

Projektabschlussbericht

„Rückgewinnung von Schleifkörnern aus Produktionsabfällen flexibler Schleifmittel“ (ReCAb)

Gefördert unter dem Az: 33215/01-21/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt


Durchgeführt durch:

Institut für Aufbereitung und Recycling, RWTH Aachen
Holger Giani, Malte Althaus, Thomas Pretz

Lehr- u. Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe, RWTH Aachen
Matthias Schnell, Lukas Schenke, Thomas Horst, Peter Quicker

PDR Recycling GmbH + Co KG
Thomas Hillebrand

Aachen/Thurnau, Juli 2018

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	33215	Referat	21	Fördersumme	223.218,00 €
Antragstitel		Rückgewinnung von Schleifkörnern aus Produktionsabfällen flexibler Schleifmittel (Recycling of Coated Abrasives: ReCAb) – eine Recyclinglösung für die Branche			
Stichworte					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
18 + 3 Monate		01.08.2016		30.04.2018	
Zwischenberichte		17.01.2017		14.07.2017	
Bewilligungsempfänger		PDR Recycling GmbH + Co KG Am alten Sägewerk 3 95349 Thurnau		Tel 09228/950-300 Fax 09228/950-51	
				Projektleitung Rebecca Schoberth	
				Bearbeiter Matthias Schnell (TEER) Lukas Schenke (TEER) Holger Giani (I.A.R.) Malte Althaus (I.A.R.)	
Kooperationspartner		Institut für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe (I.A.R.) RWTH Aachen Wüllnerstr. 2 52062 Aachen Lehr- und Forschungsgebiet der Technologie der Energierohstoffe (TEER) RWTH Aachen Wüllnerstr. 2 52062 Aachen			

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Bei der Produktion von flexiblen Schleifmitteln fallen Produktionsabfälle in Form von Fehlchargen, Stanzresten und Verschnittmassen an, die mangels etablierter Aufbereitungstechnik nicht stofflich verwertet, sondern in Müllverbrennungsanlagen thermisch behandelt und die verbleibenden Rückstände im Anschluss mit der Schlacke deponiert werden. In den Produktionsabfällen sind Schleifkörner enthalten, deren rohstoffliches Potential bei dieser Art der Entsorgung als sekundärer Rohstoff nicht genutzt wird. In Vorarbeiten wurde nachgewiesen, dass die Schleifkörner in einem kombinierten thermisch-mechanischen Aufbereitungsprozess angereichert werden können. Im Projekt ReCAb wurden die von den Projektpartnern im Labormaßstab untersuchten Einzelprozesse in eine Prozesskette im Technikumsmaßstab überführt und um den Behandlungsschritt der Klassierung erweitert.

Ziel der Partner ist es, die Ergebnisse aus dem Vorhaben durch ein folgendes Upscaling-Projekt zu verwerten, in dem der Bau einer Anlage im Demonstrationsmaßstab zur Verwertung von Abfällen aus der Schleifmittelproduktion realisiert werden soll.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Projekt ReCAb haben die Projektpartner die zuvor auf Laborebene untersuchten Prozesse zum werkstofflichen Recycling von Schleifkörnern (TRL 4) in eine technische Prozesskette (TRL 5) überführt. Ein Industrieunternehmen aus der Branche begleitete das Projekt und unterstützte das Projektkonsortium, indem es Produktionsabfälle für die Versuchskampagnen zur Verfügung stellte und eine qualitative Bewertung des im Projekt erzeugten Recyclingkorns im Vergleich zu primärem Korn durchführte.

Aufgrund des Aufbaus der flexiblen Schleifmittel wurden als Voraussetzung zur Rückgewinnung des enthaltenen Schleifkorns drei Verfahrensschritte identifiziert:

- Thermische Auftrennung der Verbundmatrix von Schleifkorn und Binder
- Mechanische Abtrennung der reinen Schleifkornfraktion von den Begleitstoffen
- Klassierung der Schleifkörner zur Erfüllung entsprechender Normen von Primärprodukten

Vor dem thermischen Aufschluss ist eine Konditionierung des Inputs nötig. Durch die thermische Behandlung wird unter oxidierenden Bedingungen der organische Anteil aus Binder und Unterlage möglichst vollständig umgesetzt. Der anorganische Anteil verbleibt als pulverförmige Komponente zusammen mit dem Schleifkorn im Rückstand. Dieser Rückstand, bestehend aus freigelegtem Schleifkorn und Begleitstoffen, wird in einem weiteren mechanischen Trennprozess separiert. Abschließend erfolgt eine Klassierung der Schleifkornfraktion, um analog zum Primärproduktionsprozess normkonforme Kornklassen zu erzeugen.

Ergebnisse und Diskussion

Arbeitspaket 0 – Materialcharakterisierung

Zur Erfüllung der anwendungsspezifischen Anforderungen werden bei der Produktion von flexiblen Schleifmitteln eine Vielzahl von Werkstoffen eingesetzt. Sowohl Schleifkorntypen als auch Materialien für Unterlagen und Bindemittel variieren. Hieraus resultieren teils stark unterschiedliche Brennstoffeigenschaften, welche in Laboranalysen näher charakterisiert wurden. Die Auswertung der Immediat-, Heizwert- und Elementaranalysen bestätigte die Annahme heterogener Zusammensetzungen, welche bei der Auswahl und Auslegung des thermischen Prozesses berücksichtigt werden müssen. Beispielhaft ist der Aschegehalt der untersuchten Schleifmittel zu nennen, bei dessen Analyse Werte zwischen 9,5 % und 64,8 % gemessen wurden. Dies war insbesondere auf den Anteil der enthaltenen Schleifkörner zurückzuführen.

Arbeitspaket 1 – Vorkonditionierung/Zerkleinerung

Ziel der Vorkonditionierung ist es, die in Menge, Form und Schüttdichte unterschiedlichen Schleifmittelabfälle, kontinuierlich in einheitlichen Korngrößen, aufgelockert für den folgenden thermischen Prozess, durch eine möglichst material- und apparateschonende Zerkleinerung bereitzustellen. Als Zielkorngröße wurden 300 µm festgelegt, damit unterschiedliche thermische Verfahren die konditionierten Abfälle verarbeiten können.

Es wurden die Techniken der reißenden und schneidenden Zerkleinerung sowie eine Kombination aus schlagender und schneidender Beanspruchung untersucht. Aufgrund des vergleichsweise geringen Material- und Maschinenverschleißes bei gleichzeitig gutem Materialaufschluss, wurde die reißende Zerkleinerung als am besten geeignete Technik identifiziert. Mittels reißender Zerkleinerung auf einem Kammwalzenzerkleinerer war es möglich die Schleifmittelabfälle effektiv aufzulockern, zu vergleichmäßigen und einen Großteil des Materials auf Partikelgrößen unter 300 µm zu zerkleinern. Einige wenige Bestandteile sind jedoch auch nach der Zerkleinerung noch größer als 300 µm. Diese müssen durch eine Schutzsiebung entfernt und der Zerkleinerung erneut zugeführt werden. Messungen zum Maschinenverschleiß nach einer Zerkleinerung von ca. 600 kg zeigten keinen messbaren Verschleiß.

Arbeitspaket 2 – Thermischer Aufschluss

Ziel des thermischen Materialaufschlusses ist die Desintegration der Schleifmittelmatrix zur Trennung der Schleifkörner von den Träger- und Bindermaterialien. Die Anforderungen an den thermischen Prozess bestehen dabei in der Vermeidung von Veränderungen der Korneigenschaften durch zu hohe Temperaturen, die eine Qualitätsminderung zur Folge haben können.

In Voruntersuchungen wurde im Labormaßstab zunächst die thermische Stabilität des Schleifkorns untersucht. Dazu wurden verschiedene Monofractionen von Primärkornsorten bei Temperaturen zwischen 500 und 1000 °C behandelt. Die Qualität der Körner wurde anschließend durch Untersuchungen eines kooperierenden Schleifmittelherstellers beurteilt. Dabei zeigten sich geringfügige Einflüsse ab Behandlungstemperaturen von 650 °C, z.B. auf die Optik, Kornhärte und Schleifleistung. Um Qualitätsnachteile von Kornrezyklat gegenüber dem Primärkorn möglichst vollständig auszuschließen, wurden für den thermischen Aufschluss im Projekt Temperaturen unter 600 °C angestrebt.

Die für einen erfolgreichen Aufschluss der Schleifmittel notwendigen Temperaturen, Verweilzeiten und Gasatmosphären wurden in thermogravimetrischen Analysen sowie Batchversuchen in einem Muffelofen für verschiedene Schleifmittel ermittelt. Versuche unter oxidativer Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 450 und 600 °C führten bei allen untersuchten Schleifmittelarten zum erfolgreichen Materialaufschluss. Dieser ließ sich einerseits durch optische Untersuchungen mittels Mikroskop feststellen, andererseits konnte der Glühverlust als geeignetes Bewertungskriterium identifiziert werden. Bei erfolgreichem Materialaufschluss wurden Glühverluste unter 1 % erreicht.

Anschließend wurde eine kontinuierliche thermische Behandlung von Schleifpapieren im Technikumsmaßstab erprobt. Verfahrenstechnische Grundlage bildeten die vorher durchgeführten Batchversuche. Als Reaktoren wurden ein Drehrohr, ein Schneckenreaktor, eine Rostfeuerung und eine Wirbelfeuerung eingesetzt. Die Versuche im Drehrohr (Glühverlust > 5 %) und Schneckenreaktor (Glühverlust ca. 16 %) waren aufgrund unzureichenden Materialaufschlusses nicht erfolgreich. Ursächlich war vermutlich die geringe Durchmischung von Luft und Schleifpapier, in Kombination mit den begrenzten Verweilzeiten in beiden Reaktortypen. Bei der Behandlung von Schleifmitteln in einer Rost- und einer Wirbelfeuerung wurde hingegen ein erfolgreicher Aufschluss des Materials erreicht (Glühverluste jeweils < 1 %). Für alle untersuchten Aggregate wurden verschiedene anwendungsspezifische Vor- und Nachteile zur Behandlung von Schleifmitteln festgestellt.

Arbeitspaket 3 – Mechanischer Trennprozess

Ziel des mechanischen Trennprozesses ist es, Schleifkörner aus den Rückständen der thermischen Behandlung zurückzugewinnen. Es sollen Schleifkornkonzentrate mit Reinheiten größer 90 % erzeugt werden.

Zunächst wurde eine Materialcharakterisierung der Rückstände durchgeführt. Die Rückstände setzten sich aus Schleifkörnern, Aschen, Schleifkorn-Asche-Agglomeraten sowie aus Störstoffen und unverbrannten Materialien zusammen. Die Partikelgrößen der letzten beiden Materialgruppen waren deutlich größer als die Schleifkörner (max. 1 mm) und ließen sich somit effektiv bei 1-4 mm absieben.

Vor einer Trennung der im Siebunterlauf verbliebenen Schleifkörner und Aschen mussten zunächst die Schleifkorn-Asche-Agglomerate aufgelöst werden. Eine effektive Desagglomeration konnte mittels Luftstrahlmühle bei 3 bar erreicht werden, so dass anschließend fast ausschließlich freie Schleifkörner und Asche vorlagen.

Mittels Siebung und Zick-Zack-Sichter war es möglich, gröbere Schleifkörner (> P60, entspricht ca. 269 µm) von der Asche mit Reinheiten > 95 % abzutrennen. Mittels Abweiseradsichter konnten sowohl grobe als auch feine Körner effektiv zurückgewonnen werden (Korngrößenbereich: P20-P600 entspricht ca. 1000 bzw. 25 µm). Es wurden Trennversuche mit den Rückständen der zuvor durchgeführten Muffelofen- und Großversuche durchgeführt. Die Rückstände aus dem Muffelofen ließen sich gut trennen. Die separierten Konzentrate der Kornarten SiC, Korund, Diamant, Zirkonkorund und Granat wiesen Reinheiten > 95 % auf. Es wurden Werte für das Wertstoffausbringen von über 90 % erreicht, mit Ausnahme der sehr feinen Körnung von P600 (25 µm), bei der das Ausbringen bei 54% lag. Der Trennerfolg der Rückstände aus den Großversuchen war maßgeblich von den zuvor erzielten Ergebnissen der jeweiligen thermischen Prozesse abhängig. Aus den Rückständen des Tunnelofens, der Wirbelschichtfeuerung und der Rostfeuerung konnten Körner mit Reinheiten von über 90 % zurückgewonnen werden. Bei nicht vollständiger Oxidation der organischen Bestandteile (z.B. bei Rückständen aus dem Drehrohrofen) konnte kein Schleifkornkonzentrat ausreichender Reinheit zurückgewonnen werden. Agglomerate aus Prozessen bei denen teilweise hohe Temperaturen von bis zu 1000 °C erreicht wurden (z. B. Korundschleifmittel mit einem hohen Heizwert in der Rostfeuerung), ließen sich nicht desagglomerieren und somit nicht effektiv trennen.

Arbeitspaket 4 – Klassierung

Ziel der Klassierung ist es, Korngrößenverteilungen der aus dem Recyclingprozess gewonnenen Schleifkörner entsprechend der FEPA-Norm (Federation of European Producers of Abrasives) herzustellen. Die Klassierung ist ein aus der Primärschleifkornherstellung erprobter Prozess, den es auf Recyclingkörner anzuwenden galt.

Als Inputmaterial für die Versuche wurde sortenreines, nicht korngrößengetrenntes Abfallkorn (Siliziumkarbid, SiC und Halbedelkorund, HEK) verschiedener Hersteller eingesetzt. Dieses Abfallkorn war vergleichbar mit dem Recyclingkorn nach thermisch-mechanischer Behandlung.

Durch externe Tastversuche wurde die Taumelsiebmaschine als geeignetes Aggregat identifiziert. Hierfür waren die Faktoren Trennschärfe, Verlust und Verschleiß ausschlaggebend. Aufgrund der großen Bandbreite an unterschiedlichen Korngrößen wurde eine Vorsiebung in Grob-, Mittel- und Feinkorn und anschließend die eigentliche Klassierung durchgeführt.

Die mit der Taumelsiebmaschine erzielten Klassierungsergebnisse wurden den Ergebnissen gegenübergestellt, die mittels Siebanalyse und Camsizeranalyse erzeugt worden waren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch reine Siebung ohne Homogenisierung die Klassierung nach FEPA-P-Spezifikation nur schwer erzeugt werden kann. Durch Homogenisierung, gezielte Beimischung anderer Kornklassen und erneute Mischung kann die Korngrößenverteilung der Zielkornklasse jedoch sehr exakt eingestellt werden. Generell kann mittels Siebung bis zur Körnung P320 entsprechend den Anforderungen der FEPA-Norm klassiert werden.

Arbeitspaket 5 – Bewertung Prozesskette

Die untersuchte Prozesskette wurde in der Größenordnung der erwarteten europäischen Marktmengen von Halbedelkorund- und Siliziumkarbidabfällen modelliert. Die Transferkoeffizienten im Modell orientieren sich an den Ergebnissen der Arbeitspakete 1-4. Zu Vergleichszwecken wurde ebenfalls die Primärherstellung der Schleifkörner abgebildet. Die technische Bewertung über den Gesamtprozess ergibt ein Wertstoffausbringen von ca. 93 % mit einer Reinheit von ca. 95 %. Durch die Schleifkorn-Rückgewinnung ließen sich nach dem Modell jährlich rund 3.600 t Rohstoffe einsparen. In einem mittleren Szenario ließen sich jährlich 51 TJ Primärenergie und 3,2 Mio. kg CO₂-Äquivalente im Gegensatz zur Primärproduktion der Schleifkörner einsparen.

Darüber hinaus wurde der ReCAb-Prozess auch aus ökonomischer Sicht bewertet. Unter der Voraussetzung, dass werthaltige Schleifkörner in ausreichendem Maße für das stoffliche Recycling zur Verfügung gestellt werden, erscheint ein wirtschaftlicher Betrieb des entwickelten Recyclingverfahrens möglich.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Projektergebnisse wurden auf dem DGAW-Wissenschaftskongress (Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft) sowie einem Kongress der Dechema bzw. des VDI mit jeweils einem Vortrag und einem Beitrag im Tagungsband veröffentlicht.

- Dechema/VDI: „Jahrestreffen der ProcessNet Fachgruppen Extraktion und Rohstoffe“, 12.-13. März 2018 in Frankfurt (http://processnet.org/JTR_EXT_ROH2018.html)
- DGAW: 8. Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“, 15.-16. März 2018 in Wien (<https://www.dgaw.de/aktivitaeten/wissenschaftskongress/>)

Mit Hilfe der DBU und dem VDS (Verband deutscher Schleifmittelhersteller) wurde eine Informationsveranstaltung „Rückgewinnung von Schleifkörnern aus Produktionsabfällen flexibler Schleifmittel“ am 8. Mai 2018 in Osnabrück durchgeführt. Die Informationsveranstaltung richtete sich gezielt an die Hersteller flexibler Schleifmittel.

Zudem wurde ein Artikel in der Zeitschrift „Müll- und Abfall“ (Fachzeitschrift für Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Heft 05/2018, S. 228-233) veröffentlicht. (<https://www.muellundabfall.de/ce/recycling-von-flexiblen-schleifmitteln/detail.html>)

Geplante Veröffentlichungen:

- Für die Konferenz „Recy & DepoTech“ (07.-09.11.2018 in Leoben, Österreich) ist ein Vortrag geplant. Ein Beitrag für den Tagungsband wurde bereits eingereicht.
- Über einen Teil der Ergebnisse wird eine Dissertation am I.A.R. verfasst, die voraussichtlich 2019 veröffentlicht wird.

Fazit

Die Projektergebnisse zeigen, dass das Recycling von Schleifkörnern aus Produktionsabfällen von flexiblen Schleifmitteln grundsätzlich technisch und wirtschaftlich möglich ist. Nach einer Vorkonditionierung und einer thermochemischen Umwandlung in Verbindung mit einer mechanischen Nachbehandlung lassen sich die Schleifkörner zurückgewinnen und in hoher Reinheit in den Produktionsprozess zurückführen. Schleifmittel, die mit ausschließlich rezyklierten Schleifkörnern hergestellt werden, können die Qualitätsanforderungen an das Schleifkorn und zur Herstellung neuer flexibler Schleifmittel i.d.R. einhalten.

Vor Realisierung der angestrebten kommerziellen Recyclinganlage müssen die erworbenen Erkenntnisse zur thermochemischen und mechanischen Aufbereitung im Pilotmaßstab erprobt werden, um die technisch-wirtschaftliche Machbarkeit des Verfahrens insgesamt zu überprüfen. Dazu sollen höhere Durchsätze, eine höhere Schleifmittelbandbreite, Anlagenverschleiß, Materiallogistik etc. in einem quasi-kontinuierlichen Anlagenbetrieb, in dem die mechanische und thermische Anlagentechnik direkt miteinander verschaltet ist, untersucht werden. Anschließend können größere Chargen von Rezyklat-Schleifmitteln beim Schleifmittelhersteller produziert und getestet werden.

Als Weiterentwicklung des Verfahrens könnte das Recycling feinerer Kornklassen sehr interessant sein, da diese generell werthaltiger sind. Zusätzlich könnte das Anlagenkonzept auf die Verarbeitbarkeit fluor- und borhaltiger Schleifmittel geprüft werden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	12
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	13
1 Zusammenfassung (PDR)	14
2 Einleitung (TEER, I.A.R.)	15
3 Hauptteil	16
3.1 Materialcharakterisierung (TEER)	16
3.2 Mechanische Vorkonditionierung (I.A.R.)	17
3.2.1 Pressversuche	18
3.2.2 Zerkleinerung	19
3.2.2.1 Schneidende Zerkleinerung	19
3.2.2.2 Kombination aus schlagender und schneidender Zerkleinerung	21
3.2.2.3 Reißende Zerkleinerung	23
3.3 Thermischer Materialaufschluss (TEER)	27
3.3.1 Vorversuche	27
3.3.1.1 Wärmebehandlung Primärkorn	27
3.3.1.2 Thermogravimetrische Analysen	28
3.3.2 Batchversuche	28
3.3.2.1 Tastversuche im Muffelofen (Labormaßstab)	28
3.3.2.2 Tastversuche im Rührreaktor (Labormaßstab)	31
3.3.2.3 Herdwagenofen (Technikumsmaßstab)	32
3.3.3 Kontinuierliche Versuche	32
3.3.3.1 Drehrohr (Technikumsmaßstab)	32
3.3.3.2 Schneckenreaktor (Technikumsmaßstab)	34
3.3.3.3 Rostfeuerung (Technikumsmaßstab)	35
3.3.3.4 Wirbelfeuerung (Technikumsmaßstab)	37
3.3.4 Bewertung der thermischen Prozesse	39
3.3.4.1 Materialaufschluss	39
3.3.4.2 Schadstoffemissionen	40

3.4	Mechanischer Trennprozess (I.A.R.)	41
3.4.1	Bestimmung Schleifkornanteil	41
3.4.2	Charakterisierung des Rückstandes der thermischen Behandlung	41
3.4.3	Desagglomeration	42
3.4.4	Identifikation eines geeigneten Trennaggregats	44
3.4.4.1	Siebung	44
3.4.4.2	Zick-Zack-Windsichter	45
3.4.4.3	Abweiseradsichter	45
3.4.5	Parametrierung der Sichtereinstellungen	47
3.4.6	Trennversuche von unterschiedlichen Kornmaterialien	47
3.4.7	Aufbereitung der Rückstände aus den kontinuierlichen Verbrennungsversuchen	49
3.5	Klassierung (PDR)	53
3.5.1	Identifikation eines industriellen Partners für Klassierversuche	53
3.5.2	Tastversuche extern (Identifikation geeignetes Aggregat)	53
3.5.3	Versuchsdurchführung (diskontinuierlich)	55
3.5.3.1	Klassierversuche Siebhersteller	55
3.5.3.2	Klassierversuche Kornhersteller	57
3.6	Untersuchung der Rezyklatqualität (I.A.R.)	59
3.6.1	Härte und Zähigkeit	59
3.6.2	Springverhalten	60
3.6.3	Schleiftests	61
3.7	Technisch-ökonomisch-ökologische-Bewertung der Prozesskette (I.A.R., PDR)	62
3.7.1	Technische Bewertung der Prozesskette (I.A.R.)	62
3.7.2	Ökologische Bewertung der Prozesskette (I.A.R.)	63
3.7.2.1	Methodik	63
3.7.2.2	Treibhausgasemissionen und Energiebedarf	65
3.7.2.3	Rohstoffbedarf	67
3.7.3	Ökonomische Bewertung der Prozesskette (PDR)	67
4	Fazit (PDR)	70
	Literaturverzeichnis	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau von flexiblen Schleifmitteln auf Unterlage	16
Abbildung 2: Heizwert- und Immediatanalysen, bezogen auf den Rohzustand	17
Abbildung 3: Unterschiedliche Formen der Schleifmittelabfälle.....	18
Abbildung 4: Ergebnisse der Druckbeanspruchung von Stanzresten.....	19
Abbildung 5: Pressversuche: Aufgabematerial, Kammerpressvorgang, gepresster Ballen ...	19
Abbildung 6: Schneidwerkzeuge der verwendeten Rotorschere	20
Abbildung 7: Partikelgrößenverteilung verschiedener Unterlagenarten nach Zerkleinerung mittels Rotorschere	20
Abbildung 8: Zerkleinerte Stanzreste und Schleifmittel mit Papier- und Gewebeunterlage der Korngrößenklasse 36-60 mm	21
Abbildung 9: Schematischer Aufbau einer Hammermühle.....	22
Abbildung 10: Unbeanspruchtes Schleifmittel und Schleifmittel nach Zerkleinerung mittels Hammermühle.....	22
Abbildung 11: Verwendete Kammwalze in Doppelwellenausführung, Schema.....	23
Abbildung 12: Partikelgrößenverteilung verschiedener Unterlagenarten nach Zerkleinerung mittels Kammwalze	24
Abbildung 13: Kammwalzenzerkleinerer vor und nach den Zerkleinerungsversuchen.....	25
Abbildung 14: Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerung von Schleifmittelballen mittels Kammwalze.....	26
Abbildung 15: Mikroskopaufnahmen des bei unterschiedlichen Temperaturen wärmebehandelten Zirkonkorunds.....	27
Abbildung 16: Exemplarische Ergebnisse der thermogravimetrischen Analysen von Schleifmitteln mit HEK P320 und mit SiC P100	28
Abbildung 17: Schematischer Aufbau der Retorte im Muffelofen	29
Abbildung 18: Mikroskopaufnahmen von unbehandelten und thermisch behandelten Schleifmitteln.....	30
Abbildung 19: Mikroskopaufnahmen der bei der Firma Invertec thermisch behandelten Schleifmittel.....	31
Abbildung 20: Anlagenschema des Drehrohrs.....	33
Abbildung 21: Mikroskopaufnahmen von unbehandeltem Schleifmittel (SiC P120) und im Drehrohr thermisch behandeltem Schleifmittel nach der ersten (Pyrolyse) und zweiten Prozessstufe (Oxidation)	34
Abbildung 22: Mikroskopaufnahmen der Aschen der im Schneckenreaktor thermisch behandelten Schleifmittel	35
Abbildung 23: Anlagenschema der verwendeten Rostfeuerung.....	36
Abbildung 24: Mikroskopaufnahmen der Aschen von in der Rostfeuerung thermisch behandelten Schleifmittel-Mischfraktionen.....	37
Abbildung 25: Anlagenschema des Wirbelfeuerungsprototyps	38

Abbildung 26: Mikroskopaufnahmen der Aschen der in der Wirbelfeuerung thermisch behandelten Schleifmittel-Mischfraktionen.....	39
Abbildung 27: Materialzusammensetzung Rückstand: 1. Korund-Schleifkörner, 2 SiC-Schleifkörner, 3 Asche, 4 Agglomerate, 5 Störstoffe, 6 unverbrannte Materialien.....	41
Abbildung 28: Schleifmittelkonzentrat ohne und mit Desagglomeration.....	43
Abbildung 29: Verwendete Luftstrahlmühle und Funktionsskizze	43
Abbildung 30: Siebung bei 400 µm auf einem Taumelsieb und Korund-Schleifkornkonzentrat im Siebüberlauf	45
Abbildung 31: Ausbringen von Schleifkörnern verschiedener Körnungen mittels Zick-Zack-Sichter.....	45
Abbildung 32: Verwendeter Abweiseradsichter und Prinzipskizze.....	46
Abbildung 33: Tastversuche Abweiseradsichter: Asche- und Kornfraktionen von P36-Korund und P150-SiC.....	46
Abbildung 34: Kornausbringen unterschiedlicher Korund-Körnungen in Abhängigkeit der Abweiserad-Umdrehungsgeschwindigkeit	47
Abbildung 35: PKS-Schleifkornkonzentrat (weiß) mit hohen Ascheanteilen (schwarz) und teilweise zerstörten Schleifkornstrukturen.....	49
Abbildung 36: Massenausbringen ins Konzentrat nach Korngrößenklassen.....	50
Abbildung 37: SiC-Konzentrate nach Rostfeuerung.....	50
Abbildung 38: Korund Konzentrate nach Rostfeuerung.....	50
Abbildung 39: Asche- und Schleifkornfraktion der Drehrohrversuche mit Korund.....	51
Abbildung 40: Asche- und Schleifkornfraktion der Wirbelfeuerungsversuche mit Korund.	51
Abbildung 41: Asche- und Schleifkornfraktion der Tunnelofenversuche mit SiC.....	52
Abbildung 42: Mehrdeck-Horizontal-Siebmaschine	53
Abbildung 43: Korngrößenverteilung des Aufgabematerials (Mischkornfraktion SiC).....	54
Abbildung 44: Taumelsiebmaschine	54
Abbildung 45: P-Körnungen HEK in FEPA-Spezifikation	57
Abbildung 46: Ergebnisse der Härtetests für P36 SiC- und Korund-Rezyklate sowie der jeweiligen Originalkörnern	60
Abbildung 47: Ergebnisse der Friabilitytests für P36 SiC- und Korund-Rezyklate sowie der jeweiligen Originalkörnern	60
Abbildung 48: Ergebnisdarstellung des Schleiftests mit aus rezyklierten Siliziumschleifkörnern hergestelltem Schleifmittel.....	61
Abbildung 49: Verfahrensfliessbild des ReCAb-Stoffstrommodells	62
Abbildung 50: Relative Anteile am Gesamtenergiebedarf im mittleren ReCAb-Szenario.	66
Abbildung 51: Einsparpotenzial Hauptrohstoffe europäische Schleifkorn-Primärproduktion	67
Abbildung 52: Annahmen Mengengerüst.....	68
Abbildung 53: Standorte der europäischen Schleifmittelhersteller	68

Abbildung 54: Originalkorn-Preise pro Kilogramm in USD (2017).....69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufgabematerial für Zerkleinerungsversuche mittels Kammwalzenzerkleinerer ...	24
Tabelle 2: Zerkleinerte Partikel mit einem maximalen Feret-Durchmesser.	25
Tabelle 3: Ergebnisse Batchversuche im Muffelofen nach Parameteroptimierung für verschiedene Kornmaterialien.	30
Tabelle 4: Ergebnisse der Batchversuche im Rührreaktor nach Parameteroptimierung für fluorhaltige Schleifmittel.....	31
Tabelle 5: Ergebnisse des Versuchs im Herdwagenofen.....	32
Tabelle 6: Ergebnisse der kontinuierlichen Versuche im Drehrohr nach Parameteroptimierung.	33
Tabelle 7: Ergebnisse der kontinuierlichen Versuche im Schneckenreaktor.	34
Tabelle 8: Ergebnisse der kontinuierlichen Versuchskampagnen in der Rostfeuerung.	37
Tabelle 9: Ergebnisse der kontinuierlichen Versuchskampagnen in der Wirbelfeuerung.	38
Tabelle 10: Konzentrat-Reinheit verschiedener gesichteter P80 SiC-Schleifkörner nach unterschiedlicher Verweilzeit in einer Luftstrahlmühle.....	44
Tabelle 11: Ergebnisse der Aufbereitung von Schleifmittel unterschiedlicher Korntypen.	48
Tabelle 12: Fotos der Konzentrate und Aschefraktionen von Schleifmittel unterschiedlicher Korntypen.....	48
Tabelle 13: Ergebnisse der Tastversuche an der Taumelsiebmaschine.	54
Tabelle 14: Ergebnisse der ersten Klassiersversuche an der Taumelsiebmaschine.....	55
Tabelle 15: Ergebnisse der zweiten Klassiersversuche an der Taumelsiebmaschine.....	56
Tabelle 16: Ergebnisse der dritten Klassiersversuche an der Taumelsiebmaschine.....	56
Tabelle 17: Ergebnisse der vierten Klassiersversuche an der Taumelsiebmaschine.....	57
Tabelle 18: Ergebnisse der Klassiersversuche beim Kornhersteller.	58
Tabelle 19: Ergebnisse des zweiten Prüfverfahrens zum Springverhalten.....	61
Tabelle 20: Abfallmengen des europäischen Schleifmittelmarktes.....	63
Tabelle 21: Umweltrelevante Eigenschaften der in Europa verkauften SiC- und HEK-Schleifmittel.....	65
Tabelle 22: KEA und THG-Emissionen.....	66

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

BBK	Blaubrand-Halbedelkorund
BImSchV	Bundemissionsschutzverordnung
C_{fix}	fixer Kohlenstoffgehalt
C_R	Konzentration an Reststoffen
C_W	Konzentration (Reinheit) an Wertstoff
D-Feret _{max}	maximaler Feret-Durchmesser
FEPA	Federation of European Producers of Abrasives
HBK	Hauptbrennkammer
HEK	Halbedelkorund
HV 1	Härte nach Vickers mit Prüfkraft 1 kPap (9,81 N)
KBF ₄	Kaliumtetrafluoroborat
KEA	Kumulierter Energieaufwand
Ma.-%	Massenprozent
MDF-Stab	mitteldichter Holzfaserstab
NBK	Nebenbrennkammer
PCDD/PCDF	Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane
PKS	Polykristallines Schleifkorn
P _{xx} (z. B. P36)	Bezeichnung der Körnung flexibler Schleifmittel
R_M	Massenausbringen in %
roh	bezogen auf Rohzustand
R_w	Wertstoffausbringen in %
SiC	Siliziumkarbid
SM	Schleifmittel
THG	Treibhausgas
λ	Luftzahl

1 Zusammenfassung (PDR)

Im Projekt ReCAb („Rückgewinnung von Schleifkörnern aus Produktionsabfällen flexibler Schleifmittel – eine Recyclinglösung für die Branche“) wurde ein Verfahren zur Aufbereitung von Produktionsabfällen aus der Schleifmittelherstellung entwickelt und zur Patentierung eingereicht. Dabei sollte das zurückgewonnene Schleifkorn vergleichbare Schleif- und Materialeigenschaften wie das Primärkorn aufweisen, um eine möglichst hohe Akzeptanz unter den Marktteilnehmern zu erreichen.

Am Projekt beteiligt waren die PDR Recycling GmbH + Co KG, das Institut für Aufbereitung und Recycling (I.A.R.) und das Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER), beide der RWTH Aachen University angehörig. Das Vorhaben wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 33215/01 gefördert.

Das Aufbereitungsverfahren beginnt mit der Vorkonditionierung der Schleifmittel, gefolgt vom thermischen Materialaufschluss zur Freilegung der Schleifkörner. Daraufhin werden die schleifkornhaltigen Verbrennungsrückstände durch Desagglomeration und Separation voneinander getrennt. Abschließend erfolgt die Klassierung der zurückgewonnenen Schleifkörner nach der FEPA-P-Norm. Branchenübliche Qualitätstests, die im Labor eines Industriepartners durchgeführt worden waren, ergaben, dass die aus dem Recyclingprozess gewonnenen Schleifkörner qualitativ den Originalschleifkörnern entsprechen. Somit konnte im Rahmen des Projektes für alle Arbeitspakete und die produzierten Rezyklate die Machbarkeit nachgewiesen werden.

Eine werkstoffliche Verwertung von Schleifkörnern substituiert Neuware aus energieintensiver Herstellung. Der hohe Marktwert einiger Schleifkörner eröffnet in Verbindung mit den vermiedenen Entsorgungskosten die Möglichkeit, mit einem spezialisierten Aufbereitungs- und Verwertungsprozess ein wirtschaftlich tragfähiges Recyclingverfahren anbieten zu können. Das Vorhaben grenzt sich somit klar vom Stand der Technik (Verbrennung, Deponie) ab und stellt eine Innovation in der Branche dar.

2 Einleitung (TEER, I.A.R.)

Bei der Produktion von Schleifmitteln auf Unterlage fallen Produktionsabfälle in Form von Fehlchargen, Stanzresten und Verschnittmasse an. Diese Abfälle machen einen Anteil von bis zu 10 % des Produktionsvolumens aus. Derzeit werden die Produktionsabfälle nicht stofflich verwertet, sondern thermisch behandelt und der verbleibende Rückstand im Anschluss deponiert. In den Produktionsabfällen sind Schleifkörner enthalten, deren Produktpotential als sekundärer Rohstoff derzeit nicht genutzt wird.

Durch die Entwicklung einer innovativen Prozesskette, mit dem Ziel des werkstofflichen Recyclings von Schleifkörnern, sollte eine grundlegende Weiterentwicklung des bisherigen Stands der Technik erfolgen. Ziel des Vorhabens war es, aus Produktionsabfällen Schleifkörner in gleichwertiger Qualität des Primärkorns zurückzugewinnen. Dazu wurde eine Recyclinglösung im Technikumsmaßstab (TRL 5) erprobt. Der Fokus der Versuche lag auf der Gewinnung der mengenmäßig bedeutsamen Sekundärrohstoffe Halbedelkorund (HEK) und Siliziumcarbid (SiC). In Tastversuchen wurde die Übertragbarkeit des Prozesses auf die Rückgewinnung fünf weiterer Korntypen getestet. Neben der rein technischen Entwicklung und Validierung der Prozesskette wurde das Verfahren ökonomisch und ökologisch bewertet.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Abfallfraktionen (z. B. Stanzabfälle, Randabschnitte, ganze Jumborollen etc.) ist vor dem thermischen Materialaufschluss eine Vorkonditionierung durch Zerkleinerung notwendig, um für den nachfolgenden Prozessschritt eine definierte Korngrößenverteilung zu gewährleisten. Der Materialaufschluss von Schleifkorn und Binder erfolgt durch einen thermochemischen Prozess, bei dem der organische Anteil aus Binder und Unterlage nahezu vollständig oxidiert wird. Dagegen verbleibt der anorganische Anteil zusammen mit dem Schleifkorn im Rückstand. Dieser liegt in Form von Agglomeraten vor, die mittels Mahlprozess aufgeschlossen werden. Im anschließenden Sichtprozess wird das freigelegte Schleifkorn von den Begleitstoffen getrennt. Da die Erfassung von Produktionsabfällen bei den Herstellern nur anhand der eingesetzten Kornart (z. B. HEK und SiC), nicht aber nach Korngröße bzw. Kornklasse (z. B. P36, P80 etc.) möglich ist, erfolgt im letzten Schritt eine Klassierung der rückgewonnenen Schleifkörner. Dieser Prozessschritt ist zwar bereits als Teil der Primärproduktion von Schleifkörnern bekannt, zur Erzeugung normkonformer Kornklassen ist eine Integration in den Recyclingprozess jedoch unverzichtbar.

Das Projekt wurde von einem Industriepartner aus der Branche begleitet. Dieser unterstützte die Antragsteller, indem er Produktionsabfälle für die Versuchskampagnen zur Verfügung stellte und das im Projekt erzeugte Recyclingkorn zu Schleifmittelmustern verarbeitete. Der Vergleich der Schleifmittelmuster mit einem auf herkömmliche Weise produzierten Schleifmittel aus primärem Korn ermöglichte einen Abgleich der Qualitäten.

3 Hauptteil

3.1 Materialcharakterisierung (TEER)

Die Anwendungsmöglichkeiten von Schleifmitteln sind vielfältig und erfordern unterschiedliche Qualitätskriterien, z. B. für das Schleifen von Metall- oder Holz. Zur Erfüllung dieser Anforderungen werden Schleifmittel mit verschiedenen Kornarten und Körnungen (Kornklassen) eingesetzt. Kornarten sind beispielsweise Siliziumkarbid, Sinterkeramik und Diamant. [Umw02]

Die Festlegung der Korngrößenverteilungen von Schleifkörnern erfolgt in Europa nach der FEPA-Norm. Für flexible Schleifmittel werden die Körnungen mit dem Buchstaben P (Ausnahme Diamant (D) und Bornitrid (B)) in Verbindung mit Zahlen gekennzeichnet (Beispiel: P36), welche die Anzahl der Siebmaschen auf einem Zoll Länge des verwendeten Prüfsiebes beschreiben. P36-Schleifkörner, mit einem mittleren Korndurchmesser von 500 µm, würden ein Sieb mit 36 Maschen pro Zoll Länge noch passieren. Niedrige Zahlen bezeichnen entsprechend gröbere Körnungen und hohe Zahlen feinere Körnungen. Zum Vergleich weisen P12-Schleifkörner einen mittleren Korndurchmesser von 1.815 µm, P5000-Schleifkörner eine mittlere Körnung von 5 µm auf. [DIN00]

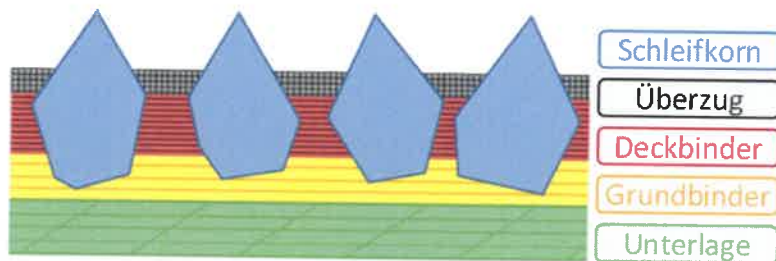


Abbildung 1: Aufbau von flexiblen Schleifmitteln auf Unterlage nach Wittchen 2006 [WR06].

Der Aufbau flexibler Schleifmittel aus Schleifkörnern, Unterlagen und Bindemitteln ist in Abbildung 1 dargestellt. Je nach Anforderungen an die Schleifmittel variieren neben Schleifkörnern auch die Materialien der Unterlagen. Es werden z. B. Papiere, Gewebe, Vulkanfaser und Folien verwendet. Der auf die Unterlage aufgetragene Grundbinder, meist aus Kunstharzen bestehend, fixiert die Schleifkörner. Durch den Deckbinder werden die Haftung und Position der Schleifkörner auf der Unterlage zusätzlich stabilisiert. Dem Deckbinder oder einem zusätzlichen Überzug werden je nach Anwendung der Schleifmittel Zuschlagstoffe wie z. B. organische Lösemittel, beigemischt. Diese ermöglichen z. B. die Minderung von Reibungswärme durch Schleifprozesse mittels des Einsatzes von Kühlmittel. [Umw02]

Zur Bestimmung der Brennstoffeigenschaften wurden im Rahmen des Projekts für insgesamt zwölf flexible Schleifmittel Heizwert-, Immediat- und Elementaranalysen am TEER durchgeführt. Die untersuchten Schleifmittel umfassten Schleifpapiere mit den Kornarten Schmelzkorund, Siliziumkarbid, Sinterkeramik, Diamant sowie Papier- und Kunststoffgewebeunterlagen. Papiere und Kunststoffgewebe sind dabei aufgrund ihrer Zusammensetzung weiter zu unterteilen, z. B. hinsichtlich ihrer Dichte und Stärke. Die untersuchten Schleifmittel unterschieden sich weiterhin durch ihre Körnungen und den daraus resultierenden Kornmassenanteilen. Die Kornmassenanteile der am TEER analysierten Schleifmittel sind aus dem Produktionsprozess bekannt und liegen zwischen minimal 10 % und maximal 40 %, im Durchschnitt bei 26,4 %.

Durch materialbedingte Schwierigkeiten bei der Herstellung homogener Proben wurden bei größeren Abweichungen der Doppelbestimmungen weitere nach DIN-Normen vorgeschriebene Analysen durchgeführt. Heizwertanalysen erfolgten daher in zwei Doppelbestimmungen, wohingegen für die übrigen Analysen einfache Doppelbestimmungen ausreichten.

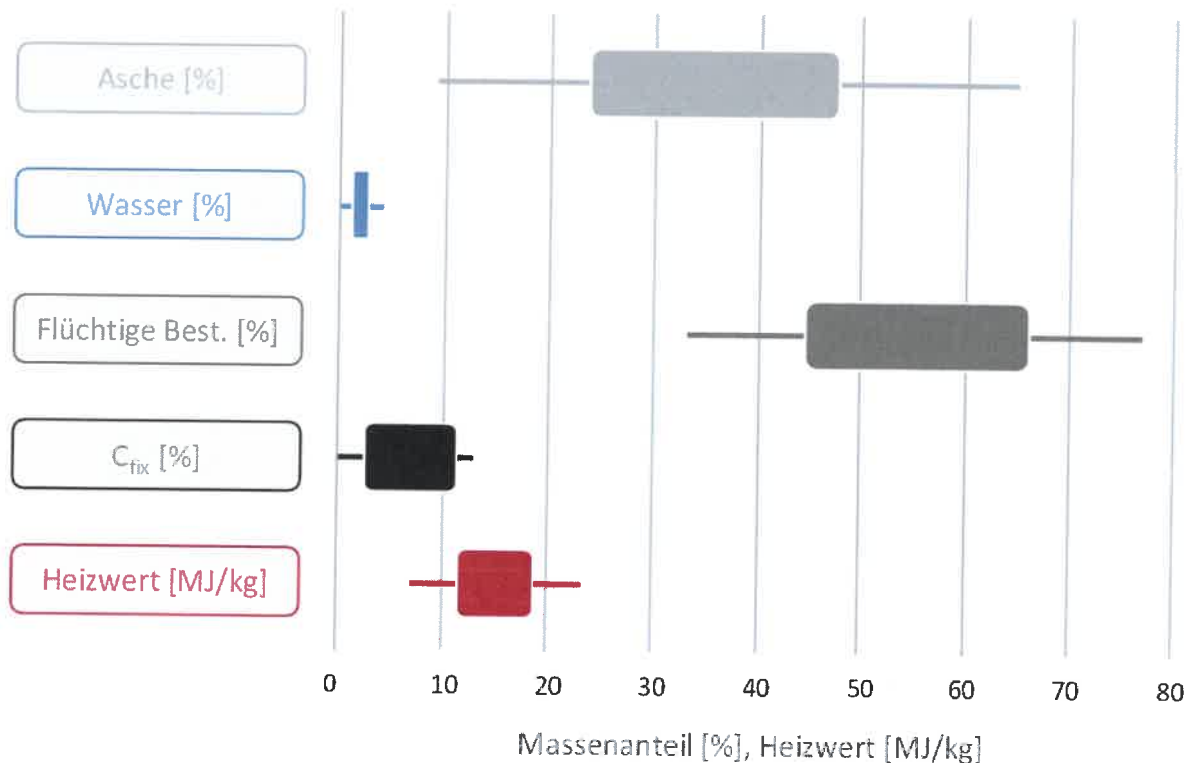


Abbildung 2: Ergebnisdarstellung der Heizwert- und Immediatanalysen, bezogen auf den Rohzustand.

Die Ergebnisse der Brennstoffanalysen (Asche- und Wassergehalt, flüchtige Bestandteile, fixer Kohlenstoff (C_{fix}) sowie Heizwert) sind in Abbildung 2 dargestellt. Insbesondere wegen der enthaltenen Schleifkörner sind die Aschegehalte mit bis zu 64,8 % relativ hoch. Erwartungsgemäß fällt der Wassergehalt im Durchschnitt mit 2 % gering aus. Die flüchtigen Bestandteile unterliegen aufgrund der unterschiedlichen Unterlagen und variierender Schleifkornanteile wie die Aschegehalte großen Schwankungen. Der fixe Kohlenstoffgehalt ist hauptsächlich auf den Kohlenstoffgehalt der jeweiligen Unterlagen abhängig und ist für alle untersuchten Schleifmittel $< 12,1$ %. Der Heizwert der untersuchten Schleifmittel liegt im Durchschnitt bei 15,2 MJ/kg.

Aus den durchgeführten Elementaranalysen sind zudem die Stickstoff-, Chlor- und Schwefelgehalte verschiedener Schleifmittel bekannt. Der Stickstoffgehalt liegt im Schnitt bei 3,5 % sowie maximal bei 6,7 % und ist im Vergleich mit z. B. holzartigen Brennstoffen hoch. Bei einer oxidativen thermischen Behandlung der Schleifmittel, sind demnach nicht unerhebliche NO_x -Emissionen zu erwarten. Chlor- und Schwefelgehalte sind im Mittel mit 0,04 % bzw. 0,08 % vergleichbar mit Werten von holzartigen Brennstoffen, dennoch ist mit relevanten SO_2 - und HCl-Emissionen zu rechnen. Die Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte nach 17. BImSchV, insbesondere für NO_x , aber auch für SO_2 und HCl, ist daher ohne Sekundärmaßnahmen voraussichtlich nicht möglich.

3.2 Mechanische Vorkonditionierung (I.A.R.)

Die Produktionsabfälle setzen sich aus Stanzresten, Verschnittmasse und Fehlchargen zusammen. Dabei fallen Fehlchargen als bis zu zwei Meter breite sogenannte Jumborollen an, auf welchen Schleifmittel bis zu 3.000 Laufmeter aufgerollt sind. Stanzreste, die bei der Produktion von meist runden oder dreieckigen Aufsätzen für Handschleifmaschinen anfallen, weisen mit ca. 35 kg/m³ vergleichbar sehr geringe Schüttdichten auf. Abbildung 3 zeigt die in Form und Schüttdichte sehr unterschiedlich anfallenden Schleifmittelabfälle.



Abbildung 3: Unterschiedliche Formen der Schleifmittelabfälle (links oben: Jumborolle; links unten: Stanzreste; rechts: Schleifbänder).

Ziel der Vorkonditionierung ist es daher, kontinuierlich Schleifmittelabfälle in einheitlichen Korngrößen aufgelockert für den folgenden thermischen Prozess durch eine möglichst material- und apparateschonende Zerkleinerung bereitzustellen. Als Zielkorngröße wurden 300 mm festgelegt, damit unterschiedliche thermische Verfahren die konditionierten Abfälle verarbeiten können.

3.2.1 Pressversuche

Die geringe Schüttdichte der Stanzreste führt zu logistischen Problemen hinsichtlich Transport- und Lagerungseffizienz der Schleifmittelabfälle. Die in Kapitel 3.7.3 dargestellte ökonomische Bewertung des untersuchten Konzeptes berücksichtigt den Transport mittels LKW. Für eine maximale ökonomische und ökologische Transporteffizienz muss die gesamte Ladekapazität der LKW ausgenutzt werden. Es ist also erforderlich, die Stanzmittelreste vor dem Transport zu verdichten. So lässt sich gleichzeitig auch die Lagerfläche an der Aufbereitungsanlage reduzieren. Neben den im Projektantrag vorgesehenen Zerkleinerungsversuchen wurden aus diesem Grund auch Verdichtungsversuche durchgeführt.

Das Verhalten von Stanzrestabfällen bei Druckbeanspruchung wurde am I.A.R. getestet. Zu diesem Zweck wurde untersucht, wie stark sich das Material bei einer definierten Druckkraft zusammenpressen lässt und wie stark sich das Material nach der Druckentlastung wieder ausdehnt. Betrachtet wurden neun Stanzrest-Proben mit einer Papier-Vlies-Unterlagenkombination, die mit einem Pressstempel und einer geringen Druckkraft von ca. 2 kPa gepresst wurden. Die Ergebnisse der Druckversuche sind in Abbildung 4 dargestellt. Bereits unter geringem Druck ließ sich das Material gut verdichten. Das Volumen wurde um ca. 70 % reduziert. Nach Entfernung der Drucklast (entspannter Zustand) dehnte sich das Material wieder aus. Durch Reibschluss blieb das Volumen jedoch 30 % unter dem Volumen des Ursprungszustands.

Es lässt sich schlussfolgern, dass Stanzreste unabhängig von den Partikelgrößen der Schleifmittelabfälle grundsätzlich verdichtet und das Volumen durch Druck deutlich reduziert werden

kann. Die Verdichtung ist beispielsweise mit einer Einkammerpresse möglich. Um eine anschließende Ausdehnung des Materials zu verhindern, muss es verschnürt werden.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden fünf Pressversuche mit jeweils ca. 500 kg Ausgangsmaterial durchgeführt (vgl. Abbildung 5). Das Ausgangsmaterial bestand aus Stanzresten und Schleifpapierbahnen und wurde mit einem Druck von 200-220 bar gepresst. Die Ballen hatten ein Gewicht von 430-620 kg mit Abmaßen von 100 x 100 x 120 cm.

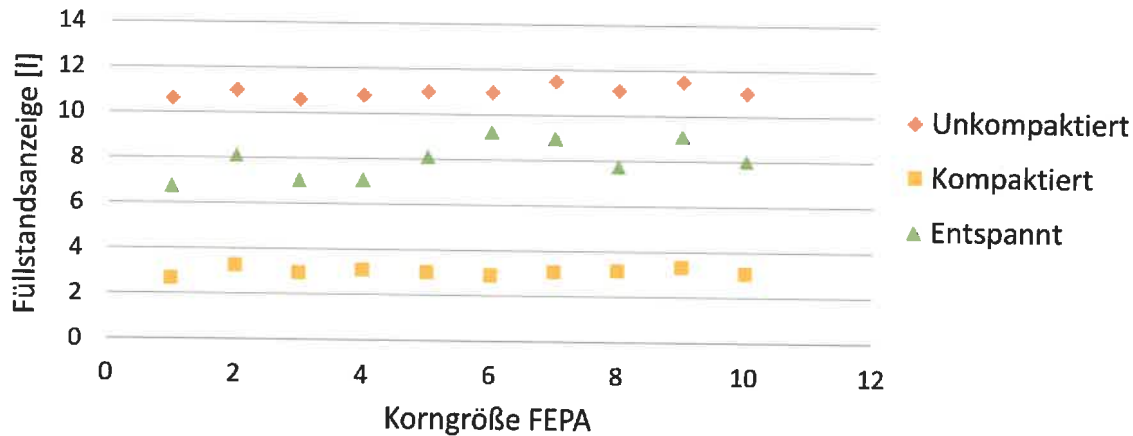


Abbildung 4: Ergebnisse der Druckbeanspruchung von Stanzresten.



Abbildung 5: Pressversuche: Aufgabematerial (links), Kammerpressvorgang (Mitte) und gepresster Ballen (rechts).

3.2.2 Zerkleinerung

3.2.2.1 Schneidende Zerkleinerung

Grundsätzlich ist es möglich, Schleifmittelabfälle maschinell zu zerkleinern. Dies wurde anhand von Vorversuchen mittels Rotorschere am I.A.R. bewiesen. In Abbildung 6 ist die verwendete Rotorschere abgebildet. Rotorscheren sind Langsamläufer, bei denen sich zwei gegenläufige Wellen mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 0,3 - 0,8 m/s (verwendete Einstellung: 0,5 m/s) drehen. Auf den Wellen lagern Schneidscheiben, die jeweils zwischen die Schneidscheiben des gegenüberliegenden Rotors greifen. Die Schneidscheiben sind spiralförmig mit Haken besetzt, um das Aufgabematerial einzuziehen.

Die Zerkleinerung des Materials wird maßgeblich durch die Schneidscheibenbreite bestimmt (15-150 mm; verwendet 28 mm). Aufgrund des geringen Abstandes der Schneidscheiben (eingestellter Abstand ca. 0,5 mm) arbeitet die Rotorschere überwiegend mit einer scheren

Beanspruchung. Daneben treten aber auch Zug- und Reißbeanspruchungen auf. Mit zunehmenden Verschleiß und Vergrößerung des Schneidspaltes ändert sich die Scher- immer mehr zu einer Zug- und Reißbeanspruchung.

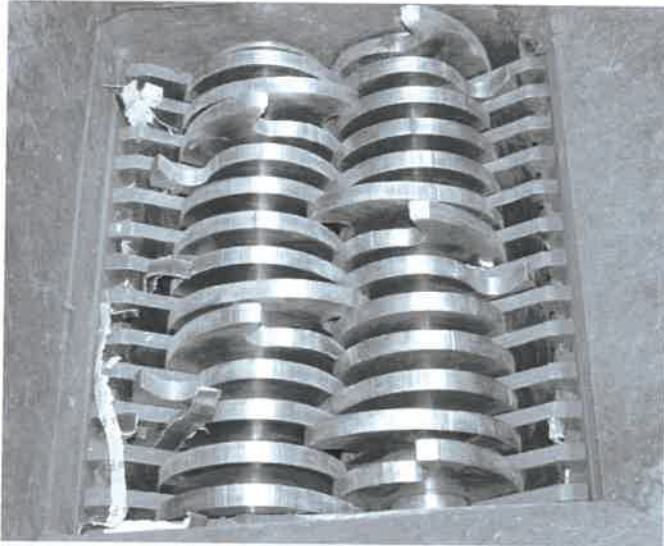


Abbildung 6: Schneidwerkzeuge der verwendeten Rotorschere.

In den Zerkleinerungsversuchen am I.A.R. wurden drei Materialarten untersucht: Stanzreste mit einer Papier-Vlies-Unterlage, Schleifmittelbänder mit einer Papier-Gewebe-Unterlage sowie einer Polyester-Gewebe-Unterlage. Insgesamt wurden so 16 Proben mit einer Masse von 2 kg zerkleinert. Die zerkleinerten Proben wurden anschließend gesiebt, um die Partikelgrößenverteilung zu ermitteln (vgl. Abbildung 7). Bei der Siebung ist zu beachten, dass die zerkleinerten Materialien flexibel verformbar sind und außerdem ein großes Längen- zu Breitenverhältnis aufweisen (vgl. Abbildung 8). Diese Eigenschaften können zu Fehlpartikeln bei der Klassierung führen. Beispielsweise kann das Material in einer Dimension (z. B. in der Breite) durch die Sieböffnung gelangen, obwohl eine andere Dimension (z. B. die Länge) viel größer ist als die Sieböffnung. Zudem kann sich das Material aufgrund der Flexibilität falten und so durch die Sieböffnung gelangen oder steckenbleiben und das Sieb zusetzen, obwohl es in mehreren Dimensionen größer ist als die Sieböffnung.

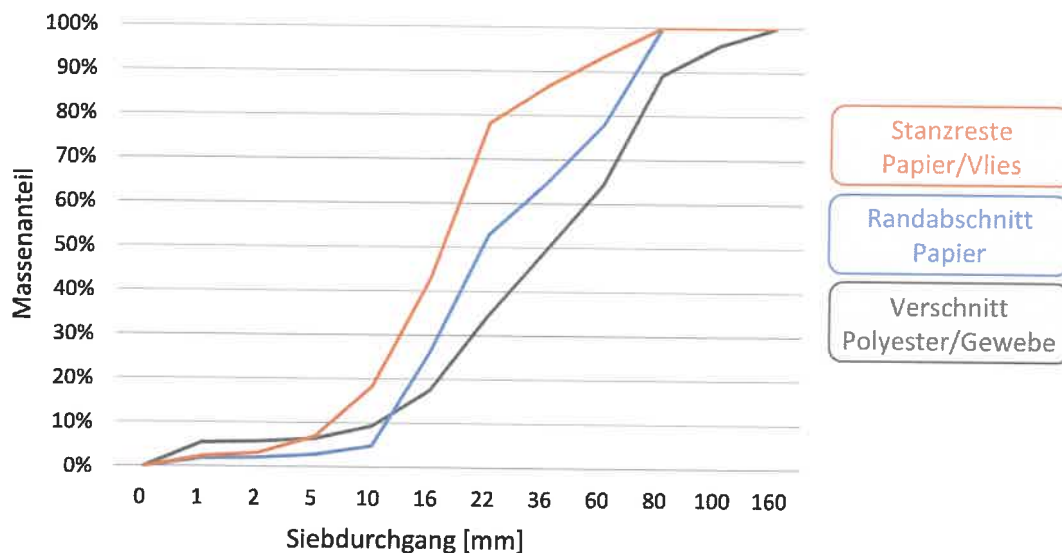


Abbildung 7: Partikelgrößenverteilung verschiedener Unterlagenarten nach Zerkleinerung mittels Rotorschere.

Mittels Rotorschere ist es möglich die Schleifmittelabfälle auf die gewünschte Korngröße (< 300 mm) zu zerkleinern. Die Partikelgrößenverteilung in Abbildung 7 zeigt, dass 95% aller Partikel (D95-Wert) sämtlicher Proben auf eine Partikelgröße < 100 mm zerkleinert wurden. Zudem wurden die Schleifmittelabfälle abhängig von der Materialart unterschiedlich stark zerkleinert. Schleifmittelbänder mit Polyester-Gewebeunterlagen wurden weniger stark zerkleinert als Stanzreste mit Papier-Vlies-Unterlagen.

Da es sich bei der Zerkleinerungsart um eine schneidende Zerkleinerung handelt, ist mit einem hohen Verschleiß zu rechnen, der bei einer reißennden oder einer Kombination aus schlagender und schneidender Beanspruchung höchstwahrscheinlich geringer ausfällt. Aus diesem Grund wurde die Eignung dieser Zerkleinerungsverfahren, wie in den folgenden Kapiteln beschrieben, untersucht.



Abbildung 8: Zerkleinerte Stanzreste und Schleifmittel mit Papier- und Gewebeunterlage der Korngrößenklasse 36-60 mm.

3.2.2.2 *Kombination aus schlagender und schneidender Zerkleinerung*

In den Vorversuchen zum Projektantrag wurden die Schleifmittel mittels Hammermühle zerkleinert. Dadurch konnte eine selektive Zerkleinerung erreicht werden. Die Papierunterlage wurde in grobe Stücke von ca. 100 x 100 mm gerissen, wodurch das Binder-Korngemisch durch die schlagende Beanspruchung von dem Papier abplatzte und in deutlich feineren Kornklassen < 10 mm anfiel. So wäre es möglich, das Binder-Korngemisch durch eine einfache Siebung von der Papierunterlage zu trennen. Eine selektive Zerkleinerung der Schleifkorn-Binder-Matrix mit separatem Austrag des Trägermaterials, etwa über einen Leichtgutaustrag, könnte eine deutliche Reduktion des thermisch zu behandelnden Massenstroms bei gleichzeitiger Vergrößerung dessen spezifischer Oberfläche durch den höheren Zerkleinerungsgrad mit sich bringen und wäre von ökologischem und ökonomischem Vorteil für die Gesamtbilanz der Aufbereitungskette.

Im Projekt wurde überprüft, ob eine selektive Zerkleinerung mit unterschiedlichen Schleifmittelmaterien mit einer Hammermühle im industriellen Maßstab möglich ist. Die Versuche wurden mit einer Hammermühle der Firma Erdwich durchgeführt (Rotor: Ø 800 mm, L 1000 mm, 45-90 kW Antriebsleistung). Abbildung 9 zeigt eine schematische Skizze einer Hammermühle.

Mit Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 75 m/s gehören Hammermühlen zu den Schnellläufern. Auf einem Rotor befinden sich Tragachsen, auf denen Zerkleinerungswerkzeuge (Hämmer) befestigt sind. Da die Hämmer pendelnd gelagert sind, werden sie bei Rotation radial ausgerichtet. Das aufzugebene Material wird von den Zerkleinerungswerkzeugen erfasst und zerkleinert. Der Austrag des zerkleinerten Materials erfolgt i. d. R. über einen Austragsrost. Die Beanspruchung ist materialspezifisch. Spröde Abfallstoffe unterliegen einer Schlag- und Prallbeanspruchung (hier: Korn-Bindergemisch). Die flexiblen Schleifmittel-Unterlagen hingegen werden hauptsächlich durch Scherbeanspruchung zerkleinert.

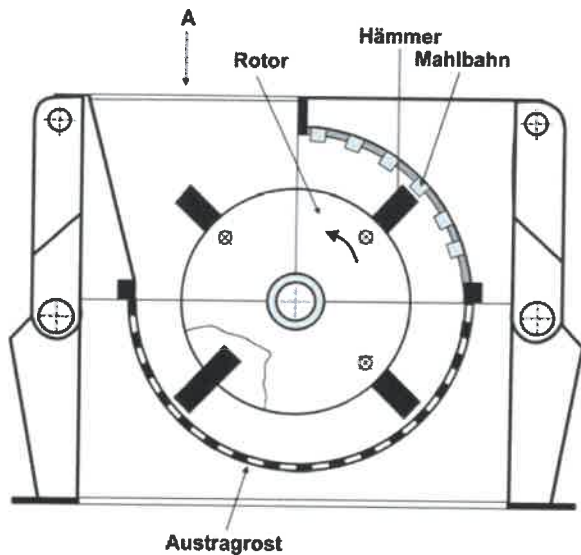


Abbildung 9: Schematischer Aufbau einer Hammermühle [PF17].

Für die Zerkleinerungsversuche wurden Schleifmittelproben für die unterschiedlichen Unterlagenarten Papier, Papier-Vlies, Polyester und Polyester-Papier vorbereitet. Nacheinander wurden die Proben mittels Hammermühle zerkleinert und anschließend das Zerkleinerungsprodukt gesiebt und optisch bewertet. Auch wenn mittels Hammermühle die stärkste Zerkleinerung erzielt wurde, zeigen die Ergebnisse der Versuche, dass eine Hammermühle aus mehreren Gründen nicht für die Zerkleinerung von flexiblen Schleifmitteln geeignet ist:

1. Während der Zerkleinerung kam es im Zerkleinerungsraum zur Funkenbildung und starker Staubentwicklung. Es resultiert die Gefahr einer Entzündung des Staubs sowie der Papier- oder Polyester-Unterlagen.
2. Nur das Schleifmittel mit Papierunterlage konnte selektiv zerkleinert werden. Bei allen anderen Schleifmitteln war die Verbindung von Binder und Unterlage so stark, dass der Binder mit dem Korn lediglich an den Rändern der Schleifmittel abgeplatzt ist und ansonsten an der Unterlage haften blieb (vgl. Abbildung 10 rechts).
3. Die Hämmer verursachten eine starke Beanspruchung (Schlag und Reibung) der Schleifmittelkörner, wodurch es zu einem hohen Verschleiß der Hämmer und der Schleifkörnern kam. Abbildung 10 zeigt links die Oberfläche eines unbeanspruchten Schleifmittels im Vergleich mit einem Schleifmittel, dass mittels Hammermühle beansprucht wurde (Mitte und rechts).

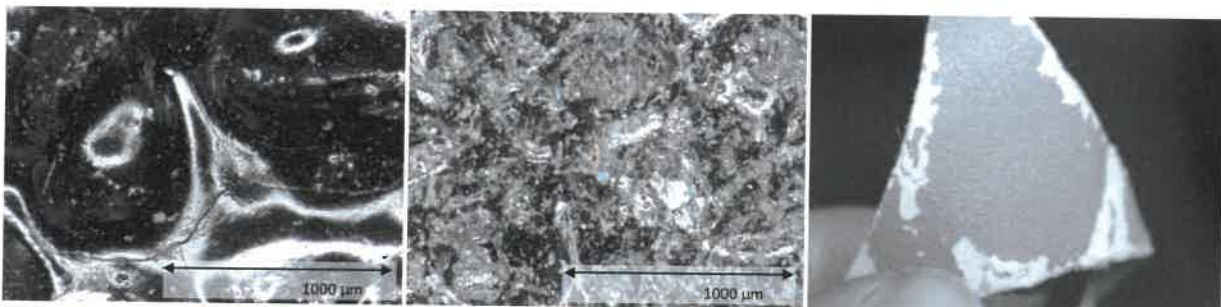


Abbildung 10: links: unbeanspruchtes Schleifmittel, Mitte und rechts Schleifmittel nach Zerkleinerung mittels Hammermühle.

3.2.2.3 Reißende Zerkleinerung

Neben den zuvor genannten Zerkleinerungstechniken wurden Versuche mittels reißender Zerkleinerung auf einem Kammwalzenzerkleinerer durchgeführt. Der Aufbau eines Kammwalzenzerkleinerers ähnelt dem einer Rotorschere. Es gibt Maschinen in Einwellen- oder Doppelwellenausführung. Die Welle ist mit Zähnen (Zerkleinerungswerkzeug) bestückt, die den Materialanforderungen angepasst werden können. Die Zähne kämmen durch einen Rost/Gegenkamm und, falls vorhanden, durch die Zähne der zweiten Welle. Dabei wird das Material eingezogen und zwischen den Zähnen und dem Gegenkamm zerrissen. Da hier die Spaltabstände deutlich größer (einstellbar) sind als bei Rotorscheren, wird das Material nicht schneidend, sondern ziehend und reißend beansprucht. Bei Überlastung können die Walzen gleichzeitig oder einzeln reversieren. [PF17] Abbildung 11 zeigt die verwendete Kammwalze, die aus zwei Wellen besteht, die jeweils mit 12 Reißzähnen und einer Antriebsleistung von 75 kW ausgestattet sind. Die Aufgabeöffnung misst 1,5 m x 1,35 m. Die Spaltweite zwischen den Zähnen und dem Kamm beträgt ca. 13 mm.

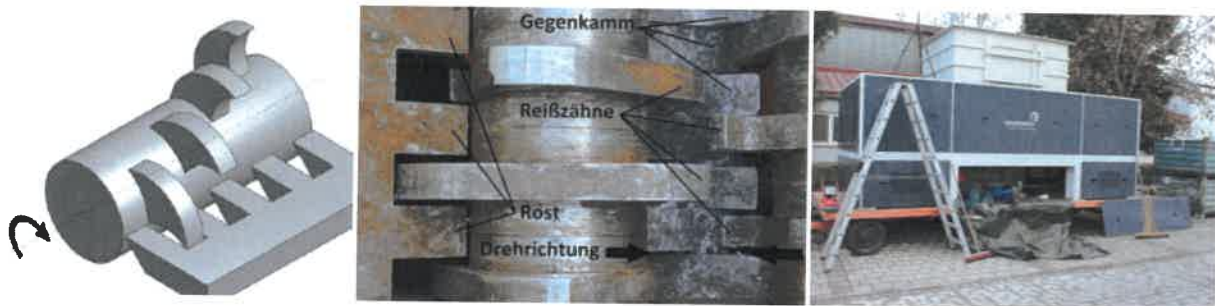


Abbildung 11: Verwendete Kammwalze in Doppelwellenausführung, Schema [PF17].

Der Vorteil einer reißenden Zerkleinerung im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Zerkleinerungsarten liegt vor allem im geringeren Maschinenverschleiß. Dadurch, dass das Material gerissen wird, kommt es zu wesentlich weniger Reibung zwischen Reißwerkzeugen und den abrasiven Schleifmitteln, wodurch sowohl die Maschinen- als auch die Kornbeanspruchung minimiert wird.

Aufgrund dieser grundsätzlichen Vorteile wurde die Zerkleinerung von Schleifmitteln auf dem Kammwalzenzerkleinerer im industriellen Maßstab mit über zwei Tonnen Material in drei Versuchskampagnen getestet.

Versuchskampagne 1:

In der ersten Kampagne wurde überprüft, ob die Kammwalze geeignet ist, das Material < 300 mm zu zerkleinern. Hierfür wurden ca. eine Tonne gemischte Schleifmittelabfälle händisch in Fraktionen nach Kornart (SiC, Korund), Korngröße und Unterlagenart (Papier, Papier-Vlies, Papier-Gewebe und Gewebe) sortiert und gewogen. Zudem stand eine kleine Jumborolle mit Granat-Schleifkorn zur Verfügung. Insgesamt wurden 13 Fraktionen sortiert und nacheinander einzeln zerkleinert (vgl. Tabelle 1). So konnte untersucht werden, welchen Einfluss Unterlage- und Kornarten auf den Zerkleinerungsgrad haben.

Der Zerkleinerungsrückstand hatte eine Schüttdichte von ca. 60-100 kg/m³. Zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung der einzelnen Zerkleinerungsprodukte wurden diese gesiebt. Abbildung 12 zeigt die Partikelgrößenverteilung der zerkleinerten Schleifmittel. Wie schon bei der Zerkleinerung mittels Rotorschere (vgl. Abbildung 7) wurde das Schleifmittel mit einer Polyesterunterlage weniger stark zerkleinert als Stanzreste mit einer Papier-Vlies-Unterlage (bezogen auf den D50-Wert). Bezogen auf die Siebanalyse, wurde das Ziel der Zerkleinerung mit einem < 300 µm für alle untersuchten Schleifmittel erreicht.

Tabelle 1: Aufgabematerial für die Zerkleinerungsversuche mittels Kammwalzenzerkleinerer.

Material	FEPA-Korngrößen	Gesamtmasse
SiC Polyester/Gewebe	P100, P120	Ca. 250 kg
SiC Papier/Gewebe	P60, P80, P100, P120	Ca. 490 kg
KOR Papier/Vlies	P100, P120, P150, P500, P600	Ca. 300 kg
KOR Papier	P36	Ca. 24 kg
GRA Papier/Vlies	P60	Ca. 24 kg

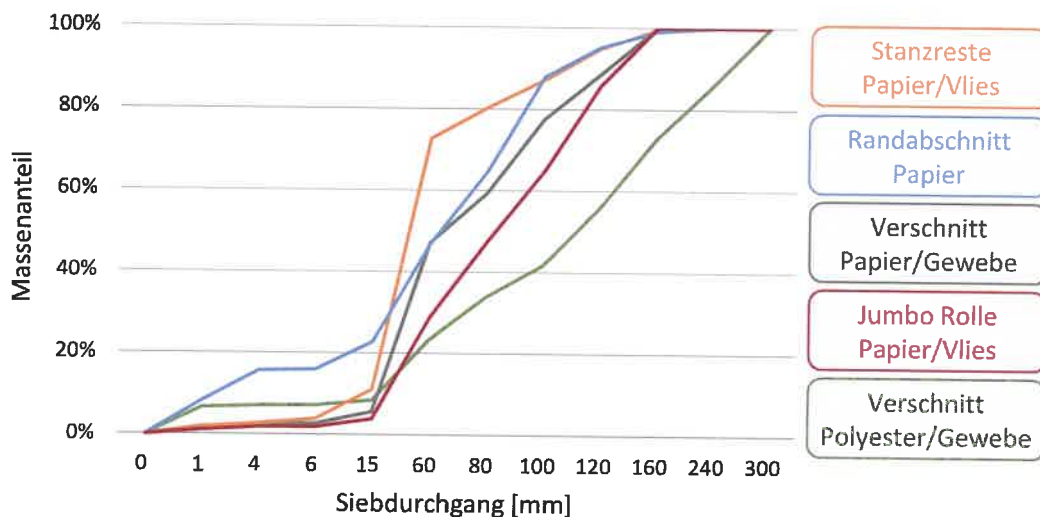







Abbildung 12: Partikelgrößenverteilung verschiedener Unterlagenarten nach Zerkleinerung mittels Kammwalze.

Wie bereits in Kapitel 3.2.2.1 erwähnt, ist das zerkleinerte Material problematisch zu sieben. Daher wurden zusätzlich Stichproben der Materialien zu ca. 90 Litern gezogen und mittels 3D-Laser-Triangulation optisch vermessen. Insgesamt wurden so mehr als 17.000 Partikel vermessen. Anhand von verschiedenen Formparametern, wie beispielsweise dem maximalen Ferret-Durchmesser ($D\text{-Ferret}_{\max}$) oder dem kleinsten umschließenden Rechteck, wurden die Messdaten ausgewertet. Der D-Feret wird als Abstand zwischen zwei parallelen Tangenten eines Partikels in einem beliebigen Winkel beschrieben, wobei der $D\text{-Ferret}_{\max}$ den maximal messbaren Abstand der Tangenten angibt. Je nach Materialunterlage waren 2-7 % der Partikel größer als 300 mm (bezogen auf die gesamte Partikelanzahl). Tabelle 2 zeigt für jedes Material die Partikel mit dem größten gemessenen $D\text{-Ferret}_{\max}$ -Wert. Der Wert ist bei allen Partikeln deutlich größer als 300 mm. Die Partikelanalyse mittels 3D-Laser-Triangulation zeigt, dass nicht alle Partikel die Zielkorngröße von 300 mm für den thermischen Prozess einhalten. In einem industriellen Aufbereitungsprozess ist es üblich, diese großen „Störpartikel“ durch eine Schutzsiebung nach der Zerkleinerung unter Verwendung eines kleineren Siebschnitts als der der Zielpartikelgröße abzutrennen und der Zerkleinerung erneut zuzuführen. Die Notwendigkeit eines solchen Siebprozesses wurde in der ökologischen und ökonomischen Prozessbewertung in Kapitel 3.7 berücksichtigt.

Tabelle 2: Zerkleinerte Partikel mit einem maximalen Feret-Durchmesser.

Probe	D-Feret _{max}	Abbildung
Polyester / Gewebe	1980 mm	
Papier / Gewebe	785 mm	
Papier / Vlies	1152 mm	
Papier	650 mm	
Jumbo Rolle Papier / Vlies	1056 mm	

Versuchskampagne 2:

In der zweiten Zerkleinerungskampagne wurde ca. 600 kg Material zerkleinert, um den Verschleiß an der Maschine zu bewerten. Vor der Zerkleinerung wurden dazu fünf ausgewählte Reißzähne an definierten Messstellen mit einem Winkelschleifer von Unebenheiten und der Oxidschicht befreit. An den Messstellen wurden vor und nach den Zerkleinerungsversuchen die Reißzahndicke mittels Schieblehre gemessen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein Maschinenverschleiß (Materialabtrag) bei einem geringen Durchsatz von 600 kg und der gewählten Methode nicht messbar war. Die Fotodokumentation der Versuche zeigt jedoch, dass durch die Zerkleinerung der Schleifmittel die gesamte Oxidschicht der Maschine entfernt wurde (vgl. Abbildung 13). Zudem wurden Unebenheiten und Grate an den Reißzähnen abgeschliffen. Für alle Aggregate, die Schleifmittel behandeln, vor allem aber für Zerkleinerungs- und Dosieraggregate, muss mit erhöhtem Verschleiß und entsprechendem Wartungs- und Instandhaltungsaufwand gerechnet werden. Aufwand und Kosten lassen sich jedoch nur in einem kontinuierlichen Betrieb mit höheren Durchsätzen über längere Zeiträume messen und verlässlich kalkulieren.



Abbildung 13: Kammwalzenzerkleinerer vor und nach den Zerkleinerungsversuchen in Kampagne 2.

Versuchskampagne 3:

In der dritten Versuchskampagne wurden die gepressten Schleifmittelballen zerkleinert. Hierzu wurden zwei Ballen bei der Firma Erdwich auf zwei verschiedenen Maschinen mit unterschiedlichen Parametern (z. B. Spaltweite, Antriebsleistung) zerkleinert. Die Ballen wurden einzeln mit Verschnürung zerkleinert. Um den Durchsatz zu bestimmen, wurde die Zeit gemessen, in der ein Ballen vollständig zerkleinert wurde. Anschließend wurden jeweils 90 Liter Material als Stichprobe am I.A.R. gesiebt, um die Partikelgrößenverteilung zu bestimmen (vgl. Abbildung 14). Durch Änderung der Maschinenparameter konnte der Durchsatz annähernd vervierfacht werden, wobei das zerkleinerte Material deutlich gröber ausfällt.

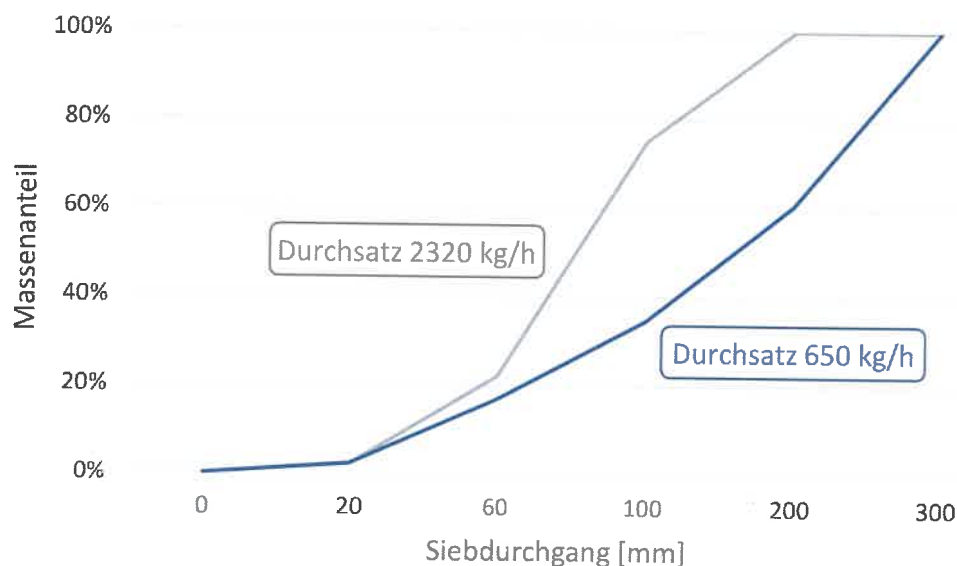


Abbildung 14: Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerung von Schleifmittelballen mittels Kammwalze.

3.3 Thermischer Materialaufschluss (TEER)

Ziel des thermischen Materialaufschlusses ist die Desintegration der Matrix zur Trennung der Schleifkörner von den Träger- und Bindermaterialien. Zu diesem Zweck wurde zunächst in Vor- und Batchversuchen für unterschiedliche Schleifmittelzusammensetzungen das grundlegende thermische Zersetzungsverhalten in Abhängigkeit von Temperatur, Verweilzeit und Atmosphäre untersucht. Anschließend wurde die Eignung verschiedener Anlagentypen für eine batchweise (Herdwagenofen) und kontinuierliche (Drehrohrofen, Schneckenreaktor, Rostfeuerung, Wirbelfeuerung) thermische Behandlung von Schleifpapier im Technikumsmaßstab erprobt.

3.3.1 Vorversuche

3.3.1.1 Wärmebehandlung Primärkorn

Zur Untersuchung der grundsätzlichen Eignung eines thermischen Recyclingverfahrens für Schleifmittel wurden bei einem kooperierenden Schleifmittelhersteller Voruntersuchungen zur thermischen Stabilität von Schleifkörnern durchgeführt. Dazu wurden vier verschiedene Primärkörner (zwei Korundmodifikationen einer Korngröße und Siliziumkarbid zweier Korngrößen) im Muffelofen für eine Verweilzeit von einer Stunde Temperaturen zwischen 600 °C und 1000 °C ausgesetzt. Anschließend wurden die für Schleifmittel relevanten Eigenschaften der wärmebehandelten Schleifkörner (Härte, Zähigkeit und Schleifverhalten) in branchenüblichen Qualitätskontrolluntersuchungen mit denen der entsprechenden Primärkörner verglichen. Bei Behandlungstemperaturen > 650 °C konnte optisch eine Farbänderung des untersuchten Zirkonkorunds erkannt werden (vgl. Abbildung 15), bei einer Temperatur von 600 °C trat dieser Effekt nicht auf.

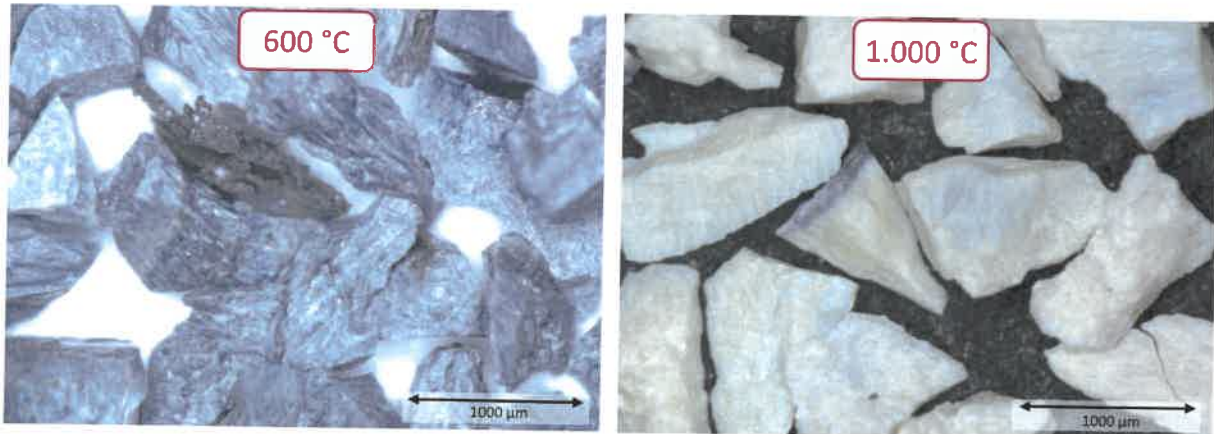


Abbildung 15: Mikroskopaufnahmen des bei unterschiedlichen Temperaturen wärmebehandelten Zirkonkorunds.

Für die übrigen Kornsorten konnten nach thermischer Behandlung optisch keine Veränderungen festgestellt werden, allerdings kam es bei Behandlungstemperaturen > 800 °C zur Agglomeratbildung der Siliziumkarbidkörner. Die Härte aller untersuchten Schleifkörner wurde durch die Wärmebehandlung nicht beeinflusst. Die Zähigkeit des Zirkonkorunds wurde bei einer Behandlungstemperatur von 1000 °C verringert, bei einer Temperatur von 600 °C war die Zähigkeit vergleichbar mit der von Primärkorn. Auch für die übrigen Schleifkörner konnte kein negativer Einfluss festgestellt werden. Zur Untersuchung des Schleifverhaltens wurde der Materialabtrag eines Holzwerkstoffes bei Behandlung mit Schleifmitteln aus den thermisch behandelten Schleifkörnern ermittelt (vgl. Kapitel 0). Bei diesem Test konnte lediglich ein Einfluss der Wärmebehandlung auf Schleifmittel mit Zirkonkorund festgestellt werden, dessen Schleifleistung gegenüber Schleifmitteln mit Primärkorn geringfügig abnahm. Bei Behandlungstemperaturen der für die Schleifmittelherstellung verwendeten Körner von 600 °C lagen

alle ausgewerteten Tests innerhalb des vom Schleifmittelhersteller definierten Toleranzbereichs von Primärprodukten. Um Qualitätsnachteile von Kornzyklat gegenüber von Primärkorn dennoch möglichst vollständig ausschließen zu können, wurden für den thermischen Prozess Temperaturen $< 600\text{ °C}$ angestrebt.

3.3.1.2 Thermogravimetrische Analysen

Die Zersetzungstemperaturen wurden für verschiedene Schleifmittel zunächst in thermogravimetrischen Analysen ermittelt. Dazu wurden die Massenverluste neun verschiedener Schleifmittelproben bei steigender Temperatur unter Stickstoffatmosphäre aufgenommen. Die Proben mit einer Anfangsmasse von ca. 20 mg wurden in einer ersten Versuchsreihe mit einer Aufheizrate von 30 K/min auf eine Zieltemperatur von 1.000 °C erhitzt und bei dieser Temperatur gehalten, bis keine weitere Massenänderung feststellbar war. In Abbildung 16 ist exemplarisch die Masseabnahme in Abhängigkeit von der Temperatur aus zwei thermogravimetrischen Analysen gezeigt. Die Zersetzung aller untersuchten Proben startete je nach Unterlage zwischen ca. 200 °C (HEK P320) und 500 °C (SiC P100) und endete bei Temperaturen zwischen 550 °C (HEK P320) und 950 °C (SiC P100) und lag somit im Bereich zwischen den beiden in Abbildung 16 gezeigten Verläufen.

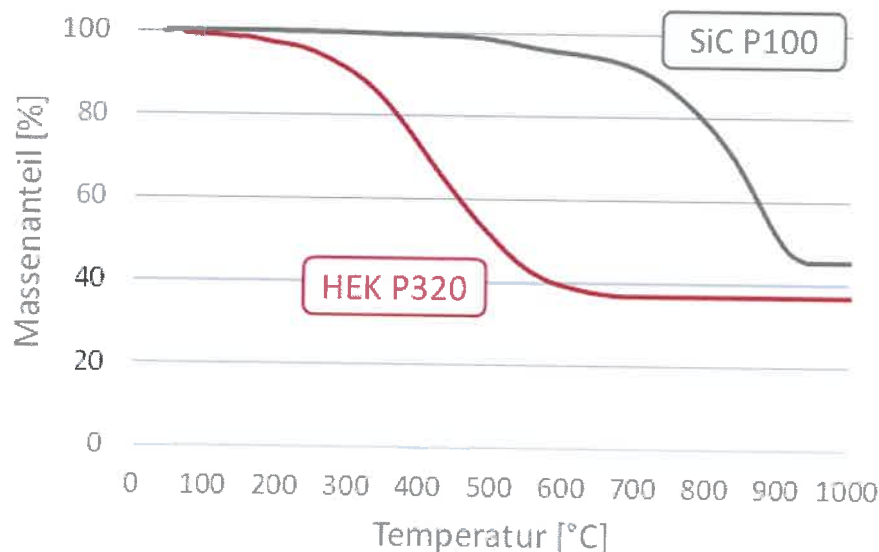


Abbildung 16: Exemplarische Ergebnisse der thermogravimetrischen Analysen eines Schleifmittels mit HEK P320 und eines Schleifmittels mit SiC P100.

3.3.2 Batchversuche

3.3.2.1 Tastversuche im Muffelofen (Labormaßstab)

Zur Beurteilung des thermischen Materialaufschlusses wurden, aufbauend auf den thermogravimetrischen Analysen, Tastversuche im Muffelofen durchgeführt. Dazu wurde ein modifizierter, elektrisch beheizter Muffelofen mit einsetzbarer Stahlretorte verwendet. Die Retorte mit einem Innenvolumen von ca. 17 Liter war mit einem Gitterboden sowie einem Gaseinlass und -auslass ausgestattet (vgl. Abbildung 17). Die Aufgabe des Gitterbodens bestand darin, eine gleichmäßige Durchströmung der Retorte bzw. des Probenmaterials zu ermöglichen. Nach Verlassen der Retorte wurde das entstehende Rohgas zunächst einer Kondensation und anschließend einer Abgasnachverbrennung zugeführt.

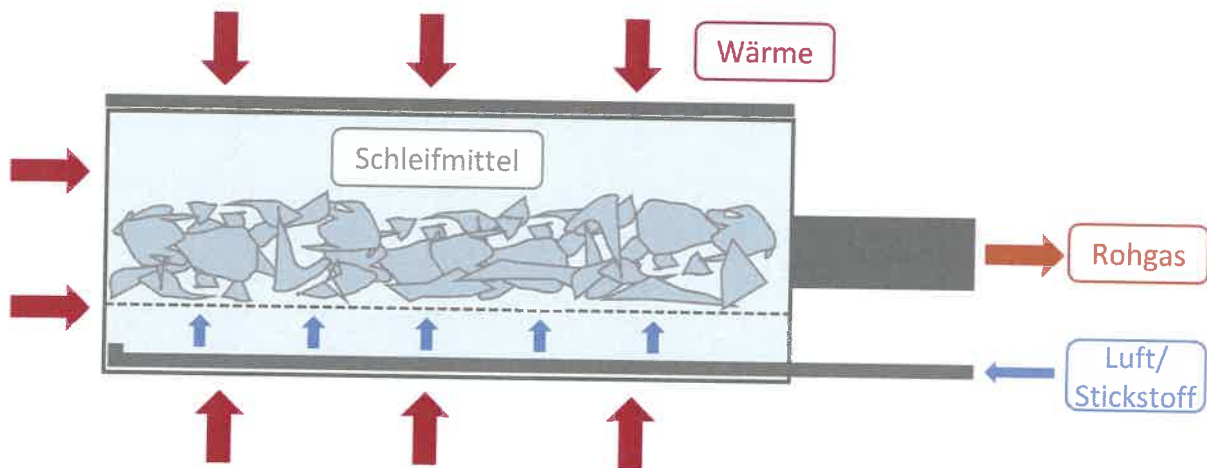


Abbildung 17: Schematischer Aufbau der Retorte im Muffelofen.

Es wurden von den auf etwa 5 cm zerkleinerten Schleifmitteln aufgrund der unterschiedlichen Dichten ca. 0,5-1 kg je Versuch auf dem Gitterboden platziert. Die gasdicht verschlossene Retorte wurde, auf Grundlage der bei den thermogravimetrischen Analysen identifizierten Zersetzungstemperaturen, produktspezifisch auf 450-600 °C aufgeheizt. Es wurden Schleifmittel mit verschiedenen Unterlagen und insgesamt sechs verschiedenen Schleifkornmaterialien (HEK, SiC, Mischkorn aus Braunkorund, Keramik und HEK, Keramik, Diamant und Zirkonkorund) im Muffelofen untersucht.

Bei den ersten Versuchen wurde die Retorte durchgängig mit Stickstoff gespült, das Material also rein pyrolytisch behandelt. Allerdings lieferten die Versuche in Sauerstoffabwesenheit keinen Erfolg bezüglich des Materialaufschlusses. Das Schleifkorn blieb in einer kohlenstoffhaltigen Matrix eingebunden und konnte auch in einem nachfolgenden mechanischen Trennprozess nicht freigelegt werden.

Aus diesem Grund standen im weiteren Verlauf Versuche unter oxidativer Atmosphäre im Fokus. In den Versuchen erfolgte bis zum Erreichen der Zieltemperatur eine Stickstoff-Spülung der Retorte. Daraufhin wurde die Retorte je nach Versuchsdurchführung für ca. 60 Minuten mit Luft gespült, um Sauerstoff als Oxidationsmittel zur Verfügung zu stellen. Der Volumenstrom richtete sich nach dem Luftbedarf für eine vollständige Oxidation, der aus den Analyseergebnissen der jeweils untersuchten Schleifmittel (vgl. Kapitel 3.1) berechnet wurde. Zu Auswertungszwecken wurde aus der Menge der eingebrachten Luft rechnerisch die theoretische Luftzahl λ bezogen auf das Ausgangsmaterial ermittelt. Da bei dieser Versuchsdurchführung bereits während der Aufheizphase Entgasungsprozesse stattfanden, reichten zur vollständigen Umsetzung der enthaltenen Organik teilweise theoretische Luftzahlen < 1 aus. Ohne Aufheizphase bzw. vorherige Entgasungsreaktionen sind für eine vollständige Umsetzung der Organik Luftzahlen ≥ 1 erforderlich. Während der Abkühlung von Muffelofen und Retorte wurde erneut mit Stickstoff gespült. Anschließend erfolgten Analysen des Glühverlusts als Bewertungskriterium für den erfolgten Materialaufschluss des festen Rückstandes sowie Mikroskopaufnahmen zur optischen Bewertung.

Bei Versuchen unter Luftatmosphäre und Temperaturen von ca. 490 °C bis 550 °C konnten für alle untersuchten Schleifmittel gute Materialaufschlüsse erzielt werden. Aus der optischen Bewertung ging hervor, dass der erreichte Materialaufschluss und der Glühverlust direkt miteinander korrelieren. Es zeigte sich, dass zur Erfüllung der Anforderungen an den nachfolgenden mechanischen Trennprozess Glühverluste < 1 % erforderlich waren. Diese konnten für alle untersuchten Kornarten auf unterschiedlichen Unterlagen, z. B. Papier, Gewebe, Gewirke und Schaumstoff sowie aus Kombinationen dieser Unterlagen, im Muffelofen erreicht werden.

Höhere Temperaturen > 600 °C zeigten keinen weiteren Effekt und verbesserten die Ergebnisse nicht. Bei niedrigeren Behandlungstemperaturen unter 450 °C erfolgte ein wesentlich schlechterer Materialaufschluss (Glühverluste von bis zu 14 %). In Tabelle 3 sind die erzielten Ergebnisse nach Parameteroptimierung für sechs exemplarisch untersuchte Schleifmittel mit verschiedenen Kornarten wiedergegeben.

Tabelle 3: Ergebnisse Batchversuche im Muffelofen nach Parameteroptimierung für verschiedene Kornmaterialien.

Schleifkorn (Unterlage)	Temperatur	Luftzahl	Massenanteil Rückstand	Glühverlust Rückstand
HEK (Papier)	510 °C	0,8	58 %	0,1 %
SiC (Papier, Gewebe)	505 °C	0,8	32 %	0,5 %
Mischkorn (Papier)	550 °C	0,6	42 %	0,2 %
Keramikkorund (Gewirke)	490 °C	1	55 %	0,2 %
Diamant (Gewirke, Schaumstoff)	525 °C	0,6	58 %	0,2 %
Zirkonkorund (Gewebe)	505 °C	1	45 %	0,4 %

In Abbildung 18 sind beispielhaft Mikroskopaufnahmen von HEK- und SiC-Körnern aus den Rückständen der Batchversuche im Muffelofen im Vergleich zum unbehandelten Schleifmittel dargestellt. Neben einem guten Aufschluss der Schleifkörner aus dem Materialverbund ist ein Belag aus feinen Aschepartikeln zu erkennen. Für eine Rückgewinnung möglichst reiner Schleifkörner ist somit eine mechanische Nachbehandlung notwendig. Insgesamt kann der Materialaufschluss durch die thermische Behandlung unter sauerstoffhaltiger Atmosphäre aus den Batchversuchen im Muffelofen als erfolgreich bewertet werden.

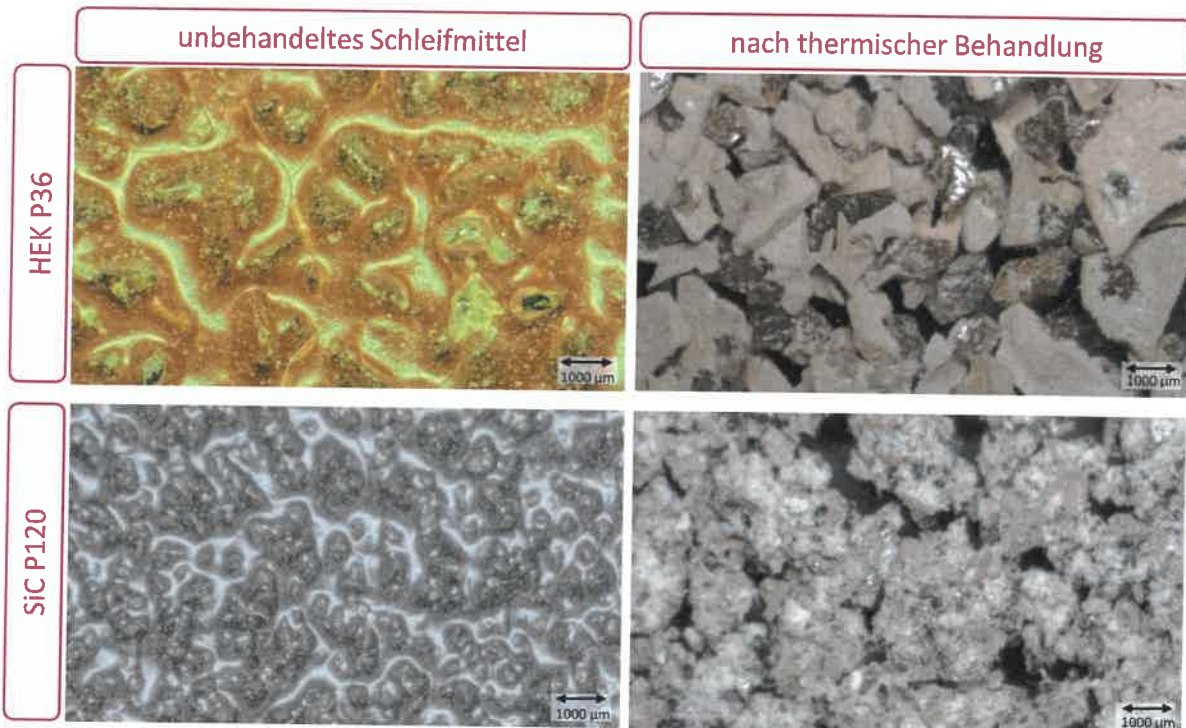


Abbildung 18: Mikroskopaufnahmen von unbehandelten und thermisch behandelten Schleifmitteln.

3.3.2.2 Tastversuche im Rührreaktor (Labormaßstab)

Bei der Firma InverTec wurde im Unterauftrag von PDR geprüft, ob sich die in den Batchversuchen im Muffelofen beim TEER ermittelten Parameter auf fluorhaltige Schleifmittel übertragen lassen. Dazu wurden zwei Schleifmittel mit unterschiedlichen Korn- (Keramik und PKS) und Bindematerialien auf Papierunterlagen untersucht. Die Fluorbestandteile (KBF_4 bzw. Kryolith) sind dabei jeweils in den Bindematerialien der Schleifmittel enthalten.

Der grundsätzliche Versuchsaufbau ähnelt dem aus Abbildung 17, zusätzlich war bei diesen Versuchen in der Retorte ein Rührer eingebaut, der für eine bessere Durchmischung von Festbett und Gasphase sorgen sollte. Als Erweiterung gegenüber dem Versuchsaufbau am TEER enthielt die Abgasnachbehandlung eine Wäscherkolonne zur Abscheidung der fluorhaltigen Gasverbindungen. Die Versuchsdurchführung erfolgte analog zu den Versuchen im Muffelofen am TEER. Während der Aufheizphase wurde die Retorte bis zum Erreichen der Zieltemperatur mit Stickstoff gespült. Anschließend erfolgte für eine festgelegte Verweilzeit von 60 Minuten die Zugabe von Luft als Oxidationsmittel. Nach Ablauf der Haltezeit wurde während der Abkühlung erneut mit Stickstoff gespült. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse nach Optimierung der Parameter Luftzahl und Temperatur auf Grundlage der optischen Bewertung des Materialaufschlusses zusammengefasst.

Tabelle 4: Ergebnisse der Batchversuche im Rührreaktor nach Parameteroptimierung für fluorhaltige Schleifmittel.

Schleifkorn (Unterlage)	Temperatur	Luftzahl	Massenanteil Rückstand	Glühverlust Rückstand
Keramik (Gewebe)	600 °C	1	38 %	0,8
PKS (Gewebe)	600 °C	1	43 %	7,9

Während für das Keramiksleifmittel anhand des Glühverlustes ein ausreichender Materialaufschluss erzielt wurde, war dies bei den untersuchten Parametern für das PKS-Sleifmittel nicht möglich, was sich auch im analysierten Glühverlust von 7,9 % widerspiegelte. Aus Abbildung 19 wird ersichtlich, dass sowohl für das Keramik- als auch das PKS-Sleifmittel die Körner nach thermischer Behandlung agglomeriert vorlagen. Die Agglomerate des Keramikorns waren jedoch leichter lösbar als die des PKS-Korns, was auf den geringeren Glühverlust des Rückstandes zurückzuführen ist. Für das PKS-Sleifmittel ist demnach eine höhere Temperatur oder eventuell auch eine weitere Anhebung der Luftzahl nötig, um einen ausreichenden Materialaufschluss erzielen zu können.

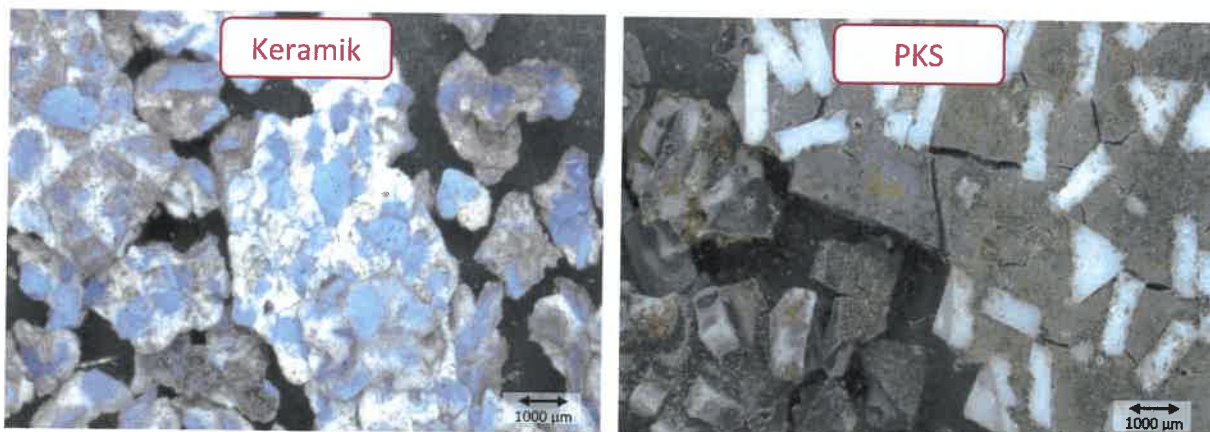


Abbildung 19: Mikroskopaufnahmen der bei der Firma Invertec thermisch behandelten Schleifmittel.

3.3.2.3 Herdwagenofen (Technikumsmaßstab)

Zur Untersuchung der Eignung einer batchweise betriebenen Anlage im Industriebmaßstab wurde ergänzend ein Versuch in einem Herdwagenofen bei der Firma Riedhammer durchgeführt. Der Herdwagenofen unterscheidet sich vom Muffelofen mit geschlossener Stahlretorte insbesondere durch größere Bauformen und durch eine vereinfachte Materialbeschickung in rollbaren offenen Behältern. Im Versuch wurde Schleifmittel mit SiC-Körnern in drei unterschiedlich großen offenen Behältern in einen Herdwagenofen eingesetzt. Dabei wurden Schütthöhen von 45 mm, 150 mm und 300 mm getestet. Oxidationsmittel bzw. Luft wurde im gasbefeuerten Ofen durch einen überstöchiometrischen Betrieb der Brenner bereitgestellt. Die Haltezeit bei einer Ofentemperatur von 500 °C betrug 105 Minuten, bis anhand der Temperaturverläufe keine exotherme Reaktion (Temperaturerhöhung) mehr feststellbar war. Insgesamt wurden ca. 12,5 kg Schleifmittel behandelt und die Ergebnisse anschließend durch Glühverlustanalysen und Mikroskopaufnahmen bewertet.

Tabelle 5: Ergebnisse des Versuchs im Herdwagenofen.

Schütthöhe	Temperaturbereich	Massenanteil Rückstand	Glühverlust Rückstand
45 mm	527-599 °C	23 %	1,2 %
150 mm	nicht gemessen	23 %	4,7 %
300 mm	600-816 °C	29 %	5,6 %

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst. Die gemessenen Temperaturbereiche nach Beendigung der Aufheizphase bis zur Beendigung der Luftzufuhr zeigen, dass die vorgesehenen 500 °C teilweise deutlich überschritten wurden. Dies ist auf exotherme Reaktionen in den offenen Behältern zurückzuführen. Aus den Werten der Glühverlustanalysen von über 1 % geht hervor, dass ein vollständiger Materialaufschluss nicht erreicht wurde. Der mit steigender Schütthöhe zunehmende Glühverlust weist auf eine unzureichende Durchmischung von Schleifmittel und Luft hin.

3.3.3 Kontinuierliche Versuche

3.3.3.1 Drehrohr (Technikumsmaßstab)

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Batchversuchen im Muffelofen (Labormaßstab) erfolgten Versuche in einem indirekt beheizten Drehrohrföfen des TEER im kontinuierlichen Betrieb. Ein Drehrohrföfen eignet sich grundsätzlich für eine spätere großtechnische Umsetzung. Als potenzielle Vorteile des Drehrohrs sind die grundsätzlich gute Regelbarkeit der Materialverweilzeit und der Behandlungstemperaturen sowie die geringe Korn- und Anlagenbeanspruchung durch wenig Reibung zwischen den Schleifkörnern und Anlagenkomponenten zu nennen. Aus diesen Gründen wurde der Drehrohrföfen als eine potentiell geeignete Anlagentechnik bewertet. Ziel der Drehrohrversuche war die Validierung der erfolgreichen Batchversuche im Muffelofen in einem kontinuierlichen Prozess.

Der elektrisch beheizte Drehrohrföfen mit einer Länge von einem Meter weist einen Innendurchmesser von 162 mm auf. Die Neigung und die Drehzahl des Drehrohrs definieren die Materialverweilzeit. Am Drehrohrauslauf wird der feste Rückstand (Koks bzw. Asche) in einem abgedichteten Behälter aufgefangen. Die Spülung mit Stickstoff (Pyrolyse) oder Luft (Oxidation) erfolgt im Gleichstrom. Das Rohgas wird nach Kondensation einer Nachverbrennung zugeführt. Zwischen Kondensation und Nachverbrennung besteht zudem die Möglichkeit zur diskontinuierlichen Entnahme von Gasproben. In Abbildung 20 ist das Anlagenschema dargestellt.

Aufgrund eines unzureichenden Materialaufschlusses verschiedener Schleifmittel bei einstufiger Prozessführung wurde ein zweistufiger Prozessansatz verfolgt. In der ersten Prozessstufe erfolgte unter Sauerstoffabschluss bei Temperaturen von ca. 500 °C eine reine Pyrolyse der Schleifmittel, um die flüchtigen Bestandteile auszutreiben. Der verbliebene Koks mit den eingeschlossenen Schleifkörnern wurde anschließend erneut in das Drehrohr aufgegeben und unter deutlich überstöchiometrischer Luftzugabe bei Temperaturen zwischen 500 °C und 600 °C oxidiert.

Im Drehrohr wurden Schleifmittel mit den beiden Kornmaterialen HEK und SiC auf insgesamt vier unterschiedlichen Unterlagen untersucht. Die Materialaufgabe erfolgte mit einem Durchsatz von maximal 0,5 kg/h. Analog zu den Batchversuchen im Muffelofen wurde der feste Probenrückstand hinsichtlich seines Glühverlusts analysiert und optisch mittels Mikroskopaufnahmen bewertet. Allerdings konnte auch bei deutlicher Anhebung von Verweilzeit und Luftzahl im zweiten Prozessschritt, der Oxidation, keine Absenkungen des Glühverlustes unterhalb von 5,5 % erzielt werden. Durch eine Anhebung der Temperatur auf bis zu 700 °C konnte ebenfalls keine Verbesserung erzielt werden. Die Ergebnisse der Drehrohrversuche nach Parameteroptimierung sind in Tabelle 6 gezeigt.

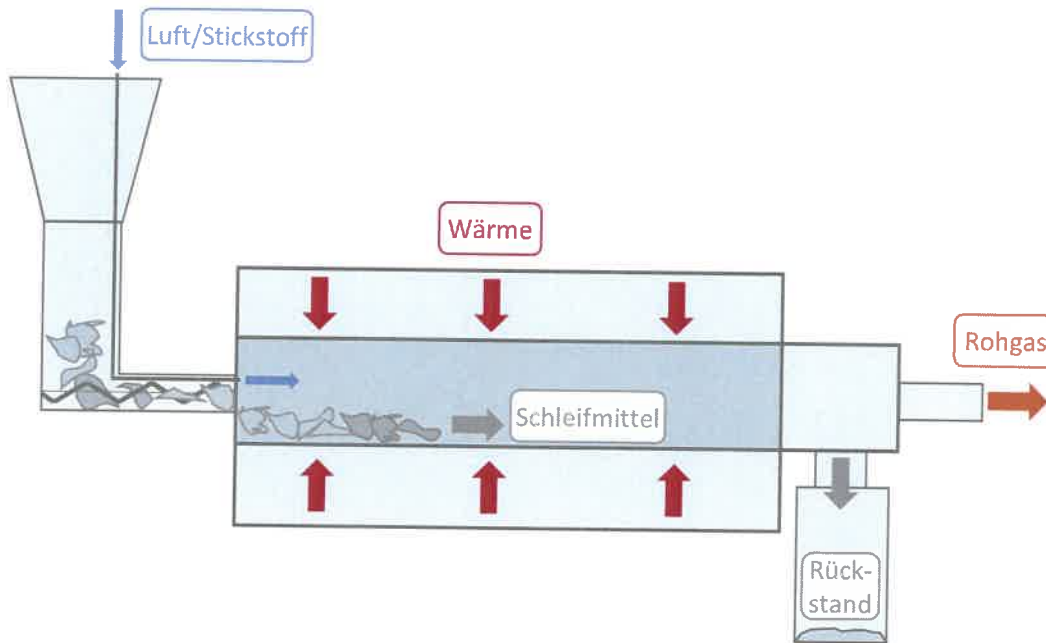


Abbildung 20: Anlagenschema des Drehrohrs.

Tabelle 6: Ergebnisse der kontinuierlichen Versuche im Drehrohr nach Parameteroptimierung.

Schleifkorn	Temperatur	Luftzahl	Massenanteil Rückstand	Glühverlust Rückstand
HEK	500 °C	5	53 %	14 %
SiC	500 °C	5	41 %	5,5 %

Die exemplarischen Mikroskopaufnahmen eines im Drehrohr behandelten SiC-Schleifmittels in Abbildung 21 zeigen die im Koks eingeschlossenen Schleifkörner. Im Vergleich zu den Batchversuchen im Muffelofen muss der Materialaufschluss im Drehrohrfurn als nicht erfolgreich bewertet werden. Es ist zu vermuten, dass eine unzureichende Durchmischung von Luft und zu oxidierenden Bestandteilen die Hauptursache darstellt.

Die ursprünglich geplante Erhöhung des Massendurchsatzes im Drehrohrreaktor wurde aufgrund der Erkenntnisse aus den Tastversuchen nicht als Fremdleistung sondern in einem

Schneckenreaktor am TEER durchgeführt (vgl. Kapitel 3.3.3.2). Dieses Vorgehen wurde aufgrund bisheriger Versuchsergebnisse und der resultierenden Mehrkosten für einen zweistufigen Prozess inklusive der Bereitstellung von Oxidationsmittel gewählt.

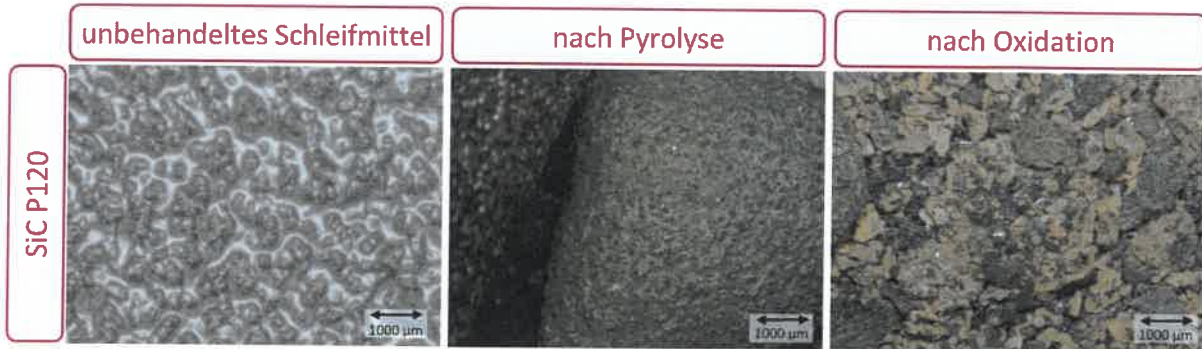


Abbildung 21: Mikroskopaufnahmen von unbehandeltem Schleifmittel (SiC P120) und im Drehrohr thermisch behandeltem Schleifmittel nach der ersten Prozessstufe (Pyrolyse) sowie nach der zweiten Prozessstufe (Oxidation).

3.3.3.2 Schneckenreaktor (Technikumsmaßstab)

Der Aufbau des Schneckenreaktors ähnelt grundsätzlich dem in Abbildung 20 gezeigten Anlagenschema des Drehrohrs. Der Materialtransport erfolgt anders als im Drehrohr nicht durch Neigung und Rotation, sondern durch eine im Inneren des Reaktors befindliche Schnecke bzw. Paddelwelle. Dadurch ist neben einer genaueren Einstellung der Materialverweilzeit auch eine bessere Durchmischung von Luft und Feststoff möglich. Der verwendete Schneckenreaktor, mit einer Länge von 2.150 mm und einem Durchmesser von ca. 250 mm, wird über vier elektrische Heizungen mit je 7,5 kW beheizt. Der Reaktor wird mittels einer Förderschnecke mit Doppelschleusensystem kontinuierlich beschickt, der feste Rückstand wird in einem Reststoffbehälter aufgefangen. Das im Prozess entstehende Gas wird einer Nachverbrennung zugeführt. Vor der Nachverbrennung besteht die Möglichkeit zur Entnahme von Gasproben. Weiterhin wird eine Messstelle am Kamin hinter der Nachverbrennung zur Messung der Rauchgasbestandteile verwendet.

Im Schneckenreaktor wurden je ca. 20 kg Schleifmittel mit den beiden Kornmaterialien SiC auf Papier-/Gewebeunterlage und HEK auf Papierunterlage untersucht. Dazu wurde, wie in Kapitel 3.3.3.1 beschrieben, ebenfalls ein zweistufiger Prozess verfolgt. In einem ersten Prozessschritt wurde das aufgegebene Schleifmittel unter Sauerstoffabschluss bei einer Verweilzeit von ca. einer Stunde pyrolysiert. Der feste Rückstand mit einem Glühverlust von ca. 45%, sowohl für SiC als auch für HEK, wurde anschließend unter Luftzugabe dem Schneckenreaktor erneut zugegeben. Hierbei betrug die Verweilzeit ca. 1,5 h. Der feste Probenrückstand wurde anschließend hinsichtlich des Glühverlustes analysiert und optisch mittels Mikroskopaufnahmen bewertet. Die Ergebnisse der Versuche im Schneckenreaktor sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Ergebnisse der kontinuierlichen Versuche im Schneckenreaktor.

Schleikorn	Temperatur	Lufzahl	Massenanteil Rückstand	Glühverlust Rückstand
HEK	500 °C	2,5	54 %	16 %
SiC	500 °C	2,5	48 %	16,5 %

Im Schneckenreaktor konnte sowohl für das behandelte SiC- als auch für das HEK-Schleifmittel keine Verringerung des Glühverlustes bzw. Verbesserung des Materialaufschlusses gegenüber den Versuchen im Drehrohr erzielt werden (vgl. Kapitel 3.3.3.1). Die Mikroskopaufnahmen in Abbildung 22 zeigen Kohlenstoffrückstände und das darin eingeschlossene Schleifkorn.

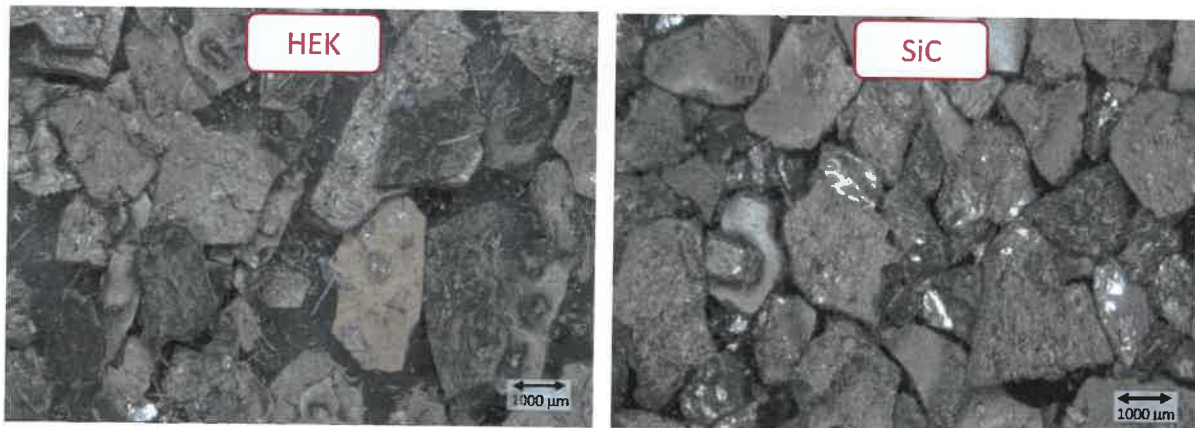


Abbildung 22: Mikroskopaufnahmen der Aschen der im Schneckenreaktor thermisch behandelten Schleifmittel.

Vom ersten Prozessschritt wurden Pyrolysegasproben entnommen sowie im ersten und zweiten Prozessschritt Abgasmessungen nach der Nachverbrennung durchgeführt. Die Ergebnisse der Analysen der Pyrolysegasproben in einem Gaschromatographen zeigen, dass sich die im Pyrolysegas enthaltenen Kohlenwasserstoffverbindungen überwiegend auf kurzkettige Aliphate beschränken, wobei Methan mit ca. 42 % den überwiegenden Anteil ausmacht. Alle ermittelten Bestandteile des Pyrolysegases sind leicht brennbare Gase, die somit in einer anschließenden thermischen Nachverbrennung eliminiert werden können.

Die über die Versuchsdauer des ersten Prozessschrittes (Pyrolyse) gemittelten, nach der Nachverbrennung gemessenen Abgaswerte lagen für NO bei 907 mg und für SO₂ bei 337 mg pro Normkubikmeter trockenem Abgas bei 11 % Bezugssauerstoffgehalt. Der gemessene Sauerstoffgehalt wurde zu 16 % und der CO₂-Gehalt zu 5 % bestimmt. Der hohe Sauerstoffgehalt im Abgas ergibt sich durch die überstöchiometrische Nachverbrennung.

Für den zweiten Prozessschritt (Oxidation) wurden im Vergleich geringere Emissionen nach der Nachverbrennung gemessen. Die wiederum über die Versuchsdauer gemittelten, am Kamin gemessenen Abgaswerte lagen für NO bei 56 mg und für SO₂ bei 0 mg pro Normkubikmeter. Der Sauerstoffgehalt wurde zu 19 % und der CO₂-Gehalt zu 2 % gemessen. Die SO₂-Konzentration von 0 mg/m³ und die deutlich niedrigeren NO-Emissionswerte im Abgas beim Oxidationsprozessschritt ergeben sich vermutlich durch den nahezu vollständigen Übergang der Schwefel- und Stickstoffverbindungen in die Gasphase, bereits beim ersten Prozessschritt, der Pyrolyse. Da keine Möglichkeit zur Messung der Abgase vor der Nachverbrennung bestand, wurden die CO-Emissionen nicht mitaufgenommen. Aufgrund der niedrigen Reaktionstemperaturen ist allerdings mit erhöhten CO Bestandteilen im Abgas zu rechnen, die eine Nachverbrennung notwendig machen.

3.3.3.3 Rostfeuerung (Technikumsmaßstab)

Verbrennungsversuche wurden auch in einer automatischen Vorschubrostfeuerung am TEER, ebenfalls im kontinuierlichen Betrieb durchgeführt. Die Vorteile der etablierten Rostfeuerungstechnik gegenüber einem Drehrohrföfen sind die einfache Technik, geringere Inputmaterialanforderungen, höhere Durchsätze, geringerer Platzbedarf sowie geringere Investitions- und Be-

triebskosten. Entscheidende potenzielle Nachteile können jedoch die prozessbedingten Temperaturspitzen und die sich bewegenden Rostelemente darstellen. Hieraus kann einerseits eine verstärkte thermische und andererseits mechanische Beanspruchung der Schleifkörner resultieren. Wie auch beim Drehrohrföfen bzw. Schneckenreaktor war das Ziel der Verbrennungsversuche in der Rostfeuerung die Validierung der guten Ergebnisse aus den Batchversuchen im Muffelofen in einem kontinuierlichen Prozess.

Die Rostfeuerung des TEER (Nennwärmeleistung: 150 kW) verfügt über drei sich bewegende Vorschubrostelemente, Primär- und Sekundärlufteintrag sowie einen Materialeintrag und Ascheaustrag mit Förderschnecken. Im Kamin besteht zudem die Möglichkeit zur Messung der Abgaszusammensetzung. In Abbildung 23 ist das Anlagenschema der Rostfeuerung dargestellt.

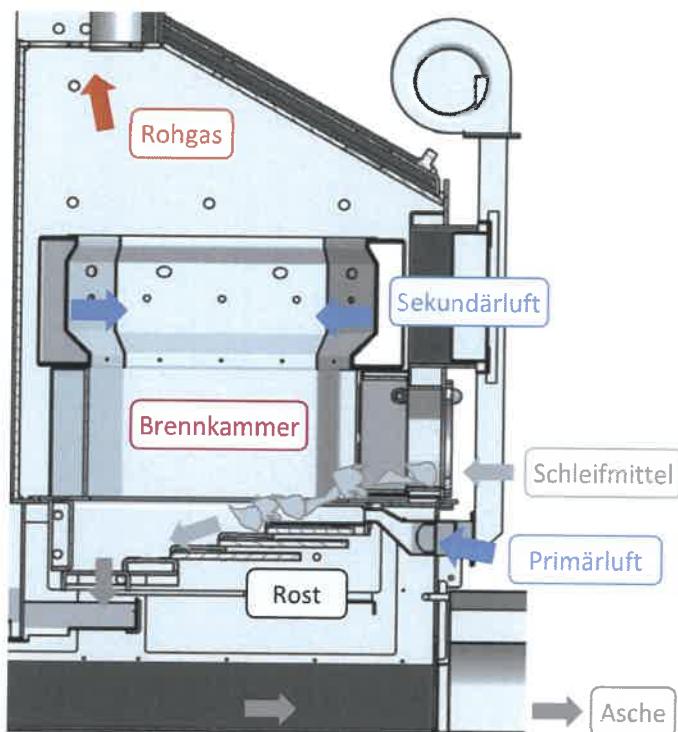


Abbildung 23: Anlagenschema der verwendeten Rostfeuerung.

Für Tastversuche wurden zunächst reine Schleifmittelfractionen mit Siliziumkarbid und Halbedelkorund als Kornmaterial sowie insgesamt sechs unterschiedlichen Unterlagen und diversen Korngrößen von P24-P400 untersucht. Dabei konnten für nahezu alle Schleifmittel bereits Glühverluste $< 1\%$ erreicht werden.

Daher erfolgten im Anschluss zwei größere Versuchskampagnen. Hierfür wurden zwei korn-typenreine Mischfraktionen auf Basis von korund- und siliziumkarbidhaltigen Schleifmitteln unterschiedlicher Körnungen (P24-P500) und Unterlagen hergestellt. Die Verbrennung fand mit einem Durchsatz von ca. 20 kg/h der jeweiligen Mischfraktionen statt. Die Ergebnisse der beiden Versuchskampagnen sind in

Tabelle 8 zusammengefasst. Bei der Verbrennung von insgesamt 117,2 kg Korund-Mischfraktionen wurden 24,6 kg Asche inkl. Schleifkorn ausgetragen. Für die Siliziumkarbid-Mischfraktion fielen bei 87,5 kg Einsatzmaterial 20,4 kg schleifkornhaltige Asche an. Der gemittelte Glühverlust der analysierten Aschen betrug $< 0,15\%$.

Tabelle 8: Ergebnisse der kontinuierlichen Versuchskampagnen in der Rostfeuerung.

Schleifkorn	Temperaturbereich	Luftzahl	Massenanteil Rückstand	Glühverlust Rückstand
HEK	679-1.060 °C	3,6	21 %	0,15 %
SiC	545-920 °C	4,6	23 %	0 %

Bei den eingestellten überstöchiometrischen Verbrennungsbedingungen wurden über den Versuchszeitraum Temperaturen zwischen 648 °C und Temperaturspitzen von bis zu 1.060 °C in der Brennkammer messen. Das zuvor gesetzte Temperaturlimit von 600 °C konnte in der Rostfeuerung somit nicht eingehalten werden. In der Folge kam es bei beiden Mischfraktionen zur Agglomeratbildung, welche in den Mikroskopaufnahmen der gewonnenen Aschen zu erkennen war (vgl. Abbildung 24). Aufgrund der hohen Temperaturen kam es zu Sinterprozessen.

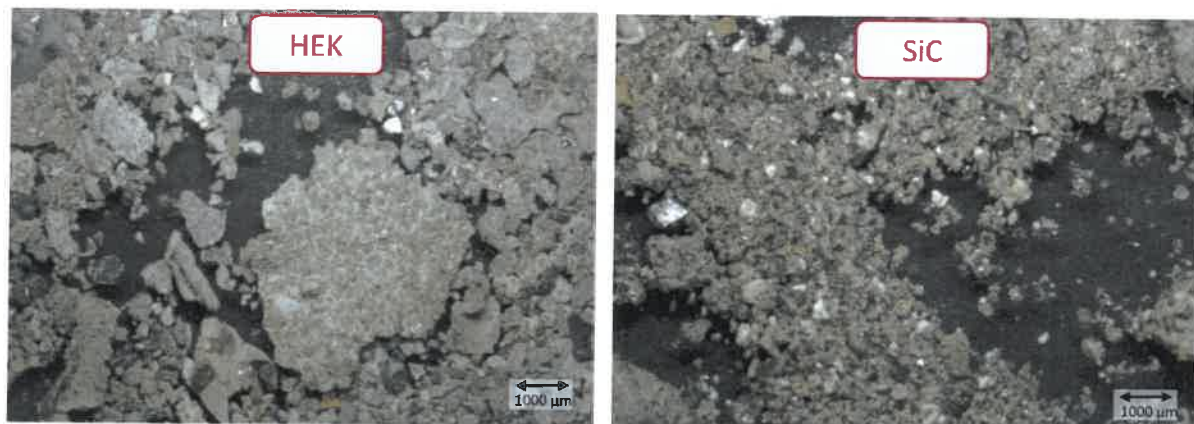


Abbildung 24: Mikroskopaufnahmen der Aschen von in der Rostfeuerung thermisch behandelten Schleifmittel-Mischfraktionen.

Die gemessenen Abgaswerte bei der Verbrennung der korundhaltigen Schleifmittel lagen über die Versuchsdauer gemittelt für NO bei 748 mg und für SO₂ bei 211 mg pro Normkubikmeter trockenem Abgas und 11 % Bezugssauerstoff. Der Sauerstoffgehalt lag bei 15 % sowie der CO₂-Gehalt bei 5 %. Die im Vergleich zu üblichen Abgasmessungen bei Rostfeuerungen hohen Sauerstoffgehalte sind wiederum auf vergleichsweise geringe Verbrennungstemperaturen durch den stark überstöchiometrischen Betrieb der Anlage zurückzuführen. Diese Betriebsweise wurde mit Fokus auf möglichst niedrige Verbrennungstemperaturen von maximal 600 °C gewählt. Die Abgasmesswerte der Verbrennung der Schleifmittel mit Siliziumkarbidkörnern lagen in einem vergleichbaren Bereich.

3.3.3.4 Wirbelfeuerung (Technikumsmaßstab)

Aufgrund des nicht erfolgreichen Materialaufschlusses im Drehrohr (vgl. Kapitel 3.3.3.1) wurde am TEER das Verhalten von Schleifmitteln zusätzlich in einem weiteren Feuerungsaggregat, dem Prototypen einer Wirbelfeuerung, untersucht. Die Wirbelfeuerung besteht im Wesentlichen aus zwei aufeinanderfolgenden Brennkammern, der Hauptbrennkammer (HBK) und der Nachbrennkammer (NBK). In der vertikalen HBK wird Festbrennstoff über eine Schnecke an der Ofendecke hinzugegeben und am Ofenboden durch Primärluft fluidisiert. Der Brennstoff bildet aufgrund vertikal im Brennraum angeordneter Strömungsleitplatten eine Art rotierende Wirbelschicht, wodurch eine sehr gute Durchmischung von Feststoff und Oxidationsmittel durch hohe Turbulenz erreicht wird. Durch den fortschreitenden Ausbrand bilden sich in der HBK Abgase bzw. Gasprodukte sowie feine, flugfähige Partikel. Gas und feine Partikel verlassen die HBK und werden in der NBK durch erneute Zugabe von Verbrennungsluft nachoxidiert. Größere Aschepartikel können am Boden der HBK über eine Schnecke ausgetragen werden.

Das Prinzip der Wirbelfeuerung ermöglicht durch die räumliche Trennung der beiden Brennkammern eine gestufte Verbrennung bei vergleichsweise hoher Verweilzeit. Hierdurch lassen sich niedrige Verbrennungstemperaturen realisieren. Dies kann Vorteile bei der Verbrennung von Schleifmitteln mit temperaturempfindlichen Schleifkörnern oder mit schlechten Ascheerweichungseigenschaften bieten. In Abbildung 25 ist das Anlagenschema der Wirbelfeuerung gezeigt. Am Austritt des Rohgases aus der Nebrennkammer besteht die Möglichkeit zur Messung der Abgasbestandteile.

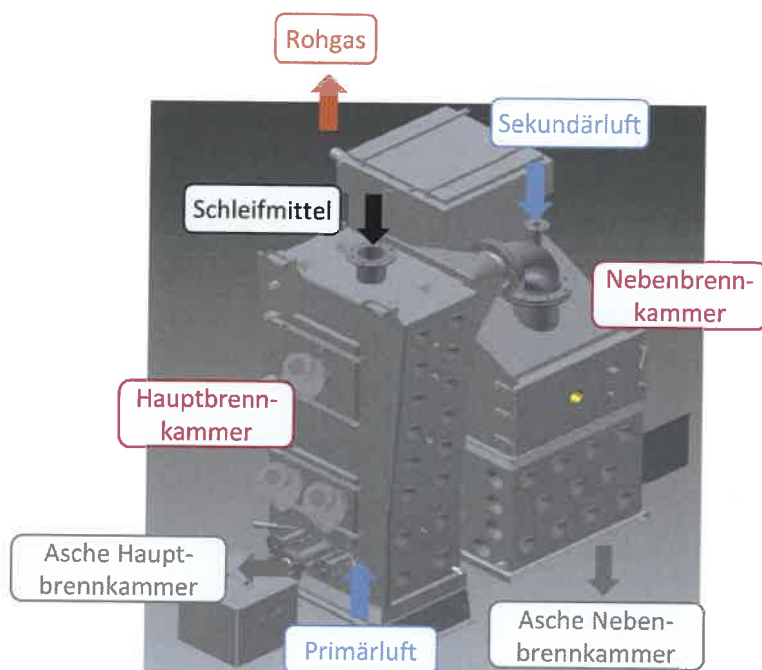


Abbildung 25: Anlagenschema des Wirbelfeuerungsprototyps.

In der Wirbelfeuerung wurden wie bei der Rostfeuerung zwei Kampagnen mit korntypenreinen Mischfraktionen auf Basis von korund- und siliziumkarbidhaltigen Schleifmitteln unterschiedlicher Körnungen (P36-P320) und Unterlagen hergestellt. Mit einem Durchsatz von 12 kg/h fand die Verbrennung der jeweiligen Mischfraktionen statt. Die Ergebnisse dieser beiden Versuchskampagnen sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Ergebnisse der kontinuierlichen Versuchskampagnen in der Wirbelfeuerung.

Schleifkorn	Temperaturbereich	Luftzahl	Massenanteil Rückstand	Glühverlust Rückstand
HEK	395-703 °C	8,2	27 %	0 %
SiC	419-649 °C	8,0	22 %	0,5 %

Bei der Verbrennung von insgesamt 35,1 kg Korund-Mischfraktionen wurden 9,4 kg Asche inkl. Schleifkorn ausgetragen. Für die Siliziumkarbid-Mischfraktion fielen bei 59,5 kg Einsatzmaterial 12,9 kg schleifkornhaltige Asche an. Der hohe Luftüberschuss resultiert aus der Einstellung einer möglichst geringen Verbrennungstemperatur von ca. 500 °C. Die gemessenen Temperaturen während einer stabilen Betriebsphase lagen zwischen 395 °C bis maximal 703 °C deutlich unter der bei der Rostfeuerung gemessenen Maximaltemperatur. Die Glühverluste der analysierten Aschen weisen Werte von unter 0,5% auf. Auch optisch wurde mittels Mikroskopaufnahmen ein erfolgreicher Materialaufschluss ohne Agglomeratbildung nachgewiesen (vgl. Abbildung 26).

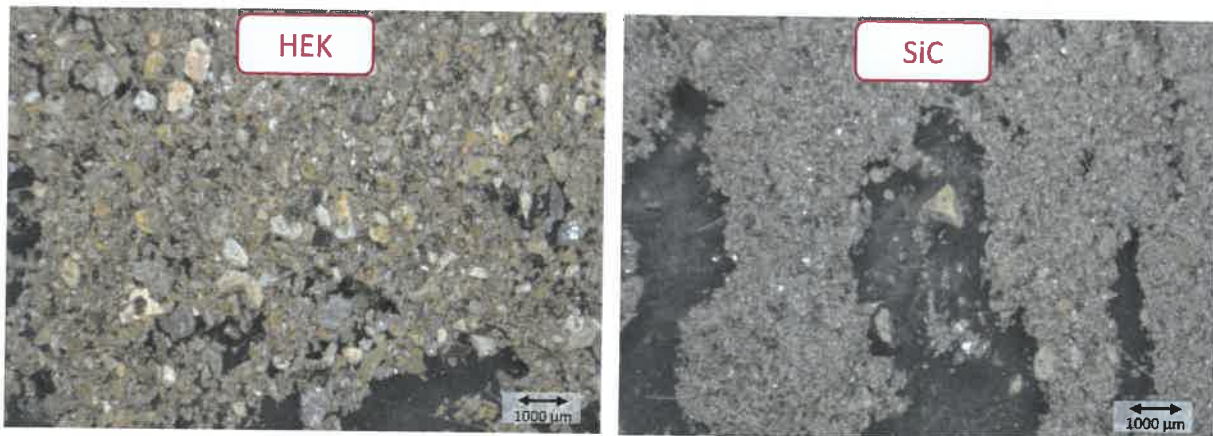


Abbildung 26: Mikroskopische Aufnahmen der Aschen der in der Wirbelfeuerung thermisch behandelten Schleifmittel-Mischfraktionen.

Die gemessenen Abgaswerte bei der Verbrennung der korundhaltigen Schleifmittel, über die Versuchsdauer gemittelt, lagen für NO bei 635 mg und für SO₂ bei 55 mg pro Normkubikmeter und 11 % Bezugssauerstoff. Der Sauerstoffgehalt lag bei 18,4 %, der CO₂-Gehalt bei 3,8 %. Da die Prozessführung gezielt an die Anforderungen des Materialaufschlusses der bisherigen Erkenntnisse angepasst wurde, sind die gemessenen Emissionswerte nicht auf einen späteren Großanlagenbetrieb übertragbar. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Verbrennungstemperaturen ist mit erhöhten CO-Emissionen zu rechnen. Im Weiteren wäre eine gezielte Nachverbrennung der Gase notwendig, um den CO-Gehalt der Abgase zu senken.

3.3.4 Bewertung der thermischen Prozesse

3.3.4.1 *Materialaufschluss*

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass der Materialaufschluss von flexiblen Schleifmitteln auf Unterlage durch eine oxidative thermische Behandlung möglich ist. Eine reine Pyrolyse kommt als Verfahren nicht in Betracht. In Batchversuchen wurden die für unterschiedliche Kornmaterialien und Unterlagen benötigten Prozessparameter ermittelt. Die Übertragung der Erkenntnisse aus Versuchen im Labormaßstab (Muffelofen) auf den Technikummaßstab (Herdwagenofen) im Batchbetrieb war nur teilweise erfolgreich, da sich mit zunehmender Schütthöhe der Materialaufschluss verschlechterte und der Glühverlust der Rückstände stieg. Aufgrund der geringen Schüttdichte der aufzugebenen Schleifmittel wäre ein kontinuierlich betriebener Herdwagenofen im Industriemaßstab unverhältnismäßig groß im Vergleich zur durchgesetzten Masse.

Als Aggregate für eine kontinuierliche Prozessführung wurden ein Drehrohr, ein Schneckenreaktor, eine Rostfeuerung sowie eine Wirbelfeuerung getestet. Der Materialaufschluss konnte durch eine zweistufige Prozessführung im Drehrohr- und Schneckenreaktor zwar im Vergleich zum einstufigen Prozess (reine Pyrolyse) verbessert werden, ein für den nachfolgenden mechanischen Trennprozess ausreichender Materialaufschluss konnte allerdings nicht erzielt werden. Die durchgeführten Abgasmessungen am Drehrohr und Schneckenreaktor bestätigten durch hohe Sauerstoffgehalte, dass keine ausreichende Reaktion zwischen Festbett und Gasphase stattfand. Dennoch ist das Potential zur Umsetzung des Verfahrens im Drehrohrreaktor im großtechnischen Maßstab vorhanden, wenn es gelingt die Durchmischung und Reaktion von Festbett und Gasphase, z. B. durch Einbauten im Drehrohr, zu verbessern und somit den Glühverlust zu senken bzw. den Materialaufschluss zu optimieren. Die Verbrennung der Schleifmittel in einer Rostfeuerung führte zu einem erfolgreichen Materialaufschluss, allerdings wurden durch hohe Temperaturspitzen Agglomerate durch beginnende Sinterprozesse gebildet, in denen Schleifkorn erneut eingeschlossen wurde.

Die Versuche in einer Wirbelfeuerung zeigten die grundsätzliche Eignung dieses Aggregats zum Materialaufschluss von Schleifmitteln. Eine mögliche verstärkte mechanische Beanspruchung der Körner durch Reibung, die zur Qualitätsabnahme führen könnte, wurde bisher allerdings nicht untersucht.

3.3.4.2 *Schadstoffemissionen*

Durch die Ergebnisse der durchgeführten Abgasmessungen wird die Notwendigkeit einer Abgasnachbehandlung bestätigt. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Aggregate mit Fokus auf einen erfolgreichen Materialaufschluss unter den vorgegebenen Randbedingungen aus Vor- und Batchversuchen betrieben wurden. Aus den niedrigen Verbrennungstemperaturen resultierten in den durchgeführten Versuchen teilweise hohe CO-Emissionen, die in diesem Maße je nach Anlage für einen großtechnischen Betrieb nicht zu erwarten wären. Die Stickoxid- und Sauerstoffemissionen sind von den Anteilen an Stickstoff, Schwefel, Chlor und Fluor in den Schleifmittelabfällen abhängig. Für diese Emissionen wird zur Einhaltung der Grenzwerte nach der 17. BImSchV eine Abgasreinigung benötigt.

3.4 Mechanischer Trennprozess (I.A.R.)

In diesem Kapitel wird beschrieben, welchen Techniken für eine Trennung von Schleifkörnern aus Rückständen thermischer Prozesse geeignet und welche Vorbehandlungen notwendig sind. Anschließend werden die wichtigsten Ergebnisse verschiedener Trennversuche zusammengefasst.

Ziel des mechanischen Trennprozesses ist es, die Schleifkörner aus dem Rückstand der thermischen Behandlung mit einer möglichst hohen Reinheit (90-95 %) wiederzugewinnen. Neben einer hohen Reinheit der Produkte sollte bei der Trennung ein möglichst hohes Wertstoffausbringen erzielt werden. Um diese Ziele erreichen zu können, war es zunächst notwendig das Ausgangsmaterial, also den thermischen Rückstand, näher zu untersuchen und zu charakterisieren. Anhand der so gewonnenen Informationen konnten anschließend Aggregate identifiziert werden, die den Prozessanforderungen und -zielen genügen.

3.4.1 Bestimmung Schleifkornanteil

Die Reinheiten (Schleifkornanteile) der produzierten Fraktionen wurden anhand von vier Methoden bestimmt. Die SiC-Konzentration wurde anhand des Kohlenstoffgehalts nach DIN ISO 21068-2 und DIN EN 12698-1 bestimmt. Die Korund-Konzentration wurde mittels Röntgenbeugungsanalyse nach vorheriger Röntgenfluoreszenzanalyse zur Ermittlung der Probenbestandteile bestimmt. Neben diesen Methoden wurden die Schleifkornkonzentrationen durch eine Säurebadbehandlung mit anschließender Dekantierung im Ultraschallbad bestimmt. Bei kleinen Probenmengen wurde eine optische Mikroskopanalyse durchgeführt.

3.4.2 Charakterisierung des Rückstandes der thermischen Behandlung

Die bei thermischen Behandlungen erzeugten Rückstände setzten sich im Wesentlichen aus den folgenden fünf Bestandteilen zusammen: Schleifkörnern (z. B. Korund und SiC), Aschen, Schleifkorn-Asche-Agglomeraten, Störstoffen sowie unverbrannte Materialien (vgl. Abbildung 27).

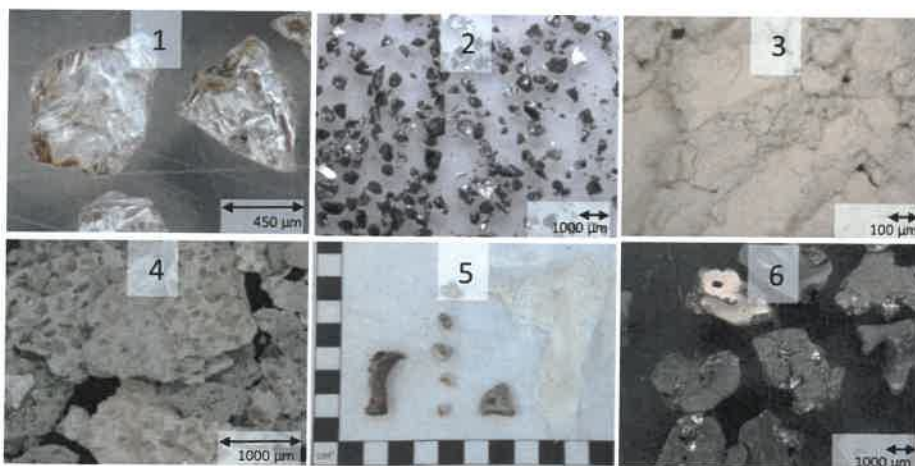


Abbildung 27: Materialzusammensetzung Rückstand: 1. Korund-Schleifkörner, 2 SiC-Schleifkörner, 3 Asche, 4 Agglomerate, 5 Störstoffe, 6 unverbrannte Materialien.

Bei Störstoffen handelt es sich um Verunreinigungen, die entweder durch das Schleifmittelmaterial oder durch den thermischen Prozess in den Rückstand gelangt sind. Hierzu zählen beispielsweise Fremdstoffe, Metallklammern oder Glasfasern. Diese Störstoffe haben eine Partikelgröße von meist mehreren Zentimetern und können durch eine Siebung bei 4-10 mm gut aus den Rückständen abgetrennt werden.

Unverbrannte Materialien sind Teile nicht vollständig oxidierter Schleifmittel. Diese Materialien sind meist schwarz und weisen teilweise noch den in Abbildung 1 gezeigten charakteristischen Schleifmittelaufbau auf. Ein Großteil der unverbrannten Materialien sind größer 1 mm und können aus diesem Grund zuverlässig mittels Siebung entfernt werden.

Unter dem Begriff Asche werden alle inerten Rückstände der vollständigen Oxidation von Schleifmitteln ausgenommen von Schleifkörnern und Störstoffen zusammengefasst. Die Aschen sind matt und ocker- oder graufarbig. Im Gegensatz zu den Schleifkörnern weisen Aschepartikel unter dem Mikroskop keine scharfen Kanten oder reflektierende Flächen auf. Zur Ermittlung der Materialeigenschaften verschiedener Aschen wurde gesondert Schleifmittel verschiedener Unterlage-Binder-Zusammensetzung ohne Korn hergestellt und in einem Muffelofen verbrannt. Die Aschen wurden anschließend mittels Gas-Pyknometer und Camsizer analysiert, um die spezifische Dichte und Kornverteilung zu ermitteln. Demnach hatten die untersuchten Aschen im Mittel eine Dichte von ca. $2,7 \text{ g/cm}^3$ und waren im Mittel ca. 8-10 μm groß.

Die Wertstoffe im Rückstand von thermischen Prozessen sind die Schleifkörner. Die Körnungen sind abhängig von der Feinheit der behandelten Schleifmittel. Im Projekt wurden Schleifmittel der Feinheiten P24-P600 mit einem mittleren Körnungsbereich von ca. 760 bzw. 26 μm untersucht. Schleifkörner, vor allem die Makroschleifkörner P24-P220 (entspricht 760 bzw. 60 μm), sind deutlich gröber als die Aschen der Schleifmittel. Diese Korngrößendifferenz bildet ein Trennmerkmal für den gesuchten Trennprozess. Ein weiteres Trennmerkmal ist der Dichteunterschied der Schleifkörner und Aschen. Die Dichte von Schleifkörnern sind größtenteils höher als die der Aschen. Beispielsweise liegen die Dichten von Korund bei 4 g/cm^3 , von Diamant bei $3,5 \text{ g/cm}^3$ und von SiC bei $3,2 \text{ g/cm}^3$.

Schleifkorn-Asche-Agglomerate sind größtenteils kleiner als 1 mm und plattenförmig. Oftmals weisen die Schleifkörner nach dem thermischen Prozess die ursprünglichen Anordnungen in der umgebenen Aschematrix auf, die sie vor dem thermischen Prozess im Bindermaterial eingenommen haben (vgl. Bild 4 in Abbildung 27). Die Agglomerate lassen sich schon durch geringfügige mechanische Beanspruchung auflösen (z. B. durch das Zerreiben zwischen zwei Fingern). Abhängig von der Schleifmittelzusammensetzung und der thermischen Behandlung (Temperatur, Verweilzeit, mechanische Beanspruchung) finden sich im Rückstand verschieden viele Schleifkorn-Asche-Agglomerate in unterschiedlichen Größen. Schleifmittelhersteller berichteten zum Beispiel, dass mit Fluor behandelte Schleifmittel (z. B. mit KBF_4) schon ab ca. 500-550 °C schmelzen können. Tatsächlich bilden fluorhaltige Keramik-Schleifmittel die größten und festesten Agglomerate von allen untersuchten Materialien.

3.4.3 Desagglomeration

Nach einer Siebung bei 1 mm liegen im Siebunterlauf fast ausschließlich Asche, Korn und Asche-Korn-Agglomerate vor, die mittels mechanischem Trennprozess weiter voneinander getrennt werden müssen. In diesem Kapitel wird die Notwendigkeit einer Desagglomeration von Schleifkorn-Asche-Agglomeraten vor einem mechanischen Trennprozess erläutert. Des Weiteren werden Techniken zur Desagglomeration vorgestellt.

Vorversuche mit einem Zick-Zack-Sichter und einem Abweiseradsichter haben gezeigt, dass sich Asche-Korn-Agglomerate während der Trennung im Prozess nicht auflösen. Die Agglomerate gelangten aufgrund ihrer spezifischen Größe und Dichte in die Schleifkornfraktion und minderten durch ihren Ascheanteil die Reinheit in der Fraktion. Abbildung 28 zeigt ein Schleifkornprodukt, das ohne Desagglomeration mit dem Zick-Zack-Sichter separiert wurde und ein Produkt, das vorher desagglomert wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Reinheit im

desagglomerierten Produkt höher ist. Um eine Reinheit von über 90 % im Schleifkornkonzentrat zu erlangen, müssen Agglomerate demnach vor einem mechanischen Trennprozess desagglomeriert werden.

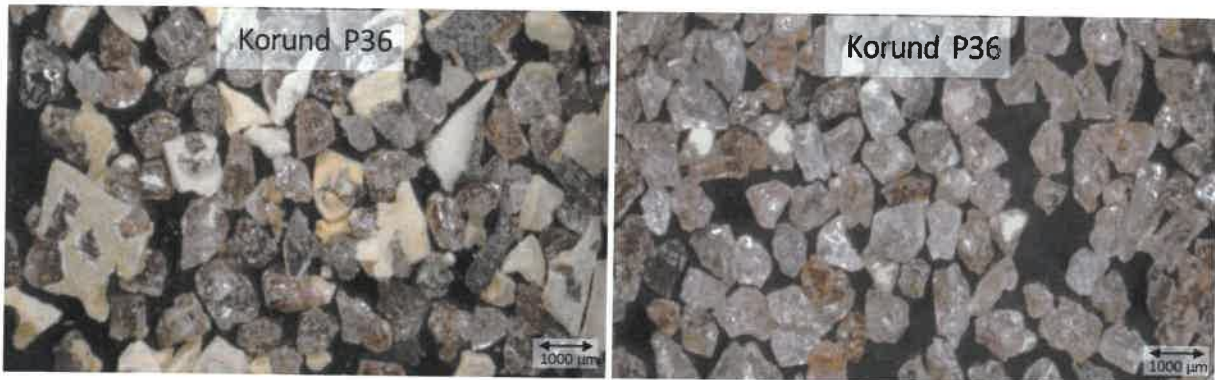


Abbildung 28: Schleifmittelkonzentrat ohne (links) und mit Desagglomeration (rechts).

Im Projekt wurden verschiedene Techniken zur Desagglomeration untersucht. Zu diesen Techniken gehörten die Zerkleinerung während einer Siebung mittels Siebhilfen auf dem Siebelag (hier: Gummibälle und Bürsten) sowie die Zerkleinerung mittels Kugelmühle und Luftstrahlmühle. Alle drei untersuchten Techniken konnten die Agglomerate zerkleinern.

Mittels Siebhilfen konnten während der Siebung auf einem Taumelsieb gröbere Agglomerate $> 400 \mu\text{m}$ aufgetrennt werden, kleinere Agglomerate gelangten jedoch in den Siebunterlauf und wurden nicht weiter beansprucht. Das Verfahren ist somit nur zur Vorzerkleinerung von Agglomeraten oder zur Zerkleinerung von Agglomeraten aus gröberen Schleifmittelrückständen ($> P40$) geeignet.

Auch mittels Kugelmühle konnten Agglomerate desagglomeriert werden. Jedoch kam es durch die Rotationsbewegung der Mühle zusammen mit den Kugeln zu vergleichsweise hohen Reibkräften, die die Schleifkörner und die Maschine abnutzten.

Die schonendste (geringste Reibung in der Maschine) und effektivste Desagglomeration konnte mittels Luftstrahlmühle erreicht werden. Abbildung 29 zeigt die im Projekt eingesetzte batchweise betriebene Luftstrahlmühle.

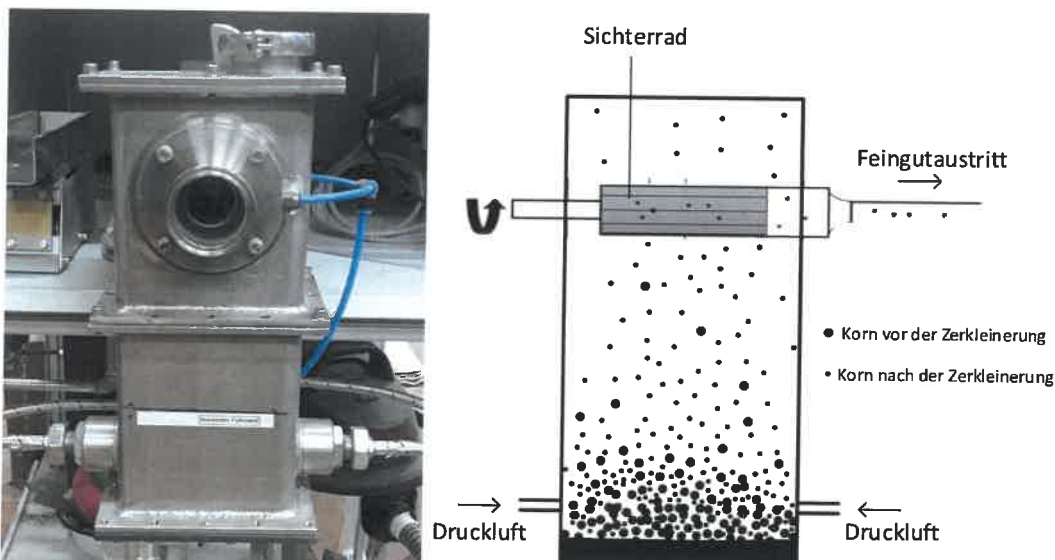


Abbildung 29: Verwendete Luftstrahlmühle und Funktionsskizze.

Das Aufgabematerial befindet sich in einem Zerkleinerungsbehälter. An zwei gegenüberliegenden Seiten des Behälters befinden sich Druckluftdüsen, die Druckluft in den Behälter blasen. Durch die Druckluft wird eine Wirbelschicht aufgebaut, in der die Agglomerate miteinander kollidieren und so zerkleinert bzw. desagglomeriert werden. Freiliegende Asche und Körner werden über einen Ventilator abgesaugt. Über die Umdrehungsgeschwindigkeit eines Abweiserads an der Saugstelle kann der Zerkleinerungsgrad eingestellt werden. Der Desagglomerationserfolg ist vor allem abhängig von der Druckluftbeaufschlagung und der Verweilzeit der Agglomerate in der Wirbelschicht.

Es wurden verschiedenen Testkampagnen durchgeführt, um die optimalen Parametereinstellungen für die Luftstrahlmühle herauszufinden. Demnach sollte das Material mit ca. 2-3 bar Druckluft zerkleinert werden. Das Abweiserad sollte nicht eingeschaltet werden, da das Material ansonsten zu lange in der Mühle verbleibt und neben den Agglomeraten auch das Schleifkorn zerkleinert. Tabelle 10 zeigt die Reinheiten von Schleifkornkonzentraten nach Separation in einem Abweiseradsichter ohne und mit vorgeschalteter Desagglomeration bei 3 bar sowie nach einer einfachen bis fünffachen Verweilzeit im Mahlbehälter.

Tabelle 10: Konzentrat-Reinheit verschiedener gesichteter P80 SiC-Schleifkörner nach unterschiedlicher Verweilzeit in einer Luftstrahlmühle.

Input	ohne Mahlung	1 Mahlung	2 Mahlungen	3 Mahlungen	4 Mahlungen	5 Mahlungen
82%	92%	98%	97%	99%	98%	98%

Es ist deutlich zu erkennen, dass eine hohe Konzentrat-Reinheit > 95% ohne eine Desagglomeration nicht erreicht werden konnte. Nach der Desagglomeration stieg die Reinheit auf über 97%. Durch eine längere Verweilzeit in der Mühle konnte die Reinheit nicht erhöht werden.

In einer weiteren Testkampagne wurde bewiesen, dass die untersuchten Schleifkörner abhängig von zunehmenden Luftdruck und längerer Verweilzeit stärker zerkleinert werden und verunreinigen. Ein erhöhter Feingutanteil durch Zerkleinerung der Schleifkörner erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass Schleifkörner während der Sichtung in das Feingut gelangen und so das Wertstoffausbringen sinkt. Eine Verrundung der Körner, also ein geringeres Längen/Breiten-Verhältnis, wirkt sich negativ auf die Schleifleistung aus (vgl. Kapitel 0). Im Projekt wurde demnach materialabhängig eine möglichst kurze Verweilzeit in der Mühle bei max. 3 bar gewählt, um die geforderte Reinheit zu erreichen.

3.4.4 Identifikation eines geeigneten Trennaggregats

In Kapitel 3.4.2 wurden die Materialeigenschaften der Korngröße und der Dichte als mögliche Merkmale zur Trennung von Asche und Schleifkörnern in einem technischen Aufbereitungsprozess identifiziert. Die nachfolgenden Techniken machen sich diese Merkmale zur Trennung von Materialgemischen zur Nutze.

3.4.4.1 Siebung

Siebung ist ein technischer Prozess, bei dem die Asche und das Schleifkorn anhand der Korngrößendifferenz voneinander getrennt werden. Im Projekt wurden Siebversuche auf Analyse-sieben und Taumelsieben durchgeführt. Demnach ist es möglich, gröbere Schleifkörner > 400-500 µm effektiv von der Asche zu trennen. Abbildung 30 zeigt den Siebüberlauf von einem thermisch behandelten P36-Korund-Schleifmittel mit Papierunterlage. Es ist deutlich die hohe Reinheit der Schleifkörner im Siebüberlauf zu erkennen. Je feiner der Siebschnitt wird, desto schlechter wird der Siebwirkungsgrad [PF17]. Mikrokörnungen können nicht effektiv abgetrennt werden [DIN00]. Die Siebung eignet sich demnach nur für die Trennung von größeren Schleifkörnern, wobei durch Zugabe von Siebhilfen (z. B. Gummibällen) gleichzeitig eine Desagglomeration von Agglomeraten erfolgen kann.



Abbildung 30: Siebung bei 400 µm auf einem Taumelsieb und Korund-Schleifkornkonzentrat im Siebüberlauf.

3.4.4.2 Zick-Zack-Windsichter

Bei einer Sichtung im Trennmedium Luft werden Partikel sowohl nach ihrer Korngröße als auch nach ihrer Dichte und Kornform getrennt. Je nach Sichterbauart wirken verschiedene Trennkräfte auf die zu trennenden Partikel. Im Projekt wurde getestet, bis zu welcher Korngröße ein Zick-Zack-Windsichter Schleifkörner effektiv von Aschen trennen kann. Zick-Zack-Windsichter sind sogenannte Gegenstromsichter, bei denen Luft in einem gezackten Kanal von unten gegen die zu trennenden Partikel bläst. Ist die Gewichtskraft der Partikel größer als der durch die Luft erzeugte Partikelantrieb, sinken die Partikel (hier: Schleifkörner) gegen den Luftstrom nach unten und werden im Schwergut angereichert. Leichte, feine und flächige Partikel (hier: Aschepartikel) werden hingegen mit der Luft ausgetragen und anschließend über einen Zyklon von der Luft abgetrennt.

Abbildung 31 zeigt das Schleifkornausbringen (Wertstoffausbringen) bei einer minimal einstellbaren Luftgeschwindigkeit von ca. 4 m/s. Es ist zu erkennen, dass das Ausbringen schon ab einer Korngröße von P60 (Mittlere Körnung 270 µm) deutlich sinkt. Der Zick-Zack-Sichter ist demnach nur in der Lage gröbere Körnungen > P60 zu trennen.

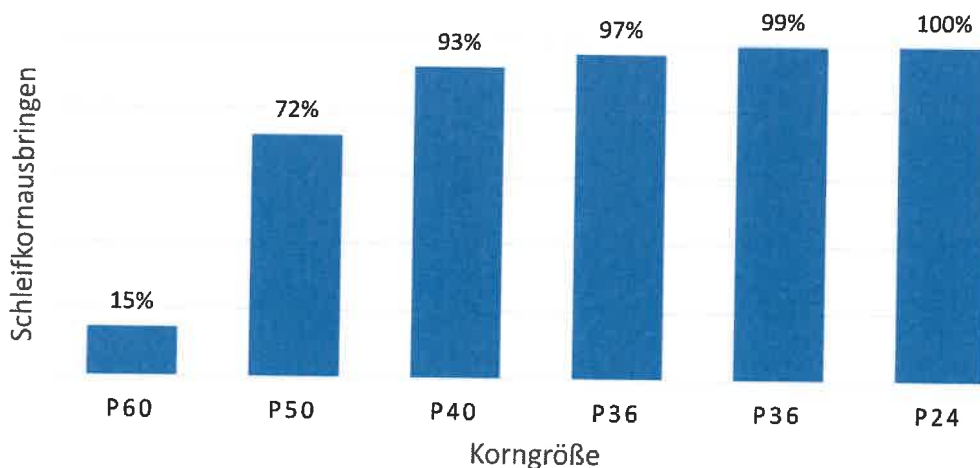


Abbildung 31: Ausbringen von Schleifkörnern verschiedener Körnungen mittels Zick-Zack-Sichter.

3.4.4.3 Abweiseradsichter

Des Weiteren wurde eine Trennung von Schleifkörnern aus thermischen Rückständen mittels Abweiseradsichter untersucht. Abbildung 32 zeigt den verwendeten Abweiseradsichter der Firma Graf.

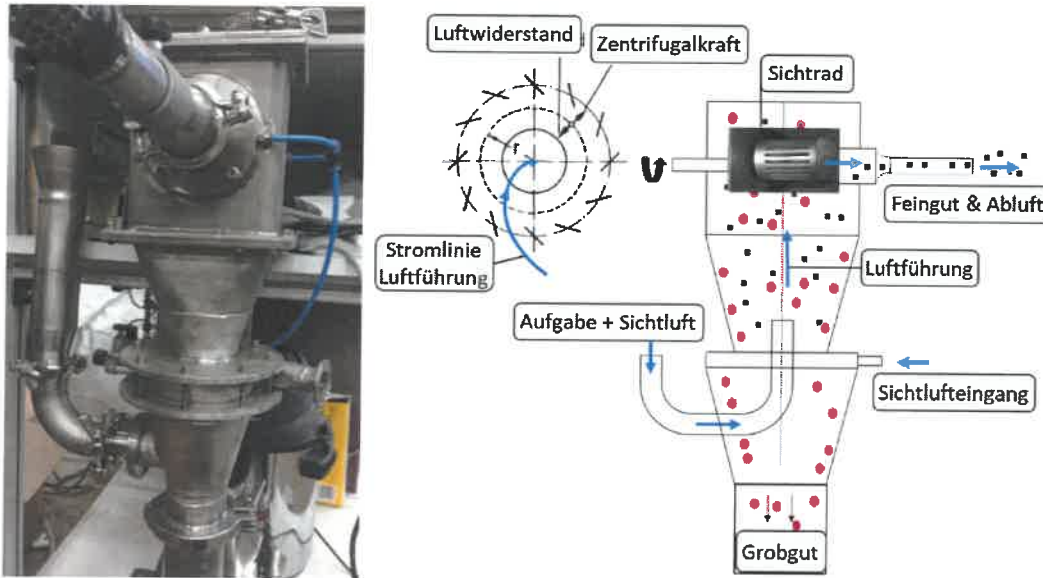


Abbildung 32: Verwendeter Abweiseradsichter und Prinzipskizze [frei nach Gra18 und Les77].

Das Aggregat besteht aus einem Auffanggefäß für das Grobgut, auf dem zwei Zykclone übereinander angebracht sind. Auf dem oberen Zyklon ist ein Aufsatz mit einem Abweiserad angebracht. Über einen Ventilator werden am Abweiserad die Sichtluft und das Feingut angesaugt. Dadurch, dass sich das Sichterad mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von bis zu 17.000 U/min dreht, wird die Sichtluft am Abweiserad verwirbelt und folgt der skizzierten Stromlinie. Auf die Partikel, die mit der Luft geführt werden, wirken zwei Kräfte: Die durch den Ventilator erzeugte Widerstandskraft und die durch die Drehung erzeugte Zentrifugalkraft. Feine, leichte Partikel (hier: Aschepartikel) folgen aufgrund der Widerstandskraft der Luftführung, passieren das Abweiserad und werden in der skizzierten Feingutfraktion ausgebracht. Große, schwere Partikel werden aufgrund der Zentrifugalkraft am Abweiserad abgewiesen und werden letztendlich im Grobgutbehälter ausgebracht. [Gra18] Die Zentrifugalkräfte, die auf die Partikel wirken, ermöglichen eine effektive Trennung von sehr feinen Partikeln (bis zu 5 µm) [Gra18]. Die Maschine ist damit potentiell gut geeignet auch die feinsten im Projekt untersuchten Schleifkörner (P600) zurückzugewinnen.

In Tastversuchen mit unterschiedlich feinen Rückständen aus thermischen Prozessen wurde die Eignung der Maschine bei der Firma Graf überprüft. Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse dieser Tastversuche. Das Grobgut zeigt eine deutliche Anreicherung an Schleifkörnern, wohingegen kaum Schleifkörner ins Feingut, also in die Aschefraktion, fehlausgetragen wurden. Aufgrund der positiven Ergebnisse der Tastversuche wurde die Maschine von der PDR geliehen und für die geplanten Testkampagnen am I.A.R. vorbereitet.



Abbildung 33: Tastversuche Abweiseradsichter: Asche- und Kornfraktionen von P36-Korund (links) und P150-SiC (rechts).

3.4.5 Parametrierung der Sichtereinstellungen

Bei einer Sichtung mittels Abweiseradsichter können der Luftvolumenstrom und die Umdrehungsgeschwindigkeit des Abweiserads variiert werden.

Der Luftvolumenstrom kann durch die Einstellung des Gebläses oder durch die Einstellung von Falschlufteingängen gesteuert werden. In dem eingesetzten Aggregat ersetzt ein Staubsauger mit einem festgelegten Luftvolumenstrom von ca. 4,9 m³/min das Gebläse. Über die Öffnung von Falschluffklappen am Abluftstutzen lässt sich der Luftvolumenstrom im Sichter reduzieren. Je geringer der Luftvolumenstrom, desto geringer ist die Widerstandskraft weshalb weniger Feingut mit dem Luftstrom abgeführt wird. Die Öffnung der Falschlufteingänge eignet sich demnach zur Abtrennung sehr feiner Partikel. Vorversuche haben jedoch gezeigt, dass zur Erfüllung der Qualitätsvorgaben der maximale Luftvolumenstrom benötigt wird, da ansonsten zu viel feine Asche in die Kornfraktion (Grobgut) gelangt.

Mittels Umdrehungsgeschwindigkeit des Abweiserads lässt sich die Trennschärfe des Sichters einstellen. Um die bestmöglichen Einstellungen für unterschiedliche Schleifmittel zu ermitteln, wurden mehrere Versuche mittels reinem Schleifkorn (ohne Ascheanteile) und reiner Asche (ohne Schleifkornanteile) durchgeführt. Abbildung 34 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Parametrierungsversuche für gröbere (P40) und feinere (P320) Korund-Körnungen. Es ist zu erkennen, dass für die gröberen P40-Körner bereits Umdrehungsgeschwindigkeiten von 1600 U/min ausreichen, um ein Wertstoffausbringen von über 95% zu erreichen, wobei die feineren P320-Körner diesen Wert erst bei Geschwindigkeiten von ca. 2200 U/min erreichen. Anhand von weiteren Versuchen mit Rückständen aus verschiedenen thermischen Behandlungen wurden optimale Einstellungsparameter für verschiedene Körnungen (P24-P600) identifiziert, die im Bereich von 1500-4500 U/min lagen.

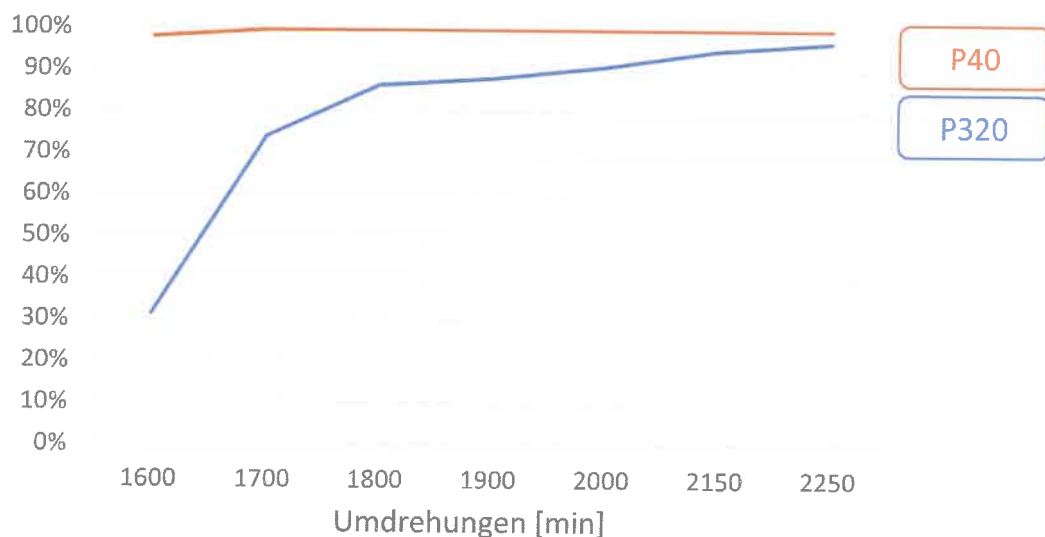


Abbildung 34: Kornausbringen unterschiedlicher Korund-Körnungen in Abhängigkeit der Abweiserad-Umdrehungsgeschwindigkeit.

3.4.6 Trennversuche von unterschiedlichen Kornmaterialien

Neben den Standardkorntypen SiC und Korund wurden mechanische Trennversuche mit fünf weiteren Korntypen durchgeführt. Das Ausgangsmaterial für die Versuche wurde, wie in Kapitel 3.3.2.1 erläutert, im Muffelofen thermisch behandelt.

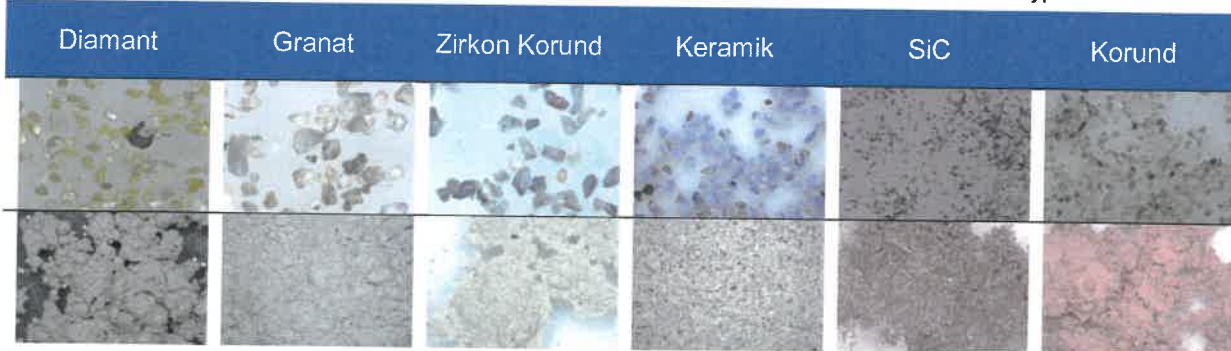
Zunächst wurden die Rückstände bei 1 mm gesiebt, um unverbrannte Materialien und Störstoffe zu entfernen. Anschließend wurde der Siebunterlauf in der Luftstrahlmühle bei 3 bar

desagglomeriert (1 Mahlung). Nach der Desagglomeration erfolgte die eigentliche Trennung der Körner mittels Abweiseradsichter. Die Umdrehungsgeschwindigkeit des Sichterrades wurde entsprechend der Körnungen eingestellt. Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse für 6 der 7 Trennversuche und Tabelle 12 die zugehörigen Mikroskopaufnahmen. Da die Reinheit der Keramikkonzentrate nach einem einstufigen Aufbereitungsprozess nicht den Zielen entsprach, wurden die Konzentrate in einem weiteren Prozess (Mahlung und Sichtung) nachgereinigt.

Tabelle 11: Ergebnisse der Aufbereitung von Schleifmittel unterschiedlicher Kornarten.

	Diamant D80	Granat P60	Zirkon-Korund P120	Keramik P36 (2 Stufig)	SiC P600	Korund P80
cW Konzentrat	99%	97%	97%	78–90%	96–98%	99%
cW Aschefraktion	10%	2%	16%	2–4%	80%	5%
R _M Konzentrat	54%	69%	65%	88%	48%	65%
R _w Konzentrat	92%	99%	92%	n.b.	54%	97%
Schüttdichte Konzentrat [g/cm ³]	2,29	2,08	1,96	2,06	1,83	1,88
Schüttdichte Aschefraktion [g/cm ³]	0,45	0,60	0,76	n.b.	n.b.	0,69

Tabelle 12: Fotos der Konzentrate und Aschefractionen von Schleifmittel unterschiedlicher Kornarten.



Insgesamt lagen Wertstoffausbringen und Reinheit bei fast allen Konzentraten über 95% (Ausnahme Keramik Korn). Das Projektziel einer hohen Reinheit (> 90-95%) konnte demnach für fast alle Kornarten erreicht werden. Selbst bei einer sehr feinen Körnung von ca. 25 µm (SiC 600) konnte ein Konzentrat mit einer Reinheit von 98% zurückgewonnen werden. Die effektive Anreicherung von Schleifkörnern in den Konzentraten lässt sich auch anhand der Schüttdichten ablesen, die bei den Konzentraten bis zu fünfmal so hoch war wie bei den Aschefractionen. Grundsätzlich gilt jedoch: Je feiner das Korn, desto geringer ist die Korngrößenunterschied zur Asche, weshalb wiederum das Wertstoffausbringen sinkt. Das Wertstoff- bzw. Schleifkornausbringen des sehr feinen SiC P600-Korns lag bei 54% und damit weit unter den Werten der anderen Ergebnisse.

Die Agglomerate der PKS- und Keramik-Rückstände waren deutlich fester und gröber als die der anderen untersuchten Rückstände (vgl. Abbildung 19). Dies lag höchstwahrscheinlich an

den fluorhaltigen Zusatzstoffen, die schon ab 550 °C schmelzen können und so den Agglomeraten zusätzliche Festigkeiten verliehen. Aufgrund der Festigkeit konnten die Agglomerate nicht in der Luftstrahlmühle zerkleinert werden. Sie wurden daher drei Sekunden in einer Scheibenschwingmühle desagglomert und anschließend gesichtet.

Abbildung 35 zeigt das aufbereitete PKS-Korn. Es ist zu erkennen, dass auch nach der durchgeführten Desagglomeration immer noch unzerkleinerte Aschepartikel und Agglomerate vorlagen, die aufgrund ihrer Größe in das Schleifkornkonzentrat (Grobgut) gelangten. Dies lag daran, dass die Zerkleinerungszeit in der Mühle zu kurz war, um die Agglomerate vollständig zu zerkleinern. Die Zerkleinerungszeit konnte jedoch nicht verlängert werden, da ansonsten die charakteristische dreieckige Struktur des PKS-Schleifkorns zerstört wurde. Eine erfolgreiche Aufbereitung von fluorhaltigen Keramiken sollte demnach bei Temperaturen unter 550 °C stattfinden, um das Schmelzen und somit die Bildung von großen, harten Agglomeraten zu verhindern.

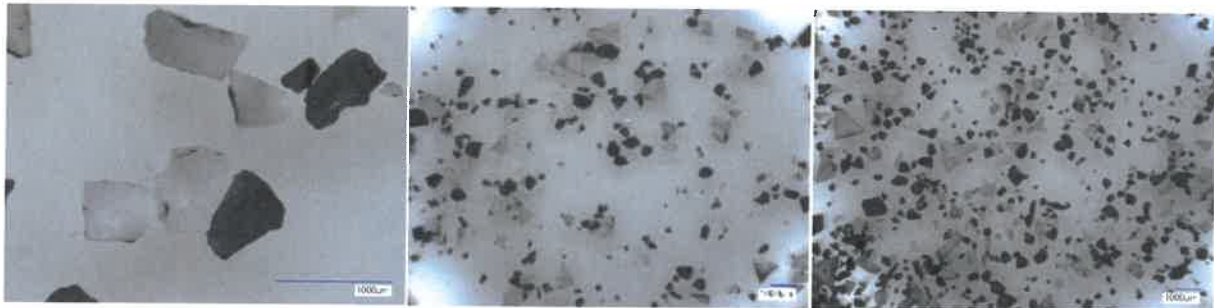


Abbildung 35: PKS-Schleifkornkonzentrat (weiß) mit hohen Ascheanteilen (schwarz) und teilweise zerstörten Schleifkornstrukturen.

3.4.7 Aufbereitung der Rückstände aus den kontinuierlichen Verbrennungsversuchen

Die Rückstände der in Kapitel 3.3.3 durchgeführten kontinuierlichen thermischen Prozessversuche wurden nach den zuvor beschriebenen Verfahren und Parametereinstellungen getrennt.

Rostfeuerung:

In der Rostfeuerung wurden insgesamt ca. 200 kg SiC- und Korund-Schleifmittel mit verschiedenen Körnungen P36-P500 und unterschiedlichen Unterlagen thermisch behandelt (vgl. Kapitel 0). Die jeweiligen Rückstände wurden bei 0,5 mm, 0,2 mm und 0,065 mm gesiebt, um geeignete Körnungsbänder für die Trennung mittels Sichtung herzustellen. So konnten für alle Körnungsbänder gezielte Parametereinstellungen vorgenommen werden.

Abbildung 36 zeigt die Massenverteilung der Schleifkornkonzentrate der einzelnen Korngrößenklassen. Im Mittel wurden ca. 60 Ma.-% in das Schleifkornkonzentrat sortiert. Je feiner die Korngrößenklassen, umso geringer war das Massenausbringen. Das lag unter anderem daran, dass sich bereits beim Klassierprozess die Asche in den feinen Kornklassen anreichert.

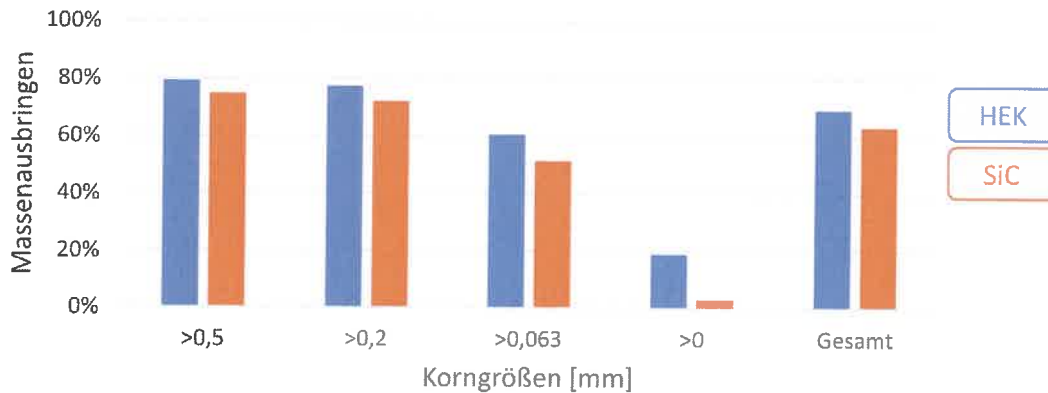


Abbildung 36: Massenausbringen ins Konzentrat nach Korngrößenklassen.

Abbildung 37 zeigt die SiC-Schleifkornkonzentrate der einzelnen Korngrößenklassen. Die Reinheiten der Konzentrate lagen zwischen 89,5% und 91%. Nur die Reinheit der Feinstfraktion war deutlich geringer und lag bei 40%.

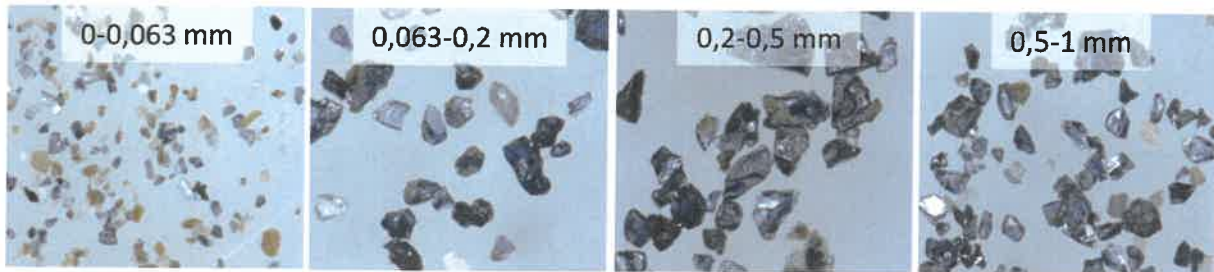


Abbildung 37: SiC-Konzentrate nach Rostfeuerung.

Abbildung 38 zeigt die Korund-Schleifkornkonzentrate der einzelnen Korngrößenfraktionen. Der Verunreinigungsgrad war nach mikroskopischer Analyse deutlich höher als der des SiC-Konzentrates. Die etwas größeren, matten, rundlichen Partikel sind Asche-Agglomerate, die durch die Luftstrahlmühle nicht zerkleinert werden konnten. Die hohe Härte der Agglomerate ist höchstwahrscheinlich auf die in Kapitel 0 beschriebenen hohen Spitzentemperaturen von über 1000 °C zurückzuführen. Zum Vergleich: Die Konzentrate in Kapitel 3.4.6 wurden bei einem maximalen Temperaturwert von 550 °C behandelt. Experten des Schleifmittelproduzenten haben die Fraktionen begutachtet und kamen zu dem Schluss, dass die Reinheiten nicht den Qualitätsanforderungen genügen. Auf die aufwendige chemische Analyse der Konzentrate wurde daher verzichtet.

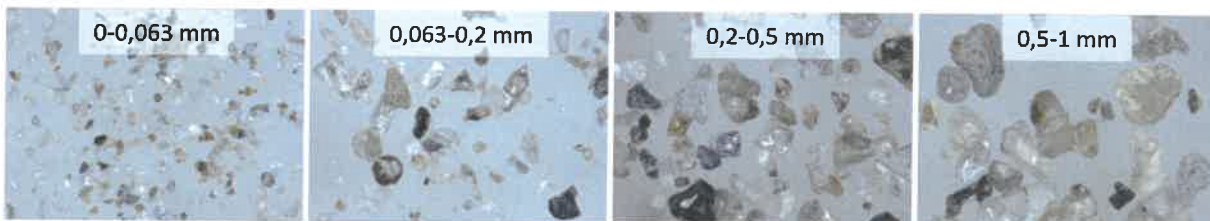


Abbildung 38: Korund Konzentrate nach Rostfeuerung.

Drehrohrofen:

Die Rückstände der Drehrohrversuche (vgl. Kapitel 3.3.3.1) wurden jeweils in einem zweistufigen Aufbereitungsprozess aufbereitet. Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse der Korund-Aufbereitung. Es sind viele schwarze, unverbrannte Partikel im Konzentrat zu erkennen. Die in Ka-

pitel 3.3.3.1 beschriebene unzureichende thermische Oxidation führt demnach zu hohen Bestandteilen an unverbranntem Material im Konzentrat, wodurch allein der Glühverlust im Konzentrat über 11% lag. Eine erfolgreiche Trennung von Korn mit einer Reinheit > 90% war somit nicht möglich. Der Glühverlust in der Aschefraktion lag bei ca. 25%.

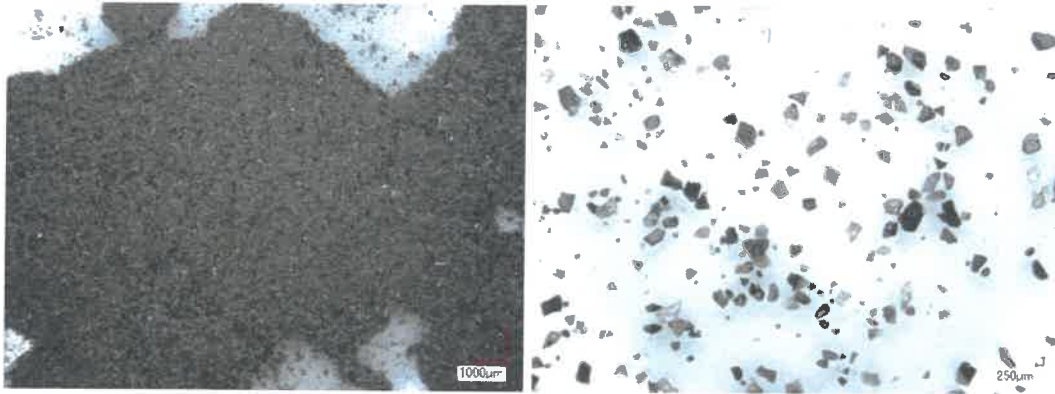


Abbildung 39: Asche- und Schleifkornfraktion der Drehrohrversuche von Korund.

Wirbelschichtfeuerung:

Mittels Wirbelschichtfeuerung (vgl. Kapitel 3.3.3.4) wurde ein gut oxidiertes und damit unproblematisch aufzubereitender Rückstand produziert. Anders als bei den anderen Verbrennungsverfahren wurden bereits im thermischen Prozess verschiedene Trennfractionen gebildet. So wurden in der Hauptbrennkammer bereits Schleifkörner angereichert und in der Nachbrennkammer Aschepartikel. Abbildung 40 zeigt die Trennergebnisse für die einzelnen Brennkammerfraktionen. Das Material aus der Hauptbrennkammer konnte mit einer hohen Reinheit von 92-94,5% zurückgewonnen werden, wohingegen das Material aus der Nachbrennkammer nicht zurückgewonnen werden konnte (der Ascheanteil im Konzentrat war höher als der Kornanteil, vgl. Abbildung 40 rechts).

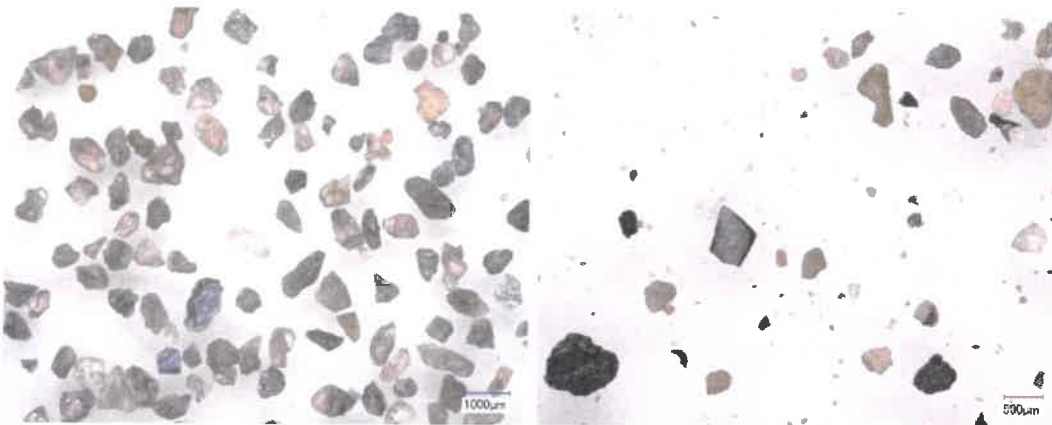


Abbildung 40: Asche- und Schleifkornfraktion der Wirbelschichtfeuerungsversuche mit Korund.

Tunnelofen:

Die thermischen Rückstände aus dem Tunnelofen konnten mit einer Reinheit von 93% zurückgewonnen werden. Die thermischen Rückstände waren sehr homogen und ließen sich gut trennen. Abbildung 41 zeigt die getrennten Fraktionen der Tunnelofenversuche. Aus dem zurückgewonnenen Schleifkornkonzentrat wurden neue Schleifmittel hergestellt und mit Original-Schleifmitteln verglichen (vgl. Kapitel 3.6).

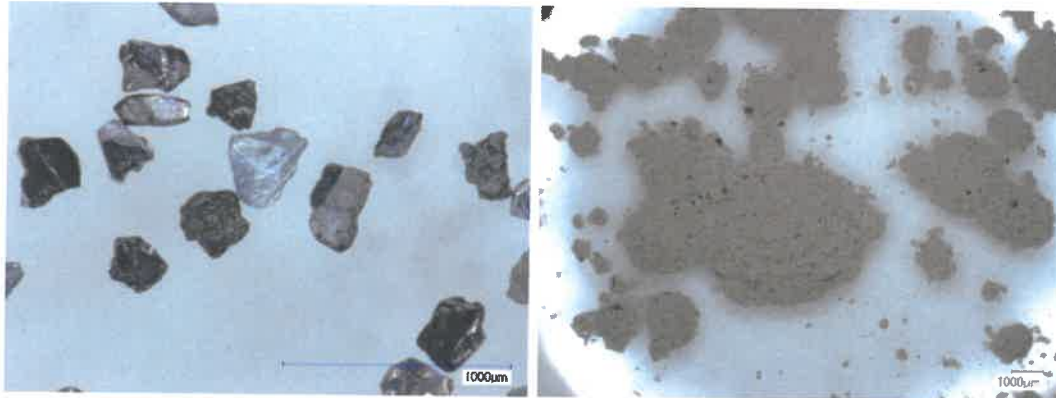


Abbildung 41: Asche- und Schleifkornfraktion der Tunnelofenversuche von SiC.

3.5 Klassierung (PDR)

3.5.1 Identifikation eines industriellen Partners für Klassiersversuche

Ziel der Klassierung ist es, Korngrößenverteilungen der aus dem Recyclingprozess gewonnenen Schleifkörner entsprechend der FEPA-Norm herzustellen. Die Klassierung ist ein aus der Primärschleifkornherstellung erprobter Prozess, den es auf Recyclingkörner anzuwenden gilt.

Um einen geeigneten Dienstleister für die Klassiersversuche auswählen zu können, wurden die Anforderungen zunächst in einem Lastenheft definiert. Wichtige Kriterien für die Wahl des Dienstleisters waren:

- Erfahrungen im Bereich der Klassierung nach FEPA-P-Standard,
- Erfahrungen/Referenzen mit Schleifkörnern bzw. abrasiven Materialien,
- geeignete Technikumsanlagen,
- Erfahrungen im Bereich der Siebung von sehr großen Kornklassenbandbreiten (25-1.000 μm).

Auf dieser Basis wurden zwei Dienstleister für die nachfolgenden Tastversuche ausgewählt. Als Lösungsansatz wandten die beiden Firmen jeweils unterschiedliche Techniken an.

3.5.2 Tastversuche extern (Identifikation geeignetes Aggregat)

Nach ersten Gesprächen mit den beiden Dienstleistern stellte sich heraus, dass die ursprünglich geplante Menge an Inputmaterial (20 kg) nicht ausreicht, um damit auf den Technikumsanlagen entsprechende Versuche durchzuführen. Hierfür würden mindestens 100 kg Korn benötigt. Aus diesem Grund konnte für die Tastversuche kein Material aus der Sichtung verwendet werden. Stattdessen stellte der Industriepartner Abfallkorn aus der Schleifmittelherstellung als Inputmaterial zur Verfügung. Bei Abfallkorn handelt es sich um Schleifkörner, die bei der Schleifmittelherstellung nicht auf der Schleifmittelunterlage haften bleiben, sondern neben das Produktionsband fallen. Dieses Abfallkorn wird nach jedem Wechsel der Schleifkornart (SiC, HEK etc.) separat erfasst, so dass es sortenrein, allerdings nicht korngrößengetrennt, vergleichbar mit Recyclingkorn, vorliegt. In Abbildung 43 ist die Korngrößenverteilung des Aufgabematerials für die Mischkornfraktion SiC beispielhaft dargestellt.

Als geeignete Technik wurde zum einen eine Mehrdeck-Horizontal-Siebmaschine in Erwägung gezogen (vgl. Abbildung 42). Der Materialtransport erfolgt hier nach dem Mikrowurfprinzip, wobei sich das Siebgut geradlinig über die horizontale Trennfläche bewegt. Dadurch ist diese Technik besonders verschleißarm. Es ist möglich, bis zu elf verschiedene Zielfraktionen gleichzeitig zu klassieren. [Anl18]



Abbildung 42: Mehrdeck-Horizontal-Siebmaschine [Anl18].

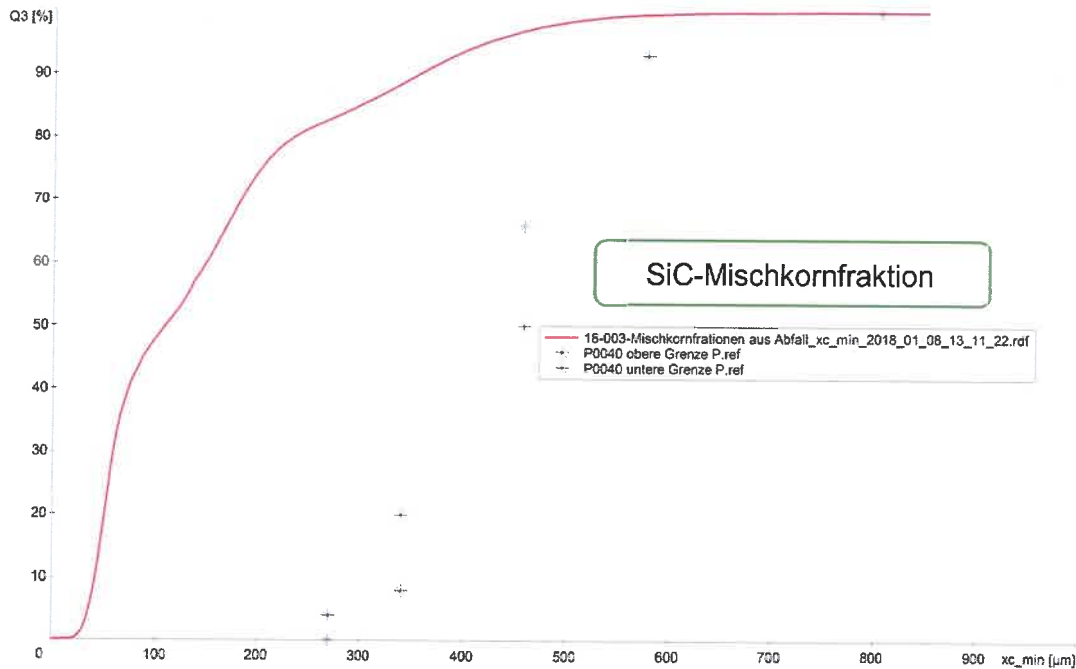


Abbildung 43: Korngößenverteilung des Aufgabematerials (Mischkornfraktion SiC).

Zum anderen kam eine Taumelsiebmaschine in Betracht, die besonders für die exakte Trennung von trockenen, staubförmigen, pulverförmigen oder körnigen Produkten geeignet ist. Diese ist in Abbildung 44 dargestellt. Sie wird vor allem für hohe Leistungen bei Siebungen von feinen und siebschwierigen Produkten eingesetzt. Das Material wird über dreidimensionale Siebbewegungen in der Maschine getrennt. Beschleunigung und horizontale sowie vertikale Amplitude können variiert werden. Des Weiteren ist es möglich, bis zu sechs Siebdecks pro Maschine einzubauen und die Verweilzeit des Kornes auf den Siebböden mittels Abweiseröffnungen zu variieren. [Anl14]



Abbildung 44: Taumelsiebmaschine [Anl14].

Nach ersten Tastversuchen mit SiC und HEK auf beiden Maschinen konnte die FEPA-P-Spezifikation noch nicht erreicht werden, jedoch lieferte die Taumelsiebmaschine bessere Ergebnisse (vgl. Tabelle 13) und wurde deshalb als geeigneteres Aggregat identifiziert. Hierfür waren außerdem die Faktoren Trennschärfe, Verlust und Verschleiß ausschlaggebend. Auch die einfacher handhabbare Feineinstellung mittels Abweiser sowie der einfache Siebwechsel sind Vorteile dieser Technik.

Tabelle 13: Ergebnisse der Tastversuche an der Taumelsiebmaschine.

FEPA-P	SiC	HEK
P050	zu grob	–
P060	in Spezifikation	–
P080	zu grob	–
P100	zu grob	–
P120	deutlich zu grob	–
P150	zu grob	deutlich zu fein
P180	in Spezifikation	zu grob
P220	zu fein	zu fein

3.5.3 Versuchsdurchführung (diskontinuierlich)

Bei den Tastversuchen zur Identifikation des geeigneten Aggregats kam es zu Problemen bei der Klassierung. Teilweise wurde eine Überfrachtung einzelner Siebböden festgestellt. Ursächlich hierfür war die stark unterschiedliche und in der Praxis unbekannte Korngrößenverteilung des Aufgabematerials (P24 – P600). Diese Problemstellung ist spezifisch für das Recyclingverfahren, da bei der Kornherstellung die Produktion sehr präzise gesteuert werden kann, so dass nur ein enger Korngrößenbereich in die eigentliche FEPA-Klassierung einfließt.

3.5.3.1 Klassierversuche Siebhersteller

Aufgrund der großen Bandbreite an unterschiedlichen Korngrößen des Abfallkorns wurde für die Folgeversuche eine Vorsiebung im Grob-, Mittel- und Feinkornbereich durchgeführt und die Klassiersiebung in FEPA-Norm nachgestellt. Es wurden geeignete Siebstufen gewählt und der Klassierversuch nochmals mit SiC-Korn wiederholt, um die gewünschten Zielkornklassen zu erreichen. Die Auswertung erfolgte mittels optischer Methode (Camsizer) durch den Industriepartner. Neben der Erreichung der FEPA-Spezifikation wurde zusätzlich das Breiten-Längen-Verhältnis der Körner im Vergleich zum Originalkorn geprüft (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Ergebnisse der ersten Klassierversuche an der Taumelsiebmaschine.

FEPA-P	SiC	Kornform (Breiten-Längen-Verhältnis)
P050	zu fein	i. O.
P060	in Spezifikation	i. O.
P080	zu fein	i. O.
P100	deutlich zu fein	i. O.
P120	in Spezifikation	i. O.
P150	deutlich zu fein	i. O.
P180	zu fein	i. O.
P220	zu fein	blockiger als Originalkorn

Die Versuchsergebnisse ergaben, dass an der Vorsiebung festgehalten werden sollte. Für die Kornklassen, für die die Spezifikation noch nicht erreicht werden konnte, wurden die Trennschnitte nochmals optimiert. Die Ergebnisse des nachfolgenden Versuchs sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Ergebnisse der zweiten Klassierversuche an der Taumelsiebmaschine.

FEPA-P	SiC	Kornform (Breiten-Längen-Verhältnis)
P050	in Spezifikation	i. O.
P060	<i>Spezifikation im ersten Klassierversuch erreicht</i>	
P080	zu fein	blockiger als Originalkorn
P100	zu fein	i. O.
P120	<i>Spezifikation im ersten Klassierversuch erreicht</i>	
P150	zu fein	i. O.
P180	<i>Spezifikation im Tastversuch erreicht</i>	
P220	in Spezifikation	i. O.

In einem weiteren Versuch sollten die Kornklassen, die bisher noch nicht entsprechend der FEPA-Norm erzeugt werden konnten (P080, P100 und P150), erneut klassiert werden (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Ergebnisse der dritten Klassierversuche an der Taumelsiebmaschine.

FEPA-P	SiC	Kornform (Breiten-Längen-Verhältnis)
P050	<i>Spezifikation im zweiten Klassierversuch erreicht</i>	
P060	<i>Spezifikation im ersten Klassierversuch erreicht</i>	
P080	zu fein	–
P100	zu fein	–
P120	<i>Spezifikation im ersten Klassierversuch erreicht</i>	
P150	zu fein	–
P180	<i>Spezifikation im Tastversuch erreicht</i>	
P220	<i>Spezifikation im zweiten Klassierversuch erreicht</i>	

Als Fazit des dritten Klassierversuchs konnte festgehalten werden, dass für die drei Kornklassen die Trennschnitte zu eng gewählt wurden. Um die Siebeinstellungen der bereits erreichten Kornklassen zu bestätigen, wurde ein vierter Klassierversuch durchgeführt. Dabei sollten darüber hinaus auch die Kornklassen, für die die FEPA-P-Spezifikation noch nicht erreicht wurde, klassiert werden. Hierzu wurde der Versuch mit zwei unterschiedlichen Abweiseröffnungen durchgeführt, um die Verweildauer auf den Siebböden zu variieren. SiC Version 1 und SiC Version 2 unterscheiden sich hinsichtlich der Abweiseröffnungen bei P80 und P100 (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Ergebnisse der vierten Klassierversuche an der Taumelsiebmaschine.

FEPA-P	SiC Version 1	SiC Version 2
P050	zu fein	–
P060	in Spezifikation	–
P080	Abweiser 80 mm: zu grob	Abweiser 100 mm: in Spezifikation
P100	Abweiser 80 mm: deutlich zu fein	Abweiser 100 mm: deutlich zu fein
P120	in Spezifikation	–
P150	zu grob	–
P180	zu fein	–
P220	in Spezifikation	–

Für die FEPA-Klassen P60, P120 und P220 konnten die Maschinenparameter bestätigt werden, zusätzlich wurde die Spezifikation für P80 erreicht. Lediglich die Kornklassen P100 und P150 konnten durch reine Siebung nicht nach FEPA-Standard klassiert werden. Für die Kornklassen P50 und P180 wurde die Spezifikation bei identischen Parametern im Vergleich zu den vorherigen Versuchen diesmal knapp verfehlt. Dies kann unter Umständen auch darauf zurückzuführen sein, dass die einzelnen Fraktionen vor der Probenahme nicht homogenisiert wurden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch reine Siebung ohne Homogenisierung die Klassierung nach FEPA-P-Spezifikation nur schwer erzeugt werden kann. Durch Homogenisierung, gezielte Beimischung anderer Kornklassen und erneute Mischung kann die Korngrößenverteilung der Zielkornklasse jedoch sehr exakt eingestellt werden.

3.5.3.2 Klassierversuche Kornhersteller

Aufgrund der bisherigen Klassierergebnisse wurden auch Gespräche mit Kornherstellern geführt, die über entsprechende Erfahrungen aus der Praxis verfügen. Daraufhin wurde bei einem Kornhersteller jeweils eine Kampagne mit SiC und eine mit HEK in einer möglichst großen Korngrößenbandbreite klassiert. Auch hier wurde für beide Kampagnen Abfallkorn eingesetzt. Die Ergebnisse der Klassierung sind in Tabelle 18 sowie Abbildung 45 zu entnehmen. In den beiden Abbildungen geben die Minimal- bzw. Maximalkurven pro P-Wert die gemäß der FEPA-Norm zulässige Bandbreite der Kornverteilung an.

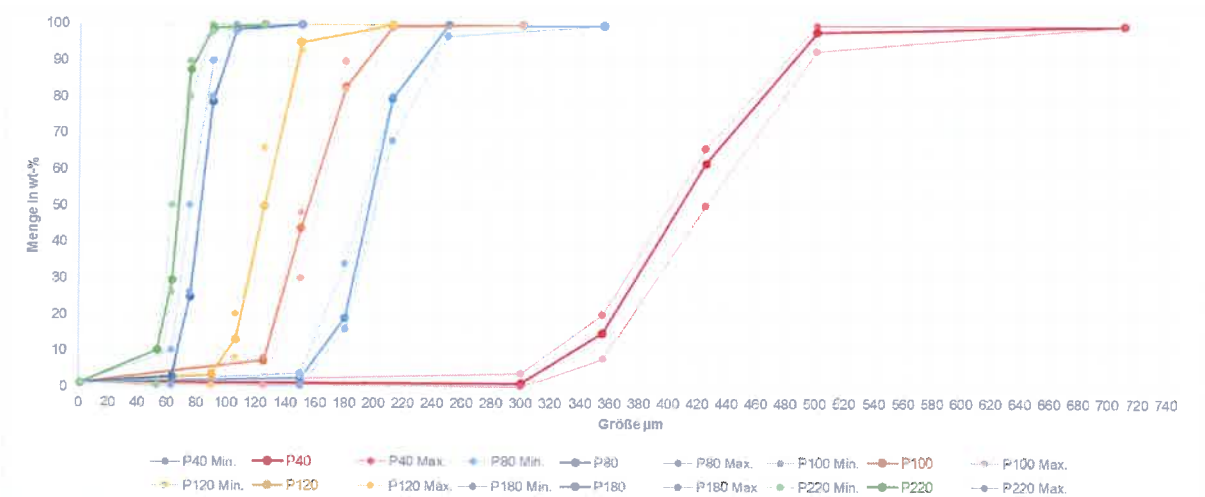


Abbildung 45: P-Körnungen HEK in FEPA-Spezifikation.

Tabelle 18: Ergebnisse der Klassierversuche beim Kornhersteller.

FEPA-P	SiC	HEK
P036	zu fein	–
P040	zu fein	in Spezifikation
P050	zu fein	–
P060	in Spezifikation	–
P080	in Spezifikation	in Spezifikation
P100	in Spezifikation	in Spezifikation
P120	in Spezifikation	in Spezifikation
P150	in Spezifikation	–
P180	in Spezifikation	in Spezifikation
P220	–	in Spezifikation
P240	–	in Spezifikation
P320	–	in Spezifikation

Der Kornhersteller konnte die Spezifikation nur durch eine zweistufige Klassierung erreichen. Hierzu wurde die Grobkornfraktion vorklassiert und homogenisiert. Anschließend wurden die finalen Siebfraktionen durch eine nachgeschaltete Endklassierung hergestellt und durch entsprechende Zumischungen in FEPA-Spezifikation gebracht. Darauf folgte wiederum eine Homogenisierung, bevor die Endanalyse durchgeführt wurde.

Die Ergebnisse der Klassierversuche weisen die generelle Machbarkeit der Aufgabenstellung nach. Generell kann mittels Siebung bis zur Körnung P320 normgerecht klassiert werden. Laut Kornhersteller empfiehlt es sich, feinere Körnungen mittels Schlämmprozessen zu klassieren.

3.6 Untersuchung der Rezyklatqualität (I.A.R.)

Durch die hohen Beanspruchungen im Recyclingprozess ist es möglich, dass sich die Materialeigenschaften der Schleifkörner verändern. Daher wurden folgende für den Schleifprozess wesentliche Qualitätsmerkmale untersucht:

- Härte und Zähigkeit,
- Springverhalten sowie
- Schleifeigenschaften.

Die Qualitätsmerkmale wurden jeweils für rezyklierte Schleifkörner und vergleichbare Originalkörner untersucht und miteinander verglichen.

3.6.1 Härte und Zähigkeit

Das Schleifkorn benötigt eine hohe Härte sowie eine auf die Anwendung abgestimmte Zähigkeit, damit die Materialzerspanung auf der Werkstückseite liegt und die Schneiden des Schleifkorns lange scharf bleiben. Die Härte wird durch das Materialgefüge des Kornes bestimmt. Die Zähigkeit beschreibt die Widerstandsfähigkeit gegen Rissausbreitung und Bruch. [Sch17]

Die Härte wird unter Verwendung einer Vickers-Härteprüfmaschine ZHV 30 von Zwick Roell untersucht. Diese besteht aus einem Kreuztisch, einer Kamera und einem Messmikroskop mit 5-fach-Revolver, an dem der Eindringkörper und 4 Objektive integriert ist.

Für die Versuche wurde der Eindringkörper mit einer Kraft von 9,81 N (HV Wert = 1) für 10 s in das Schleifkorn gedrückt. Anschließend wurden die Diagonalen des viereckigen Eindrucks vermessen und die Vickershärte anhand von Prüfkraft und der Fläche des Eindrucks errechnet (HV 1). Es wurden pro Material 10 Messungen durchgeführt und der Mittelwert bestimmt. [DIN06, Zwi17, Zwi18]

Der Friabilitytest (Friatest) ist eine definierte Zerkleinerungsmethode. Mit dem Friabilitytest wird die Zähigkeit der Schleifkörner bestimmt. Zunächst wird das Schleifkorn bei 600 und 500 µm gesiebt, um eine enge Körnungsband zu erhalten. Eine bekannte Menge an Schleifkorn wird anschließend zusammen mit einer Stahlkugel in eine standardisierte Kapsel gegeben und in den Friatester eingespannt. Unter vorgegebenen Bedingungen an Hub, Zyklenzahl und Geschwindigkeit wird die Kapsel geschüttelt. Dadurch wird das Schleifkorn teilweise zerstört. Nach Ablauf der vorgegebenen Schlaganzahl wird die Kapsel in einem Siebturm bei 425 µm gesiebt. Der Siebrückstand gibt den Grad der Zerstörung an und ist ein Maß für die Zähigkeit. Je mehr Schläge benötigt werden, um 50% der Probe zu zerstören, desto höher ist die Zähigkeit. Es wurden jeweils 5 bis 10 Messungen pro Probe durchgeführt. [Sch17]

In Abbildung 46 sind die Ergebnisse der Härteprüfung und in

Abbildung 47 die Ergebnisse des Friabilitytests von P36 Halbedelkorund (BBK) und Siliziumkarbid (SiC) dargestellt. Die Schleifkörner wurden durch eine Rostfeuerung freigelegt und anschließend durch einen dreistufigen Mahl- und Sichtprozess zurückgewonnen.

Durch den Recyclingprozess hat sich die Härte des Halbedelkorund nicht verändert. Die Härte des Siliziumkarbides hat sich nur gering verschlechtert, wobei die Verschlechterung im Toleranzbereich des Schleifmittelherstellers liegt. Sowohl die Zähigkeit des BBKs als auch die Zähigkeit des SiC wurde durch den Recyclingprozess erhöht (Faktor 1,6 bei SiC). Eine Änderung der Zähigkeit kann sich positiv auf die Standzeiten beim Schleifen auswirken.

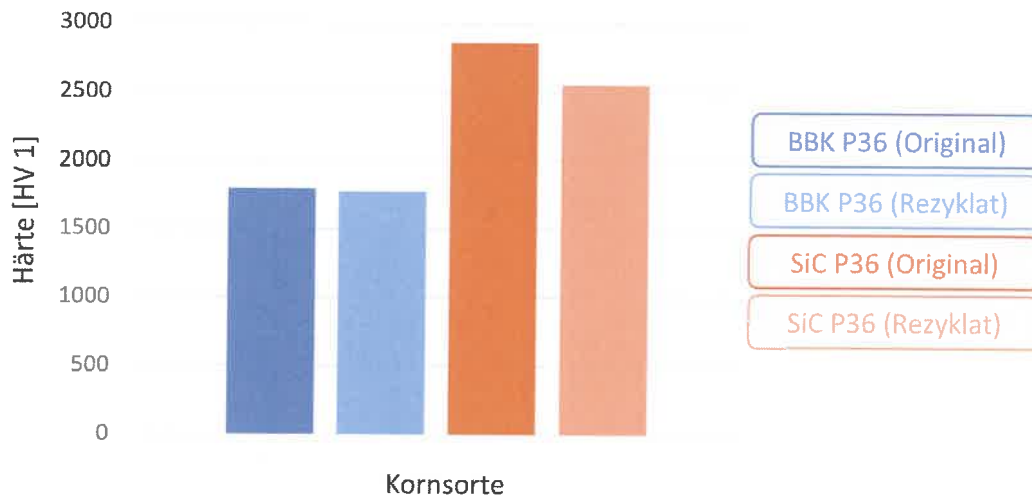


Abbildung 46: Ergebnisse der Härtetests für P36 SiC- und Korund-Rezyklate und den jeweiligen Originalkörnern.

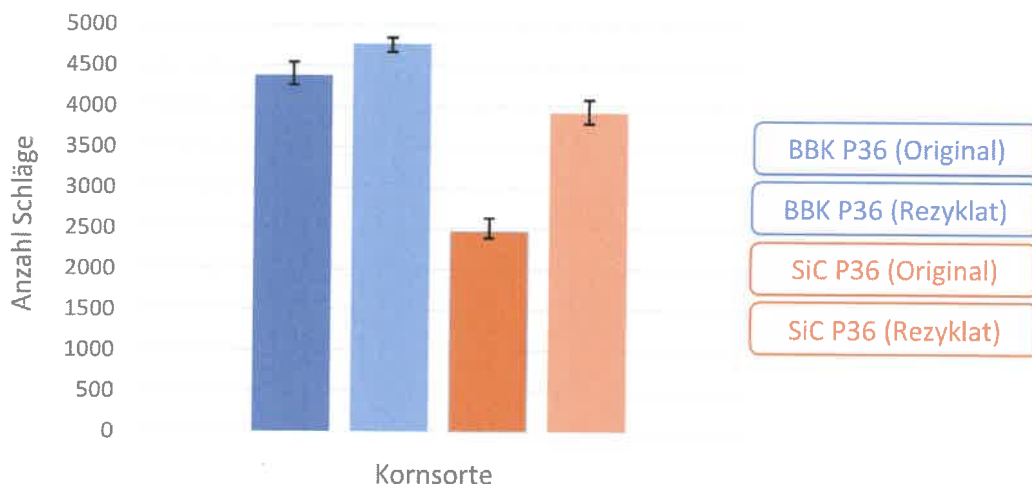


Abbildung 47: Ergebnisse der Friabilitytests für P36 SiC- und Korund-Rezyklate und den jeweiligen Originalkörnern.

3.6.2 Springverhalten

Das Springverhalten beschreibt die Fähigkeit von Schleifkörnern Ladung anzunehmen und in einem elektrostatischen Feld nach „oben“ (der Schwerkraft entgegengesetzt) zu springen. Dabei richten die Schleifkörner ihre Längsachse entlang der elektrischen Feldlinien aus und bleiben größtenteils senkrecht auf der mit Grundbinder beschichteten Unterlage haften. Das Springverhalten kann zum einen qualitativ durch die Analyse des Streubildes bewertet werden oder quantitativ mittels Test-Streumaschine, mit der der prozentuale Anteil der „nicht gesprungenen“ Rückstandsmasse zur definierten Ausgangsmasse gemessen wird. Je kleiner der Wert ist, desto besser ist das Sprungverhalten [DIN97].

In Tabelle 19 sind die prozentualen Anteile der Rückstandsmassen zur Bewertung des Springverhaltens für ein BBK (Rostfeuerung, dreistufiger Mahl- und Sichtprozess) und zwei SiC-Proben (P100: Rostfeuerung, dreistufiger Mahl- und Sichtprozess; P80 Tunnelofen, zweistufiger Mahl und Sichtprozess) angegeben. Bei allen Rezyklaten hat sich das Springverhalten verschlechtert. Anhand der Streubilder war jedoch zu erkennen, dass trotz der Verschlechterung des Sprungverhaltens ausreichend Schleifkorn auf der Unterlage aufgetragen wurde.

Tabelle 19: Ergebnisse des zweiten Prüfverfahrens zum Springverhalten.

Kornprobe	Rückstand [%]
BBK P36 Original	70,7
BBK P36 Rezyklat	86,5
SiC P100 Original	53,0
SiC P100 Rezyklat	77,6
SiC P80 Original	51,2
SiC P80 Rezyklat	58,9

3.6.3 Schleiftests

Bei einem Schleifmittelproduzenten wurden im Labormaßstab Schleifmittel hergestellt und standardisierten Schleiftests unterzogen. Dabei wurde das Gemisch aus unterschiedlichen Körnungen nach FEPA klassiert. Im Rahmen der Schleiftests ließ sich der Materialabtrag des geschliffenen Holzwerkstoffs pro Schleifzyklus (60 Sekunden) erfassen. [Sch17] In Abbildung 48 sind die Ergebnisse eines charakteristischen SiC-Schleiftests der Kornklasse P100 dargestellt. Die verwendeten SiC-Schleifkörner wurden mittels Rostfeuerung thermisch behandelt und in einem dreistufigen Mahl-Sichtprozess separiert. Die Abtragswerte des Recyclingkorns liegen zu Beginn 18% unter den Werten des Primärkorns und nähern sich nach 10 Schleifzyklen bis auf 9% an. Die Schleifqualität der Rezyklate liegt für den entsprechenden Schleifmitteltyp innerhalb des vom Schleifmittelhersteller definierten Toleranzbereichs von Primärprodukten. Auch die Ergebnisse von Schleiftests anderer Rezyklate lagen im Toleranzbereich des Schleifmittelherstellers.

Es wurden nur Schleifmittel untersucht, die zu 100 % aus rezykliertem Korn bestanden. Bei einer Mischung von Originalkörnern mit rezyklierten Körnern würde der Einfluss der Rezyklatkörner abnehmen, so dass auch die oben genannten Unterschiede geringer ausfallen würden.

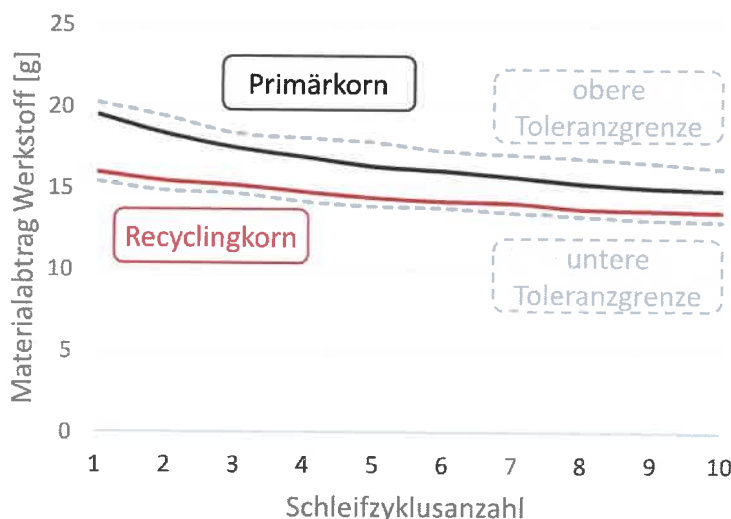


Abbildung 48: Ergebnisdarstellung des Schleiftests mit aus rezyklierten Siliziumschleifkörnern hergestelltem Schleifmittel.

3.7 Technisch-ökonomisch-ökologische-Bewertung der Prozesskette (I.A.R., PDR)

3.7.1 Technische Bewertung der Prozesskette (I.A.R.)

Zur technischen Bewertung der Prozesskette wurden die Ergebnisse der vorherigen Kapitel in einem Modell zusammengeführt. Als Kennzahlen dienten das Wertstoffausbringen und die Wertstoffkonzentration im Schleifkornprodukt.

Die Prozesskette wurde mithilfe der Software Umberto® des ifu (Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH) anhand der Aggregate und Einstellungen modelliert, die in den anderen Arbeitspaketen als beste Wahl charakterisiert wurden. Im Einzelnen besteht das Stoffstrommodell aus (vgl. Abbildung 49):

1. Zerkleinerung des Schleifmittelabfalls mittels Kammwalzenzerkleinerer,
2. Schutzsiebung 1 zum Schutz des Ofens mit Rückführung des Siebüberlaufs in die Zerkleinerung,
3. Thermischer Materialaufschluss mittels Drehrohrofen,
4. Schutzsiebung 2 des Verbrennungsrückstands bei 1 mm zum Ausschleusen von Fremdstoffen und unverbranntem Material,
5. Desagglomeration 1 des Verbrennungsrückstands,
6. Vorklassierung des desagglomerierten Verbrennungsrückstands in vier Korngrößenklassen (0-0,063 mm, 0,063-0,2 mm, 0,2-0,5 mm, 0,5-1 mm),
7. Sichtung 1 aller Korngrößenklassen zur Trennung von Schleifkorn (Grobgut) und Asche (Feingut),
8. Desagglomeration 2 der Grobgutfraktionen der drei größeren Korngrößenklassen,
9. Sichtung 2 der Grobgutfraktionen der drei größeren Korngrößenklassen,
10. Klassierung der vier Schwergutfraktionen mittels Mehrdecksiebmaschine,
11. Mischen der Korngrößenklassen zu Gemischen nach FEPA-Norm.

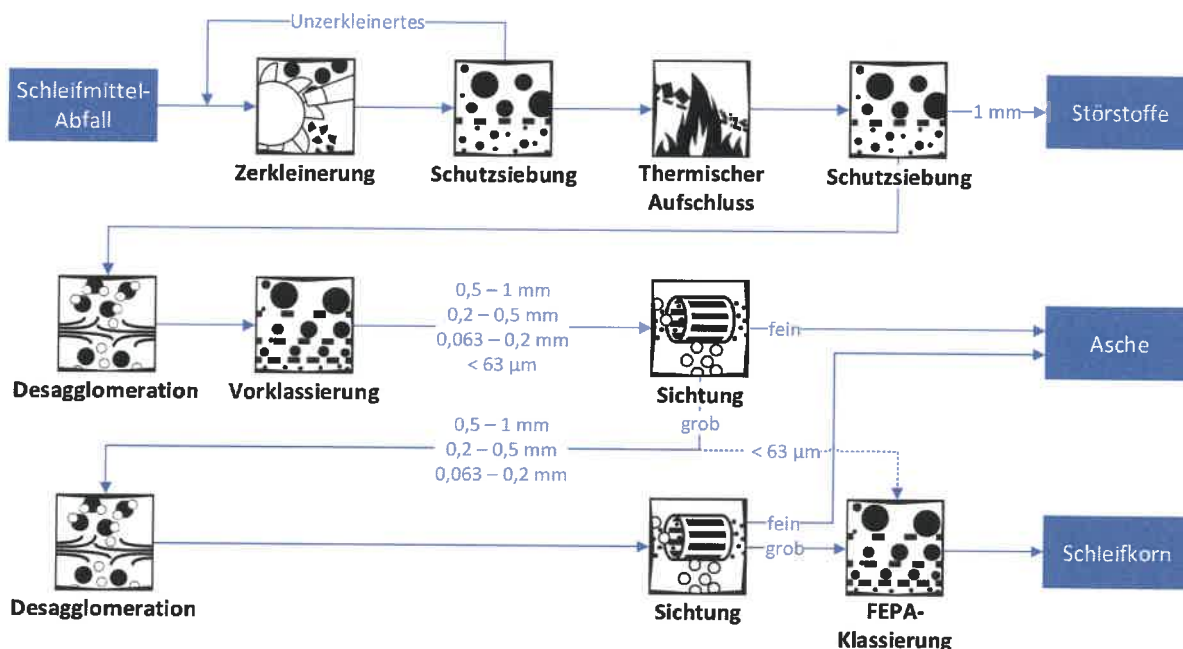


Abbildung 49: Verfahrensfließbild des ReCAb-Stoffstrommodells. Nach der ersten Sichtung werden die Kornklassen weiter getrennt aufbereitet; im Fließbild ist zur Erhaltung der Übersichtlichkeit stellvertretend jeweils nur ein Pfeil zwischen den Aggregaten abgebildet.

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete wurden auf die erwarteten europäischen Marktmengen skaliert, wodurch das Mengenverhältnis der verwandten Kornmaterialien bestimmt wurde. Außerdem wurden dadurch die Maßstäbe der einzelnen Versuchsaggregate einheitlich auf eine Größenordnung normiert, die einem realistischen Anlagenbetrieb entspricht. Modelliert wurden die Prozessketten der Korntypen SiC und HEK, die in den Großversuchen dieses Projekts untersucht wurden. Dabei lag der Fokus auf Makrokörnungen bis zur FEPA-Klasse P220. Bei kleineren Korngrößen muss potentiell von geringerem Wertstoffausbringen ausgegangen werden. Die europäischen Marktmengen für anfallenden Schleifmittelabfall und darauf enthaltenes Korn sind in Tabelle 20 aufgezeigt.

Tabelle 20: Abfallmengen des europäischen Schleifmittelmarktes.

	Schleifmittelabfall	Korn auf Schleifmittelabfall
SiC	3.830 t/a	860 t/a
HEK	6.920 t/a	1.670 t/a
Gesamt	10.750 t/a	2.530 t/a

Die folgenden Transferkoeffizienten der Einzelprozesse wurden im Modell hinterlegt. Nicht erhobene Daten wurden nach praktischen Erfahrungswerten abgeschätzt. In der Schutzsiebung 1 werden 20 % der Aufgabe als Siebüberlauf zurückgeführt. Als Rückstand aus dem thermischen Prozess verbleiben 35 % (HEK) bzw. 34 % (SiC) der aufgegebenen Schleifmittel. Diese Werte entsprechen nicht den Drehrohrversuchen im Technikumsmaßstab (vgl. Kapitel 3.3.3.1), da eine einfache Hochskalierung nicht möglich war. Sie basieren auf der Aschegehaltanalyse der Schleifmittelkomponenten (vgl. Tabelle 21). Bei der Schutzsiebung 2 werden 1 % des Schleifkorns und 2 % des restlichen Rückstandes ausgetragen. Bei der ersten Sichtung gelangen 3 % des Schleifkorns und 80 % des restlichen Rückstandes in die Aschefraktion. 21 % der Grobfraktion wird ohne zweite Sichtung klassiert (< 63 µm). Bei der zweiten Sichtung gelangen 3 % des Schleifkorns und 50 % des Rückstandes in die Aschefraktion. In der FEPA-Klassierung wurde von einem Siebverlust von 1 % ausgegangen, da laut AP 4 (Klassierung) auch das Feinmaterial erfolgreich genutzt werden kann.

Über die gesamte Aufbereitungskette ergab sich mit diesen Parametern ein modelliertes Wertstoffausbringen von ca. 93 %. Durch die mechanischen Trennprozesse (vgl. Kapitel 0) wurde im Modell eine Wertstoffkonzentration der Schleifkornprodukte von ca. 95 % erreicht.

3.7.2 Ökologische Bewertung der Prozesskette (I.A.R.)

Der untersuchte Prozess soll Schleifkorn in einer Qualität liefern, die eine Substitution von Schleifkorn aus konventioneller Herstellung ermöglicht. Anhand des Vergleichs zweier Modellszenarien (*ReCAB-Szenario* und *Primärszenario*) wurde untersucht, welche ökologischen Vorteile durch die Substitution erreicht werden könnten. Als Kennzahlen der Umweltwirkungen dienten die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) in CO₂-Äquivalenten, der kumulierte Energieaufwand (KEA) in Primärenergieäquivalenten und der Rohstoffbedarf.

3.7.2.1 Methodik

Das modellierte ReCAB-Szenario umfasst den Landtransport der Schleifmittelabfälle von den europäischen Schleifmittelherstellern zu einer (fiktiven) Aufbereitungsanlage in Thurnau, Deutschland, und die Behandlung nach dem oben genannten technischen Prozess. Dabei wurden die Energiebedarfe der verwendeten Aggregate und die Emissionen aus dem Verbrennungsprozess berücksichtigt. Die Errichtung der ReCAB-Anlage wurde nicht mit einbezogen. Das Modell zur technischen Bewertung (vgl. Kapitel 3.7.1) wurde entsprechend erweitert. Die Daten für THG-Emissionen, KEA und Rohstoffbedarf wurden der ecoinvent-Datenbank (Version 3.3) entnommen:

- transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)
- market for electricity, medium voltage (DE)

Für den Transport der europäischen Schleifmittelabfälle nach Thurnau ergaben sich 839 km aus gewichteter Mittelung der Abfallmengen europäischer Schleifmittelhersteller. Der Energiebedarf des ReCAB-Szenarios setzt sich aus der Energie der Schleifmittelabfalltransporte und dem Strombedarf der Aufbereitungsschritte zusammen. Die entsprechenden Werte wurden den Datenblättern geeigneter Aggregate entnommen. Da für den Regelbetrieb nicht von einem Betrieb unter Volllast ausgegangen wurde, wurden die Herstellerangaben als *Hoher Energiebedarf* modelliert. Als wahrscheinlicher Energiebedarf im Regelbetrieb wurden die Strombedarfe halbiert (*Mittlerer Energiebedarf*). Als *Niedriger Energiebedarf* wurde die Alternative bezeichnet, in der nur ein Drittel des Volllast-Bedarfs benötigt wird. Eine Ausnahme bildet der thermische Materialaufschluss, da kein Strombedarf einer vergleichbaren Verbrennung von Schleifmitteln in einem Drehrohrofen bekannt war. Entsprechende Werte ließen sich auch nicht aus dem entsprechenden Arbeitspaket (vgl. Kapitel 3.3.3.1) gewinnen. Der Energiebedarf konnte daher nur abschätzend mithilfe einer Energiebilanz ermittelt werden. Im Regelfall (bezeichnet als *Effiziente Verbrennung*) wurde von einer Luftzahl von $\lambda = 2$ und einer effizienten Wärmerückgewinnung (6,83 MJ/kg Schleifmittel) ausgegangen. Im ungünstigen Fall (bezeichnet als *Ineffiziente Verbrennung*) wurden eine Luftzahl von $\lambda = 2,5$ und eine geringe Wärmenutzung (2,54 MJ/kg Schleifmittel) angesetzt.

Als funktionelle Einheit dient im Modell die zurückgewonnene Masse Schleifkorn aus den Schleifmittelabfällen. Damit ließ sich ermitteln, welche Umweltwirkungen durch die Aufbereitung im ReCAB-Szenario entstehen. Zum Vergleich wurden die Umweltwirkungen der konventionellen Herstellung und Entsorgung derselben Schleifkornmenge bestimmt (bezeichnet als *Primärszenario*).

Die Systemgrenzen des Primärszenarios wurden wie folgt definiert. Sie umfassen die Gewinnung der notwendigen Rohstoffe, den Seetransport zu europäischen Produzenten und die Veredlung in Europa. Die Veredlung beinhaltet die energieintensiven Prozesse der Zerkleinerung und Schmelze [Klo17]. Außerdem wurde die bei der Verwertung in Müllverbrennungsanlagen genutzte Energie berücksichtigt. Für das Primärszenario wurden folgende Datensätze aus der ecoinvent-Datenbank (Version 3.3) verwendet:

- market for silicon carbide (GLO)
- market for aluminium oxide (GLO)
- market for electricity, medium voltage, aluminium industry (IAI Area, EU27 & EFTA)
- market group for electricity, medium voltage (RER)

Die Umweltwirkungen für die Transportwege der Rohstoffe sind bereits in den *market*-Datensätzen enthalten und wurde daher nicht gesondert bestimmt.

Der innereuropäische Landtransport vom Schleifkornhersteller zum Schleifmittelhersteller wurde in beiden Szenarien nicht betrachtet, da auch rezykliertes Schleifkorn aus dem ReCAB-Szenario zum Schleifmittelhersteller transportiert werden muss. Es wurde angenommen, dass beide Transportentfernungen äquivalent und somit für den Vergleich der Szenarien unerheblich sind. Der Transport der Schleifmittelabfälle zur lokalen Müllverbrennungsanlage oder Deponie wurde ebenfalls nicht betrachtet, da von kurzen Wegen und entsprechend geringer Umweltwirkung ausgegangen wurde.

Die thermische Behandlung der Schleifmittelabfälle ist zentraler Bestandteil des untersuchten Prozesses und der Entsorgung im Primärszenario. Um Aussagen über die THG-Emissionen und die nutzbare Energie treffen zu können, wurden die Komponenten der in den Großversuchen betrachteten Schleifmittel untersucht. Die genauen Schleifmittelzusammensetzungen

waren durch Spezifikationen des kooperierenden Schleifmittelherstellers bekannt. Heizwerte und Kohlenstoffgehalte wurden für alle Schleifmittelkomponenten bestimmt, deren Anteil mehr als ein Prozent an der europäischen Verkaufsmasse von HEK- und SiC-Schleifmitteln betrug. Aus den Kohlenstoffgehalten wurden die entstehenden CO₂-Emissionen stöchiometrisch berechnet. Die Analyseergebnisse sind Tabelle 21 zu entnehmen.

Tabelle 21: Umweltrelevante Eigenschaften der in Europa verkauften SiC- und HEK-Schleifmittel. Ermittelt in Schleifmittelkomponentenanalysen und gewichtet anhand der Verkaufsmengen des teilnehmenden Industriepartners.

	SiC-Schleifmittel	HEK-Schleifmittel
Heizwert	12,8 MJ/kg	15,8 MJ/kg
THG-Emissionen	1,24 kg CO ₂ /kg	1,37 kg CO ₂ /kg
Verbrennungsrückstand	34 %	35 %
davon Korn	23 %	24 %
davon Asche	11 %	11 %

Dem Primärszenario wurde die Energienutzung der Schleifmittelabfallbehandlung in Müllverbrennungsanlagen ökologisch vorteilhaft angerechnet. Unter der Annahme, dass die Abfälle wie Restabfall behandelt wurden, wurden in Europa nach den länderspezifischen Abfallstatistiken und Schleifmittelabfallmengen 48 % einer Verwertung mit Energierückgewinnung (R1) zugeführt. Verrechnet mit den regionenspezifischen Wirkungsgraden von Müllverbrennungsanlagen [Rei12] ergab sich, dass vom Energieinhalt der europäischen Schleifmittelabfälle in den letzten Jahren ca. 7 % in Form von elektrischer und ca. 18 % in Form von thermischer Energie genutzt wurden. Die dadurch erreichten Ersparnisse der Umweltwirkungen wurden anhand von ecoinvent-Datensätzen ermittelt, indem von einer Verdrängung des marktüblichen Stroms ausgegangen wurde:

- market group for electricity, medium voltage (RER)
- market group for heat, district or industrial, other than natural gas (RER)

3.7.2.2 Treibhausgasemissionen und Energiebedarf

In Tabelle 22 werden die ermittelten Werte für THG-Emissionen und KEA zusammengefasst dargestellt. Bei einer effizienten Verbrennung und einem mittleren Strombedarf der übrigen Aufbereitungskette (bezeichnet als *mittleres ReCAb-Szenario*) ließen sich 60,6 TJ Primärenergie einsparen. Das entspricht einer Verringerung gegenüber dem Primärszenario innerhalb der definierten Systemgrenzen um 62 %. Die Einsparung an THG-Emissionen betrüge in dem Fall 4,5 Mio. kg CO₂-Äquivalente oder 21 %. Während Schwankungen des sonstigen Strombedarfs zu verhältnismäßig moderaten Abweichungen führen, entscheidet die Energieeffizienz des Verbrennungsprozesses maßgeblich über die ökologischen Auswirkungen des Prozesses. Bei einer ineffizienten Verbrennung (vgl. Kapitel 3.7.2.1) liegen die Werte von KEA und THG-Emissionen sogar über denen des Primärszenarios. Grund für den hohen Energiebedarf des thermischen Materialaufschlusses ist die elektrische Beheizung des Verbrennungsaggregats. Weil Schleifmittel mit unterschiedlichen Korntypen behandelt werden sollen, müsste die thermische Behandlung batchweise mit zwischengeschalteter Reinigung und Wiederaufheizung durchgeführt werden. Weiterhin ist die Möglichkeit zur effizienten Energierückgewinnung in der betrachteten Größenordnung (2-3 t/h) beschränkt.

In Abbildung 50 ist exemplarisch der Energiebedarf im mittleren ReCAb-Szenario (effizienter thermischer Materialaufschluss, mittlerer Strombedarf der restlichen Aggregate) dargestellt. Der Gesamtenergiebedarf des ReCAb-Szenarios wird mit 73 % vom Abfalltransport von den Schleifmittelherstellern zur Aufbereitungsanlage dominiert. Die restlichen 27 % entfallen auf die Strombereitstellung für die Aggregate. Ein Drittel des Strombedarfes entfällt auf die Des-

agglomeration, jeweils knapp ein Viertel auf die Zerkleinerung und den thermischen Materialaufschluss. Dabei ist zu beachten, dass der Strombedarf bei ineffizienter Verbrennung stark ansteigt (vgl. Tabelle 22).

Tabelle 22: KEA und THG-Emissionen.

		KEA (Primärenergie)		THG-Emissionen		
		TJ		Mio kg. CO2-eq		
Primärproduktion	Kornherstellung	147,9		10,1		
	Schleifmittelentsorgung in MVA	0,0		14,2		
	Verdrängte Energieerzeugung	-50,2		-2,6		
	Summe	97,8		21,7		
		Verbrennung	sonstiger Energiebedarf			
ReCAb-Prozess	effizient	niedrig	34,6	16,8		
		mittel	37,1	17,1		
		hoch	44,8	18,2		
	ineffizient	mittel	139,6	30,9		
Einsparung	effizient	niedrig	63,2	65 %	4,9	22 %
		mittel	60,6	62 %	4,5	21 %
		hoch	53,0	54 %	3,5	16 %
	ineffizient	mittel	-41,9	-43 %	-9,2	-43 %

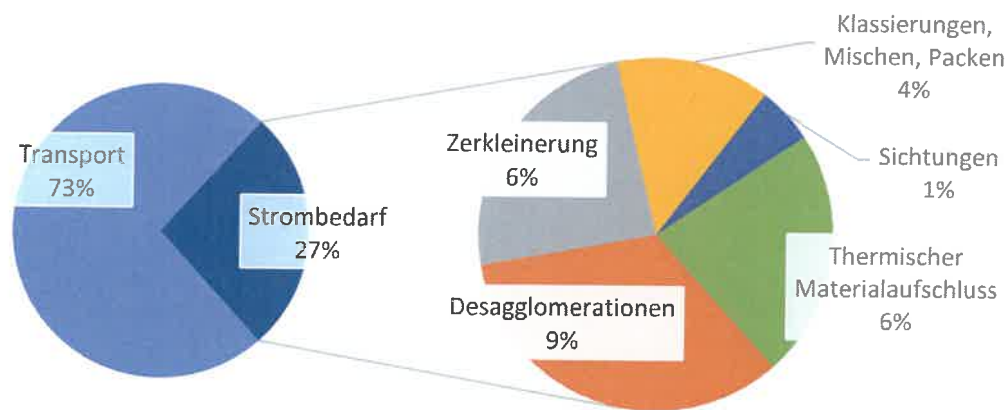


Abbildung 50: Relative Anteile am des Gesamtenergiebedarfs im mittleren ReCAb-Szenario.

Der größte Teil der THG-Emissionen wird mit 83 % durch die Verbrennung der Schleifpapiere verursacht. Diese CO₂-Menge entsteht bei jeder Oxidation des enthaltenen Kohlenstoffs, hier ergeben sich also keine Einsparungen gegenüber der Entsorgung im Primärszenario. Die Strombereitstellung aller Aggregate (inklusive des Verbrennungsofens) bewirkt 8 % der Treibhausgasemissionen im ReCAb-Szenario, der Schleifmittelabfalltransport 9 %.

3.7.2.3 Rohstoffbedarf

Die Betrachtung des Rohstoffbedarfs umfasst die Hauptrohstoffe zur Primärproduktion der Schleifkörper. Die Datengrundlage bieten wiederum die oben genannten ecoinvent-Datensätze (market for silicon carbide (GLO), market for aluminium oxide (GLO)). Bei einem Kornausbringen von 93 % könnten mithilfe einer ReCAB-Anlage für den europäischen Schleifmittelabfallmarkt die in Abbildung 51 aufgeführten Rohstoffe eingespart werden, die andernfalls in der Primärproduktion aufgewendet würden.

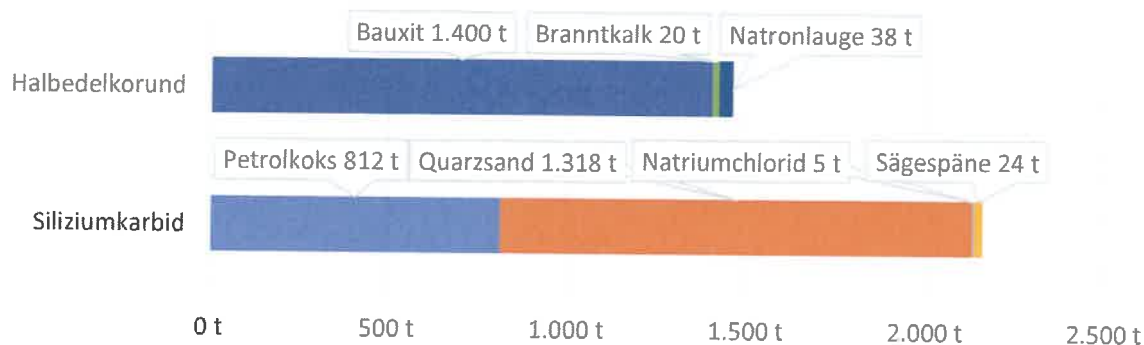


Abbildung 51: Jährliches Einsparpotenzial der Hauptrohstoffe der europäischen Schleifkorn-Primärproduktion.

3.7.3 Ökonomische Bewertung der Prozesskette (PDR)

Das Marktpotential für das Recycling von Schleifmitteln auf Unterlage wurde als Grundlage für das ökonomische und ökologische Potential durch einen branchenerfahrenen Berater erhoben. Die Ergebnisse der Studie wurden durch den Verband Deutscher Schleifmittelwerke, den Industriepartner sowie einen weiteren Berater unabhängig voneinander überprüft und plausibilisiert.

In der Studie wurde der weltweite Markt für Hersteller von Schleifpapier auf Unterlagen untersucht und mittels geeigneter Annahmen die Menge der Produktionsabfälle sowie der Schleifkörper, die für die Wiedergewinnung zur Verfügung stehen, abgeschätzt. Auf dieser Grundlage kann das weltweite Potenzial an recycelfähigen Schleifmitteln mit rund 40.000 t/a angenommen werden [PDR17].

Aus logistischen Gründen muss bei der Planung einer Behandlungsanlage jedoch ein regionaler Ansatz gewählt werden. Daher sieht das Vermarktungskonzept vor, lediglich die europäischen Produktionsabfälle von Schleifmitteln auf Unterlage in einer zentralen Behandlungsanlage zu recyceln. Diese werden mit rund 16.000 t/a abgeschätzt [PDR17].

Die Auslegung der Anlagenkapazität basiert auf der Annahme, dass PDR 80 % des Gesamtpotenzials an Produktionsabfällen zum Recycling zur Verfügung stehen. Schleifpapier besteht in der Regel zu ca. 70 % aus Organik und zu ca. 10 % aus Mineralik bzw. Restabfällen, der Kornanteil auf dem Schleifpapier beträgt durchschnittlich 20 %. Aufgrund der Ergebnisse der bisherigen Aufbereitungsversuche nimmt PDR an, dass es gelingt, 80 % dieses Kornanteils erfolgreich zurückzugewinnen. Treten die getroffenen Annahmen ein, so kann PDR pro Jahr ca. 2.000 Tonnen Recyclingkorn produzieren, das die Hersteller von Schleifmitteln wieder in ihrem Produktionsprozess einsetzen können. Abbildung 52 fasst die getroffenen Annahmen nochmals zusammen.

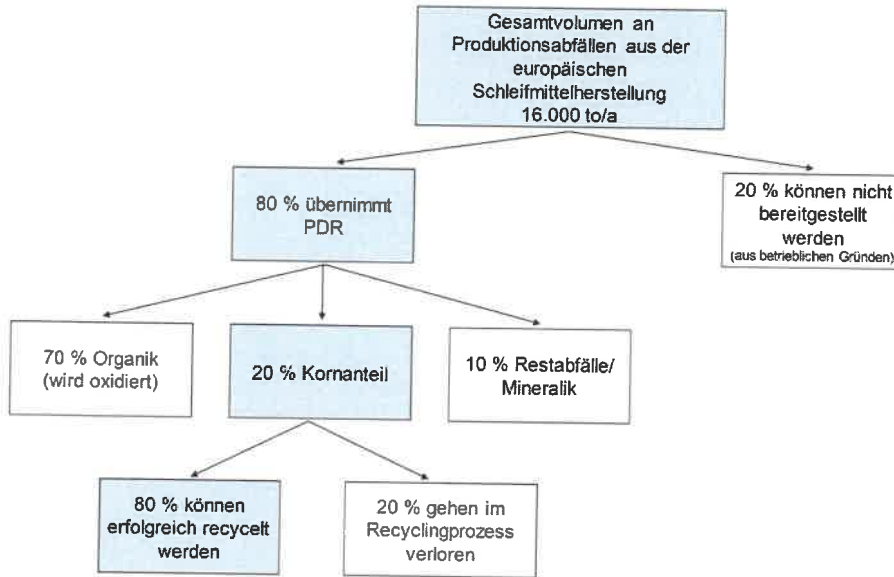


Abbildung 52: Annahmen Mengengerüst

Die tatsächlichen Aufwendungen der Schleifmittelhersteller für ihre Produktionsabfälle setzen sich aus den Einkaufskosten für das verlorene Originalkorn und den Entsorgungskosten für die Abfälle zusammen. PDR erzielt seine Erlöse dagegen im Wesentlichen aus dem Verkauf des Recyclingkorns.

Das Modell unterstellt den Transport der Schleifmittelabfälle in Ballen und die nach Kornsorten getrennte Bereitstellung der Abfälle durch die Hersteller. Außerdem finden die unterschiedlichen Entfernungen der europäischen Schleifmittelhersteller zu PDR Berücksichtigung (Abbildung 53).

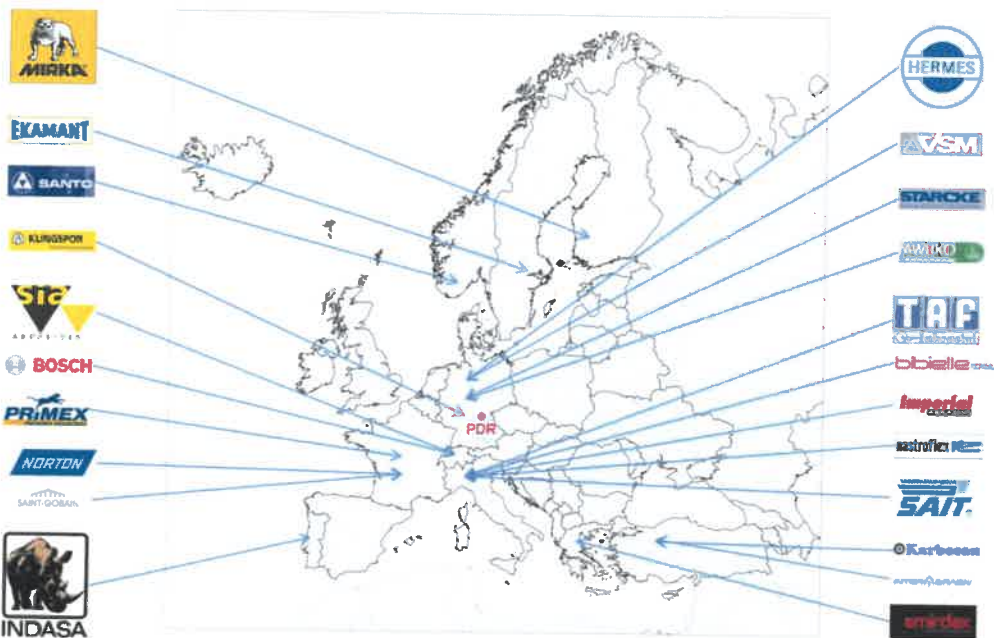


Abbildung 53: Standorte der europäischen Schleifmittelhersteller [PDR17].

Die verschiedenen Kornsorten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wertigkeit. Die Originalkorn-Preise pro Kilogramm in USD können Abbildung 54 entnommen werden.

Auf Basis der durchgeführten Marktstudie konnte ein Durchschnittspreis für ein Kilogramm Originalkorn berechnet werden. Da die Qualität des Recyclingkorns nahezu der des Originalkorns entspricht, geht PDR davon aus, dass das Recyclingkorn für 70% des Originalkorn-Preises vermarktet werden kann. Ein Einkaufsvorteil von 30% gegenüber dem Originalkorn ist ein hoher Anreiz für die Hersteller, Produktionsabfälle zur Verfügung zu stellen.

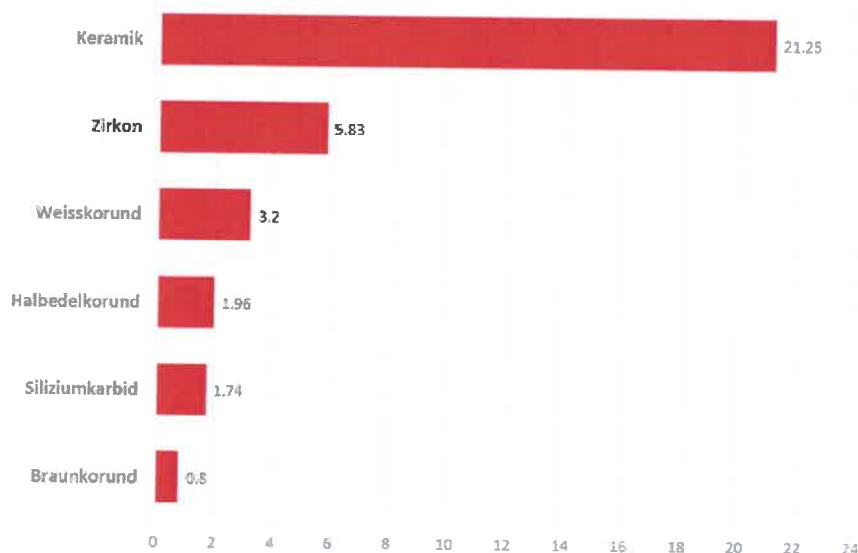


Abbildung 54: Originalkorn-Preise pro Kilogramm in USD (2017) [PDR17].

Das Anlagenkonzept sieht eine Vorzerkleinerung, zwei Verbrennungslinien inkl. Rauchgasreinigungen sowie nachgeschaltete mechanische Trenn- und Klassiereinrichtungen vor. Die Anlage soll im Drei- bzw. Vierschichtbetrieb gefahren werden. Die zweilinige Auslegung der Verbrennungseinheit erhöht zum einen die Ausfallsicherheit und erleichtert zum anderen die Getrennthaltung unterschiedlicher Kornqualitäten. Die Investitionskosten für die Anlage betragen rund 10 Mio. Euro, die jährlichen Betriebskosten bei Volllastung knapp 4 Mio. Euro.

Vor dem Hintergrund eines wirtschaftlichen Betriebs der Anlage müssen insbesondere werthaltige Schleifkörner in ausreichendem Maße für das stoffliche Recycling zur Verfügung gestellt werden. Die getroffenen Annahmen stellen zugleich die Risiken des Modells dar. Treten diese nicht ein, so ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens fraglich. Entscheidende Faktoren sind insbesondere der Durchschnittspreis sowie die Höhe des Preisabschlags für Recyclingkorn im Vergleich zu Originalkorn. Auch das Mengenszenario, auf das die Anlagenaggregate ausgelegt sind, beruht auf Schätzwerten. Darüber hinaus ist zum aktuellen Zeitpunkt noch unklar, inwieweit die Schleifmittelhersteller die nach Kornsorten getrennte Bereitstellung der Schleifmittelabfälle gewährleisten können. Da kein Schleifmittelhersteller allein genügend Produktionsabfälle zum wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage zur Verfügung stellen kann, strebt PDR aus ökologischen und ökonomischen Gründen eine europaweite Branchenlösung an. Trotz erster positiver Signale aus dem Markt, kann die Kooperationswilligkeit der Hersteller bisher lediglich unterstellt werden.

Bei Eintreten der beschriebenen Annahmen erscheint ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb möglich.

4 Fazit (PDR)

Die Projektergebnisse zeigen, dass das Recycling von Schleifkörnern aus Produktionsabfällen von flexiblen Schleifmitteln grundsätzlich möglich ist. Nach einer Vorkonditionierung und einem thermischen Materialaufschluss in Verbindung mit einer mechanischen Nachbehandlung lassen sich die Schleifkörner von der Asche abtrennen und in hoher Reinheit dem Produktionsprozess zurückführen. Schleifmittel, die mit ausschließlich rezyklierten Schleifkörnern hergestellt werden, können die Qualitätsanforderungen an das Schleifkorn und zur Herstellung neuer flexibler Schleifmittel i. d. R. einhalten.

Für eine wirtschaftlich zu betreibende, großtechnische Recyclinganlage müssen allerdings noch einige Herausforderungen überwunden werden. So gilt es, unter verschiedenen Optionen zur thermochemischen Behandlung der Schleifmittel die bestgeeignetste auszuwählen. Wesentliche Bewertungskriterien sind exakte Regelbarkeit der Temperatur und des Sauerstoffgehaltes im Ofen sowie Flexibilität hinsichtlich eines Chargenbetriebs. Zudem müssen die erworbenen Erkenntnisse zur mechanischen Aufbereitung im Pilotmaßstab erprobt werden, um die technisch-wirtschaftliche Machbarkeit des Verfahrens insgesamt zu überprüfen. Dazu sollen höhere Durchsätze, eine höhere Schleifmittelbandbreite, Anlagenverschleiß, Materiallogistik usw. in einem quasi-kontinuierlichen Anlagenbetrieb, in dem die mechanische und thermische Anlagentechnik direkt miteinander verschaltet sind, untersucht werden. Anschließend können größere Chargen von Rezyklat-Schleifmitteln beim Schleifmittelhersteller produziert und getestet werden. Zusätzlich soll das Anlagenkonzept auf die Verarbeitbarkeit fluor- und borhaltiger Schleifmittel geprüft werden.

Ziel der Projektpartner ist es, die Ergebnisse aus dem ReCAB-Projekt durch ein Upscaling-Projekt zu verwerten, in dem der Bau einer Anlage zur Verwertung von Abfällen aus der Schleifmittelproduktion realisiert werden soll. Durch den Betrieb der Recyclinganlage möchte PDR geeignete, im europäischen Raum verfügbare Abfälle im Rahmen einer von der Schleifmittelindustrie getragenen Recyclinglösung aus dem aktuellen Pfad der Verbrennung/Deposition herausnehmen und durch eine Aufbereitung in den Wirtschaftskreislauf zurückführen.

Als Weiterentwicklung des Verfahrens ist das Recycling feinerer Kornklassen von hohem Interesse, da diese generell werthaltiger sind. Allerdings bestehen höhere Anforderungen an Qualität und Reinheit bei gleichzeitig geringeren Massenströmen. Weiterhin könnte das Verfahren auf die Rückgewinnung von Schleifmitteln aus weiteren Schleifwerkzeugen übertragen werden.

Literaturverzeichnis

- [Anl14] ANLAGENHERSTELLER: Informationen zur Taumelsiebmaschine. 2014. Firmenschrift.
- [Anl18] ANLAGENHERSTELLER: Informationen zur Mehrdeck-Horizontal-Siebmaschine. zuletzt geprüft am 18.06.2018.
- [DIN97] DIN EN ISO 11125 TEIL 3: Prüfverfahren für metallische Strahlmittel. Bestimmung der Härte. 1997.
- [DIN00] DIN ISO 6344: Schleifmittel auf Unterlage – Korngrößenanalyse. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [DIN06] DIN EN ISO 6507 TEIL 1: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers. Prüfverfahren. 2006.
- [Gra18] GRAF ANLAGENBAU: Turbo-Windsichter HTS. <http://www.graf-anlagen.de/images/downloads/SichterHTSProspektDeutsch.pdf>, zuletzt geprüft am 14.06.2018.
- [Klo17] KLOCKE, F.: Fertigungsverfahren 2. Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.
- [Les77] LESCHONSKI, K.: Das Klassieren disperser Feststoffe in gasförmigen Medien. In: Chemie-Ingenieur-Technik Nr. 9, Jg. 49 (1977), S. 708-719.
- [PDR17] PDR RECYCLING GmbH + Co KG: Marktanalyse Coated Abrasives. Unveröffentlicht, 2017.
- [PF17] PRETZ, T. und FEIL, A.: Aufbereitung fester Abfallstoffe. In: Kranert, M.: Einführung in die Kreislaufwirtschaft. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer-Verlag, 2017, S. 189-252.
- [Rei12] REIMANN, D. O.: CEWEP Energy Report III. (Status 2007-2010). Results of Specific Data for Energy, R1 Plant Efficiency Factor and NCV of 314 European Waste-to-Energy (WtE) Plants. http://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/10/1069_13_01_15_cewep_energy_report_iii.pdf, zuletzt geprüft am 12.07.2018.
- [Ret17] RETSCH TECHNOLOGY GmbH: Camsizer X2 Produktinformation. Haan, 2017. Firmenschrift.
- [Ret18] RETSCH TECHNOLOGY GmbH: Dynamische Bildanalyse. <https://www.retsch-technology.de/de/produkte/dynamische-bildanalyse/camsizer-xt/funktionsmerkmale/#>, zuletzt geprüft am 11.04.2018.
- [Sch17] SCHLEIFMITTELHERSTELLER: interne Dokumente über Prüfmethode, 2017.
- [SF18] SCHENKE, L., SCHNELL, M., GIANI, H., HORST, T., QUICKER, P. und FEIL, A.: Recycling von flexiblen Schleifmitteln – Thermisch-mechanische Rückgewinnung von Schleifkörnern aus Produktionsresten. In: Müll und Abfall Nr. 5, Jg. 50 (2018), S. 228-233.

- [SQ18] SCHNELL, M., GIANI, H., SCHENKE, L., CLAUSEN, A., PRETZ, T. und QUICKER, P.: Rückgewinnung von Schleifkörnern aus Produktionsabfällen flexibler Schleifmittel – eine Recyclinglösung für die Branche. 8. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft am 15. und 16. März 2018 an der Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien, Tagungsband.
- [Umw02] UMWELTBUNDSAMT BERLIN: Integrierter Umweltschutz bei bestimmten industriellen Tätigkeiten. Anlagen zur Oberflächenbehandlung durch Appretieren, Imprägnieren, Bedrucken, Tränken, Beschichten. Teilband 1, 2002.
- [WR06] WITTCHEN, B., JOSTEN, E. und REICHE, T.: Holzfachkunde. 4. Auflage. Stuttgart/Leipzig: Teubner Verlag, 2006.
- [Zwi17] ZWICK GmbH & Co. KG: Härte prüfen mit Zwick Roell. Ulm, 2017. Firmenschrift.
- [Zwi18] ZWICK GmbH & Co. KG: Vickers Härteprüfmaschine ZHV30/zwickiLine. <https://www.zwick.de/vickers-haertepuefgeraete/zhv30-zwickiline>, zuletzt geprüft am 06.04.2018.