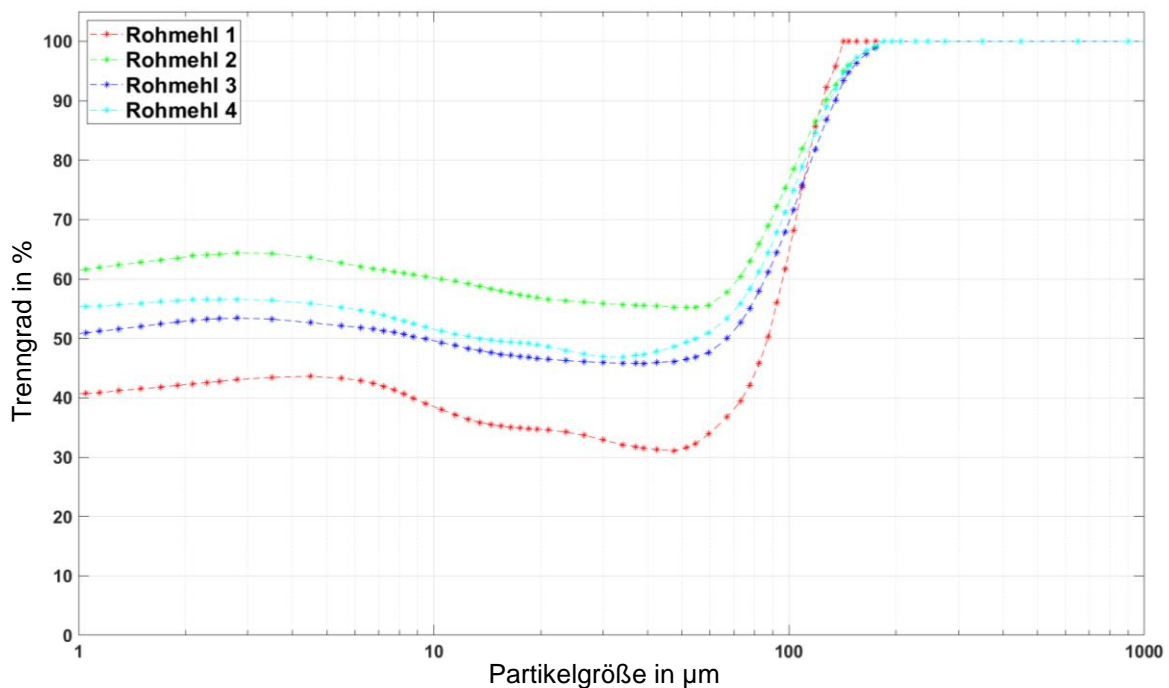


Abbildung 2-23 Trenngradkurven Siebversuche (finaler Versuchsschritt)

Allgemein zeigt sich bei Betrachtung der Korngrößenverteilungen die Tendenz, dass der Lageparameter als Maß für die Feinheit der mittels Sichtklassierung hergestellten Rohmehle (rote Kurven) insgesamt im Verhältnis zu den gesiebten Rohmehlen (blaue Kurven) geringer ist. Dieser Parameter, der die Durchgangssumme bei 63,2 Vol.-% angibt, liegt für die Sichtversuche durchschnittlich bei 19 µm, während er bei den Siebversuchen bei 27 µm im Mittel liegt.

In **Tabelle 2-8** sind die entsprechenden Ergebnisse aus der Luftstrahlsiebung für die einzelnen Proben angegeben. Die Ergebnisse der Luftstrahlsiebanalysen können hierbei jedoch nicht direkt mit den Ergebnissen aus der Laserbeugungsspektroskopie in **Abbildung 2-24** aufgrund der zugrunde liegenden unterschiedlichen Messverfahren verglichen werden. Die Luftstrahlsiebung führt im Allgemeinen zu etwas geringeren Rückständen als die Laserbeugung und damit zu einem verhältnismäßig feineren Produkt, da hier das Kleinstkorn für das Messergebnis maßgeblich ist.

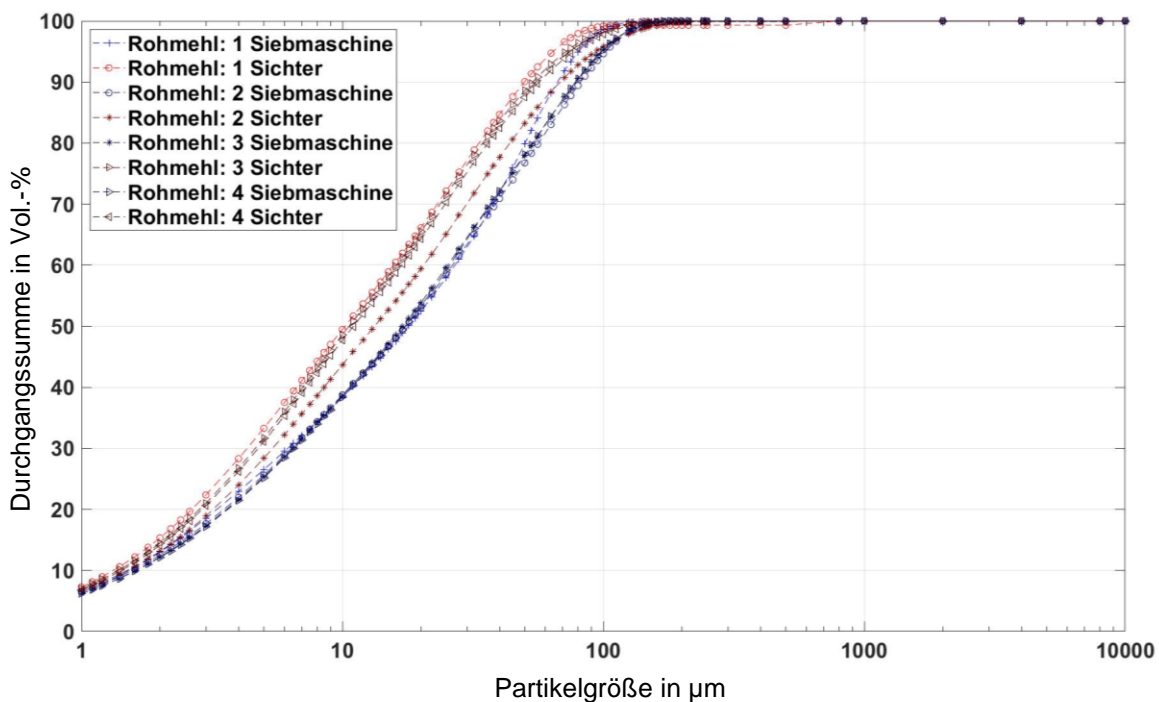


Abbildung 2-24 Vgl. der Produktkorngrößenverteilungen der finalen Klassierversuche

Ein Vergleich der in **Tabelle 2-8** dargestellten Siebrückstände zeigt die Unterschiede im Grobkornbereich (>90 µm und >200µm) zwischen Sieb- und Sichtklassierung. Wie zu erwarten weisen die ermittelten Sieb-Rückstandswerte auf einen verringerten Grobkornanteil (>200 µm) bei der Siebung hin. Es wird deutlich, dass die Siebung zu einer engeren Korngrößenverteilung führt, was sich wiederum positiv auf die Homogenität des Rohmehls auswirkt.

Tabelle 2-8 Gegenüberstellung der Siebrückstände der hergestellten Rohmehle aus Sicht- und Siebklassierung*

Rohmehl	Sichtklassierung		Siebklassierung	
	R90 µm	R200 µm	R90 µm	R200 µm
1	12,8	5,5	5,7	0,3
2	11,9	2,4	8,6	0,2
3	10,9	2,7	6,6	0,2
4	14,2	4,3	8,8	0,1

* Ergebnisse mittels Luftstrahlsiebung bestimmt

Für die granulometrische Charakterisierung und den Vergleich der Klassiermethoden wurden neben den Produktkorngrößenverteilungen die Korngrößenverteilungen von Aufgabe- und Grobgut mittels Lasergranulometer bestimmt. Diese ermöglichen neben den Siebanalysen eine Bewertung der Klassiereffizienz der Sieb- und Sichtklassierung sowie der daraus resultierenden Umlauffaktoren der Klassiermethode sowie der möglichen Feingutausbringung. Die Korngrößenverteilungen sind in **Abbildung 2-25** sowie **Abbildung 2-26** für die ersten beiden untersuchten Rohmehle im finalen Versuchsschritt exemplarisch dargestellt. Im Anhang in **Abbildung A- 1** und in **Abbildung A- 2** sind die Ergebnisse für die Rohmehle 3 und 4 ergänzend abgebildet. Im Gegensatz zu den synthetischen Rohmehlen 2 bis 4 wurde für das industrielle Rohmehl nur ein Versuchsdurchgang durchgeführt, da es sich hierbei bereits um eine Rohmaterialmischung ohne Einzelbestandteile mit unterschiedlicher Mahlbarkeit handelt.

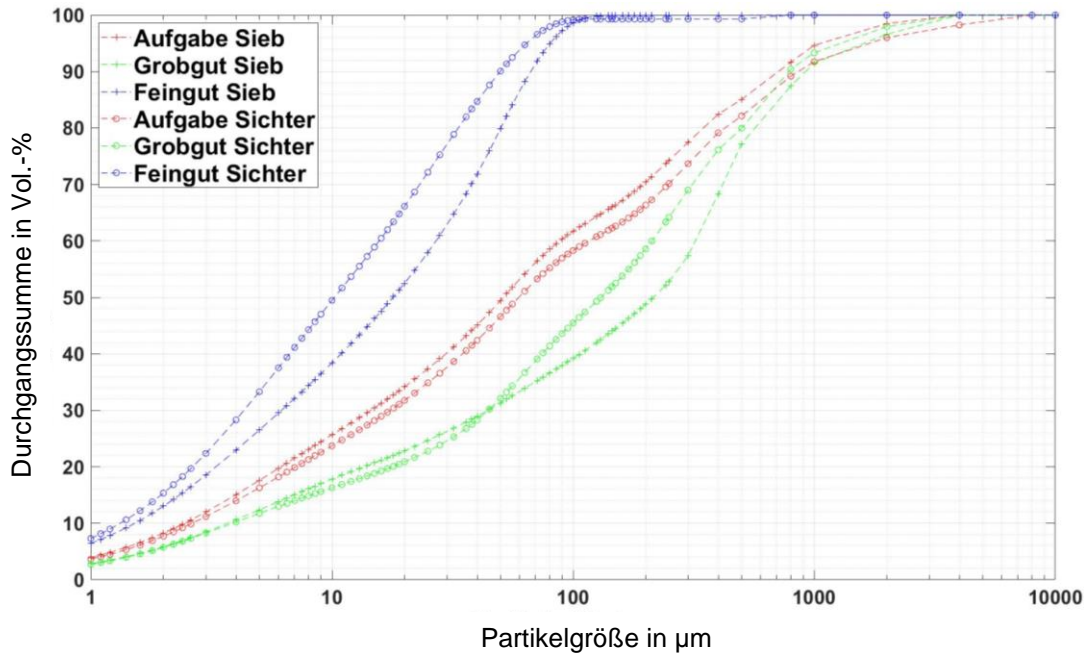


Abbildung 2-25 Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen aus Sieb- und Sichtklassierung Rohmehl 1

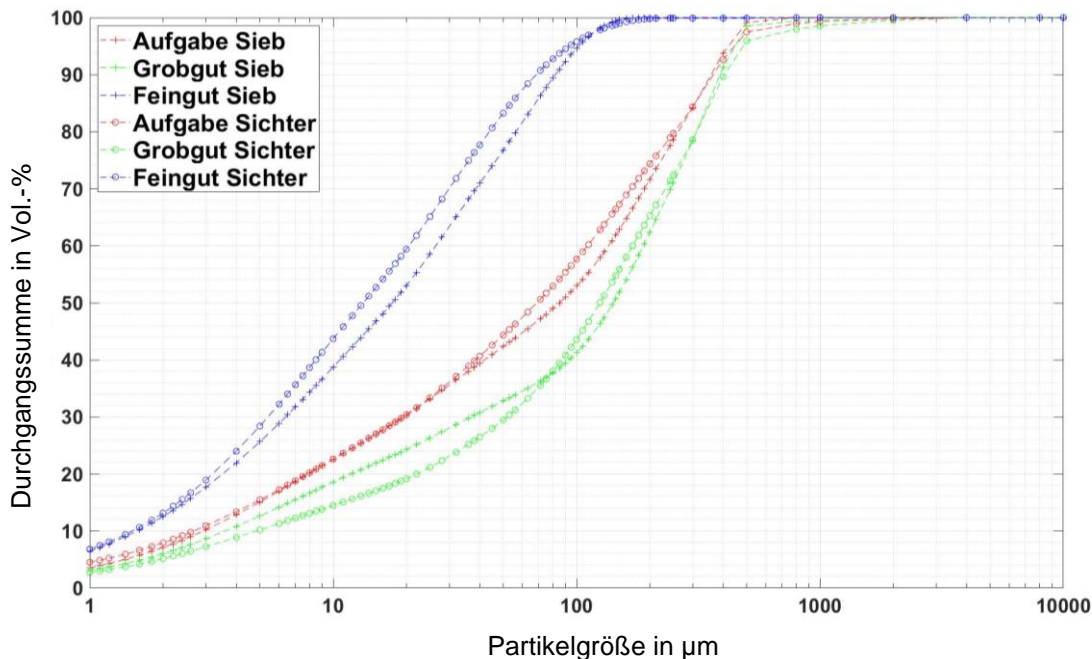


Abbildung 2-26 Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen aus Sieb- und Sichtklassierung Rohmehl 2 (finaler Versuchsschritt)

Abbildung 2-27 zeigt einen Vergleich der ermittelten Klassiereffizienz für alle im VDZ-Technikum hergestellten Rohmehle. Die Definition der Klassiereffizienz bezieht hierbei sowohl Fehlunterkorn im Grobgut als auch Fehlüberkorn im Feingut mit ein. Die Klassiereffizienz wurde hierbei von der Definition des Siebgütegrads abgeleitet [2]. Es gibt jedoch weitere Definitionen dieser Kennzahl, welche nur die Unterkornausbringung berücksichtigen [7]. Ein Vergleich der Ergebnisse bei veränderter Berechnung der Klassiereffizienz zeigt lediglich geringfügige Unterschiede von maximal 2 %. Die jeweiligen Ergebnisse in **Abbildung 2-27** beziehen sich jeweils auf den ersten und letzten Versuchsdurchgang von insgesamt vier Versuchsdurchgängen bei den synthetischen Rohmehlen sowie auf den ersten Versuchsschritt bei dem industriellen Rohmehl (vgl. auch **Abbildung 2-18**). Sie wurden mit **Formel 1** anhand von Analysen mit einem Cilas-Lasergranulometer berechnet. Als maßgebliche Partikelgröße für die Berechnung der Klassiereffizienz wurde 125 µm verwendet, da die Partikelfraktion zwischen 0 und 125 µm das gesamte Rohmehl hinreichend genau charakterisiert.

$$\eta_S = \frac{(F_{F,A} - F_{F,G}) * (F_{F,F} - F_{F,A})}{(1 - F_{F,A}) * (F_{F,F} - F_{F,G}) * F_{F,A}}$$

Formel 1

$F_{F,A}$: Durchgangssumme <125 µm im Aufgabegut

$F_{F,G}$: Durchgangssumme <125 µm im Grobgut

$F_{F,F}$: Durchgangssumme <125 µm im Feingut

Die Ergebnisse in **Abbildung 2-27** zeigen deutliche Unterschiede im ersten Versuchsdurchgang, sowie verringerte Unterschiede im letzten Versuchsdurchgang zwischen Sicht- und Siebklassierung. Die ersichtliche Abnahme der ermittelten Klassiereffizienz bei der Siebklassierung ist auf die zunehmende Materialagglomeration bei der Durchführung nachfolgender Versuchsschritte durch die Wiederholung der einzelnen Aufbereitungsschritte in der Kugelmühle und die anschließende Homogenisierung in einem Rhönrad zurückzuführen. Insbesondere die im Rohmaterial eingesetzte Tonkomponente begünstigt aufgrund ihrer geringen Mahlbarkeit diesen Prozess. Dieser Effekt ist vermutlich auf die Mehrfachnutzung des Versuchsmaterials zurückzuführen und wird in industriellen Mahlanlagen aufgrund dieser Ursache, wie die Ergebnisse aus den ersten Versuchsschritten zeigen, nicht auftreten.

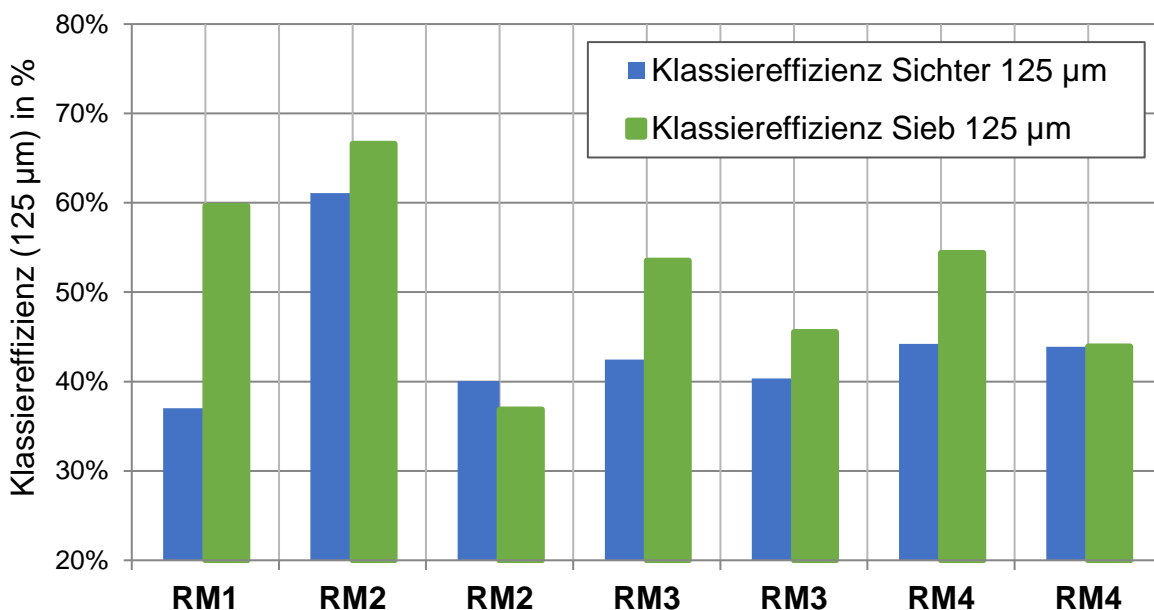


Abbildung 2-27

Vergleich der Klassiereffizienz zwischen Sieb- und Sichtklassierung

Weiterhin ist die ermittelte Trennschärfe für die Versuche in **Abbildung 2-28** analog dargestellt. Hier zeigt sich gleichfalls eine signifikante Erhöhung der Trennschärfe der Siebklassierung gegenüber der Sichtklassierung bei allen untersuchten Versuchsschritten.

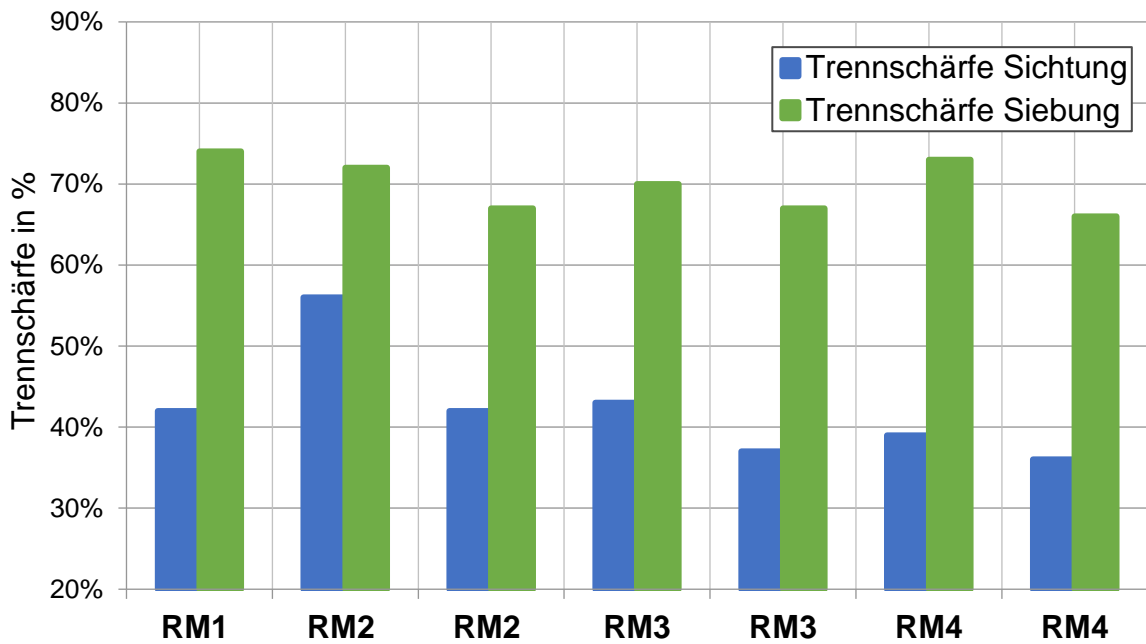


Abbildung 2-28 Vergleich der Trennschärfe zwischen Sieb- und Sichtklassierung

In **Abbildung 2-29** sind darüber hinaus die Umlauffaktoren in Abhängigkeit der ermittelten Klassiereffizienz sowohl für die Sieb- als auch für die Sichtversuche dargestellt. Der näherungsweise lineare Zusammenhang zwischen Klassiereffizienz und Umlauffaktor wird deutlich. Eine geringe Klassiereffizienz mit einer verringerten Feingutausbringung führt dabei zwangsläufig zu einem ansteigenden Umlauffaktor, welcher zu einem erhöhten spezifischen Gesamtenergiebedarf durch eine ansteigende Materialrezirkulation in einer geschlossenen Mahlanlage führt.

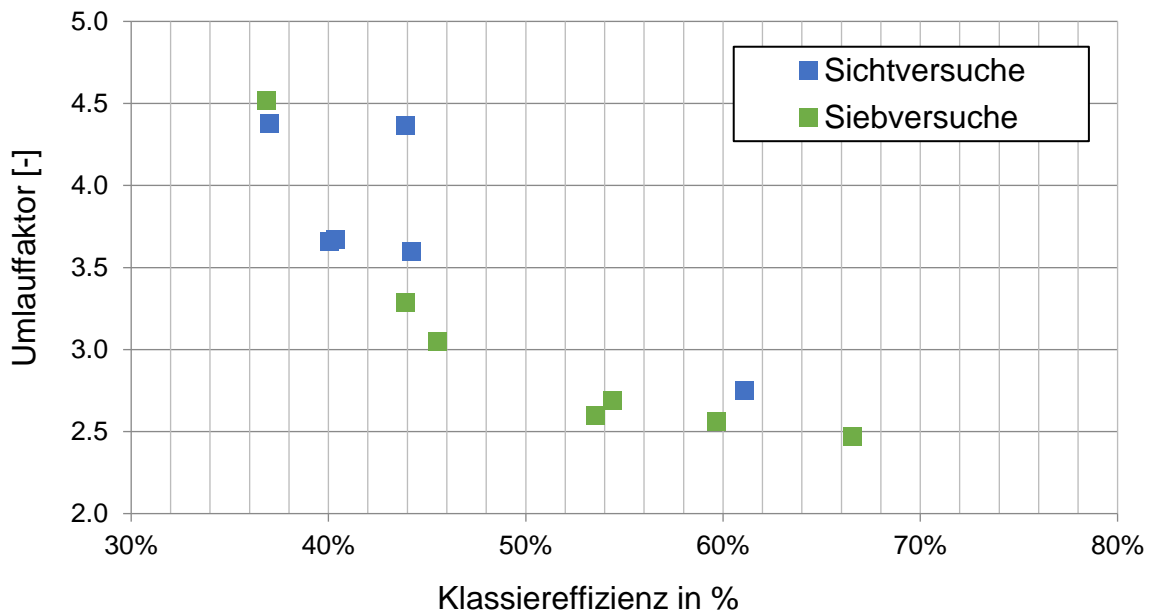


Abbildung 2-29 Umlauffaktor in Abhängigkeit des Siebgütegrad bei 125 µm für durchgeführte VDZ-Versuche

2.6 Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs der Rohmaterial-Klassierung (AP4)

In diesem Arbeitspaket wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Klassierverfahren auf eine im geschlossenen Kreislauf betriebene Mahlanlage mit Kugelmühle zur Rohmahlung bewertet. Die Energiebedarfsrechnung berücksichtigt hierbei die potentielle Steigerung der Produktionsleistung der gesamten Mahlanlage bei Substitution eines Windsichters durch eine Vibrations-Siebmaschine. Folglich wurden die Veränderungen bei einer im Verhältnis zur Windsichtung effizienteren Siebklassierung in Bezug auf die Produktionskapazität der Mahlanlage sowie die Reduktion des spezifischen Energiebedarfs (in kWh/t) ermittelt.

Zu diesem Zweck wurde die erzielbare relative Leistungssteigerung eines geschlossenen Kugelmühlen-Mahlkreislaufs bei Substitution des Windsichters durch eine Vibrationssiebmaschine mit einem Modellansatz bestimmt. Die Produktionsleistungssteigerung eines Kugelmühlen-Mahlkreislaufs kann in Abhängigkeit von Umlauffaktor und Klassiereffizienz entsprechend **Formel 2** angegeben werden [8, 9]. Der Herleitung der dargestellten Modellgleichung liegen die Randbedingungen bzw. Modellannahmen eines linearen Zerkleinerungsfortschritts in der Kugelmühle (Zerkleinerungsgesetz 1. Ordnung) sowie kein vorhandenes Feingut im Mühlenaufgabematerial zugrunde.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{(1 + C_1) * (1,5 + C_2 - \frac{1}{U_2})}{(1 + C_2) * (1,5 + C_1 - \frac{1}{U_1})} \quad \text{Formel 2}$$

- Q_1 : Produktionskapazität der Kugelmühle mit Windsichter
- Q_2 : Produktionskapazität der Kugelmühle mit Hochleistungssiebmaschine
- C_1 : Klassiereffizienz Windsichter
- C_2 : Klassiereffizienz Hochleistungssiebmaschine
- U_1 : Umlauffaktor Windsichter
- U_2 : Umlauffaktor Hochleistungssiebmaschine

Der Umlauffaktor wurde hierbei gemäß **Formel 3 [10]** basierend auf den dargestellten Korngrößenverteilungen berechnet:

$$U_{\text{Klassierer}} = \frac{A}{F} = \frac{1}{v_{F,korr.}} = \frac{\sum(\Delta f - \Delta g)^2}{\sum \left(\frac{\Delta a - \Delta g}{\Delta f - \Delta g} \right)} \quad \text{Formel 3}$$

- A: Aufgabe Klassierprozess in t/h
- F: Feingut Klassierprozess in t/h
- $\Delta a, \Delta g, \Delta f$: Differenz der Trenngrade T(x) von Aufgabe, Grob- und Feingut

Der Gesamtenergiebedarf der Mahlanlage kann im Anschluss unter Berücksichtigung der wesentlichen Komponenten wie Kugelmühle, Klassierer und Ventilator (**Abbildung 2-30** und **Abbildung 2-31**) berechnet werden und fließt in die entsprechende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein.

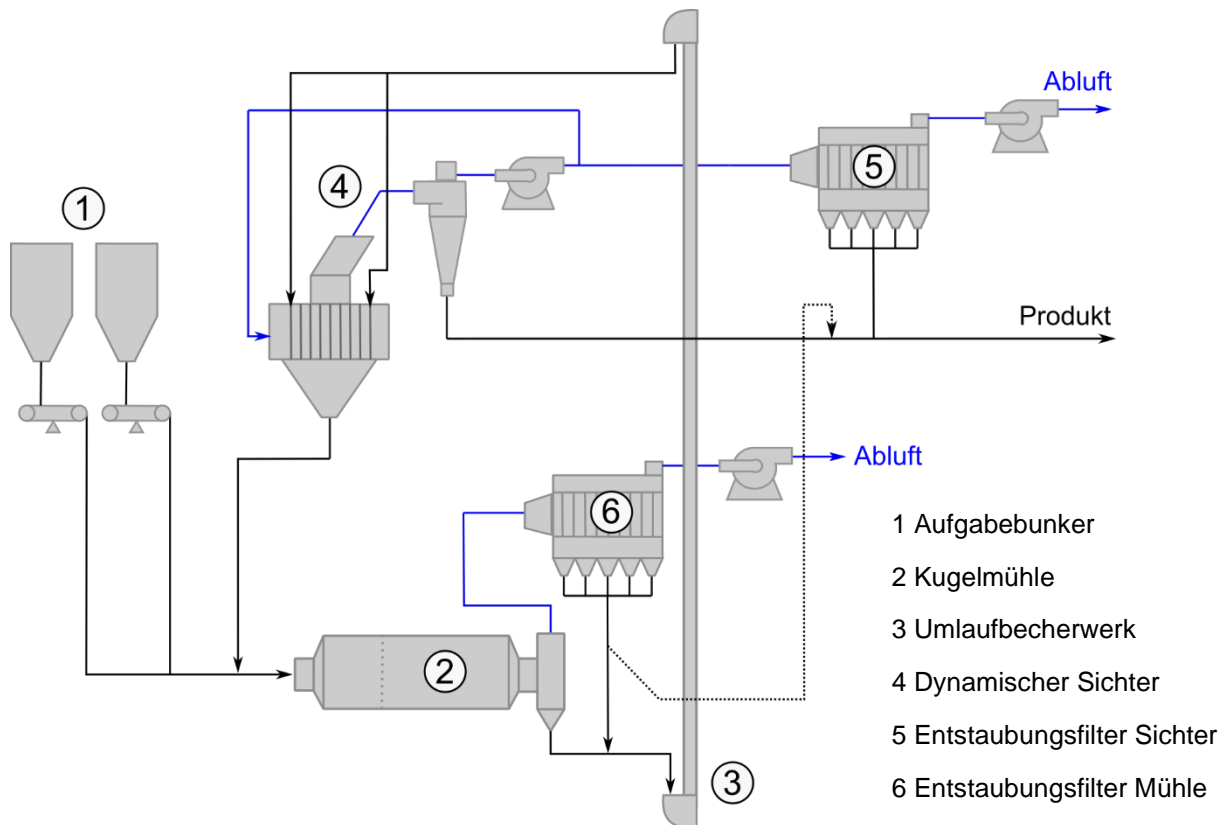


Abbildung 2-30 Schematische Darstellung geschlossener Mahlkreislauf mit Kugelmühle und Windsichter

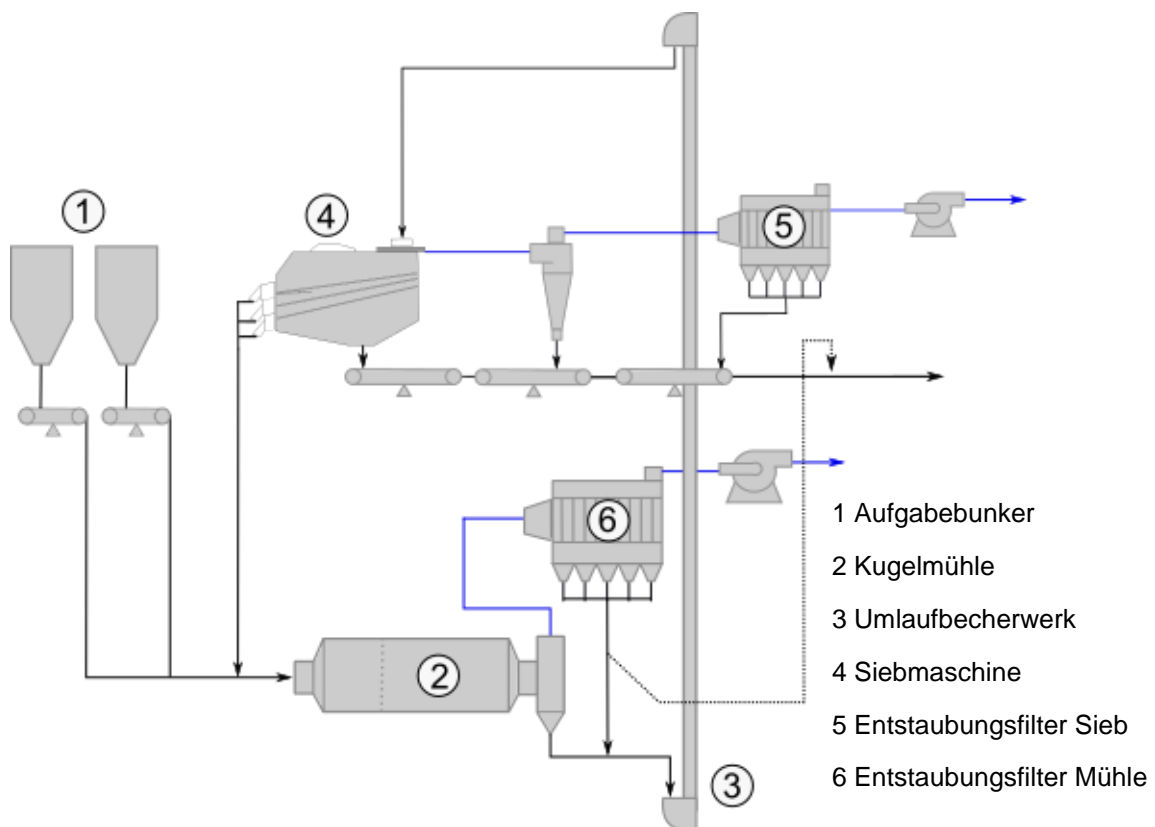


Abbildung 2-31 Schematische Darstellung geschlossener Mahlkreislauf mit Kugelmühle und Siebmaschine

In **Tabelle 2-9** sind die Ergebnisse zur Berechnung der relativen Produktionsleistung bei einem Einsatz von Sieb- bzw. Sichtklassierung in einem geschlossenen Kugelmühlen-Mahlkreislauf für die untersuchten unterschiedlichen Rohmehle zusammenfassend dargestellt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des ersten Versuchsdurchgangs aus den VDZ-Technikumsversuchen für die unterschiedlichen Rohmehle ergibt sich folglich eine berechnete Produktionsleistungssteigerung bei Ersatz eines Windsichters durch eine Siebmaschine von 9 %.

Tabelle 2-9 Relative Produktionsleistungssteigerung Sieb- vs. Sichtklassierung anhand VDZ-Versuchen

Rohmehlvariation	Siebklassierung				Sichtklassierung			
	RM1	RM2	RM3	RM4	RM1	RM2	RM3	RM4
Klassiereffizienz	60%	67%	54%	54%	37%	61%	42%	44%
Umlauffaktor	2.6	2.5	2.6	2.7	4.4	2.8	2.3	3.6
Mittlere Klassiereffizienz	59%				46%			
Mittlerer Umlauffaktor	2.6				3.3			
Relative Produktionsleistung Sieb- vs. Sichtklassierung	+9%							

Das Ergebnis wurde anschließend, basierend auf den Korngrößenverteilungen der Mühlenaufgabe des Referenz-Rohmaterials sowie den Korngrößenverteilungen von Aufgabegut, Grobgut und Feingut (jeweils für Sieb- und Sichtklassierung) der VDZ-Technikumsversuche, mit einem vorhandenen Simulationsmodell für einen geschlossenen Kugelmühlenmahlkreislauf mit Sichter (Populationsbilanz in der Mühle) bei tkIS verifiziert. Auf Basis dieser Daten wurde eine erhöhte Feingutausbringung mittels Siebklassierung von 4 % ermittelt. Auf Grundlage der ermittelten Ergebnisse wurde für die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein mögliches Potential zur Erhöhung der Mühlenproduktionsleistung zwischen 4 % und 9 % angesetzt.

In der nachfolgenden **Tabelle 2-10** sind die Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung unter Berücksichtigung der berechneten Produktionsleistungssteigerung zusammengefasst. Die Ergebnisse beruhen auf folgenden Randbedingungen:

1. Geschlossener Mahlkreislauf mit Kugelmühle und Sichter / Siebmaschine (vgl. **Abbildung 2-30** und **Abbildung 2-31**).
2. Produktionsleistung der Mahlanlage: 150 t/h

Tabelle 2-10 Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung

	Windsichter	Siebmaschine
Erwarteter Umlauf [-]	3.3	2.6
Aufgabemassenstrom Klassierer [t/h]	495	390
Anzahl Sichter / Siebmaschinen	1	12*
Spezifischer Energiebedarf Klassierer [kWh/t]	1,15	0.73
Spezifischer Energiebedarf Mühle [kWh/t]	10,23	10,23
Spezifischer Energiebedarf BW [kWh/t]	0,59	0,59
Spezifischer Energiebedarf Ventilator [kWh/t]	2,91	0,15
Leistungssteigerung Mahlkreislauf [%]	-	4 – 9
Summe Spezifischer Energiebedarf [kWh/t]	14.9	10.7 – 11.3
Differenz Spez. Energiebedarf [%]	24% - 28%	

* davon 1 redundant

Die Ergebnisse in **Tabelle 2-10** zeigen eine Reduktion des spezifischen Gesamtenergiebedarfs einer geschlossenen Kugelmühlenmahanlage bei Einsatz einer Siebmaschine von 24% bis maximal 28% gegenüber dem Energiebedarf bei einer Sichtklassierung. Der verringerte Energiebedarf ergibt sich im Wesentlichen durch den sehr geringen Antriebsenergiebedarf der eingesetzten direkt erregten Siebmaschine von etwa 0,07 kWh/t sowie durch den verringerten Energiebedarf aufgrund des wegfallenden pneumatischen Materialtransports. Weiterhin kann die Feingutausbringung mittels Siebmaschinen aufgrund der höheren Klassiereffizienz in Abhängigkeit der Siebflächenbeladung gesteigert werden, wodurch eine erhöhte Produktionsleistung der Mahlanlage möglich wird. Dieser Zustand wirkt sich ebenfalls vorteilhaft auf den notwendigen elektrischen Energiebedarf aus.

2.6.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In **Tabelle 2-11** sind die Randbedingungen der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusammengestellt. Das Ergebnis in **Tabelle 2-12** beruht dabei auf zwei unterschiedlichen Energiepreisszenarien. Die beiden linken Spalten beziehen sich hierbei jeweils auf einen Energiepreis von 0,08 € / kWh, während die beiden rechten Spalten sich auf einen Energiepreis von 0,16 € / kWh beziehen. Die potentielle Einsparung an thermischer Brennstoffenergie, wie in **Kapitel 2.7.3** beschrieben, sowie die daraus resultierende Einsparung an Brennstoffkosten hängt maßgeblich von der zukünftigen Entwicklung der Ersatzbrennstoffkosten sowie deren anteiligem Einsatz ab. Unter Berücksichtigung des derzeitigen mittleren Brennstoffeinsatzes in Deutschland im Jahr 2022 sowie angesetztter mittlerer Brennstoffpreise für das Jahr 2020 ergibt sich theoretisch ein zusätzliches Einsparpotential zwischen 0.08 und 0.13 € je Tonne Klinker [1, 11]. Als Ergebnis resultieren insgesamt Amortisationszeiten für einen Siebmaschineneinsatz je nach Strompreisszenario zwischen 4 und 8 Jahren.

Tabelle 2-11 Ausgangsdaten für Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Parameter	Wert
Produktionsleistung Mahlanlage [t/h]	150
Auslastung [%] / Betriebsstunden [h]	75 % / 6.570
Rohmehl-Klinker Faktor [-]	1.55
Rohmehl- / Klinkerproduktionsleistung [t/a]	985.500 / 635.800
Elektrische Energie [€/kWh]	0.08 / 0.16
Geschätzte Invest.-kosten Siebmaschinen (EPC) [€]	2.150.000 (12 Maschinen / 1 redundant)

Tabelle 2-12 Gegenüberstellung Betriebskosten (OPEX) Sieb- und Sichtklassierung für zwei verschiedene Szenarien

	Wind-sichter	Siebmaschine	Wind-sichter	Siebmaschine
Energiepreisszenario Strom	0,08 €/kWh	0,08 €/kWh	0,16 €/kWh	0,16 €/kWh
Spezifischer Energiebedarf [kWh/t]	14,9	10,7	14,9	10,7
Gesamtenergiebedarf / Jahr [kWh/a]	14.664.200	10.581.300	14.664.200	10.581.300
Gesamtbetriebskosten Energie [€/a]	1.173.100	846.500	2.346.300	1.693.000
Gesamtbetriebskosten Verschleiß [€/a]	40.000	144.500*	40.000	144.500*
Gesamtbetriebskosten (inkl. Verschleiß) [€/a]	1.213.100	991.000	2.386.300	1.837.600
Einsparung Brennstoffkosten thermische Energie [€/a]	-	52.000 (82.000)	-	52.000 (82.000)
Gesamtbetriebskosten (inkl. thermische Einsparung) [€/a]	1.213.100	938.900	2.386.300	1.785.400
Jährliche Kosteneinsparung [€/a]		274.200		600.900

* Verschleißkosten basierend auf einer angesetzten Standzeit für ein Polyurethan-Siebgewebe von 4.500 Betriebsstunden

2.7 Klinkerbrennprozess (AP5)

In diesem Arbeitspakete wurden Klinkerbrände der vier unterschiedlichen Rohmehlvariationen aus der Sieb- und Sichtklassierung hergestellt. Auf Basis verschiedener Klinkeranalysen wurden die Klinker aus der Sieb- und Sichtklassierung qualitativ miteinander verglichen, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Klassierverfahren auf die Brennbarkeit des Materials zu untersuchen.

In Bezug auf die Rohmehlzusammensetzung für die weiteren Rohmehlvariationen 2 bis 4 ist die in **Tabelle 2-13** gewählte Massen-Zusammensetzung der Einzelkomponenten maßgeblich.

Tabelle 2-13 Chemische Rohmehlzusammensetzung und Kontrollparameter

	Anteile in Ma-%	Chemischer Kontrollparameter	Referenz-Rohmehl	Zielwert Synthetisches Rohmehl
Kalkstein	82,0	Kalkstandard (KSt.)	96,3	96,5
Ton	11,0	Tonermodul (TM)	2,53	2,44
Quarz	6,2	Silikatmodul (SM)	2,64	2,74
Korund	0,8			

Die untersuchten Rohmehlvariationen sind in **Tabelle 2-5** aufgeführt. Die Einzelkomponenten Mergel (Rohmehl 1) sowie Kalkstein und Ton (Rohmehle 2 bis 4) wurden zu Beginn für die chemische Charakterisierung der Ausgangsstoffe mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) analysiert (vgl. **Tabelle B- 9**). Die Rohmehlzusammensetzung für die Herstellung der synthetischen Versuchsrohmehle wurde nachfolgend anhand der chemischen Analyseergebnisse des Referenzrohmehls bestimmt. Als Zielparameter für die Einstellung der chemischen Zusammensetzung wurden die in der Praxis gängigen Kontrollparameter Kalkstandard sowie Silikat- und Tonermodul verwendet.

2.7.1 Versuchsprogramm

2.7.1.1 Methoden

2.7.1.1.1 Chemische Analyse

Die chemische Zusammensetzung der Rohmehle wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) an Schmelztabletten ermittelt. Dazu wurde ein Spektrometer der Baureihe „Tiger S8“ der Firma Bruker AXS eingesetzt. Die Gehalte an Wasser und CO₂ wurden mit einem Infrarot-Analysator der Firma ELTRA gemessen.

Da der Freikalkgehalt der gebrannten Laborklinker ein wesentliches Kriterium zur Bewertung der Brennbarkeit eines Rohmehls ist, wurde an allen Laborklinkern der Freikalkgehalt gemäß DIN EN 451 analysiert. Gleichfalls sollten die Befunde der Röntgenbeugung überprüft werden.

2.7.1.1.2 Mineralogische Analyse

Die Phasenzusammensetzung der Laborklinker wurde mittels Röntgenbeugungsanalyse (RBA, Advance PRO der Firma Bruker AXS) gemessen und mittels der zugehörigen Rietveld-Software „Topas 6.1“ quantifiziert. Die manuelle Präparation der Proben erfolgte als Pulverpressling in der „Backloading-Technik“. Die Quantifizierung wurde anhand der vorliegenden chemischen Ergebnisse für die jeweiligen Ausgangs-Rohmehle kontrolliert.

2.7.1.1.3 Lichtmikroskopie

Zur Charakterisierung des Mikrogefüges wurden die unterschiedlichen Klinkerproben der Klinkerbrände an einem Lichtmikroskop (Zeiss Axioplan) untersucht. Dazu wurden die Klinkerproben in dünnflüssigem Epoxidharz unter Vakuum eingebettet. Nach dem Aushärten wurden polierte Anschliffe hergestellt. Für lichtmikroskopische Untersuchungen wurden die Anschliffe mit 10%iger Kalilauge (KOH) und alkoholischer Dimethylammoniumcitratlösung (DAC) geätzt.

2.7.2 Untersuchungsergebnisse

2.7.2.1 Rohmehle

2.7.2.1.1 Chemische Zusammensetzung

Das technische Rohmehl 1 diente als Bezugspunkt für die Zusammenstellung der synthetischen Rohmehle, wodurch eine gezielte Auswahl unterschiedlicher Körnungen der Ausgangsstoffe „Kalkstein“ und „Sand“ ermöglicht werden sollte. In den ersten Kontrollanalysen zeigte sich, dass die künstlich hergestellten Rohmehle (2 bis 4) eine gute Annäherung an die chemische Zusammensetzung des technischen Rohmehls aufwiesen. Aufgrund der unterschiedlichen Klassierverfahren gab es jedoch Abweichungen in Bezug auf die chemische Zusammensetzung der einzelnen Rohmehle. Die Sieb- und Sichtklassierung führte dabei insbesondere durch deren unterschiedliche sowie mit zunehmender Anzahl an Versuchsschritten abnehmender Klassiereffizienz zu Veränderungen in der Feingutausbringung und folglich zu einer veränderten Frischgutmenge im nächsten Versuchsschritt. Diese Ursache wirkte sich auf die finale chemische Zusammensetzung der einzelnen Rohmehle aus. In Folge dessen wichen auch die chemischen Zusammensetzungen der Rohmehle, die letztlich zum Brennen der Laborklinker verwendet wurden, teilweise deutlich von den ursprünglich angesetzten Zielvorgaben ab.

Tabelle 2-14 zeigt die chemischen Zusammensetzungen der Rohmehle 1 bis 4 sowie die daraus abgeleiteten Module. Aufgrund der teilweise deutlichen Unterschiede ist nachvollziehbar, dass ein Vergleich zwischen verschiedenen Rohmehlen und den daraus hergestellten Klinkern nur bedingt sinnvoll ist. Innerhalb eines Rohmehltyps ist aber der Vergleich zwischen der Sieb- und Sichtklassierung möglich

Tabelle 2-14 Chemische Zusammensetzung der Rohmehle nach Mühlenumlauf und Klassierung (Anteile in M.-%) sowie Berechnung von Klinkerphasen und Moduli nach Bogue

Phase	Rohmehl 1		Rohmehl 2		Rohmehl 3		Rohmehl 4	
	gesichtet	gesiebt	gesichtet	gesiebt	gesichtet	gesiebt	gesichtet	gesiebt
Kohlendioxid	32,33	32,24	34,09	34,42	34,17	34,29	33,79	33,67
Wasser	2,07	2,13	1,40	1,30	1,45	1,41	1,48	1,46
Glühverlust	34,40	34,36	35,49	35,72	35,62	35,70	35,27	35,13
SiO₂	15,45	15,61	14,03	13,65	13,67	13,82	14,05	14,21
Al₂O₃	4,45	4,31	4,36	4,18	4,15	4,09	4,55	4,45
TiO₂	0,20	0,20	0,17	0,17	0,17	0,17	0,19	0,19
P₂O₅	0,09	0,09	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07
Fe₂O₃	1,53	1,56	1,66	1,70	1,67	1,68	1,80	1,75
Mn₂O₃	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07
MgO	0,87	0,85	0,90	0,92	0,91	0,93	0,89	0,93
CaO	41,43	41,28	42,61	42,85	42,68	42,11	41,81	41,92
SO₃	0,28	0,30	0,08	0,06	0,08	0,06	0,05	0,06
K₂O	0,79	0,79	0,57	0,54	0,56	0,55	0,56	0,58
Na₂O	0,11	0,11	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05
Na₂O_{eq}	0,63	0,63	0,43	0,40	0,42	0,40	0,42	0,43
C₃S	29,33	27,96	54,54	62,51	61,87	57,45	47,31	47,12
C₂S	45,75	47,64	21,16	13,79	14,51	18,99	27,19	27,85
C₃A	14,11	13,46	13,56	12,79	12,73	12,56	14,07	13,74
C₄AF	7,16	7,30	7,82	8,04	7,95	8,06	8,55	8,29
KST_{III}	85,0	84,1	95,2	98,4	98,0	96,0	92,6	92,3
SM	2,58	2,66	2,33	2,32	2,35	2,39	2,21	2,29
TM	2,90	2,76	2,63	2,47	2,48	2,43	2,53	2,54
SG	33,9	36,3	15,3	12,6	14,3	11,1	9,6	10,5

2.7.2.2 Laborklinker

2.7.2.2.1 Mineralogische Zusammensetzung

Aufgrund der eingeschränkten Vergleichbarkeit der eingesetzten Rohmehle erlaubten auch die Phasenuntersuchungen an den Laborklinkern nur einzelne vergleichende Bewertungen über die verschiedenen Versuchsreihen hinweg. Die **Tabelle 2-15**, **Tabelle 2-16** sowie **Tabelle 2-17** und **Tabelle 2-18** zeigen getrennt für die einzelnen Rohmehle die Phasenzusammensetzung der Laborklinker in Abhängigkeit der Brenntemperatur (1250 °C, 1350 °C, 1450 °C) .

Tabelle 2-15 Phasenzusammensetzung der Laborklinker aus **Rohmehl 1** (Anteile in M.-%)

Phase	gesichtet			gesiebt		
	1250 °C	1350 °C	1450 °C	1250 °C	1350 °C	1450 °C
Alit	5,9	31,8	34,8	9,1	41,7	41,9
Belit	67,8	45,1	43,0	64,7	38,4	37,1
C ₃ A _{cub.}	10,9	6,1	8,7	12,4	7,5	7,7
C ₃ A _{orth.}	0,7	8,9	6,8	0,8	6,3	6,8
C ₄ AF	5,9	5,4	5,5	5,4	5,5	5,8
Mayenit	1,5			0,9		
Freikalk	6,5	2,1	0,6	5,8	0,3	0,1
Periklas	0,8	0,4	0,3	0,8	0,3	0,4
Quarz	0,0	0,3	0,2	0,0	0,1	0,2
Kalkstandard (RFA)	85,0			84,1		
Freikalk (EN 451)	6,7	1,63	0,71	5,7	0,44	0,32

Tabelle 2-16 Phasenzusammensetzung der Laborklinker aus **Rohmehl 2** (Anteile in M.-%)

Phase	gesichtet			gesiebt		
	1250 °C	1350 °C	1450 °C	1250 °C	1350 °C	1450 °C
Alit	8,4	49,6	58,2	15,4	54,0	63,2
Belit	58,4	24,8	19,5	50,2	20,5	14,4
C ₃ A _{cub.}	10,4	8,7	7,1	12,4	8,1	6,0
C ₃ A _{orth.}	0,5	6,8	7,6	0,5	7,1	8,2
C ₄ AF	8,8	5,3	5,5	8,1	5,3	5,5
Mayenit	2,0			1,3		
Freikalk	10,8	4,2	1,5	11,3	4,4	1,9
Periklas	0,8	0,4	0,3	0,8	0,4	0,4
Quarz	0,0	0,2	0,3	0,0	0,2	0,4
Kalkstandard (RFA)	95,2			98,4		
Freikalk (EN 451)	13,4	4,1	1,6	13,6	4,2	1,7

Tabelle 2-17 Phasenzusammensetzung der Laborklinker aus **Rohmehl 3** (Anteile in M.-%)

Phase	gesichtet			gesiebt		
	1250 °C	1350 °C	1450 °C	1250 °C	1350 °C	1450 °C
Alit	1,3	54,3	62,6	1,4	55,2	63,9
Belit	60,8	21,6	15,2	59,7	22,1	15,7
C ₃ A _{cub.}	5,4	9,1	8,9	4,5	8,0	7,4
C ₃ A _{orth.}	0,1	6,0	5,6	0,3	6,4	5,9
C ₄ AF	10,6	4,8	5,3	11,9	5,4	5,8
Mayenit	3,2	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0
Freikalk	17,7	3,6	1,8	16,4	2,4	0,8
Periklas	0,8	0,4	0,4	0,9	0,4	0,4
Quarz	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2
Kalkstandard (RFA)	98,0			96,0		
Freikalk (EN 451)	18,4	3,5	1,8	18,6	2,8	0,8

Tabelle 2-18 Phasenzusammensetzung der Laborklinker aus **Rohmehl 4** (Anteile in M.-%)

Phase	gesichtet			gesiebt		
	1250 °C	1350 °C	1450 °C	1250 °C	1350 °C	1450 °C
Alit	1,0	43,0	54,9	1,3	52,4	58,2
Belit	63,6	31,3	22,0	61,2	23,7	20,3
C ₃ A _{cub.}	3,3	10,3	9,8	4,0	9,0	7,6
C ₃ A _{orth.}	0,1	5,5	5,1	0,1	6,8	6,6
C ₄ AF	12,2	6,5	6,6	12,2	5,9	6,6
Mayenit	4,5	0,0	0,0	5,6	0,0	0,0
Freikalk	14,6	3,1	1,1	14,7	1,6	0,1
Periklas	0,7	0,3	0,4	0,9	0,4	0,4
Quarz	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2	0,2
Kalkstandard (RFA)	92,6			92,3		
Freikalk (EN 451)	16,5	3,2	1,1	16,9	1,4	0,3

Zusammenfassend lassen sich folgende Beobachtungen machen:

- Bei Rohmehl 1 konnte der Zielwert für den Kalkstandard des Referenzrohmeihls von 96,5 trotz eines Kalksteinanteils als zusätzlicher Korrekturkomponente nicht erreicht werden. Eine Ursache hierfür können chemische Inhomogenitäten des verwendeten Kalksteinmergels sein, sodass eine anteilige Beimischung von 20 M-% Kalkstein basierend auf der chemischen Analyse des Mergels sowie des Kalksteins zu gering war.
- Erwartungsgemäß nimmt bei allen Rohmehlen der Brenngrad mit steigender Brenntemperatur zu, was an steigenden Alitgehalten und abnehmenden Anteilen an Belit und Freikalk zu erkennen ist.
- Alle Brände bei 1450°C erreichen eine weitgehend vollständige Umsetzung der Rohmehle mit Restgehalten an Freikalk von zum Teil deutlich unter 2 M.-%.
- Bereits bei 1350 °C sind teilweise beträchtliche Umsatzraten zu verzeichnen. Hier ist bei fast allen Rohmehltypen (außer Rohmehl 3) ein signifikant höherer Brenngrad bei den gesiebten Rohmehlen im Vergleich zu den gesichteten Varianten zu verzeichnen. Bei den gesiebten Rohmehlen 1 und 4 kann bereits bei dieser Brenntemperatur von einer abgeschlossenen Verklinkerung ausgegangen werden, obwohl der Brand einstufig und statisch (ohne Bewegung des Brenngutes) durchgeführt wurde (vgl. **Abbildung A- 9**).
- Die bessere Brennbarkeit der gesiebten Rohmehle zeigt sich tendenziell auch bei Rohmehl 2. Hier wurden zwar nominell in etwa gleiche Freikalkgehalte in den Laborklinkern aus beiden Aufbereitungsschritten gemessen. Allerdings lag der Kalkstandard bei der gesiebten Probe deutlich höher, so dass zum Erreichen des gleichen Freikalkgehaltes eine höhere Umsatzrate notwendig war. Dementsprechend finden sich auch höhere Alitgehalte in diesem Laborklinker.
- Die Rohmehle 2 und 3 erlauben aufgrund zumindest ähnlicher Moduli ansatzweise einen Vergleich. Bei Rohmehl 2 ist vor allem in der gesiebten Variante schon bei 1250 °C eine einsetzende Verklinkerung zu erkennen. Bereits bei 1350°C haben sich die Umsatzraten aber bei diesem Rohmehl angeglichen. Offenbar kommt im Rohmehl 3 der günstige Effekt der Siebung in Bezug auf den erzielten Freikalkgehalt weniger deutlich zum Tragen als in den übrigen Rohmehltypen (vgl. **Tabelle 2-17**).
- Von grundlegendem zementtechnologischem Interesse ist darüberhinaus die Beobachtung, dass bei den Rohmehlen 1 und 2, und hier besonders bei den gesiebten Varianten, überhaupt schon bei 1250 °C deutliche Alitbildungen zu verzeichnen sind (vgl. **Abbildung A- 8**). Weiterhin ist eindeutig nachvollziehbar, dass sich bei den niedrigeren Brenntemperaturen zunächst nur kubisches Aluminat

bildet, das dann bei höheren Temperaturen zunehmend Alkalien aufnimmt und dadurch in die orthorhombische Modifikation wechselt.

Es gilt festzuhalten, dass sich im Vergleich von gesiebten und gesichteten Rohmehlen eine bessere Brennbarkeit bei den gesiebten Varianten abzeichnet. Eine mikrostrukturelle Erklärung dazu kann in der lichtmikroskopischen Analyse ausgewählter Klinker erfolgen.

2.7.2.2.2 Lichtmikroskopie

Im Rahmen der lichtmikroskopischen Untersuchungen wurden fünf Laborklinker analysiert, die aus den folgenden Rohmehlproben bei 1450 °C gebrannt wurden:

- Rohmehl 2, gesiebt (SM-RM2-FG-D4) und gesichtet (Si-RM2-FG-D4)
- Rohmehl 3, gesiebt (SM-RM3-FG-D4)
- Rohmehl 4, gesiebt (SM-RM4-FG-D4) und gesichtet (Si-RM4-FG-D4)

Typische Gefügebilder der jeweiligen Laborklinker sind im Anhang in **Abbildung A- 3, Abbildung A- 4, Abbildung A- 5, Abbildung A- 6** sowie **Abbildung A- 7** zusammengestellt.

Die Porosität aller Laborklinker war vergleichsweise hoch. Bei den Untersuchungen der geätzten Anschliffe konnten in allen Proben die Klinkerphasen Alit, Belit, C₃A, C₄AF, Freikalk und Periklas unterschieden werden. Dabei wurden die mittels quantitativer Röntgenbeugungsanalyse ermittelten Trends hinsichtlich der Gehalte der verschiedenen Klinkerphasen bestätigt. So wies beispielsweise die Probe Si-RM4-FG-D4 (Rohmehl 4 gesichtet) die höchsten Gehalte an Belit auf, während in Probe SM-RM4-FG-D4 (Rohmehl 4 gesiebt) die niedrigsten Gehalte an Freikalk beobachtet wurden (vgl. **Kapitel 2.7.2.2.1**).

Bei der mikroskopischen Untersuchung wurden insbesondere die maximalen Durchmesser von Nestern aus Freikalk- und Belitkristallen bestimmt, um die Auswirkungen von Siebung und Sichtung sowie die Effekte der unterschiedlichen Feinheiten der Rohstoffe (Kalkstein und Quarz) vor der Mahlung der Rohmehle 2, 3 und 4 zu vergleichen. Freikalknester werden durch grobe, CaO-reiche Partikel im Brenngut verursacht, während Belitnester in der Regel auf grobe, SiO₂-reiche Partikel im Brenngut zurückgehen. Es ist davon auszugehen, dass größere Durchmesser der jeweiligen Nester in den Laborklinkern auf größere Durchmesser der entsprechenden Partikel in den jeweiligen Rohmehlproben zurückzuführen sind.

Zur Bestimmung der maximalen Durchmesser der Nester wurde jeweils eine große Anzahl an Nestern (bis zu 70) verteilt über die Fläche des Anschliffs vermessen. Teilweise war die Anzahl der beobachteten Nester jedoch geringer. Dies trifft vor allem auf die Freikalknester im Laborklinker aus dem gesiebten Rohmehl 4 zu (SM-RM4-FG-D4), die nur in sehr geringer Anzahl auftraten. Die Belitnester in den Laborklinkern waren teilweise miteinander vernetzt, so dass eine klare Abgrenzung nach außen nicht immer erkennbar und somit die Bestimmung von Durchmessern schwierig war. Dieser Effekt war bei der Probe Si-RM4-FG-D4 (Rohmehl 4 gesichtet) besonders deutlich ausgeprägt und lässt sich zum Teil auf den niedrigen Kalkstandard der entsprechenden Probe (92,3) zurückführen. Bei vergleichbarer Korngrößenverteilung der einzelnen Rohmehlkomponenten sind die Durchmesser von Belitnestern in Klinkern mit niedrigem Kalkstandard tendenziell größer als in Klinkern mit hohem Kalkstandard.

Die für den jeweiligen Laborklinker typische Obergrenze der Größe von Belitnestern und Freikalknestern sind in **Tabelle 2-19** bzw. **Tabelle 2-20** zusammengestellt. Einige Proben enthielten einzelne Nester, die deutlich größer waren als die große Mehrzahl der übrigen Nester. Deren Durchmesser sind in den Tabellen ebenfalls zusammengestellt.

Beim direkten Vergleich zeigt sich, dass sowohl die Belitnester als auch die Freikalknester in den Laborklinkern signifikant kleiner waren, wenn das jeweilige Rohmehl gesiebt statt gesichtet worden war. Dies zeigt, dass die jeweils ursächlichen Körner in den gesiebten Rohmehlen feiner waren als in den gesichteten Rohmehlen.

Ein Vergleich der Größen von Freikalk- und Belitnestern in Laborklinkern aus verschiedenen Rohmehlen (2, 3 und 4) bei vergleichbarer Aufbereitung (Sichtung bzw. Siebung) untereinander ist kaum sinnvoll möglich, da die Proben sich zum Teil deutlich in ihrer chemischen Zusammensetzung und damit auch in ihren zementchemischen Parametern (vgl. **Kapitel 2.7.2.1.1, Tabelle 2-14**) unterschieden. Diese Unterschiede können sich auch auf die Durchmesser von Belit- und Freikalknestern auswirken (siehe oben). Die Daten zeigen, dass der Klinker aus gesiebt Rohmehl 3 (SM-RM3-FG-D4) sehr ähnliche Eigenschaften aufwies wie der Klinker aus gesiebt Rohmehl 2 (SM-RM2-FG-D4). Die Klinker aus Rohmehl 4 (SM-RM4-FG-D4 und Si-RM4-FG-D4) enthielten dagegen sowohl größere Belit- als auch Freikalknester als die Klinker aus Rohmehlen 2 (SM-RM2-FG-D4 und Si-RM2-FG-D4) und 3 (SM-RM3-FG-D4).

Tabelle 2-19 Obergrenze der Größe von Belitnestern

Belitnester	gesiebt	gesichtet
Rohmehl 2	800 µm	1000 µm (vereinzelt 1400 µm)
Rohmehl 3	800 µm (vereinzelt 1100 µm)	
Rohmehl 4	1000 µm (vereinzelt 1500 µm)	2000 µm*

* Nester nach außen kaum abgegrenzt

Tabelle 2-20 Obergrenze der Größe von Freikalknestern

Freikalknester	gesiebt	gesichtet
Rohmehl 2	120 µm (vereinzelt 260 µm)	300 µm (420 µm)
Rohmehl 3	120 µm (vereinzelt 220 µm)	
Rohmehl 4	310 µm*	400 µm (vereinzelt 680 µm)

* nur sehr geringe Anzahl an Freikalknestern

Auch die Größen von Alit- und Belitkristallen wurden in den untersuchten Laborklinkerproben ermittelt. Dabei wurden jeweils rund 100 Einzelmessungen durchgeführt. In **Tabelle 2-21** und **Tabelle 2-22** sind die durchschnittlichen und die maximalen Größen von Alit- bzw. Belitkristallen zusammengefasst. Im Rahmen der üblichen Schwankungsbreite solcher Messungen waren keine signifikanten, systematischen Unterschiede zwischen den Proben erkennbar.

Tabelle 2-21 Durchschnittliche und maximale Größe von Alitkristallen

Alitkristalle	gesiebt	gesichtet
Rohmehl 2	Ø 24 µm / max. 61 µm	Ø 20 µm / max. 68 µm
Rohmehl 3	Ø 22 µm / max. 68 µm	
Rohmehl 4	Ø 25 µm / max. 80 µm	Ø 22 µm / 72 µm

Tabelle 2-22 Durchschnittliche und maximale Größe von Belitkristallen

Belitkristalle	gesiebt	gesichtet
Rohmehl 2	Ø 25 µm / max. 52 µm	Ø 21 µm / max. 46 µm
Rohmehl 3	Ø 21 µm / max. 48 µm	
Rohmehl 4	Ø 19 µm / max. 40 µm	Ø 20 µm / max. 75 µm

2.7.2.2.3 Zusammenfassung Lichtmikroskopie

Die auflichtmikroskopischen Untersuchungen an Laborklinkern, die aus verschiedenen Rohmehlproben hergestellt wurden, ergab, dass sich die Siebung der Rohmehle gegenüber der Sichtung positiv auf die Klinkereigenschaften auswirkte. Die Durchmesser sowohl von Belit- als auch von Freikalknestern waren bei der Siebung geringer als bei der Sichtung. Dies deutet darauf hin, dass die Siebung den Anteil grober Körner im Rohmehl gegenüber der Sichtung deutlich reduziert.

Die Partikelgröße der einzelnen Rohmehlkomponenten bei der Zugabe in die Mühle wirkte sich dagegen nicht systematisch positiv auf die Gefüge der resultierenden Laborklinker aus.

2.7.3 Einfluss der Siebklassierung auf den thermischen Brennstoffenergiebedarf

Die Abschätzung der potentiellen Verringerung des thermischen Brennstoffenergiebedarfs bei gesiebten Rohmehlen ergibt insgesamt ein mittleres Reduktionspotential von circa 2 %. Auf Basis der Analyseergebnisse der Laborklinkerbrände wurde eine konservative Abschätzung getroffen, dass die Sinter-temperatur im Klinkerbrennprozess um circa 50°C bei gleichbleibender Klinkerqualität herabgesetzt werden kann. Bei dieser Temperaturabsenkung im Klinkerbrennprozess kann bei der Siebklassierung durch ein homogeneres Rohmehl ein vergleichbarer Brenngrad des Klinkers in Bezug auf die wesentlichen Merkmale Alitbildungsrate und resultierender Freikalkgehalt im Verhältnis zur Sichtklassierung erreicht werden (vgl. **Kapitel 2.7.2.2.1**).

Bei einem angesetzten durchschnittlichen Energiebedarf von 2.791 MJ je Tonne Zement in Deutschland sowie einem mittleren Klinker-Zement Faktor von 72 % [5] ergäbe sich folglich auf Basis der Daten für das Jahr 2021 ein spezifischer thermischer Energiebedarf von 3.876 MJ je Tonne Klinker. Bei der beschriebenen Absenkung der Sintertemperatur im Klinkerbrennprozess kann folglich eine Reduktion um circa 2 % (78 MJ je Tonne Klinker) in Bezug auf den thermischen Energiebedarf abgeschätzt werden [12]. In Abhängigkeit der Preisentwicklung für Alternativbrennstoffe könnten folglich die Brennstoffkosten je Tonne Klinker zusätzlich reduziert werden. Dies würde die Wirtschaftlichkeit einer Siebklassierung weiter unterstützen (vgl. **Kapitel 2.6.1, Tabelle 2-12**).

2.8 Zusammenfassung

Im Projekt Rohmehl-Siebung wurde die Eignung von Vibrationssiebmaschinen für den Einsatz in der Rohmaterialklassierung im Zementherstellungsprozess untersucht. Weiterentwicklungen im Bereich der Siebtechnik in Bezug auf den Einsatz von direkt erregten Siebmaschinen mit Kunststoffsiebgeweben ermöglichen mittlerweile höhere für industrielle Prozesse interessante Siebdurchsätze. Zudem weisen Kunststoffsiebgewebe im Verhältnis zu Drahtsiebgeweben höhere Standzeiten auf, sodass der Siebge-webeverschleiß in kontinuierlichen Industrieprozessen reduziert werden kann. Aufgrund des energieeffizienten Siebmaschinenbetriebs bei einer Verringerung des elektrischen Energiebedarfs für den pneumatischen Transport wurde zu Projektbeginn eine signifikante elektrische Energieeinsparung bei Substitution von Windsichtern durch Siebmaschinen erwartet. Auf Basis der definierten Arbeitspakete wurde folglich das Potential für den Einsatz der Siebtechnologie in Rohmahlanlagen der Zementindustrie evaluiert.

Nach Planung und Inbetriebnahme des Siebmaschinenversuchsstands im Technikum von tkIS wurde eine Parameterstudie mit einem repräsentativen, industriellen Zwischenprodukt aus einer Rohmahlanlage durchgeführt. Durch die Variation von Siebmaschinenbetriebsparametern wie Siebaufgabe, Siebneigung und Siebanregungsfrequenz wurden für die Rohmehlklassierung optimierte Siebmaschinenbetriebsparameter identifiziert. Im Anschluss an die durchgeführten Kurzzeitversuche für die Parameterstudie wurden Langzeitbetriebsversuche mit einem Polyurethan-Siebge-webe mit einer Betriebszeit >100 Stunden durchgeführt. Auf diese Weise konnte die Verschleißentwicklung dokumentiert

sowie eine Prognose zur voraussichtlichen mittleren Standzeit des Siebgewebes von 6000 Stunden abgeleitet werden.

Nach Abschluss der Technikumsversuche bei tkIS wurde die Siebmaschine im VDZ-Technikum installiert, um die Siebklassierung weiterführend anhand von Technikumsversuchen mit vier unterschiedlichen Rohmehlen mit der Sichtklassierung vergleichen zu können. Anhand spezifischer Kennzahlen zur Bewertung der Klassiereffizienz wurde die Siebmaschinenteknologie mit gängigen Windsichtern verglichen.

Im letzten Arbeitspaket wurden aus den mittels Sieb- und Sichtklassierung hergestellten Rohmehlen Klinkerbrände hergestellt. Diese ermöglichen einen chemisch-mineralogischen Vergleich der unterschiedlichen Klinker in Abhängigkeit der eingesetzten Klassiermethode und Rohmehlgranulometrie. Die Analyse der Klinkereigenschaften deutet schließlich auf ein verbessertes Brennverhalten von gesiebten Rohmehlen (bei gleicher chemischer Zusammensetzung) verursacht durch ein homogeneres Kornband hin, welches sich in einer erhöhten Alitbildungsrate und einem verringerten Freikalkgehalt bei konstanter Brenntemperatur äußert. Neben der verbesserten Brennbarkeit von gesiebten Rohmehlen stellt insbesondere die verbesserte Klassiereffizienz durch die hohe Trennschärfe bei der rein auf geometrischen Kriterien basierenden Siebung einen wesentlichen Vorteil dieser Klassiermethode dar. Darüber hinaus kann durch den Einsatz von energieeffizienten direkt erregten Vibrationssiebmaschinen sowie dem verringerten pneumatischen Transportaufwand der elektrische Energiebedarf gegenüber geschlossenen Mahlkreisläufen mit Kugelmühle und Windsichter um potentiell circa 24 % bis 28 % reduziert werden. Im Allgemeinen wurde die Eignung der Siebtechnologie im Anwendungsbereich Rohmehlklassierung nachgewiesen und die Vorteile gegenüber herkömmlichen Windsichtern aufgezeigt, sodass eine industrielle Anwendung in Betracht kommt.

3 Literaturverzeichnis

- [1] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V., HRSG.: *Zahlen und Daten: Zementindustrie in Deutschland 2022 : Stand Oktober 2022*. Berlin, 2022
- [2] ZLATEV, Metodi ; FENNENKÖTTER, KLAUS HAVER-NIAGARA GMBH: *Feinstkornklassierung von Quarzsand mit der Haver Fine-Line Siebmaschine*. In: *AT Minerals* (2016)
- [3] BRUDER, Uwe: *Siebmaschinen und Siebbeläge*. 2015
- [4] SCHMIDT, Paul Dr.-Ing. (Hrsg.); KÖRBER, Rolf Dr.-Ing (Hrsg.); COPPERS, Matthias Dr.-Ing. (Hrsg.): *Sieben und Siebmaschinen: Grundlagen und Anwendung* : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003
- [5] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V., HRSG.: *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2021*. Düsseldorf, 2022
- [6] QUITTKAT, Wolfram: *Die Phasenumbildungsvorgänge beim Zement-Klinkerbrennen aus Rohmehlen mit Branntkalk-, Kalkhydrat- und Kalksteinkomponente und Ihre Bedeutung für den technischen Brennprozess*. 1962
- [7] STIEß (Hrsg.): *Mechanischer Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. 3. Auflage : Springer, 2009
- [8] JANKOVIC, A. ; VALERY, W. ; SONMEZ, B.: *The benefits of high classification efficiency in closed ball mill circuits*. In: *Proceedings of the XV Balkan Mineral Processing Congress* (2013), S. 63–66
- [9] JANKOVIC, A. ; VALERY, W.: *Closed circuit ball mill - Basics revisited*. In: *Minerals Engineering* (2012). URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.006>
- [10] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE, Hrsg.: *Vt 18 Merkblatt Zerkleinerung*. Berlin, 2020
- [11] MÜHLPOINTNER, Thomas ; HOLTZ, Georg: *Klimaschutzverträge für die Industrietransformation: Rechner für die Abschätzung der Transformationskosten einer klimafreundlichen Zementproduktion : Modellversion 1.1*
- [12] LOCHER, Georg ; SCHNEIDER, Martin: *Modeling in Cement Kiln Operations*. 2011 (Innovations in portland cement manufacturing)

4 Anhang

4.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Balkenzeitplan für das Projekt Rohmehl-Siebung	4
Abbildung 1-2	Von links nach rechts: Gutbettwalzenmühle, Kugelmühle, Walzenschüsselmühle mit integriertem Korbsichter	5
Abbildung 1-3	Von links nach rechts: Statischer Sichter und Umluftsichter	6
Abbildung 1-4	Von links nach rechts: Zyklonumlufthsichter und Stabkorbsichter (Dynamischer Sichter)	6
Abbildung 1-5	Links: Einfluss der Korngröße auf den Freikalkgehalt; Rechts: Abhängigkeit der Reaktionszeit von der maximalen Korngröße [6]	8
Abbildung 1-6	Darstellung von Belitnesten mithilfe der mikroskopischen Untersuchung von Zementklinkern	9
Abbildung 1-7	Vergleich der Trompkurven von verschiedenen Klassierverfahren	10
Abbildung 2-1	Aufbau der Rohmahlanlage bei Phoenix Zement (links) und des geplanten Versuchsaufbaus bei tkIS (rechts)	12
Abbildung 2-2	Fine-Line-Siebmaschine HE500x1250 im R&D Center von Haver Niagara	13
Abbildung 2-3	Einplanung der Siebmaschine in das Versuchsgestüt (Technikum tkIS)	15
Abbildung 2-4	Homogenisierung der Materialverteilung und flexible Verbindung zwischen Bandwaage und Sieb Links: 3D-Modell. Rechts: Foto des Trichters mit Verbindungsrohren zum Sieb	16
Abbildung 2-5	Entnahme des Zwischenproduktes aus der Rohmahlanlage des Zementwerkes Phoenix	16
Abbildung 2-6	Partikelverteilungen des Zwischenproduktes der Industriemahlanlage (Durchgang und Dichte- verteilung) für die Siebversuche.	17
Abbildung 2-7	Probenaufbereitung. Links: Auffangbehälter für Siebdurchgang und Siebüberlauf. Rechts: Rhönrad zur Homogenisierung.	18
Abbildung 2-8	Versuchsprogramm mit Angabe der variierten Betriebsparameter (Parameterstudie)	18
Abbildung 2-9	Siebdurchgang (Produktmenge) in Abhängigkeit von der spez. Siebleistung (Drahtgewebe 0,118 * 0,355 mm).	19
Abbildung 2-10	Siebdurchgang in Abhängigkeit von Siebneigung für das Drahtgewebe 0,118 x 0,355 mm und PU-Gewebe 0,125 x 3,0 mm.	20
Abbildung 2-11	Trenngradkurve für Draht- und PU-Gewebe bei gleicher spez. Siebbelastung von 5,5 t/(m ³ h)	21
Abbildung 2-12	Durchgang und Fehlkornanteil 125 µm in Abhängigkeit von Anregungsdrehzahl (für beide Motoren gleich). Oben: Drahtgewebe. Unten: PU-Gewebe.	22
Abbildung 2-13	Gestörter Materialtransport im Umlaufbetrieb. Links: Materialzufuhr zum Umlaufbecherwerk. Mitte: Verstopfte Überlaufleitung. Rechts: Überfülltes Sieb aufgrund zugesetzter Überlaufleitung.	23
Abbildung 2-14	Betriebsdauer der Kreislaufversuche und Zeitpunkte der Verschleißmessungen.	24
Abbildung 2-15	Verschleißmessung des Siebgewebes. Links: Lichtmikroskop. Rechts: Siebgewebe mit Kennzeichnung der Messpunkte inkl. vergrößerte Darstellung einzelner Siebbereiche	24
Abbildung 2-16	Messung der Lamellendicke des PU-Siebbelags an einem Messpunkt.	25
Abbildung 2-17	Lamellenbreite mit Markierung der minimalen Breite (Ende Lebensdauer)	26
Abbildung 2-18	Schematische Darstellung der Vorgehensweise für die durchgeführten Klassierversuche im VDZ-Technikum	28
Abbildung 2-19	Siebmaschinenaufbau im VDZ-Technikum	29
Abbildung 2-20	Eingesetztes PU-Siebgewebe mit einer Langmasche (0,125 µm x 3 mm)	30

Abbildung 2-21 Oben:	Rohrkettenförderer mit Materialaufgabe auf dyn. Sichter;	31
Abbildung 2-22	Trenngradkurven Sichtversuche (finaler Versuchsschritt)	33
Abbildung 2-23	Trenngradkurven Siebversuche (finaler Versuchsschritt)	33
Abbildung 2-24	Vgl. der Produktkorngrößenverteilungen der finalen Klassierversuche	34
Abbildung 2-25	Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen aus Sieb- und Sichtklassierung Rohmehl 1	35
Abbildung 2-26	Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen aus Sieb- und Sichtklassierung Rohmehl 2 (finaler Versuchsschritt)	35
Abbildung 2-27	Vergleich der Klassiereffizienz zwischen Sieb- und Sichtklassierung	36
Abbildung 2-28	Vergleich der Trennschärfe zwischen Sieb- und Sichtklassierung	37
Abbildung 2-29	Umlauffaktor in Abhängigkeit des Siebgütegrad bei 125 µm für durchgeführte VDZ-Versuche	37
Abbildung 2-30	Schematische Darstellung geschlossener Mahlkreislauf mit Kugelmühle und Windsichter	39
Abbildung 2-31	Schematische Darstellung geschlossener Mahlkreislauf mit Kugelmühle und Siebmaschine	39

4.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Ergebnisse Vorversuch R&D Center Haver Niagara – ohne Überschüttung	13
Tabelle 2-2	Ergebnisse Vorversuch R&D Center Haver Niagara – mit Überschüttung bis zu 15% Uk/Üb	14
Tabelle 2-3	Rückstandswerte des Siebdurchgangs (Produktmenge) für Draht- und PU-Gewebe basierend auf Messungen mit einem Laserdiffraktometer (Malvern)	21
Tabelle 2-4	Ermittelter Verschleiß für die Messpunkte 1-3	25
Tabelle 2-5	Untersuchte Rohmehlvariationen*	27
Tabelle 2-6	Versuchseinstellungen Siebversuche (finaler Versuchsschritt)	32
Tabelle 2-7	Versuchseinstellungen Sichtversuche (finaler Versuchsschritt)	32
Tabelle 2-8	Gegenüberstellung der Siebrückstände der hergestellten Rohmehle aus Sicht- und Siebklassierung*	34
Tabelle 2-9	Relative Produktionsleistungssteigerung Sieb- vs. Sichtklassierung anhand VDZ-Versuchen	40
Tabelle 2-10	Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung	41
Tabelle 2-11	Ausgangsdaten für Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	42
Tabelle 2-12	Gegenüberstellung Betriebskosten (OPEX) Sieb- und Sichtklassierung für zwei verschiedene Szenarien	42
Tabelle 2-13	Chemische Rohmehlzusammensetzung und Kontrollparameter	43
Tabelle 2-14	Chemische Zusammensetzung der Rohmehle nach Mühlenumlauf und Klassierung (Anteile in M.-%) sowie Berechnung von Klinkerphasen und Moduli nach Bogue	45
Tabelle 2-15	Phasenzusammensetzung der Laborklinker aus Rohmehl 1 (Anteile in M.-%)	46
Tabelle 2-16	Phasenzusammensetzung der Laborklinker aus Rohmehl 2 (Anteile in M.-%)	46
Tabelle 2-17	Phasenzusammensetzung der Laborklinker aus Rohmehl 3 (Anteile in M.-%)	46
Tabelle 2-18	Phasenzusammensetzung der Laborklinker aus Rohmehl 4 (Anteile in M.-%)	47
Tabelle 2-19	Obergrenze der Größe von Belitnestern	49
Tabelle 2-20	Obergrenze der Größe von Freikalknestern	49
Tabelle 2-21	Durchschnittliche und maximale Größe von Alitkristallen	49
Tabelle 2-22	Durchschnittliche und maximale Größe von Belitkristallen	49

A **Abbildungen**

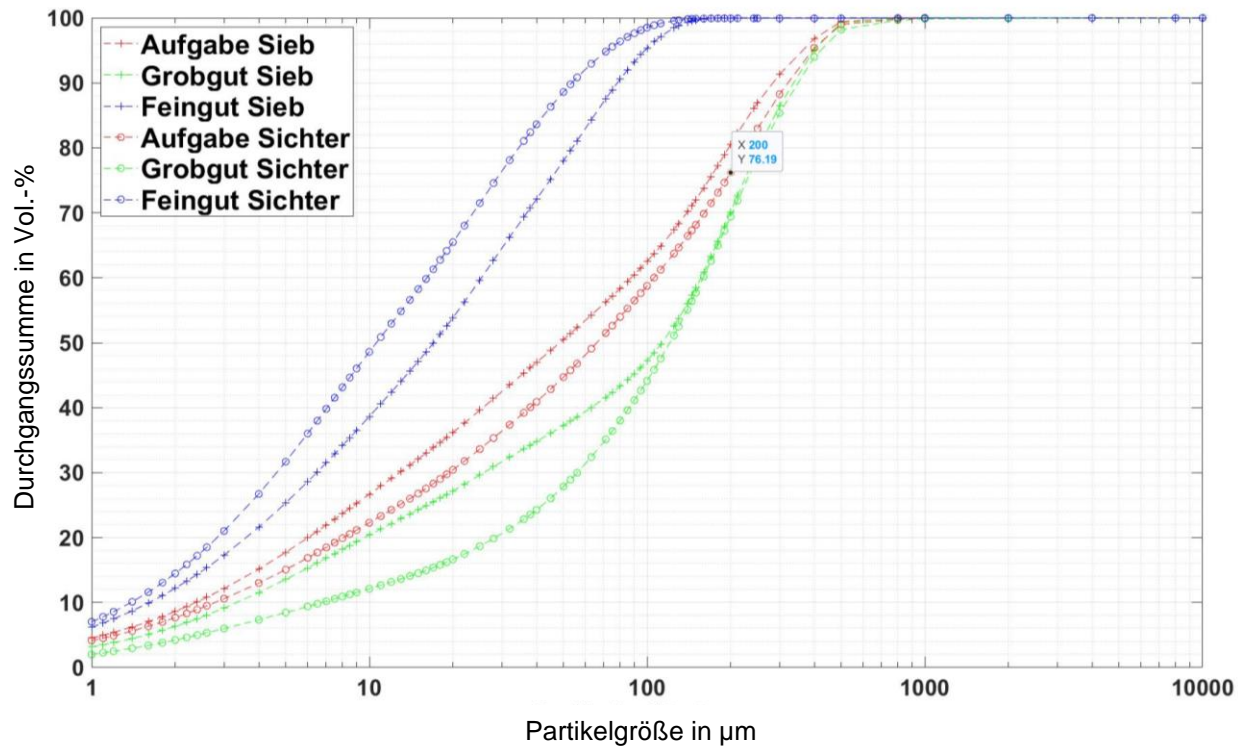


Abbildung A- 1 Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen aus Sieb- und Sichtklassierung Rohmehl 3 (finaler Versuchsschritt)

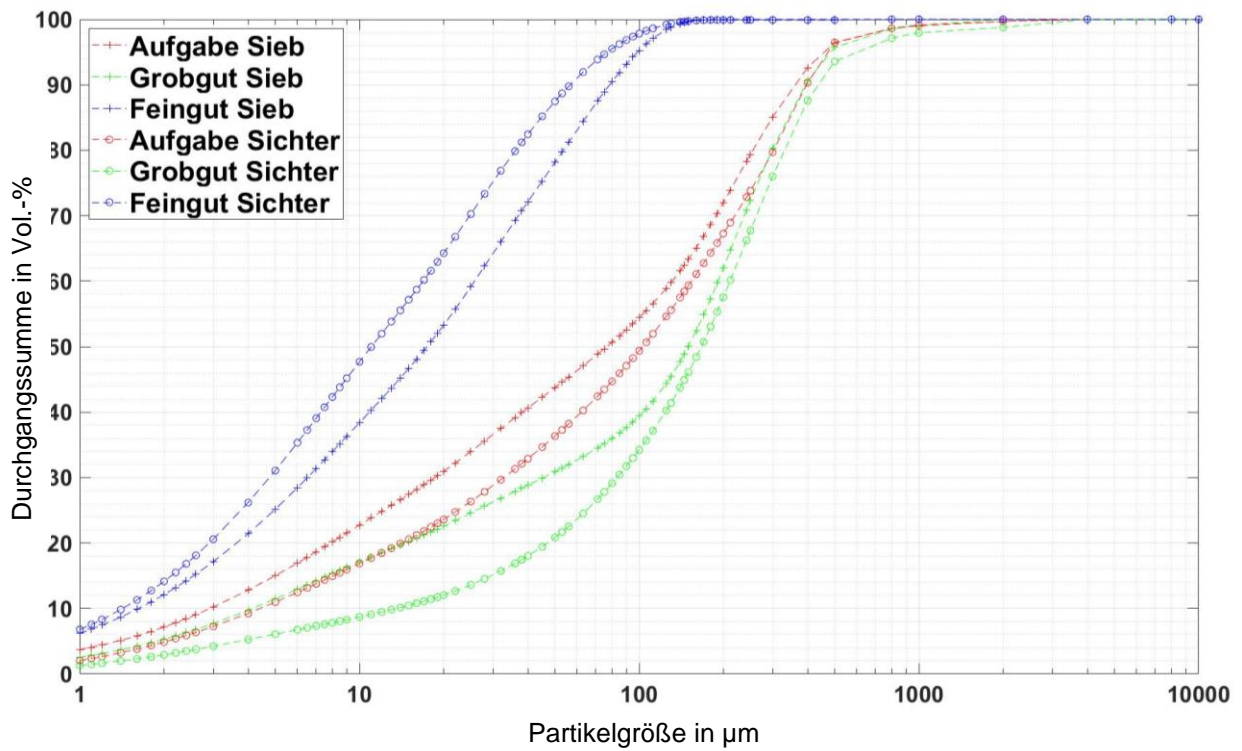


Abbildung A- 2 Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen aus Sieb- und Sichtklassierung Rohmehl 4 (finaler Versuchsschritt)

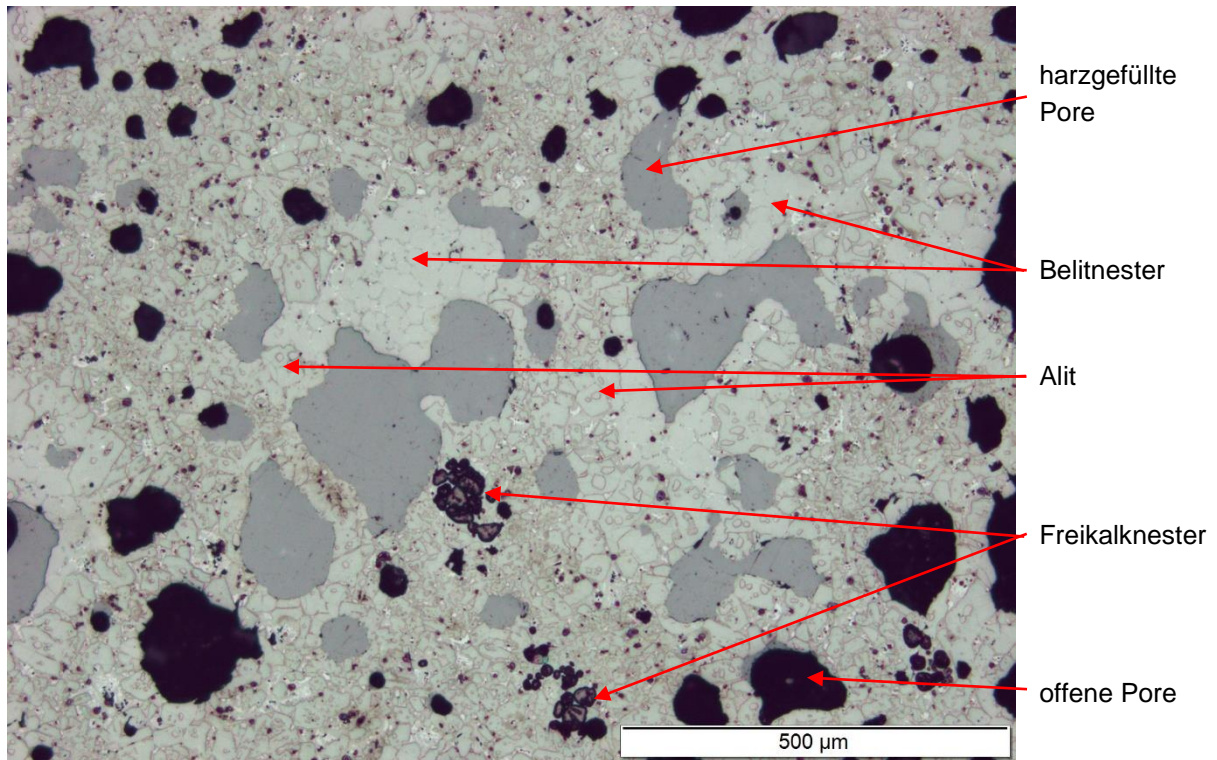


Abbildung A- 3 Laborklinker aus Rohmehl 2 gesiebt (SM-RM2-FG-D4), typisches Gefüge mit hoher Porosität, Belitnestern, Freikalknestern

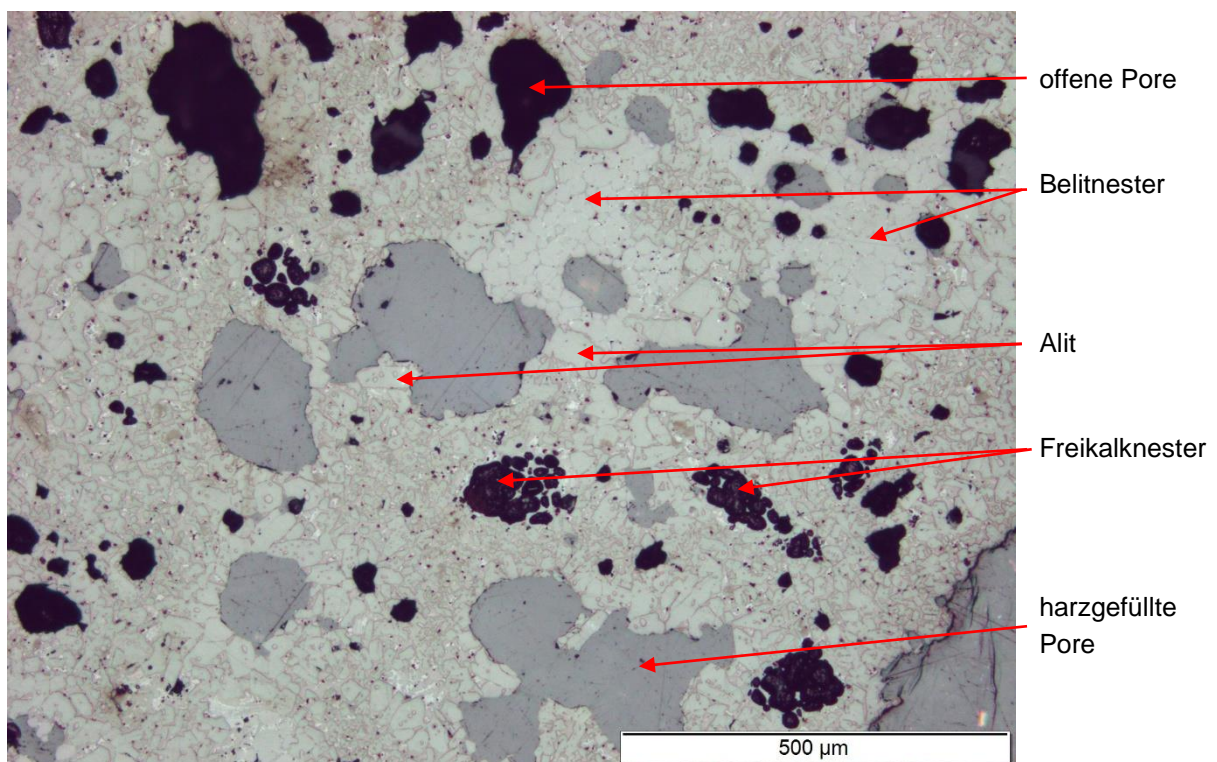


Abbildung A- 4 Laborklinker aus Rohmehl 2 gesiebt (Si-RM2-FG-D4), typisches Gefüge mit hoher Porosität, Belitnestern, Freikalknestern

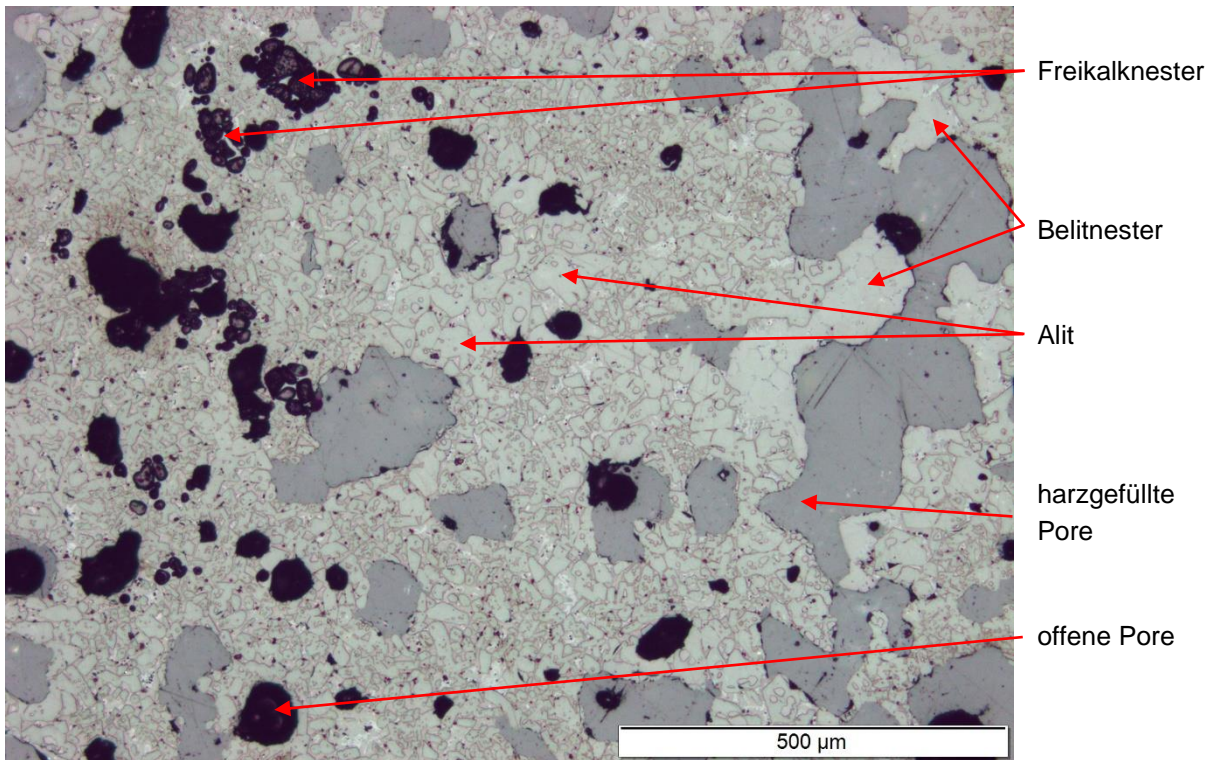


Abbildung A- 5 Laborklinker aus Rohmehl 3 gesiebt (SM-RM3-FG-D4), typisches Gefüge mit hoher Porosität, Belitnestern, Freikalknestern

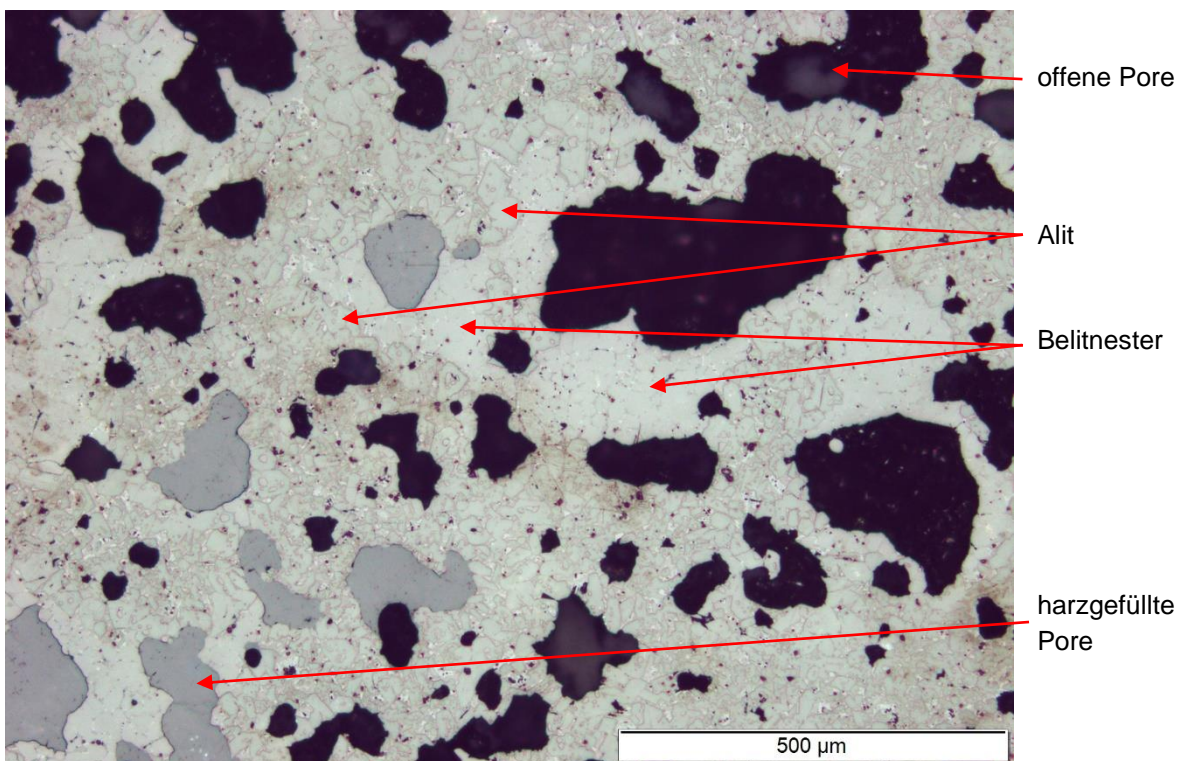


Abbildung A- 6 Laborklinker aus Rohmehl 4 gesiebt (SM-RM4-FG-D4), typisches Gefüge mit hoher Porosität, Belitnestern

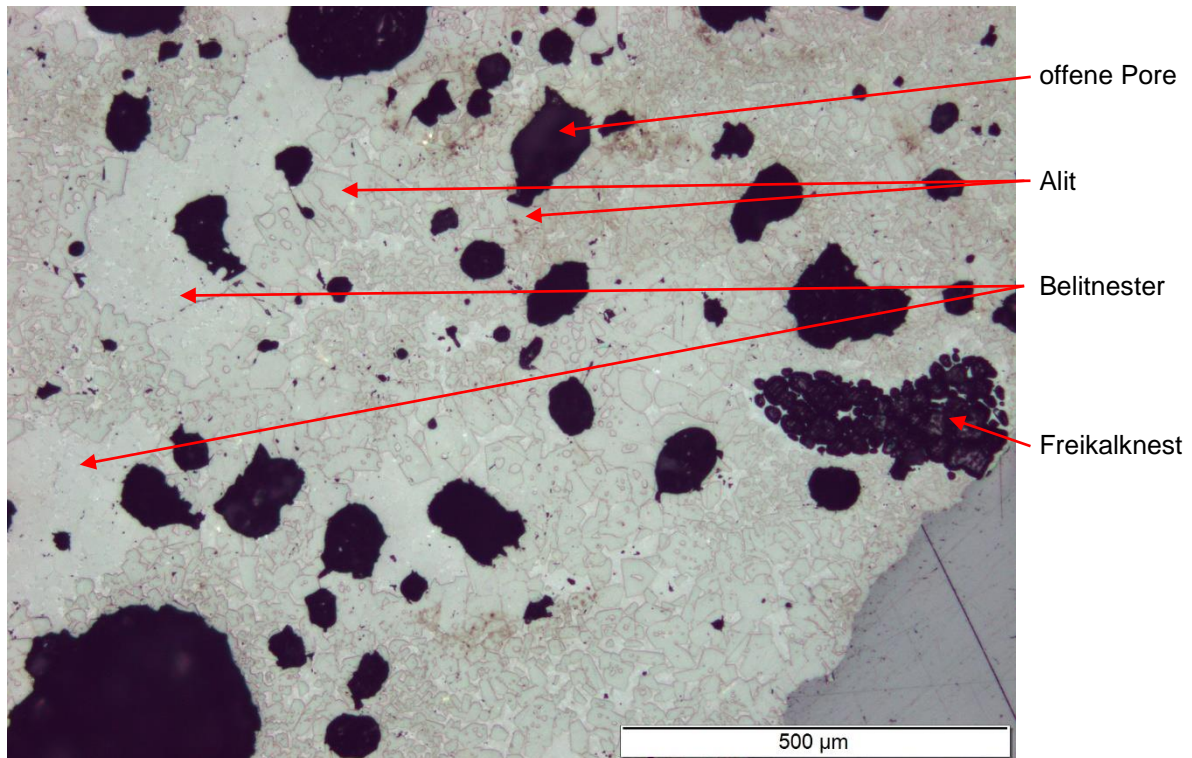


Abbildung A-7 Laborklinker aus Rohmehl 4 gesichtet (Si-RM4-FG-D4), typisches Gefüge mit hoher Porosität, Belitnestern, Freikalknest

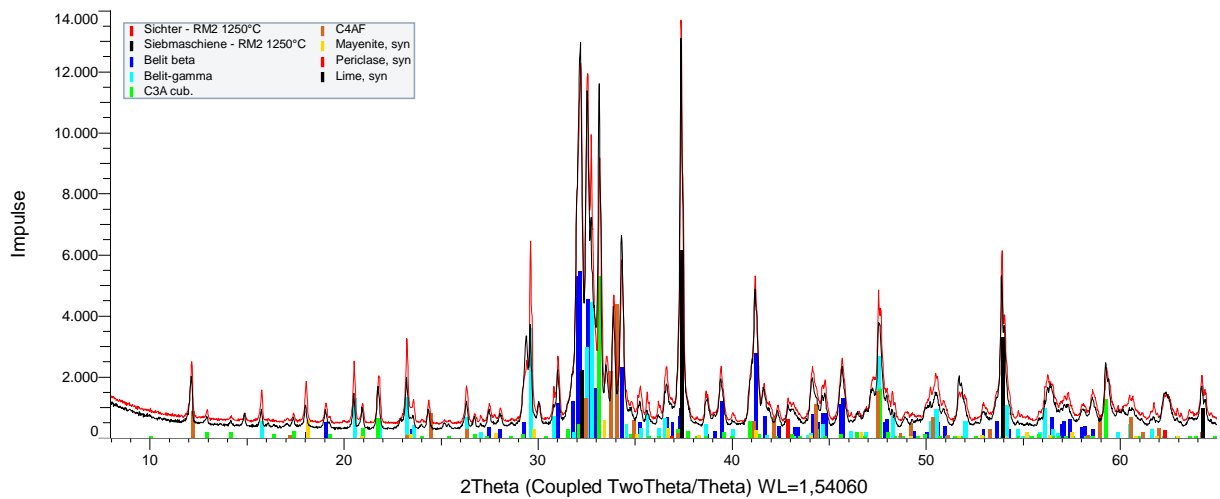


Abbildung A-8 Röntgendiffraktogramm der bei 1250°C gebrannten Laborklinker aus RM2, Vergleich von Sichtung und Siebmaschine (mit Phasenzuordnung)

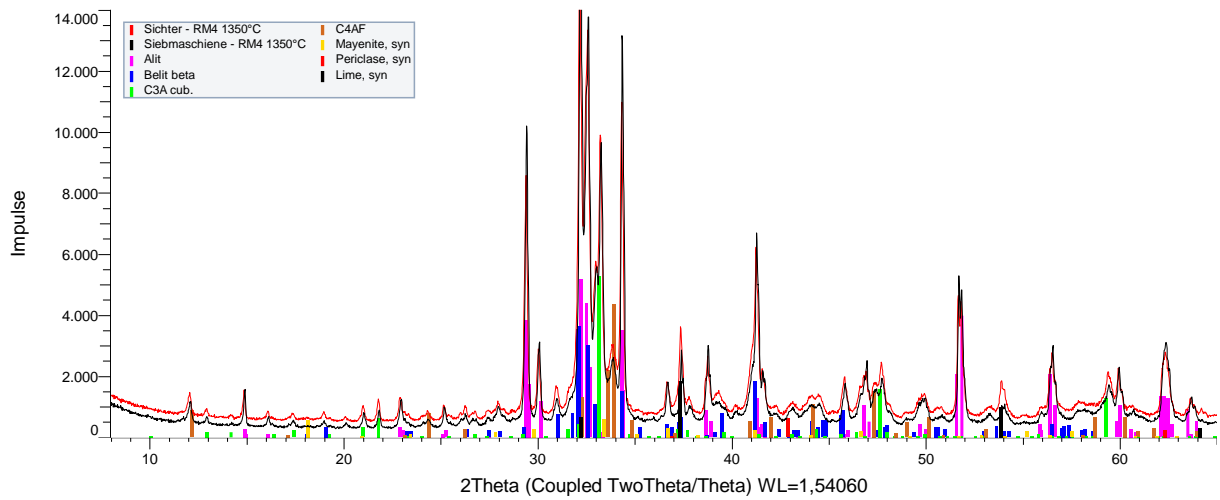


Abbildung A- 9 Röntgendiffraktogramm der bei 1350°C gebrannten Laborklinker aus RM4, Vergleich von Sichtung und Siebmaschine (mit Phasenzuordnung)

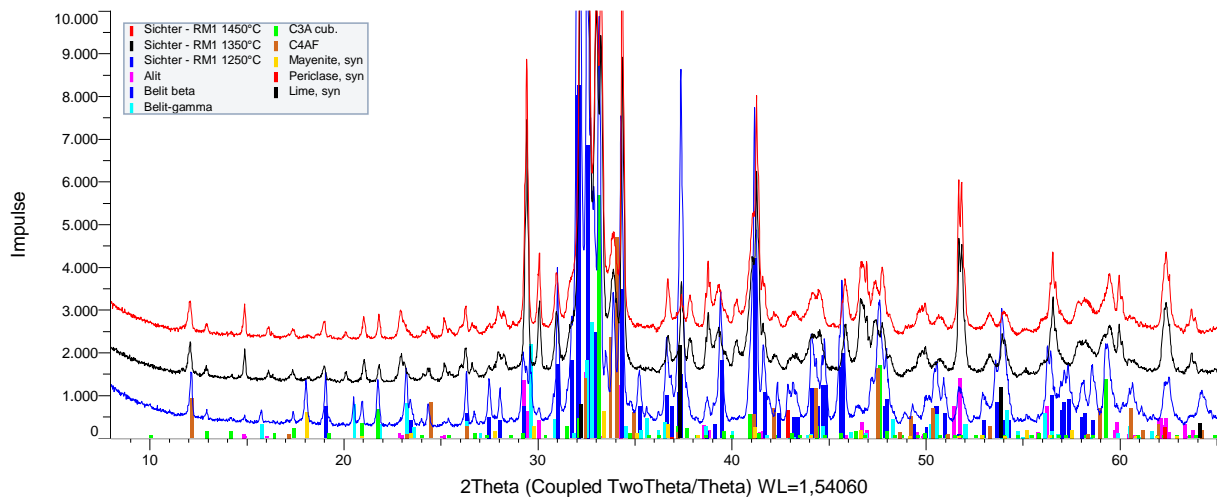


Abbildung A- 10 Röntgendiffraktogramm der Laborklinker aus RM1 / Sichter, alle Brenntemperaturen (mit Phasenzuordnung)

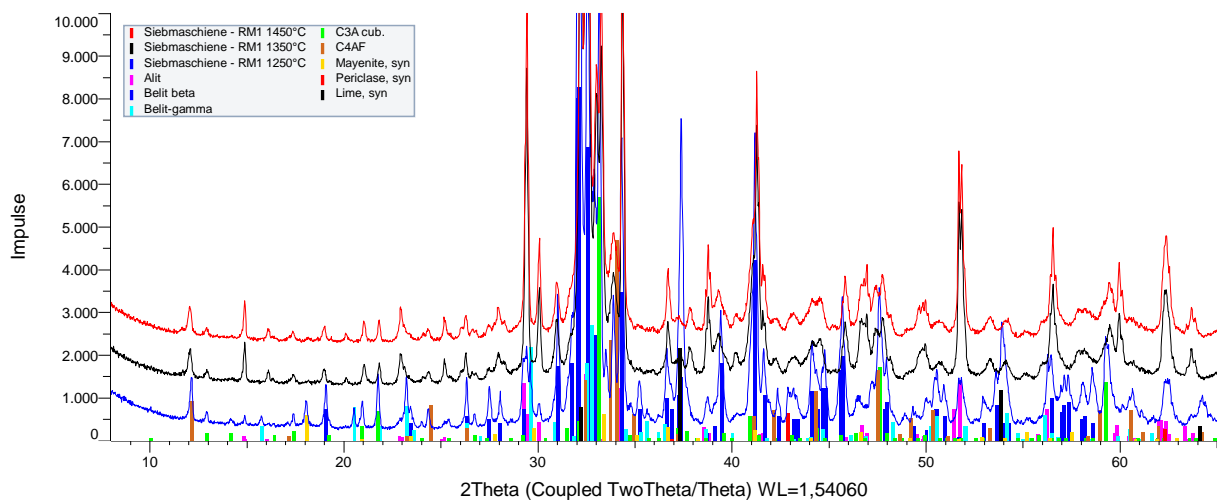


Abbildung A- 11 Röntgendiffraktogramm der Laborklinker aus RM1 / Siebmaschine, alle Brenntemperaturen (mit Phasenzuordnung)

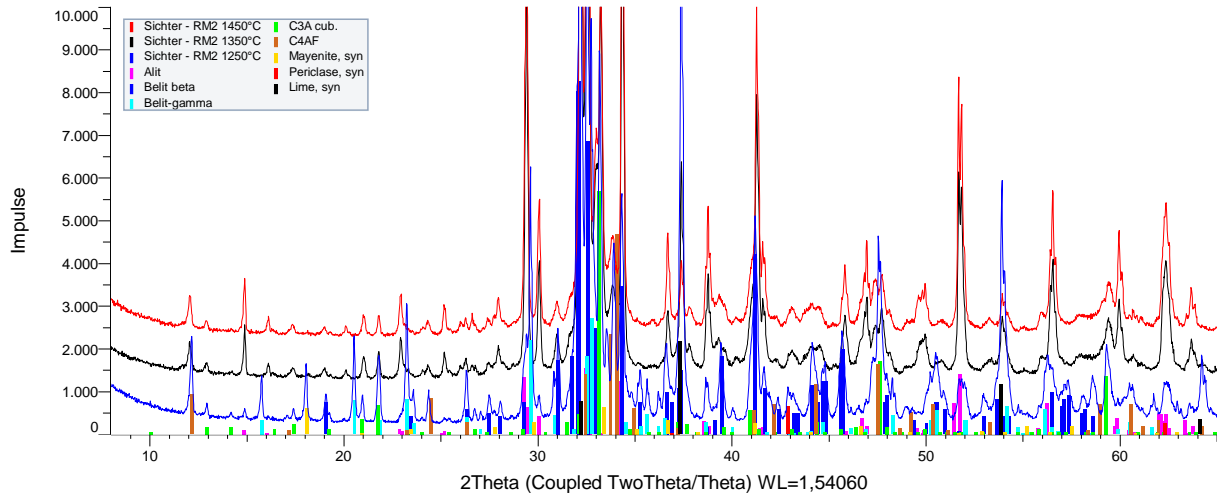


Abbildung A- 12 Röntgendiffraktogramm der Laborklinker aus RM2 / Sichter, alle Brenntemperaturen (mit Phasenzuordnung)

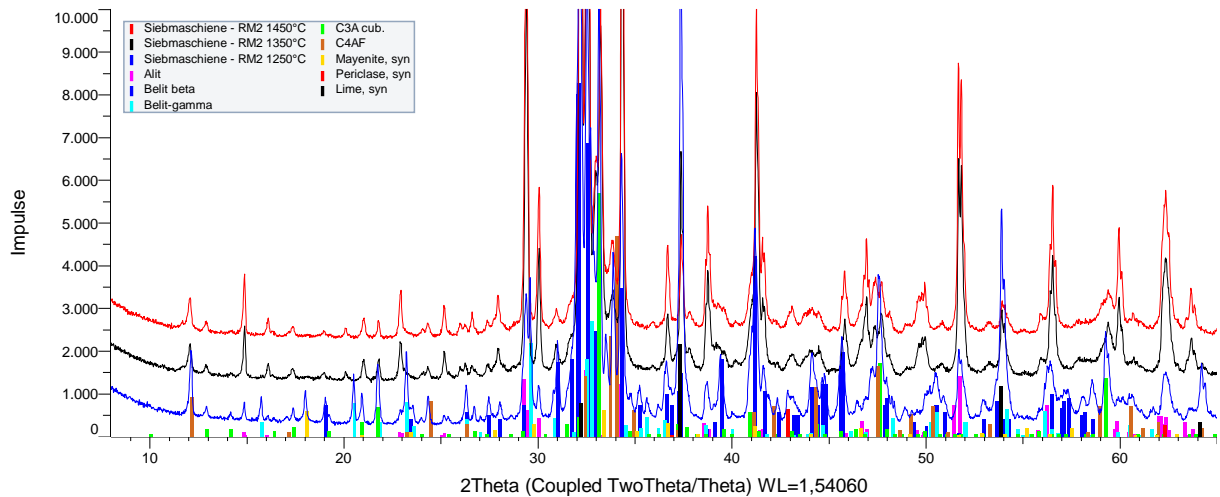


Abbildung A- 13 Röntgendiffraktogramm der Laborklinker aus RM2 / Siebmaschine, alle Brenntemperaturen (mit Phasenzuordnung)

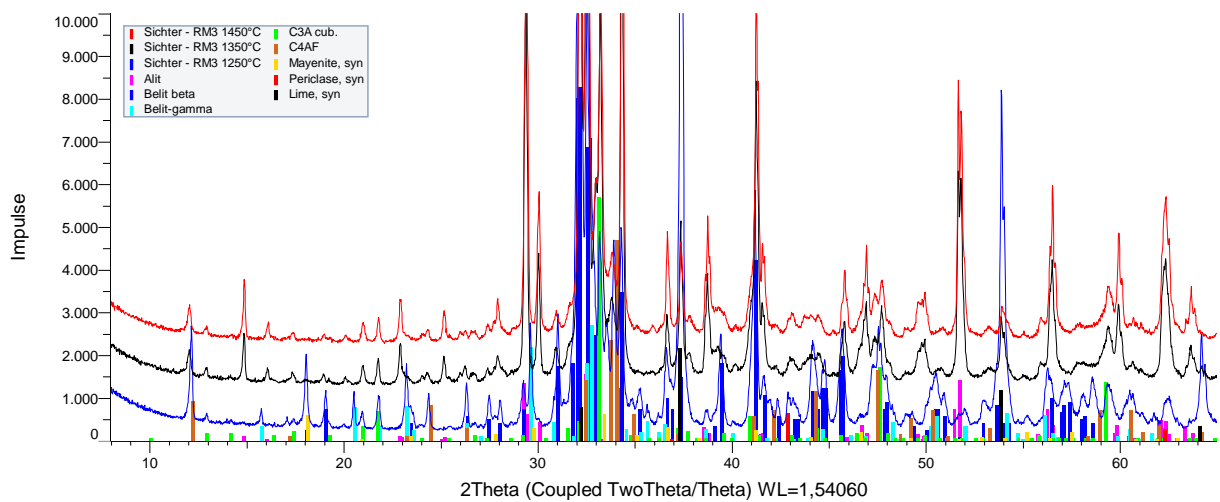


Abbildung A- 14 Röntgendiffraktogramm der Laborklinker aus RM3 / Sichter, alle Brenntemperaturen (mit Phasenzuordnung)

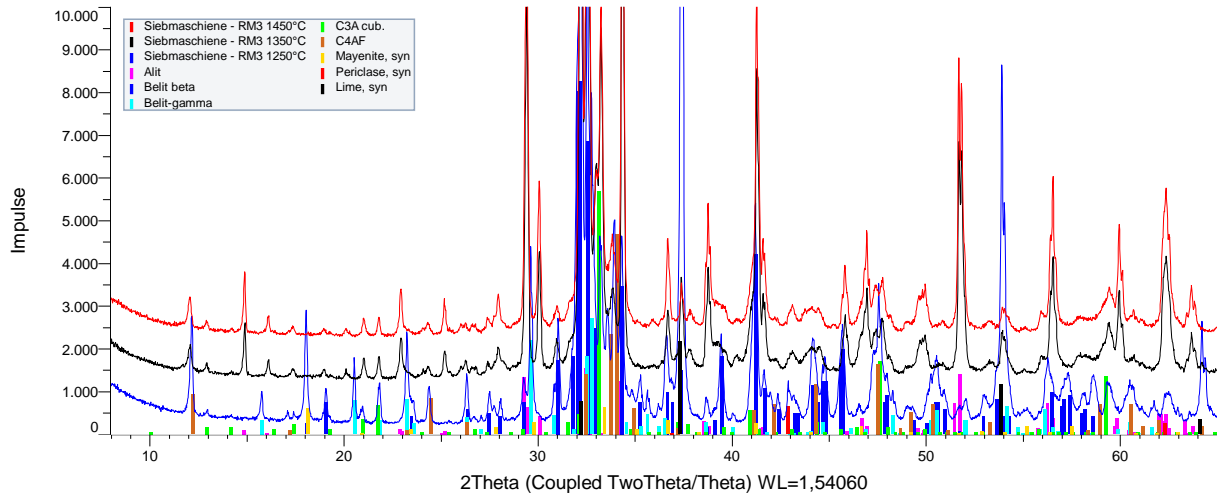


Abbildung A-15 Röntgendiffraktogramm der Laborklinker aus RM3 / Siebmaschine, alle Brenntemperaturen (mit Phasenzuordnung)

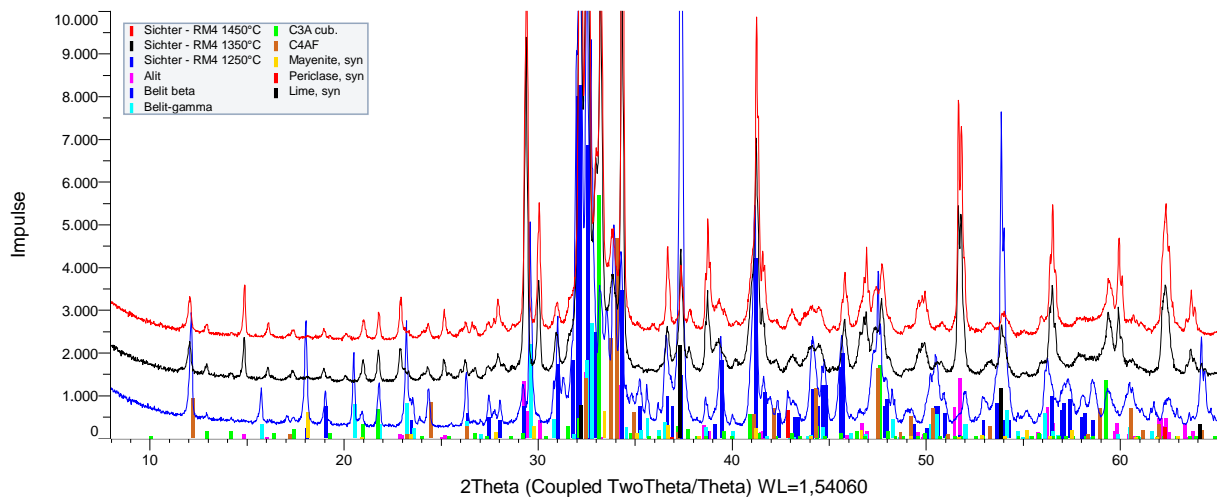


Abbildung A-16 Röntgendiffraktogramm der Laborklinker aus RM4 / Sichter, alle Brenntemperaturen (mit Phasenzuordnung)

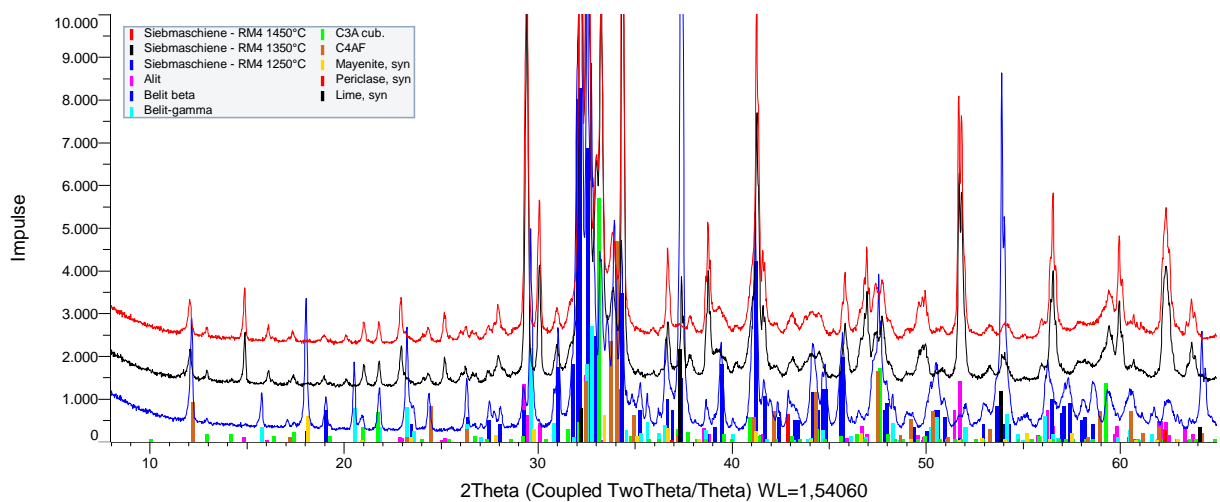


Abbildung A-17 Röntgendiffraktogramm der Laborklinker aus RM4 / Siebmaschine, alle Brenntemperaturen (mit Phasenzuordnung)

B Tabellen

Tabelle B- 1 Versuchseinstellungen Siebversuche Rohmehl 1

Versuchsnummer	V1
Einstellung Schwingförderrinne [%]	72.5
Antriebsdrehzahl (Antrieb 1+2) [UpM]	2000
Filterfrequenz Entstaubung [Hz]	20
Versuchsdauer [s]	107
Aufgabe [t/hm ²]	5.26

Tabelle B- 2 Versuchseinstellungen Siebversuche Rohmehl 2

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4
Einstellung Schwingförderrinne [%]	75	75	74	70
Antriebsdrehzahl (Antrieb 1+2) [UpM]	2000	2000	2000	2000
Filterfrequenz Entstaubung [Hz]	20	20	20	20
Versuchsdauer [s]	123	118	115	115
Aufgabe [t/hm ²]	4.80	5.30	4.95	4.64

Tabelle B- 3 Versuchseinstellungen Siebversuche Rohmehl 3

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4
Einstellung Schwingförderrinne [%]	70	70	70	75
Antriebsdrehzahl (Antrieb 1+2) [UpM]	2000	2000	2000	2000
Filterfrequenz Entstaubung [Hz]	20	20	20	20
Versuchsdauer [s]	115	110	105	115
Aufgabe [t/hm ²]	4.78	5.15	5.44	4.91

Tabelle B- 4 Versuchseinstellungen Siebversuche Rohmehl 4

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4
Einstellung Schwingförderrinne [%]	70	70	70	70
Antriebsdrehzahl (Antrieb 1+2) [UpM]	2000	2000	2000	2000
Filterfrequenz Entstaubung [Hz]	20	20	20	20
Versuchsdauer [s]	121	121	115	116
Aufgabe [t/hm ²]	4.60	4.68	4.99	4.90

Tabelle B- 5 Versuchseinstellungen Sichtversuche Rohmehl 1

Versuchsnummer	V1
Einstellung Schwingförderrinne [%]	11
Einstellung Sichter [UpM]	296
Umfangsgeschwindigkeit Stabkorb [m/s]	2.3
Volumenstrom Ventilator [m³/h]	389
Versuchsdauer [min]	71
Aufgabe [kg/h]	30

Tabelle B- 6 Versuchseinstellungen Sichtversuche Rohmehl 2

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4
Einstellung Schwingförderrinne [%]	14	14	14	11
Einstellung Sichter [UpM]	293	293	282	290
Umfangsgeschwindigkeit Stabkorb [m/s]	2.3	2.3	2.2	2.3
Volumenstrom Ventilator [m³/h]	389	389	389	389
Versuchsdauer [min]	55	60	60	81
Aufgabe [kg/h]	38	35	35	26

Tabelle B- 7 Versuchseinstellungen Sichtversuche Rohmehl 3

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4
Einstellung Schwingförderrinne [%]	11	14	14	14
Einstellung Sichter [UpM]	292	303	295	302
Umfangsgeschwindigkeit Stabkorb [m/s]	2.3	2.4	2.3	2.4
Volumenstrom Ventilator [m³/h]	389	389	389	389
Versuchsdauer [min]	91	73	94	71
Aufgabe [kg/h]	23	29	22	30

Tabelle B- 8 Versuchseinstellungen Sichtversuche Rohmehl 4

Versuchsnummer	V1	V2	V3	V4
Einstellung Schwingförderrinne [%]	17,5	17,5	17,5	17,5
Einstellung Sichter [UpM]	296	295	296	302
Umfangsgeschwindigkeit Stabkorb [m/s]	2.3	2.3	2.3	2.4
Volumenstrom Ventilator [m³/h]	389	389	389	389
Versuchsdauer [min]	78	85	55	55
Aufgabe [kg/h]	27	25	38	38

Tabelle B- 9 Ergebnisse Röntgenfluoreszenzanalyse der Ausgangsstoffe (Chemische Analyse)

Anteile in M.-%	Warsteiner Kalkstein	Ton	Mergel
Kohlendioxid	42,16	0,33	32,19
Wasser	0,85	8,86	2,12
Glühverlust	43,01	9,18	34,31
Silizium(IV)oxid	2,47	53,53	16,34
Aluminiumoxid	0,62	21,00	4,35
Titandioxid	0,04	1,11	0,19
Phosphor(V)oxid	0,05	0,03	0,08
Eisen(III)-oxid	0,35	10,87	1,60
Mangan(III)-oxid	0,06	0,03	0,04
Magnesiumoxid	0,64	0,52	0,76
Calciumoxid	52,31	0,40	40,40
Sulfat als SO ₃	0,05	0,05	0,40
Kaliumoxid	0,11	2,46	0,76
Natriumoxid	0,02	0,09	0,15
Na ₂ O-Äquivalent	0,09	1,71	0,65

Kontaktdaten:

vdz

Dr. Stefan Seemann, M.Sc. Sebastian Rösch
Umwelt und Betriebstechnik, www.vdz-online.de

stefan.seemann@vdz-online.de;

Tel.: (0211) 45 78-263

sebastian.roesch@vdz-online.de;

Tel.: (0211) 45 78-422

VDZ Technology gGmbH

Toulouser Allee 71

40476 Düsseldorf



thyssenkrupp

Dr. Karl Lampe, Dipl.-Ing. Carsten Sachse, Dipl.-Ing. Christoph Hörenbaum

BU Cement Technologies Münsterland

Product Management/R&D/CPT

karl.lampe@thyssenkrupp.com

Tel.: +49 2525 99 2230

carsten.sachse@thyssenkrupp.com

Tel.: +49 2525 99 2876

christoph.hoerenbaum@thyssenkrupp.com

Tel.: +49 2525 99 3699

thyssenkrupp Industrial Solutions AG (tkIS)

Graf-Galen-Str. 17, 59269 Beckum, Deutschland