

Grimm Metallpulver GmbH  
Roth - Eckersmühlen

**Einsatz von bis zu 50 % Aluminiumrecyclat in Aluminiumpulvern  
und -pasten als Expansionsmittel in der Baustoffindustrie**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 34376/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Martin Grimm, Catalina Moran, Tim Seidler, Martin Heyder

Roth - Eckersmühlen, 28. April 2020

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>34379/01</b>	Referat	<b>21/2</b>	Fördersumme	<b>EUR 125.000</b>
----	-----------------	---------	-------------	-------------	--------------------

**Antragstitel**                      **Einsatz von bis zu 50 % Aluminiumrecyclat in Aluminiumpulvern und -pasten als Expansionsmittel in der Baustoffindustrie**

**Stichworte**

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>24 Monate</b>	<b>29.01.2018</b>	<b>29.01.2020</b>	
Zwischenberichte	09.07.2018	09.02.2019	02.08.2019

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Grimm Metallpulver GmbH	Tel	+49 9171 974-912
	Am Wasserturm 1	Fax	+49 9171 974-950
	91154 Roth - Eckersmühlen	Projektleitung	
		Martin Grimm	
		Bearbeiter	
		Martin Grimm	

**Kooperationspartner**

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Ziel ist der Einsatz von bis zu 50 % Aluminiumrecyclat in Aluminiumpulvern und -pasten, die u. a. als Expansionsmittel in der Baustoffindustrie zugesetzt werden. Die Verwendung von Reinaluminiumgrieß (99,7 %), das energetisch sehr aufwendig hergestellt wird, könnte somit drastisch reduziert werden. Das Trockenmahlverhalten von Aluminiumpartikeln aus Recyclaten sowie deren Reaktionsvermögen bei der Porenbetonherstellung bzw. in Mörteln und Putzen ist nicht hinreichend untersucht. Vermahlene Aluminiumpartikel (Flitter) verhalten sich nicht wie kugelförmige Partikel (Mehl, Staub), die mit Anlagen gem. Stand der Technik in anderen Branchen klassiert werden. Die idealisierte Kugelform wird auch in Wissenschaft und Forschung genutzt, um die Bewegung steifer Partikel in einer stationären Strömung, die Abhängigkeit der Partikelform von der stationären Sinkgeschwindigkeit und laminare Umströmungen zu beschreiben.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Da im Hause GRIMM eine in-Line - Partikelzählung bzw. Größenbestimmung derzeit nicht vorhanden ist, kann erst nach der Klassierung ermittelt werden, welche Partikel in welcher Verteilung dem Prozess entnommen wurden. Im Rahmen der Qualitätssicherung werden offline Laserbeugungsmessungen und stichprobenartig manuelle Expansionsversuche durchgeführt. Die in-Line - Partikelgrößenbestimmung und -zählung scheint notwendig, wenn unterschiedliche Ausgangsmaterialien (Aluminiumrecyclate und Reinaluminiumgrieße) gemischt werden, um das abweichende Mahlverhalten sowie das Schweb- und Sinkverhalten im Sichter bei der Klassierung untersuchen, bewerten und die Klappensteuerung eines Mehrkammerstromsichters (laminare Horizontalstromsichtung und Schwerkraft) effizient nutzen zu können. Arbeitsschwerpunkte sind die Auswahl von Aluminiumrecyclatqualitäten und -klassierungen (Korngrößen, Anteile aktives Aluminium) / Mahl- und Klassierversuche in Kugelmühlen und Sichtern, Zyklo- nen, Sieben / Entwicklung, Konstruktion, Fertigung sowie Umbau der Realobjekte für praxisbasierte Ver- suche / Integration in-Line - Laserbeugung / Expansionsversuche mit neuen Pulvermischungen / Meilen- stein „Proof-of-Concept“ inkl. Digitalisierung der Prozesse / Optimierungen. Der Antragsteller kann - nach notwendigen Umbauten - ein Realobjekt (Kugelmühle mit Klassierstrecke, in-Line - Laserbeugung) für Versuche und Tests nutzen.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Mit Projektbeginn wurde mit potentiellen Lieferanten eine Vorauswahl aus unterschiedlichsten Al-Recyclaten (Mahlgrieße, Gemische, gmp) getroffen. Die vorausgewählten Recyclate der NIMEX NE-Metall GmbH, 06311 Helbra, wurden für die ersten Versuche in einem Realobjekt (Kugelmühle 1) Reinaluminiumgrießen (Al: 99,5 % - 99,8 %) von 22 bis zu 35 % Gewichtsanteilen zugemischt. Es wurde deutlich, dass das Recyclat nicht zu „hart“ sein darf, d. h., es dürfen nicht zu viele Verunreinigungen anderer Metalle, z. B. Eisen, Kupfer, Silizium enthalten sein, da sich diese härteren Metalle auf die Dauer des Mahlprozesses in den Kugelmühlen verlängernd auswirken. Längere Mahldauer = höherer Energieeinsatz, größerer Verschleiß der Anlagen sowie höhere Betriebskosten. Recyclate dürfen auch keinen zu niedrigen Aluminiumgehalt haben. Durch die Versuche wurde herausgefunden, dass sich ein Aluminiumgehalt < 97 % negativ auf das gewünschte Expansionsverhalten (Reaktionskurve) auswirkt. Somit mussten Recyclatanteile in Abhängigkeit der Chargen niedriger dosiert werden. Ein Vorzugseinsatzmaterial Mahlgrieß 160-560 µm (gmp 010316) wurde festgelegt. Nach technischen Anpassungen der Kugelmenge von 2.700 kg auf 3.680 kg und der Betriebsbedingungen des Realobjektes können mit dem Vorzugseinsatzmaterial folgende Ergebnisse reproduzierbar erzielt werden:

<b>Aluminiumrecyclat (Anteil Reinaluminium in %)</b>	<b>Anteil Recyclat</b>	<b>Ausstoß Pulver</b>
gmp 010316 (Al: > 97%)	ca. 22 %	Ø 37,5 kg/h
gmp 010316 (Al: > 97%)	ca. 30 %	Ø 32,6 kg/h
gmp 010316 (Al: > 97%)	ca. 36 %	Ø 30,0 kg/h
gmp 010316 (Al: > 97%)	ca. 46 %	Ø 28,9 kg/h
gmp 010316 (Al: > 97%)	ca. 29 %	Ø 33,3 kg/h

Im März 2019 wurde eine in-Line-Partikelmessung in Betrieb genommen. Die in-Line Partikelmessung funktionierte wie gewünscht und hat wichtige Ergebnisse in Echtzeit an 3 Messpunkten geliefert. Diese Ergebnisse wurden auch durch mehrfache Vergleichsprüfungen mit unserem Off-Line Partikelmessgerät bestätigt. Die Anlage misst das Fertiggut der „Kugelmühle 1“. Generell ist zu beachten, dass ein Recyclat nicht dauerhaft den gleichen gewünschten Aluminiumanteil hat, was den Mahlprozess durch die wechselnde Zusammensetzung beeinflusst. Hierdurch sind chargenbedingt wechselnde Einstellungsanpassungen erforderlich, die durch die in-Line-Partikelmessung aber kurzfristig möglich ist.

Eine unmittelbare Übertragbarkeit der Vorzugsparameter auf weitere Kugelmühlen ist erfahrungsgemäß nicht gegeben. Auf Realobjekt „Kugelmühle 4“ wurden erste Versuche mit geringere Mengen Recyclat bei den Produkten EXPANDIT® BE 1151 F (D50: ca. 33 µm), EXPANDIT® BE 1101 (D50: ca. 50 µm) und EXPANDIT® BE 1071 (D50: ca. 60 µm) eingesetzt. Hier sind jedoch bei den geringeren Einsatzmengen bereits Probleme mit den Laufzeiten sowie teilweise mit dem Reaktionsverhalten aufgetreten. Diese müssen nochmals nachgetestet werden, um eine Reproduzierbarkeit zu erreichen.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die gemahlene Recyclate können fast allen heutigen Produkten, regelmäßig EXPANDIT® BE „Typ R“ für Porenbeton, zugemischt und somit unmittelbar in eingeführten Märkten verwertet werden. Da die Weltmarktpreise für Recyclate ca. 25% unter dem jeweiligen Marktpreis von Aluminium (99,7 %) liegen, ist neben den positiven Umweltaspekten auch ein finanzieller Anreiz vorhanden, Recyclate einzusetzen.

## **Fazit**

Obwohl das anspruchsvolle Ziel der Beimischung von bis zu 50 % Aluminiumrecyclat in Aluminiumpulvern und -pasten, die als Expansionsmittel in der Baustoffindustrie eingesetzt werden, nur bis zu einem Anteil von ca. 36 % ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist, kann im Ergebnis des Vorhabens der Einsatz von Reinaluminiumgrieß (99,7 %), das energetisch sehr aufwendig hergestellt wird, mit Recyclaten drastisch reduziert werden. Bezogen auf die bisherige Ausgangsmenge Reinaluminiumgrieß im Hause GRIMM könnten jährlich 150 bis 200 t Aluminiumrecyclat in Trockenmahlverfahren eingesetzt werden. Somit steht eine ökologisch und betriebswirtschaftlich sinnvolle Lösung für den Einsatz von Aluminiumrecyclaten zur Verfügung. Die Klimabilanz gegenüber Reinstaluminium ist positiv. Die Projektergebnisse sind zudem auf alle Aluminiumpulver-Trockenmahlverfahren mit Kugelmühlen übertragbar und können somit branchenweit genutzt werden.

## **Inhaltverzeichnis**

	<b>Projektkennblatt</b>	<b>2</b>
	<b>Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen</b>	<b>5</b>
<b>1.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>Vorhabensdurchführung und -ergebnisse</b>	<b>11</b>
3.1	Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der dabei angewandten Methoden und der tatsächlich erzielten Ergebnisse	11
3.1.1	Auswahl geeigneter Recyclate	11
3.1.2	Optimierung der Mühlen	12
3.1.3	Integration des Laserbeugungspartikelmessgerätes	13
3.1.4	Überprüfung der Lagerfähigkeiten	14
3.2	Diskussion der Ergebnisse in Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung	15
3.3	Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse	19
3.4	Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	22
<b>4.</b>	<b>Fazit</b>	<b>23</b>
<b>5.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>24</b>
<b>6.</b>	<b>Anhänge</b>	<b>25</b>

## **Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen**

Abbildung 1: Einsatzmaterialien Recyclate Aluminiumfolien, Aluminiumspäne und Aluminiumsprühgrieß 90 bis 99,7 %

Abbildung 2: Lagerungsstabilität unseres Produktes EXPANDIT® BE 1101 über ein Jahr

Abbildung 3: Reaktionsverhalten unseres Produktes EXPANDIT® BE 1101 mit verschiedenen Anteilen Recyclat

Abbildung 4: Rückwärtige Ansicht des 3-Kammerquerstromsichters mit 4-fach Multizyklon

Abbildung 5: Korrelationsdiagramm der Kenngrößen x10, x50, x90

Abbildung 6: Beispiele für Rückführ- und Kreislaufschaltungen von Trockenmahlungen (Anhang)

Tabelle 1: Vorauswahl zu Zugabemengen verschiedener Recyclate

Tabelle 2: Aktuelle Zugabemengen Recyclat in Produkten (Sorten) zur Herstellung von Porenbeton

# 1. Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war der Einsatz von bis zu 50 % Aluminiumrecyclat in Aluminiumpulvern und -pasten, die u. a. als Expansionsmittel in der Baustoffindustrie zugesetzt werden. Die Verwendung von Reinaluminiumgrieß (99,7 %), das energetisch sehr aufwendig hergestellt wird, könnte somit drastisch reduziert werden.

Das Trockenmahlverhalten von Aluminiumpartikeln aus Recyclaten sowie deren Reaktionsvermögen bei der Porenbetonherstellung bzw. in Mörteln und Putzen war vor dem Projektstart nicht hinreichend untersucht. Vermahlene Aluminiumpartikel (Flitter) verhalten sich nicht wie kugelförmige Partikel (Mehl, Staub), die mit Anlagen gem. Stand der Technik in anderen Branchen klassiert werden.

Im Rahmen des Projektes wurde in Vorversuchen ein für das Verfahren geeigneter Recyclatgrieß ermittelt. Mit diesem wurden dann stufenweise Versuche durchgeführt, um herauszufinden, welches Produkt mit wie viel Recyclat ohne Verluste in der Qualität hergestellt werden kann. Da kundenseitige Spezifikationen in der Reaktivität eingehalten werden müssen, wurde der Höchstwert an verwendetem Recyclat in gröberen und damit langsameren Produkten erreicht. Die gemahlene Recyclate können in fast allen heutigen Produkten, regelmäßig EXPANDIT® BE „Typ R“ für Porenbeton, zugemischt und somit unmittelbar in eingeführten Märkten verwertet werden. Da die Weltmarktpreise für Recyclate ca. 25 % unter dem jeweiligen Marktpreis von Reinaluminium (99,7 %) liegen, ist neben den positiven Umweltaspekten auch ein finanzieller Anreiz vorhanden, Recyclate einzusetzen.

Das Projekt ist als Erfolg einzustufen, da während der Projektlaufzeit über 100 t Aluminiumrecyclate in verschiedensten Fertigprodukten eingesetzt wurden. Folgende Ergebnisse sind besonders hervorzuheben:

- Auf jeder Mühle ist es möglich, mit Mahlgrieß so zu arbeiten, dass die vorgegebenen Spezifikationen der Qualitätsprodukte sichergestellt sind.
- Die vorhergesehenen Probleme, die durch Mahlgrieß entstehen können, wurden soweit möglich gelöst oder zumindest unter Kontrolle gebracht.
- Die in-Line Partikelmessung ist seit dem Einbau in Kugelmühle 1 ein wichtiger Indikator für die Qualität des hergestellten Produkts.
- In der Spitze konnten über 45 % Recyclat in unseren Mühlen verarbeitet werden.

Obwohl das anspruchsvolle Ziel der Beimischung von bis zu 50 % Aluminiumrecyclat in Aluminiumpulvern und -pasten, die hauptsächlich als Expansionsmittel in der Baustoffindustrie eingesetzt werden, nur bis zu einem Anteil von ca. 36 % ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist, kann im Ergebnis des Vorhabens der Einsatz von Reinaluminiumgrieß (99,7 %), das energetisch sehr aufwendig hergestellt wird, mit Recyclaten drastisch reduziert werden. Bezogen auf die bisherige Ausgangsmenge Reinaluminiumgrieß im Hause GRIMM könnten im langjährigen Mittel jährlich mind. 150 bis 200 t Aluminiumrecyclat in Trockenmahlverfahren eingesetzt werden.

Somit steht eine ökologisch und betriebswirtschaftlich sinnvolle Lösung für den Einsatz von Aluminiumrecyclaten zur Verfügung. Die Klimabilanz gegenüber Reinstaluminium ist positiv.

Die Projektergebnisse sind zudem auf alle Aluminiumpulver-Trockenmahlverfahren mit Kugelmühlen übertragbar und können somit branchenweit genutzt werden.

## 2. Einleitung

In Deutschland gewinnt das Recycling mehr und mehr an Bedeutung. Neben dieser volkswirtschaftlichen Dimension bietet das Recycling von Aluminium auch ökologische und ökonomische Vorteile. Das Recycling von Aluminium benötigt weniger als 5 % der Energie, die zur Herstellung von Primäraluminium benötigt wird [KYME2020]. Darüber hinaus werden durch das Recycling Emissionen reduziert. Gerade im Verpackungsbereich ist Deutschland Recyclingweltmeister. Denn in Deutschland werden alle Verpackungen, ob Aluminiumdose oder -folie, dem Recycling zugeführt. Aus den gebrauchten Produkten wird neues Aluminium, das zur Herstellung neuer, hochwertiger Produkte verarbeitet wird. Recycling nur am Beispiel der Optimierung des Energiebedarfs festzumachen, greift zu kurz. Recycling spart Ressourcen, entlastet die Deponien, reduziert Emissionen. Kurz um – Recycling lohnt sich für die Umwelt. (Quelle Gesamtverband der Aluminiumindustrie e. V.)

Aluminiumpulver finden auf Grund ihrer sehr hohen Reaktionsfähigkeit traditionell Einsatz in Feuerwerkskörpern und als Treibstoffbestandteil in Feststoffraketen, in den letzten Jahrzehnten mit steigender Tendenz in der Baustoffindustrie. Dort hätte die Herstellung von Plansteinen aus Porenbeton ohne den Einsatz von Aluminiumpulvern als **Expansionsmittel** nicht so eine rasante Entwicklung nehmen können. Aluminium wird dabei als sehr reaktives und feinst gemahlenes Expansionsmittel verwendet. Gas- bzw. Porenbeton entsteht durch die Reaktion von Aluminiumpulver in wässrig-alkalischen Lösungen: Aluminiumpulver wird dazu mit Kalk, Zement, Sand und Wasser gemischt. Unter den basischen Bedingungen der Mischung oxidiert das Aluminium unter Entstehung von Wasserstoffgas, das kleine Bläschen, also Poren, im Beton bildet.

Beim Einsatz von Aluminiumpulvern in Putzen, Trockenmörteln und Estrichen werden gesonderte Formulierungen bzw. Rezepturen verwendet, da das Haftvermögen an der Wand (bis zur Trocknung), das Wasserrückhaltevermögen und das Schwundverhalten zur Verhinderung der Rissbildung in getrockneten Putzen und oftmals eine maschinelle Verarbeitung in Putzmaschinen modifiziert werden können und müssen. Fester Bestandteil der Fertigmischungen neben variablen Additiven ist das Bindemittel Kalksteinmehl.

Durch anwendungsspezifische Anpassungen des Herstellprozesses (Kugelmühle) und der Teilchengrößenverteilung und ggf. durch die Nachbehandlung (z. B. Beschichtung mit Gallussäure) der Aluminiumpulver aus Reinaluminiumgrieß können durch GRIMM der Reaktionsbeginn, die Reaktionsschnelligkeit, die Porenstruktur und die Gießstabilität an die Anforderungen des Baustoffs (Rohdichte, Festigkeit usw.) grundsätzlich angepasst werden.

**Ziel des Vorhabens war der Einsatz von bis zu 50 % Aluminiumrecyclat in Aluminiumpulvern und -pasten, die u. a. als Expansionsmittel in der Baustoffindustrie zugesetzt werden.** Die Verwendung von Reinaluminiumgrieß (99,7 %), das energetisch sehr aufwendig hergestellt wird, könnte somit drastisch reduziert werden. Bezogen auf die bisherige Einsatzmenge Reinaluminium sollten ca. 400 t/a Aluminiumrecyclat im Hause GRIMM Metallpulver eingesetzt werden.

Das Mahlverhalten von Aluminiumpartikeln aus Recyclaten sowie deren Reaktionsvermögen bei der Porenbetonherstellung bzw. in Mörteln und Putzen war bislang nicht hinreichend untersucht.

Die Grimm Metallpulver GmbH weist eine über 100-jährige Firmengeschichte auf, die nunmehr in fünfter Generation fortgeführt wird. Gegründet 1907 zur Fertigung von Bronzepulver und Aluminiumpulver in der traditionsreichen Gegend der Goldschläger (Stadt Schwabach), wurde bei GRIMM bereits 1946 mit der Fertigung von Aluminiumpulvern für die Porenbetonherstellung begonnen. Seit 1986 werden Metallpulver auch in Putzen, Mörteln, seit den

1990er Jahren zudem in Fliesenklebern, Fugenfüllern (Spachtelmassen), Estrichen und Zement-Bitumen eingesetzt.

Typische Produkte sind heute Metallpigmente aus Aluminium, Bronze oder Kupfer. Die plättchenförmigen Teilchen sind lamellar und haben eine Stärke von unter 1 µm. Je feiner die Plättchen sind, desto größer ist die Oberfläche, verbunden mit einer Zunahme der Deck- bzw. Reaktionsfähigkeit. Die Produkte sind in Pulver- oder Pastenform erhältlich:

- EXPANDIT® BE Aluminiumpulver und -pasten zur Herstellung von Porenbeton
- EXPANDIT® Aluminiumpulver beschichtet für die Trockenmörtelindustrie
- OPTONIT® Aluminiumpulver beschichtet mit zusätzlichen funktionalen Eigenschaften für die Trockenmörtelindustrie
- Aluminiumpigmente und -flitter für die Pyrotechnik
- Bronze- und Effektpigmente in Aluminium, Bronze und Zink für die Veredelung in Grafik und Dekoration

Die Markterfahrungen, das Know-how zur Herstellung von Aluminiumpulvern und -pasten mittels Trockenmahlverfahren und die Bekenntnis zu umweltgerechteren Verfahren und Produkten waren Auslösungsgründe für das geförderte Vorhaben.

Heutiges Pulverentnahmegut aus Reinaluminium besteht aus Plättchen (Flitter) mit einer Dicke < 1 µm, einer Partikelgröße von 20 bis 70 µm und weist reaktionsfähige Oberflächen von 5.000 bis 20.000 cm<sup>2</sup>/g auf. Zu untersuchen sind daher einerseits die Auswirkungen des zugemischten Recyclats auf den Mahlvorgang, das Verhalten der Partikel im Umluftstrom der Klassierung und das veränderte Reaktionsvermögen und -verhalten der fertigen Pulver bzw. Pasten, die als Expansionsmittel bei der Herstellung von Porenbeton bzw. in Putzen und Mörteln zugesetzt werden. Die derzeit genutzten Verfahrensschritte Mahlen und Klassieren durch Sieben und Sichten erfüllen nicht die Anforderungen, um gemahlene Recyclate in den wünschenswerten Größenklassen (D50 - Werte) 15 µm, 35 µm bzw. 75 µm zu entnehmen.

Vermahlene Aluminiumpartikel (Flitter) verhalten sich nicht wie kugelförmige Partikel (Mehl, Staub), die mit Anlagen gem. Stand der Technik in anderen Branchen klassiert werden. Die idealisierte Kugelform wird auch in Wissenschaft und Forschung genutzt, um die Bewegung steifer Partikel in einer stationären Strömung, die Abhängigkeit der Partikelform von der stationären Sinkgeschwindigkeit und laminare Umströmungen zu beschreiben.

Da im Hause GRIMM eine in-Line - Partikelzählung bzw. Größenbestimmung zu Vorhabensbeginn nicht vorhanden war, konnte erst nach der Klassierung stichprobenartig ermittelt werden, welche Partikel in welcher Verteilung dem Prozess entnommen wurden. Im Rahmen der Qualitätssicherung wurden Laserbeugungsmessungen lediglich offline durchgeführt und stichprobenartig manuelle Expansionsversuche durchgeführt.

Die in-Line - Partikelgrößenbestimmung und -zählung ist notwendig, wenn unterschiedliche Ausgangsmaterialien (Aluminiumrecyclate und Reinaluminiumgrieße) gemischt werden, um das abweichende Mahlverhalten sowie das Schweb- und Sinkverhalten im Sichter bei der Klassierung untersuchen, bewerten und bspw. die Klappensteuerung eines Mehrkammerstromsichters (laminare Horizontalstromsichtung und Schwerkraft) effizient nutzen zu können.

Arbeitsschwerpunkte des Vorhabens waren

- die Auswahl von Aluminiumrecyclatqualitäten und -klassierungen (Korngrößen, Anteile aktives Aluminium)
- Mahl- und Klassiersversuche in Kugelmöhlen und Sichtern, Zyklonen, Sieben

- Entwicklung, Konstruktion, Fertigung sowie Umbau der Realobjekte für praxisbasierte Versuche
- Integration in-Line - Laserbeugung
- Expansionsversuche mit neuen Pulvermischungen
- Meilenstein „Proof-of-Concept“ inkl. Digitalisierung der Prozesse
- Optimierungen

Der Antragsteller konnte - nach notwendigen Umbauten - Realobjekte (2 Kugelmöhlen mit Klassierstrecke, in-Line - Laserbeugung) für Versuche und Tests nutzen.

Die Anzahl und Qualifikation der Mitarbeiter mit branchen- und betriebsspezifischen Kenntnissen, die langjährigen Erfahrungen der Geschäftsführung, der weltweite Vertrieb sowie die technische Ausstattung der Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung bieten das notwendige Umfeld, um das innovative Vorhaben zu realisieren und nach erfolgreichem Abschluss der Entwicklungsphase die notwendige Implementierung in die Produktion zu realisieren.

### Herstellung von Aluminiumpulver

Als Ausgangsprodukte zur Herstellung (Vermahlen) von Aluminiumpulver werden üblicherweise Reinaluminium (99,7 % aktives Aluminium), aber auch Recyclingmaterialien (93 bis 97 % aktives Aluminium) in nachfolgenden Ausführungen eingesetzt (Abb. 1):

- Aluminiumflitter mit einer mittleren Teilchengröße von mehr als 2 mm,
- Aluminiumfolienschnitzel,
- Aluminiumgrieß (0,1 bis 0,6 mm Korngröße), im Hause GRIMM auch kleiner,
- seltener Aluminiumspäne

Leichte Schüttgüter, wie Folienschnitzel, neigen beim Lagern und Austragen leicht zur Brückenbildung. Die Ursache ist oft in dem verhältnismäßig geringen Schüttgewicht, der Fließeigenschaft, der Konsistenz oder auch der statischen Aufladung der Folienschnitzel zu finden. Aluminiumspäne weisen ölige Bearbeitungsrückstände in veränderlichen Zusammensetzungen und Benetzungsgraden auf.

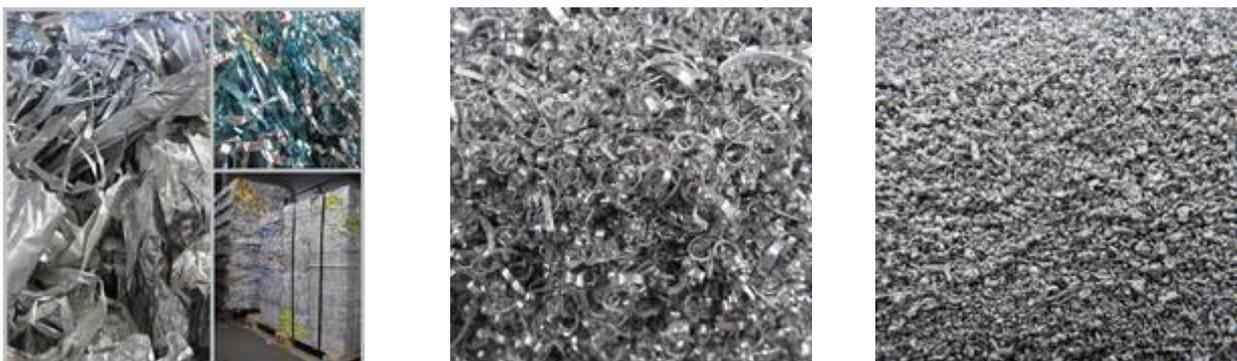


Abb. 1: Einsatzmaterialien Recyclate Aluminiumfolien (l.), Aluminiumspäne (M.) und Aluminiumsprühgrieß 90 bis 99,7 % (r.) [Quelle: NIMEX2017]

Der Anteil des aktiven Aluminiums in fertigen Pulvern ist höher als in Pasten und beträgt dabei heute mind. 92 bis 95 %. Weitere Bestandteile sind Mahlhilfsmittel und in veränderlichen, in der Reihenfolge der Nennung abnehmenden, Prozentanteilen Si, Fe, Cu, Zn, Mn, Mg und Sn.

Im Hause GRIMM kommt als Ausgangsprodukt **ausschließlich Aluminiumsprühgrieß** (99,7 % aktives Aluminium) zur Fertigung der Pulver und Pasten im **Trockenmahlverfahren in kontinuierlich beschickten geschlossenen Umluftanlagen** (ca. 3,2 t Kugeln je Kugeltrockenmühle) zum Einsatz. Die vier Mühlen werden kontinuierlich betrieben, da Aufgabegut (Grieße) und Zielprodukte keinen großen Schwankungen unterliegen. Das Ausgangsmaterial Aluminiumsprühgrieß wird durch Schleusen eingebracht. (Anhang 1)

Um explosionsfähige Gemische zu unterbinden, sind die Kugelmühlen wassergekühlt, werden Mahlhilfsmittel (Fette) zugegeben und die Anlagen unter Stickstoffüberschuss gefahren. Aber der Restsauerstoffgehalt muss im Bereich von 7,5 bis 8,5 % liegen, um die Selbstpassivierung der Pulveroberflächen zu gewährleisten.

Neben diesen Trockenmahlverfahren werden Aluminiumpulver großtechnisch überwiegend im **Nassmahlverfahren** hergestellt. Die Ausgangsmaterialien werden dabei in Testbenzin gemahlen. Auf Fette als Mahlhilfsmittel kann bei den Nassmahlverfahren daher verzichtet werden. Konzerngebundene Wettbewerber nutzen neben kleineren Trockenmahlanlagen vor allem die mit sehr hohen Investitionen und Betriebskosten verbundenen Nassmahlverfahren. Im Anschluss an den Mahlprozess müssen die Aluminiumteilchen abgefiltert bzw. abgepresst werden. Die (Taschen-)Filter sind regelmäßig mit Stickstoff (Ex-Schutz) abzuklopfen. Nach dem Trocknungsprozess werden die Teilchen schließlich mittels energieaufwendigen Luftstrahlsieben neu klassiert und wieder mit Lösungsmitteln entstaubt, respektive angepasst. Diese Pasten weisen dann Festkörperanteile von 60 bis 80 % auf.

- Nassmahlverfahren fanden ab Mitte des 20. Jahrhunderts eine starke Verbreitung, da ein besserer Schutz vor Explosionen als bei Trockenmahlverfahren möglich wurde.
- Trockenmahlverfahren sind aber seit ca. 30 Jahren auch sehr sicher.
- Großtechnische Nassmahlanlagen sind aber sehr energieintensive Verfahren: Lösemittel sind im Einsatz, Trocknungsprozesse nach dem Mahlen erforderlich und nach dem Klassieren wieder mit Lösemitteln entstauben bzw. anpassen
- Chargen- und Durchlaufprinzip möglich
- Beimischungen von Recyclat (auch ölbehaftete Späne) möglich

### 3. Vorhabensdurchführung und -ergebnisse

#### 3.1 Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte sowie der dabei angewandten Methoden und der tatsächlich erzielten Ergebnisse

Vorversuche zu diesem Projekt hatten bereits gezeigt, dass diverse Aufgaben zu bewältigen waren. Zuerst stand die Ermittlung des richtigen Mahlgrießes. Untersucht wurden Recyclate verschiedener Folien, Spänen und Grieße mit Reinheiten von 90 bis 97 %. Direkt einhergehend damit wurde über zusätzliche Mahlhilfsmittel nachgedacht. Es mussten Basismahlversuche durchgeführt werden. Hier war der Plan, den Anteil an Recyclat im Prozess schrittweise zu erhöhen, um Veränderungen an den Produkten festzustellen. Hierzu gehörten Anpassungen der Kugelmenge, der Sichterluft, der Drehzahl und des Füllgrades des Systems.

Anschließend wurde der in-Line Partikelmesser in das System eingebaut, damit auf schwankende Partikelgrößen – und damit auch veränderte Reaktivität – schneller reagiert werden konnte. Dieser wurde auf Kugelmühle 1 in Betrieb genommen und zuerst ohne Mehrkamersichter (Querstromsichter) verwendet.

Der Querstromsichter wurde etwas später eingebaut – aufgrund der Auftragslage war ein Umbau der Mühle zu einem früheren Zeitpunkt nicht möglich – und in Betrieb genommen.

Währenddessen fanden bereits Expansions-, Reaktions- und Lagerungsversuche mit den aus dem Recyclat hergestellten Pasten und Kalkabmischungen statt. Hier wurden in Abständen von je einem Monat dieselben Abprüfungen wie zum Zeitpunkt der Herstellung durchgeführt. Es wurde dokumentiert ob das weniger reaktive recycelte Aluminium die Lagerstabilität positiv oder negativ beeinflusst.

Für die Optimierung des Mahlprozesses war eine eigene Stickstofferzeugung angedacht, um die Proben der in-Line Partikelmessung wieder in den Prozess zurück zu führen, ohne dabei zusätzlichen Sauerstoff in das Mahlsystem einzubringen. Die Stickstofferzeugung erweist sich auf Basis der Projektergebnisse nach heutigem Kenntnisstand weder als technisch benötigt noch als wirtschaftlich lohnenswert.

Die Bemusterung unserer Kunden mit dem neuen Material wurde für die erfolgreich lagerbaren Produkte durchgeführt.

##### 3.1.1 Auswahl geeigneter Recyclate

Bevor Mahlgrieße in der Produktion zum Einsatz kamen, wurde eine Vorauswahl getroffen. Diese entschied sich für Grieße der Firma Nimex, Helbra. Hierbei wurde nach den Kriterien Feinheit, Härte und Aluminiumgehalt entschieden. Diese Vorauswahl wurde mit herkömmlichen Aluminiumgrießen gemischt und auf Kugelmühle 1 vermahlen. (Tab. 1)

Aluminiumrecyclat	Anteil %	Produktionsmenge kg/h
gmp 201114-2 (Al: ca.95 %)	22 %	Ø 33,75 kg/h
gmp 201114-2 (Al: ca.95 %)	30 %	Ø 27,79 kg/h
Mahlgrieß 160-560 (ca.96 %)	27,5 %	Ø 27,28 kg/h
Mahlgrieß 160-560 (ca.96 %)	16 %	Ø 31,52 kg/h
gmp 010316 (Al: ca. 97 %)	22 %	Ø 37,53 kg/h
gmp 010316 (Al: ca. 97 %)	30 %	Ø 28,75 kg/h
gmp 010316 (Al: ca. 97 %)	35 %	Ø 28,13 kg/h
Gemisch gmp 010316 + 160-560	22 %	Ø 29,35 kg/h

Tab. 1: Vorauswahl zu Zugabemengen verschiedener Recyclate

Bei der Auswahl geeigneter Recyclate mussten nachfolgende Parameter beachtet werden:

- 1.) Das Recyclat darf nicht zu „hart“ sein! Dies bedeutet, es dürfen nicht zu viele Verunreinigungen anderer Metalle, z. B. Eisen, Kupfer, Silizium, usw. enthalten sein, da sich diese härteren Metalle auf die Dauer des Mahlprozesses in den Kugelmöhlen verlängernd auswirken. Längere Mahldauer = höherer Energieeinsatz, größerer Verschleiß der Anlagen sowie höhere Betriebskosten.
- 2.) Das Recyclat darf keinen zu niedrigen Aluminiumgehalt haben. Durch die Versuche wurde herausgefunden, dass sich ein Aluminiumgehalt von weniger 97 % zu negativ auf die gewünschten Reaktionskurven auswirkte. Somit musste Recyclat niedriger dosiert werden. Das gewählte Recyclat hat einen Aluminiumgehalt von mindestens 97 %.

Es wurde sich am Ende für das Recyclat **Mahlgrieß 160-560µm (gmp 010316)** entschieden!

Hier wurden bei der Erhöhung die geringsten Verschlechterungen hinsichtlich Produktionsmenge bzw. -dauer erreicht. Zusätzlich konnten hiermit die besten Ergebnisse in der Anpassung der gewünschten Zielreaktivität der Produkte erreicht werden.

### 3.1.2 Optimierung der Mühlen

Nach Anpassung der Kugelmenge in Kugelmühle 1 von 2.700 kg auf 3.680 kg im August 2018 konnten mit gmp 01032016 folgende Ergebnisse beim Produkt EXPANDIT® BE 1101 erzielt werden:

- Beim Produkt EXPANDIT® BE 1101 (D50: ca. 50 µm) sind auf der Kugelmühle 1 bei einer Zugabe von ca. 29 % das Reaktionsverhalten sowie die Laufzeiten der Kugelmühle in einem hinnehmbaren Rahmen.
- Das Fertigprodukt EXPANDIT® BE 1071 (D50: ca. 60 µm) auf Kugelmühle 1 zeigte bei einem Anteil von ca. 20 % keine auffälligen Änderungen des Reaktionsvermögens, die Laufzeiterhöhungen waren hinnehmbar.
- Versuche zum Reaktionsvermögen nach langer Lagerung (im Hause GRIMM) über 6, 9, 12 und 18 Monaten wurden mit folgendem Ergebnis durchgeführt: Das Reaktionsvermögen entsprach auch nach diesen Zeiten den technischen Spezifikationen.
- Hier ist jedoch zu beachten, dass ein Recyclat nicht dauerhaft den gleichen gewünschten Aluminiumanteil hat. Was den Mahlprozess durch die wechselnde Zusammensetzung beeinflusst. Hierdurch sind wechselnde Einstellungsanpassungen des Öfteren von Nöten.
- Auf Anlage Kugelmühle 4 wurden erste Versuche mit Recyclaten durchgeführt. Jedoch wurden hier bis jetzt nur geringere Mengen Recyclat bei den Produkten EXPANDIT® BE 1151 F (D50: ca. 33 µm), EXPANDIT® BE 1101 (D50: ca. 50 µm) und EXPANDIT® BE 1071 (D50: ca. 60 µm) eingesetzt. Schon bei geringeren Einsatzmengen sind Probleme mit den Laufzeiten sowie teilweise mit dem Reaktionsverhalten aufgetreten. Diese müssen nochmals nachgetestet werden, um die Problematik zu bestätigen.
- Das unterschiedliche Verhalten der 2 Kugelmöhlen mit dem Recyclat zeigt, dass es Versuche auf jeder Kugelmühle, mit jedem dort produzierten Produkt, erfordert. Da anscheinend jede Anlage anders auf das Material reagiert und individuell eingestellt werden muss.
- Da die Aluminiumpulver für den Baustoffsektor (Expansionsmittel Trockenmörtel und Herstellung von Porenbetonsteinen) nicht nach optischen Aspekten verkauft werden, sondern nach von Kunden spezifizierten Parametern wie Partikelgröße, Schüttgewicht und vor allem der Reaktivität (Bildung von H<sub>2</sub> in einem laugigen Prozess) des Aluminiumpulvers, kann nicht in jedem Aluminiumpulver Recyclat verwendet werden bzw. sind die Zugabemengen unterschiedlich. Da es hierbei, wie in den Zwischenberichten geschildert, bei einigen Kunden zu Problemen kam, wurden die Recyclatanteile optimiert und von den

Kunden getestet, ob die Spezifikationen im Produktionsbetrieb die gewünschten Parameter aufweisen. Eine aktuelle Aufstellung, welche Aluminiumpulver ohne bzw. mit wieviel Recyclat produziert werden können, zeigt Tabelle 2.

Sorte	Zugabemenge	H <sub>2</sub> in 10 min.	D50 Teilchendurchmesser	Mahlmenge	Kugelmühle
BE 1071 R	20 – 30 %	300 – 400 ml	55 – 65 µm	38 – 43 kg/h	4
BE 1071	5 – 10 %	400 – 500 ml	55 – 65 µm	40 – 45 kg/h	1 + 4
BE 1101 R	15 – 25 %	450 – 550 ml	45 – 55 µm	38 – 43 kg/h	4
BE 1101	10 – 15 %	mind. 600 ml	45 – 55 µm	45 – 50 kg/h	1,2,4
BE 1101 S	0	mind. 640 ml	45 – 55 µm	50 – 55 kg/h	1
BE 1131	0 – 5 % Kundenspezifikation abhängig	mind. 620 ml	40 – 50 µm	50 – 55 kg/h	1
BE 1141	0 – 5 % Kundenspezifikation abhängig	mind. 640 ml	35 – 45 µm	50 – 55 kg/h	1
BE 1151 R	35 – 45 %	420 – 520 ml	28 – 38 µm	30 – 35 kg/h	4
BE 1151 F	10 – 15 %	mind. 550 ml	28 – 38 µm	35 – 40 kg/h	4
BE 1151 S	0 – 5 % Kundenspezifikation abhängig	mind. 630 ml	28 – 38 µm	45 – 50 kg/h	1 + 4
BE 1161	10 – 15 %	mind. 600 ml	23 – 33 µm	45 – 50 kg/h	4
BE 1080	5 – 10 %	450 – 550 ml	50 – 60 µm	30 – 35 kg/h	3
BE 1100	5 – 10 %	mind. 600 ml	45 – 55 µm	30 – 35 kg/h	2 + 3
BE 1140	5 – 10 %	mind. 600 ml	37 – 47 µm	25 – 30 kg/h	2 + 3
BE 1160	5 – 10 %	mind. 620 ml	32 – 42 µm	25 – 30 kg/h	3

Tab. 2: Aktuelle Zugabemengen Recyclat in Produkten (Sorten) zur Herstellung von Porenbeton

Nach Erhöhung der Kugelmenge stand auch fest, dass keine zusätzlichen Mahlhilfsmittel in den Prozess eingebracht werden müssen, um eine reproduzierbare Vermahlung zu gewährleisten.

### 3.1.3 Integration des Laserbeugungspartikelmessgerätes

Der optische Partikelzähler ermöglicht die Messung der Partikelanzahlkonzentration in Abhängigkeit von der Partikelgröße in Verbindung mit einer Volumenstrommessung. Die einzelnen Partikel werden mit dem Probenahmestrom durch das Messvolumen des Partikelzählers transportiert. Das Messvolumen wird mittels einer Lichtquelle beleuchtet und die Lichtstrahlen hinter dem Messvolumen von einer Strahlfalle absorbiert. Die Partikel und die Moleküle in dem optisch abgegrenzten Messvolumen bilden das Messobjekt des Partikelzählers. Ein Linsensystem sammelt einen Teil des Streulichtes vom Messobjekt und fokussiert es auf einen Fotodetektor. Der Fotodetektor wandelt das Streulicht in elektrische Signale um. Eine nachgeschaltete Signalverarbeitung zählt die Partikelsignale, klassiert sie anhand der Signalamplituden und erstellt eine Partikelgrößenverteilung. Die Signalamplituden werden in der Regel bei kommerziellen optischen Partikelzählern anhand von definierten

Schwellwerten ausgewertet. Wenn das Signal einen festgelegten Schwellwert übersteigt, wird der Spitzenwert des Signals ermittelt.

Seit 18.03.2019 ist die in-Line Partikelmessung in Kugelmühle 1 in Betrieb genommen worden. Diese funktioniert wie gewünscht und liefert wichtige Daten in Echtzeit, um auf Fluktuationen im Produkt zu reagieren. Es wurden mehrere Vergleichsmessungen mit dem Off-Line Partikelmessgerät der QS angestellt und bestätigt.

- Eine übermäßige Nutzung von Aluminiumrecyclaten in unseren Produkten führt direkt zu Einbußen in der Reaktivität als auch in der Gesamtmenge des entstehenden Gases.
- Zwar ist Mahlgrieß (Recyclat) in der Herstellung weniger energieaufwendig, jedoch wird zum Vermahlen mehr Energie (längere Laufzeiten) benötigt, um diesen härteren Grieß zur gewünschten Teilchengröße auszutreiben. Des Weiteren führt die Härte des Grießes zu stärkerem Verschleiß der Mühle.
- Versuche mit dem Mehrkammersichter erwiesen sich leider als nicht prozessverbessernd.
- Das Aluminiumrecyclat kann sowohl in wasserbenetzbare als auch in nicht wasserbenetzbare Pulver eingearbeitet werden.
- Die Laserbeugungsmessung wird auch weiterhin als Kontrollfunktion (auf KM1) für die laufende Produktion eingesetzt. Die Endprüfung findet weiterhin offline im hauseigenen QS-Labor statt.
- Die Lagerungsfähigkeit der Produkte wurde durch das eingesetzte Recyclat nicht negativ beeinflusst.
- In speziellen Produkten können höhere Mengen Mahlgrieß (bis zu 36 %) eine gezielte Verlangsamung der Gasentwicklung hervorrufen. Dies ist vor allem in wärmeren Ländern der Fall wo andere Pulver und Pasten zu aggressiv wirken
- Anfallender Ausschuss kann erneut mitvermahlen werden und sorgt somit für einen ökologischeren Produktkreislauf.
- Auch in Kalkprodukten weisen Pulver mit Recyclatanteil keine stark veränderte Expansion auf, in Spezialfällen (R-Typen) kann auch hier eine gewünschte Bremswirkung erzielt werden.

#### 3.1.4 Überprüfung der Lagerfähigkeiten

Bearbeitetes Aluminium ist aufgrund seiner hohen Oberfläche extrem reaktiv, sobald es mit entsprechenden Substanzen in Kontakt kommt – dies können sowohl saure als auch basische Umgebungen sein. Deshalb müssen für jedes neues Produkt Lagerungstests durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Produkte beim Kunden nicht bereits im Lager reagieren, Wasserstoff entwickeln und somit nicht mehr für die Produktion von Porenbeton verwendet werden können.

Daher wurden die hergestellten Pulver mit Lösemittel entstaubt und in unseren Lagern für Labortests aufbewahrt. Abbildung 2 zeigt das Reaktionsverhalten des mit 15 % recyceltem Aluminium hergestellten Produktes EXPANDIT® BE 1101 über eine Lagerungszeit von 12 Monaten (aufgrund von Übersichtlichkeit sind hier nur 0, 3, 6 und 12 Monate eingetragen).

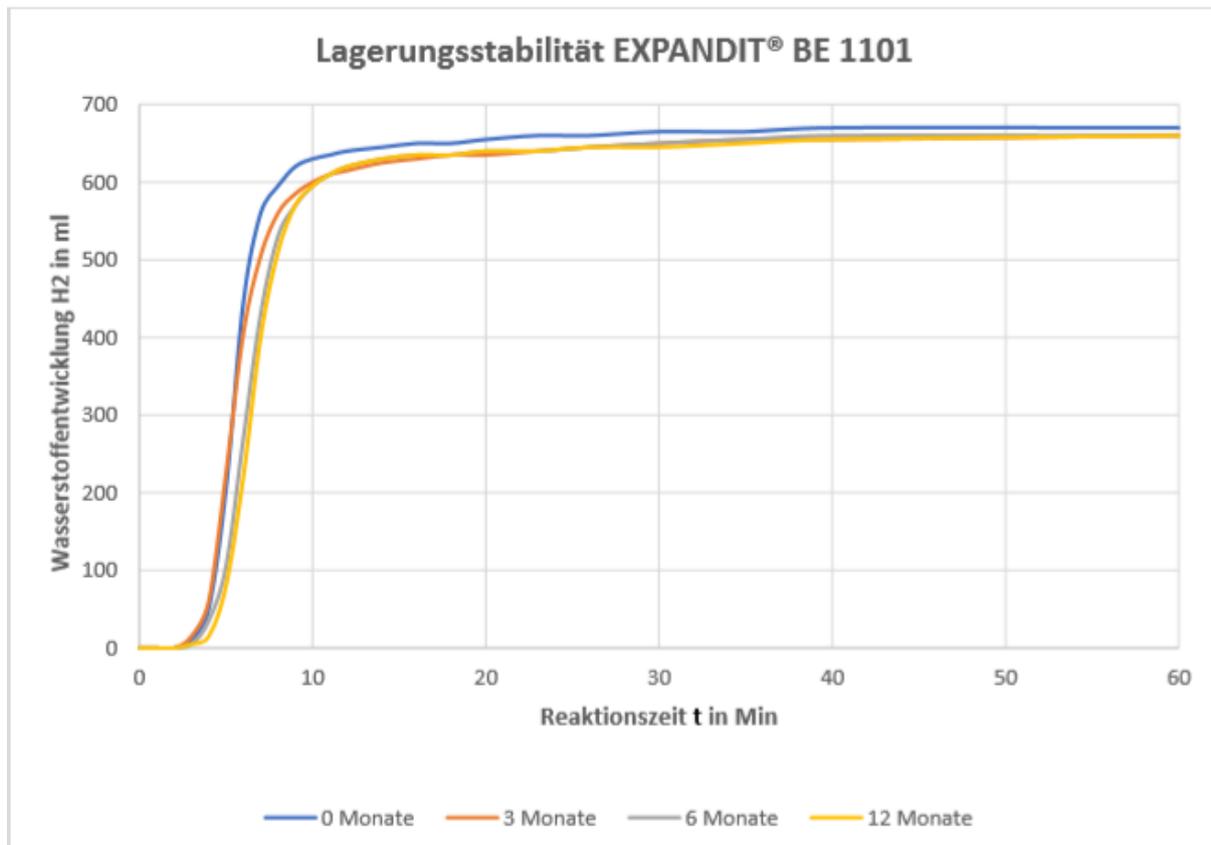


Abb. 2: Lagerungsstabilität unseres Produktes EXPANDIT® BE 1101 über ein Jahr [Quelle: Eigene]

Es waren weder positive noch negative Effekte des recycelten Aluminiums auf die Lagerungsstabilität unserer Produkte zu beobachten. Die leicht verringerte Reaktivität war zu erwarten, da eine Passivierung des Aluminiums während der Lagerung nur bedingt verhindert werden kann.

### 3.2 Diskussion der Ergebnisse in Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung

Die Auswirkungen des Einsatzes von recyceltem Aluminium waren zum Vorhabenbeginn nicht hinreichend bekannt und wurden daher im Vorhaben untersucht. Dies betraf den Mahlprozess, die Klassierung, aber auch die Transport- und Lagerfähigkeit sowie die Reaktionsfähigkeit, bzw. die Möglichkeiten der Beeinflussung des Reaktionsvermögens (Wasserstoffbildung), wenn Aluminiumpulver als Expansionsmittel eingesetzt wird.

Nach anfänglichen Schwierigkeiten in den Mühleneinstellungen (Kugelmenge, Drehzahl etc.) ist es gelungen, Recyclatgrieß in nahezu allen Produkten zu verwenden. Ausgenommen hiervon sind Flitter, da hier ein optisches Produkt erzeugt wird, bei dem Glanz und Brillanz durch Mahlgrieß zu stark negativ beeinflusst werden, sowie einzelne kundenspezifizierte Produkte, die aufgrund besonders starker Reaktivität nur mit Sprühgrieß hergestellt werden können.

Zu Beginn wurde die Klassierung von Pulvern aller Mühlen off-Line im hauseigenen QS-Labor durchgeführt. Hierfür wurden Stichproben des aktuellen Materials entnommen und mittels einem Partikelmessgerätes geprüft, ob es die gewünschte Korngröße bereits erreicht hatte. Nach Einbau der in-Line Partikelmessung in Kugelmühle 1 wird diese stetig überwacht, um direkt auf Schwankungen im Material reagieren zu können. Es hat sich gezeigt, dass bei der Verarbeitung von Recyclatgrieß eine direkte und stetige Kontrolle nahezu unab-

dingbar ist, da die Schwankungen im Ausgangsmaterial direkt im Endprodukt nachweisbar sind. Dieser Effekt ist offensichtlich stärker je mehr recyciertes Aluminium eingesetzt wird.

Weder Transport- noch Lagerfähigkeit werden nach bisherigen Erkenntnissen durch die Verwendung von Recyclat beeinflusst. Dies gilt für reines Pulver, daraus abgemischte Pasten und die Kalkprodukte (EXPANDIT® und OPTONIT®).

Anders verhält es sich mit der Reaktionsfähigkeit. Diese ist klar durch recyciertes Aluminium beeinflussbar. Im Allgemeinen gilt, je mehr Mahlgrieß in den Mühlen eingesetzt wird, desto langsamer werden die Reaktionen der daraus hergestellten Produkte. Durch die Entwicklung neuer, spezieller bereits mit Mahlgrieß geplanten Produkte wurden einige Kundenwünsche nach herausgezögertem Reaktionsverhalten erfüllbar. Produkte mit bis zu 30 % Mahlgrieß weisen nahezu unveränderte Reaktivität gegenüber dem gleichen Produkt ohne Mahlgrieß auf. (Abb. 3)

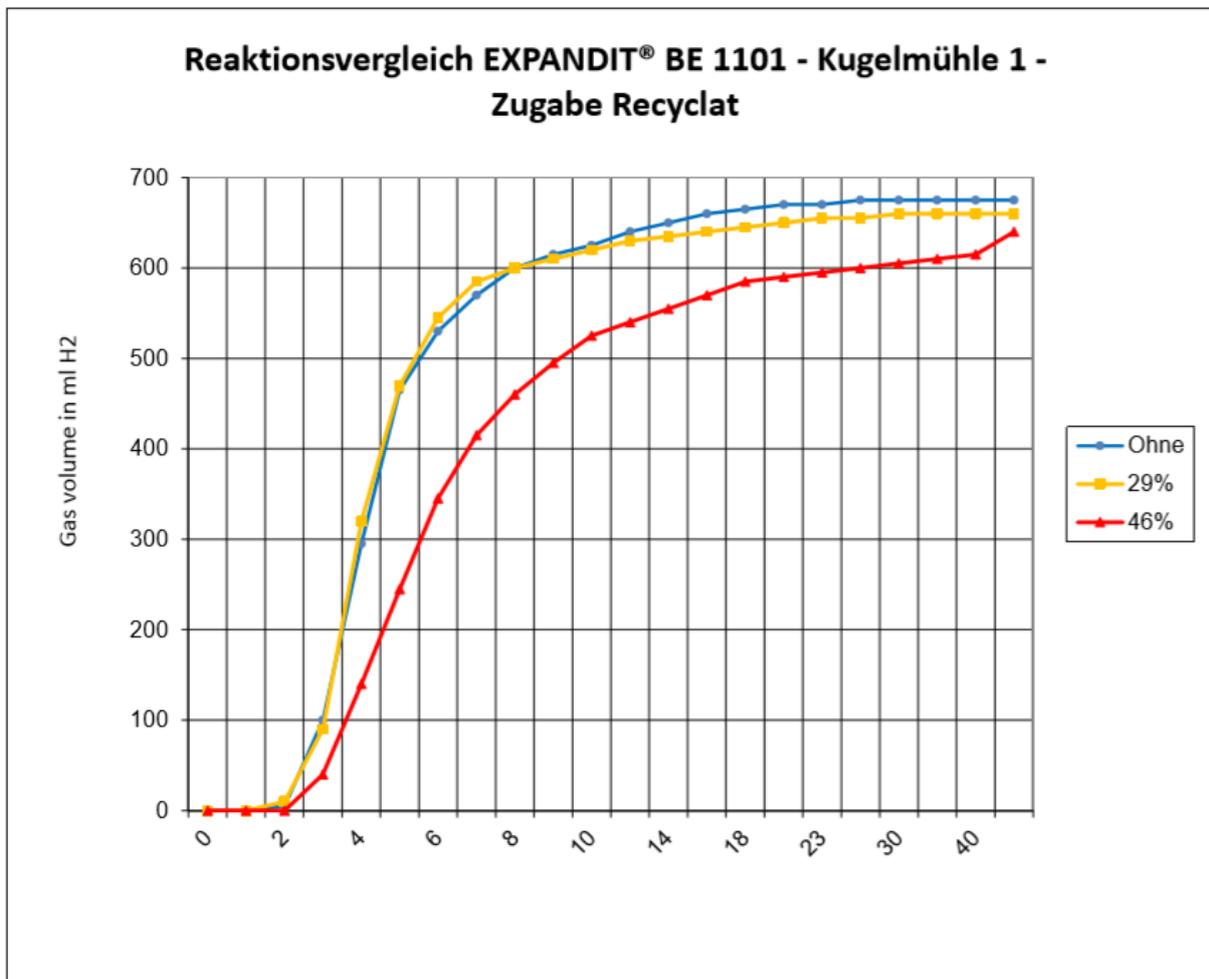


Abb. 3: Reaktionsverhalten unseres Produktes EXPANDIT® BE 1101 mit verschiedenen Anteilen Recyclat [Quelle: Eigene]

Die Laufzeit der Mühlen hingegen erhöht sich bereits merklich ab 10 bis 15 % Recyclat. Eine Verwendung von über 30 % ist nur bei bereits erwähnten langsamen Produkten (R-Typen) möglich, da sonst die Qualität der Produkte zu stark leidet.

Die verfahrenstechnischen Ziele der geforderten Partikelgrößenverteilung, spezifische Oberfläche und minimale Fehlstellenverteilung für die Gewährleistung einer gezielten Reaktionsfähigkeit der Partikel als Expansionsmittel lassen sich nur durch sinnvolle Kombinationen bzw. Schaltungen von Mahl- und Klassierprozessen lösen. Dabei muss ggf. tief in das bis-

lang als optimiert geltende Trockenmahlverfahren eingegriffen werden. Parallel zum Vorhaben wurde im Hause GRIMM eine horizontale Aeroklassierstrecke (Aerosortierung [JUNG2015]) für Aluminiumpartikel, bestehend aus Mehrkammerstromsichter (laminare Horizontalstromsichtung und Schwerkraft) zur Klassierung von Feststoffen nach definierten Kriterien wie Partikelgröße, Dichte, Trägheit und dem Schweb- oder Sichtungsverhalten sowie Sieben im geschlossenem Luftstrom (keine sauerstoffhaltige Umgebungsluft als zusätzliche Sichtluft) in Abhängigkeit folgender Parameter entwickelt und aufgebaut.

Um eine bessere Klassierung über entspannte Strömungen - statt zusätzlicher Sichtluft - zu erreichen, wurden Horizontalstromsichterkammern (Abb. 4) mit drehbaren Luftleitklappen oben und höhenverstellbaren Wehren unten sowie neue Multizyklo-nen (4-fach) in den Prozess eingebracht. Erstmals sollte es somit ermöglicht werden, Partikel in drei wünschenswerten Größenbereichen 5 bis 20  $\mu\text{m}$ , 20 bis 50  $\mu\text{m}$  bzw. 50 bis 100  $\mu\text{m}$  prozesssicher zu klassieren.



Abb. 4: Rückwärtige Ansicht des 3-Kammerquerstromsichters mit 4-fach Multizyklon [Quelle: Eigene]

Das Ziel, Partikel in drei Größenbereichen 5 bis 20  $\mu\text{m}$ , 20 bis 50  $\mu\text{m}$  bzw. 50 bis 100  $\mu\text{m}$  reproduzierbar zu klassieren, wurde im Projektzeitraum nicht erreicht. Es konnte keine klare Trennung erreicht werden, obwohl verschiedenste Einstellungen am Quersichtersichter und in der Mühle selbst vorgenommen wurde. Trotz eines Frequenzumrichters zur Steuerung der Mühlenluft haben Verwirblungen im Mehrkammersichter auf allen drei Ausgängen das gleiche Produkt klassiert.

Da das Klassierprinzip aber grundsätzlich bewährt ist, sollen im Ergebnis der letzten Versuche mittels regulierbarer Umluft (Einsatz Frequenzumrichter für Ventilator) und Sichterluft zumindest 2 Klassierungen reproduzierbar realisiert werden. Der Ausstoß "Gutkorn" je Umluft könnte somit im Vergleich zu heute (30 kg/h) nachhaltig erhöht werden.

**Diese Projektergebnisse haben allerdings keine Auswirkungen auf den Einsatz von Recyclaten des hier betrachteten Vorhabens!**

Der optische Partikelzähler ermöglicht die Messung der Partikelanzahlkonzentration in Abhängigkeit von der Partikelgröße in Verbindung mit einer Volumenstrommessung. Die einzelnen Partikel werden mit dem Probenahmevolumenstrom durch das Messvolumen des Partikelzählers transportiert. Das Messvolumen wird mittels einer Lichtquelle beleuchtet und die Lichtstrahlen hinter dem Messvolumen von einer Strahlfalle absorbiert. Die Partikel und die Moleküle in dem optisch abgegrenzten Messvolumen bilden das Messobjekt des Partikelzählers. Ein Linsensystem sammelt einen Teil des Streulichtes vom Messobjekt und fokussiert es auf einen Fotodetektor. Der Fotodetektor wandelt das Streulicht in elektrische Signale um. Eine nachgeschaltete Signalverarbeitung zählt die Partikelsignale, klassiert sie anhand der Signalamplituden und erstellt eine Partikelgrößenverteilung. Die Signalamplituden werden in der Regel bei kommerziellen optischen Partikelzählern anhand von definierten Schwellwerten ausgewertet. Wenn das Signal einen festgelegten Schwellwert übersteigt, wird der Spitzenwert des Signals ermittelt.

Die Laserbeugung nutzt die messtechnische Erfassung über Laser, wobei im Anschluss Größe und Anzahl durch mathematische Formeln ermittelt werden. Diese Partikelzähler gelten als sehr modern und werden auch vermehrt im industriellen Bereich eingesetzt. Die Geräte selber werden i.d.R. als Laborgeräte, in der Industrie und in der Wissenschaft eingesetzt.

Das in-Line Partikelmessgerät wurde am 18. März 2019 in Betrieb genommen und liefert leicht abweichende Ergebnisse zu den off-Line Messungen in Labor. Dies ist sehr wahrscheinlich aufgrund der unterschiedlichen hinterlegten mathematischen Auswertung der Ergebnisse. Es wäre somit möglich, diese über einen einfachen Faktor aneinander anzugleichen, jedoch ist dies nicht wirklich nötig, da in der Produktion bereits mit diesen ‚neuen‘ Werten gearbeitet wird, um Material entsprechend einzustellen.

Der Abbildung 5 ist zu entnehmen, dass die Analysenergebnisse von MYTOS (in-Line) und Cilas (off-Line) nicht vollständig identisch sind. Liegen die Werte für den x10 noch sehr eng beieinander, so weichen die x50-Werte der MYTOS Analysen bereits ins Grobe ab. Noch stärker ist dieser Effekt bei dem x90 zu beobachten. Diese Verschiebung zu größeren Partikelgrößenverteilungen bei der Trockendispergierung war und ist bekannt, und wurde so auch erwartet.

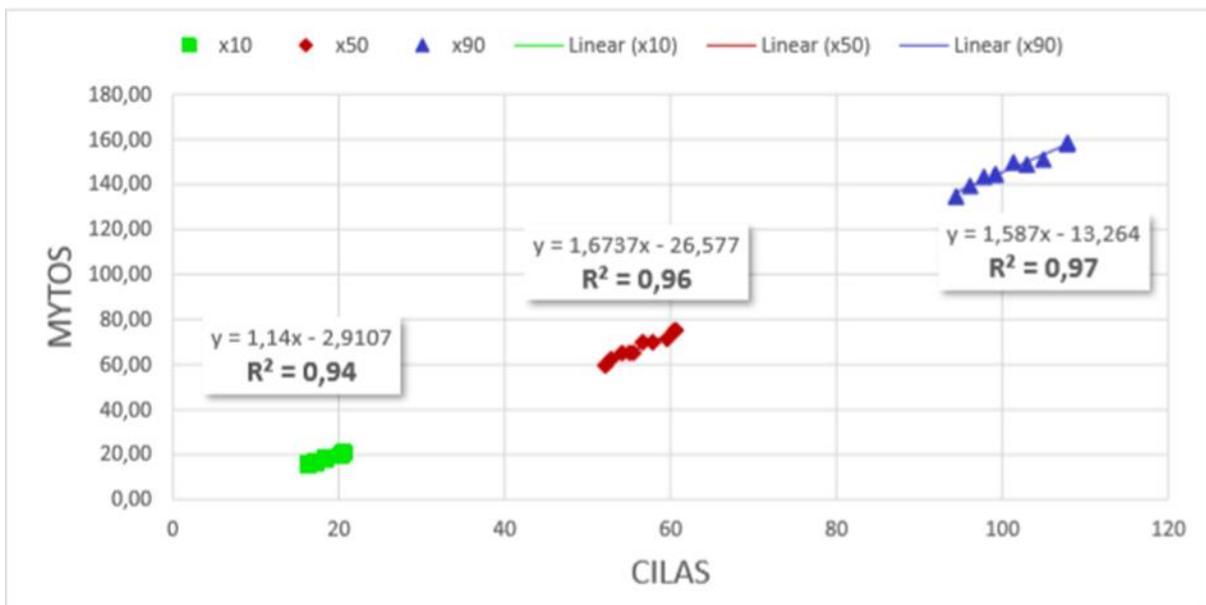


Abb. 5: Korrelationsdiagramm der Kenngrößen x10, x50, x90 [Quelle: Analysebericht MYTOS von Sympatec für GRIMM Metallpulver]

Weitere Versuche zwischen Nass- und Trockendispergierung unter Einbezug weiterer Sym-patec Analysensysteme (hier nicht dokumentiert) konnten dies bestätigen. Um eine grundsätzliche Eignung der MYTOS Daten zu verifizieren, ist das Maß der Korrelation beider Technologien entscheidend. Abbildung 5 zeigt ein solches Korrelationsdiagramm für alle drei Kennwerte und liefert einen eindeutigen Zusammenhang. Das Bestimmtheitsmaß (Pearson-Korrelationskoeffizient) steigt von 94 % beim x10 über 96 % beim x50 auf 97 % für den x90.

Derzeit wird dieses Gerät auf Kugelmühle 1 betrieben, jedoch stehen angesichts der hervorragenden Ergebnisse bereits Pläne für eine Nachrüstung von Kugelmühle 3 und 4 mit Messgeräten desselben Typs im Raum. Dies würde wiederum bedeuten, dass auch auf diesen Mühlen einfacher mit hohen Mengen an Mahlgrieß gearbeitet werden kann. Bisher sind hier eher geringe Mengen im Einsatz, um Fluktuationen im Endmaterial zu begrenzen.

in-Line - Partikelmessung: Rückführung der Proben in den Prozess unter Verhindern der Einbringung Sauerstoff

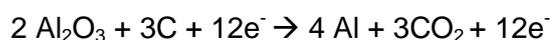
Die Proben werden direkt aus dem Messvolumen mit Umgebungsluft zurückgeführt, da das Messvolumen verglichen mit der Mühle verschwindend gering ist. Es wurden keine auffälligen Schwankungen beobachtet und die in-Line Messung wird ohne Stickstoffatmosphäre betrieben. Das Ausblasen findet hierbei je 5 Sekunden vor jeder Messung statt. Es werden bei 3 bar und <10 l/s mit Umgebungsluft ausgeblasen. Werden nun 10 l angenommen, so werden etwas mehr als 5 l mehr Sauerstoff in das System eingebracht, welches gesamt (Mühle und Rohrleitungen) ca. 18.000 l fasst und bei 7,5 bis 8,5 % Sauerstoffgehalt betrieben wird. Diese vergleichsweise geringe Menge and zusätzlichem Sauerstoff würde eine eigene Anlage zur Stickstofferzeugung nicht wirtschaftlich machen.

Steuerungen Fertigungsprozess (Digitalisierung) unter Praxisbedingungen

Ergebnisse: Hier konnten leider keine Fortschritte erzielt werden, da dieses Ziel direkt an den erfolgreichen Einsatz des Querstromsichters gekoppelt war. Es war angedacht, die Flügelklappen durch die Messwerte des in-Line Partikelzählers zu automatisieren. Wie oben bereits erwähnt, hat das Konzept des Mehrkammersichters für Aluminiumpulver nicht wie gewünscht funktioniert. In Zukunft ist es jedoch eventuell möglich, die klassischen Sichter zu automatisieren. Hierzu wäre eine Steuerung der Sichtluft nötig, um das produzierte Material nach Feinheit – mittels der Schwebfähigkeit im Sichter – zu sortieren. Überkorn würde weiterhin über die Siebe verhindert werden.

### **3.3 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse**

Die Herstellung des für den Sprühgrieß benötigten Aluminiums findet mittels des Hall-Héroult Prozesses statt, hierbei wird aus Bauxit mittels des Bayer-Verfahrens  $Al_2O_3$  gewonnen. Diese wird in einer Schmelzflusselektrolyse in seine chemischen Bestandteile zerlegt. [RÖMPP1993] Das entstehende Aluminium ( $Al^{3+}$ ) wandert zur Kathode und wird von dort aus abgesaugt. Die Sauerstoffionen ( $O^{2-}$ ) wandeln sich an der Graphitanode zu Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) um.



Hierbei werden also pro 1 Tonne erzeugtem Aluminium ca. 1,22 Tonnen  $CO_2$  in die Atmosphäre entlassen.

$$\text{Al: } 26,982 \text{ g/mol} \quad \text{CO}_2: 44,009 \text{ g/mol} \quad \rightarrow \quad \frac{3 \cdot 44,009 \text{ g/mol}}{4 \cdot 26,982 \text{ g/mol}} = 1,2233$$

Hierbei ist jedoch noch nicht die hierfür benötigte Schmelzenergie berücksichtigt. Die hierfür benötigte Schmelztemperatur wird durch die Zugabe von Kryolith ( $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$ ) auf 950 – 970°C verringert. Gesamt wird also bei der Herstellung von 1t Hütten-Aluminium 1,22t  $\text{CO}_2$  sowie 42GJ (während der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Herstellung) als auch 13,5 MWh (zur Elektrolyse) Energie benötigt. [RÖMPP1989]

Rechnet man nun all dies in  $\text{CO}_2$  um – die Schätzung für 2018 beträgt hier 0,474 kg/kWh – [UBA2019], so erhält man eine Gesamtmenge von ca. 13,2 Tonnen  $\text{CO}_2$  pro 1 Tonne Aluminium.

$$\text{CO}_2 \text{ aus } \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Herstellung: } \frac{42 \cdot 10^9 \text{ J}}{3600000} * \frac{0,474 \text{ t CO}_2}{\text{MWh}} = 11,67 \text{ MWh} * 0,474 \text{ t} \frac{\text{CO}_2}{\text{MWh}} = 5,53 \text{ t CO}_2$$

$$\text{CO}_2 \text{ aus der Elektrolyse: } 13,5 \text{ MWh} * 0,474 \text{ t} \frac{\text{CO}_2}{\text{MWh}} = 6,40 \text{ t CO}_2$$

$$\text{Gesamt: } (1,22 + 5,53 + 6,40) \text{ t CO}_2 = 13,15 \text{ t CO}_2$$

Weiterhin werden bei der Verdüsung von Aluminium zur Herstellung von Sprühgrieß durchschnittlich 700 kWh Strom benötigt. Dies ist eine Angabe für unseren 50-200 µm Sprühgrieß, die wir durch unseren Zulieferer Mepura erhalten haben. Genauere Einschätzungen sind uns hier nicht möglich. Umgerechnet entstehen hierdurch weitere 0,33 t  $\text{CO}_2$ .

$$\text{CO}_2 \text{ aus der Sprühgrießherstellung: } 700 \text{ kWh} * 0,474 \text{ t} \frac{\text{CO}_2}{\text{MWh}} = 0,3318 \text{ t CO}_2$$

Somit ergeben sich 13,5t  $\text{CO}_2$  für die Herstellung von 1t Sprühgrieß (Aluminiumgehalt > 99,7 %).

Vergleichen wir dies nun mit den Energiekosten von Nimex, unserem Lieferanten des verwendeten gmp-010316 Mahlgrießes, so sehen wir, dass hier nur 150kWh Strom pro Tonne hergestellten Aluminiumgrießes benötigt werden. Weiterführend gibt uns dies also einen Wert von 0,07 t  $\text{CO}_2$ .

$$\text{CO}_2 \text{ aus der Recyclatherstellung: } 150 \text{ kWh} * 0,474 \text{ t} \frac{\text{CO}_2}{\text{MWh}} = 0,0711 \text{ t CO}_2$$

Da der Mahlgrieß jedoch eine höhere Härte, vor allem durch die bereits genannten Verunreinigungen aufweist, ergeben sich bei GRIMM höhere Energiekosten. Vergleichen wir hierfür ein Produkt mit ähnlicher Teilchengröße mit verschiedenen Anteilen an Recyclat.

Produkt 1151S enthält ca. 7 % Mahlgrieß (Verwendung von 50 kg pro 725 kg Charge) und besitzt eine durchschnittliche Laufzeit von 16 Stunden. Vergleichen wir dies mit 1151R, welches ca. 41 % Mahlgrieß besitzt (Verwendung von 300 kg pro 725 kg Charge) bei einer durchschnittlichen Laufzeit von 21 Stunden. Somit zeigt sich ein Unterschied von 5 Stunden Laufzeit pro 250 kg Mahlgrieß bzw. 20 Stunden pro Tonne. Bei einer durchschnittlichen Betriebsleistung unserer Mühlen von 45 kW pro Stunde errechnet sich somit ein Unterschied von zusätzlichen 900 kWh pro eingesetzter Tonne Aluminiumrecyclat. Dies wiederum hat eine Zusatzbelastung von 0,43 t  $\text{CO}_2$  pro verwendeter Tonne Mahlgrieß zur Folge.

$$\text{Erhöhter CO}_2 \text{ Verbrauch durch Mahlgrieß: } \frac{5 \text{ h}}{0,25} * 45 \text{ kW} * 0,474 \text{ t} \frac{\text{CO}_2}{\text{MWh}} = 0,4266 \text{ t CO}_2$$

Aus der Herstellung und Verarbeitung des Mahlgrießes ergibt sich somit ein Gesamtaufwand von ca. 0,5 t  $\text{CO}_2$  pro Tonne verwendeten recycelten Aluminiums. Vergleicht man dies nun

mit dem CO<sub>2</sub> Ausstoß der primären Aluminiumherstellung von ca. 13,5 t so zeigt sich das unter der Verwendung von recyceltem Aluminium ca. 96 % des CO<sub>2</sub> einsparen lassen.

$$\text{Einsparung CO}_2: 100\% - \left( \frac{0,4266t+0,0711t}{1,22t+5,53t+6,40t+0,33t} \right) = 100\% - 3,69\% = 96,31\%$$

Da das verwendete Recyclat jedoch in seiner Kornbandverteilung teilweise stark fluktuiert, war es unerlässlich, mittels der Bypasslaserbeugung unsere herzustellenden Produkte in Echtzeit zu überwachen. Dies erlaubte eine schnellere Reaktion auf Schwankungen im Endprodukt und ist somit sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll, da Fehlproduktionen selbst mit höheren Mengen an Mahlgrieß verhindert werden können. Die in-line Messung ist bisher jedoch nur in Kugelmühle 1 zum Einsatz gekommen und somit bleibt im Moment keine andere Möglichkeit, als weiterhin auch off-line Messungen im QS-Labor durchzuführen. In Zukunft ist angedacht, auch Kugelmühle 3 und 4 mit einem Laserbeugungsmessgerät auszustatten, um sowohl Arbeitsaufwand zu reduzieren als auch die kontinuierliche Qualität unserer Produkte zu gewährleisten.

Es ist auch zu erwähnen, dass alle Standardprodukte unter der Verwendung von Mahlgrieß nachgestellt werden konnten und bereits erfolgreich bei Kunden getestet wurden und in deren Prozessen Verwendung finden. Weiterhin hat die Verwendung von Mahlgrieß zur Entwicklung von Spezialprodukten geführt, die sich durch eine besonders langsame Reaktion auszeichnen.

Betrachtet man nun die rein ökonomische Seite so stellt man fest, dass Mahlgrieß im Einkauf günstiger als Sprühgrieß ist. Dies liegt natürlich an einer Kombination aus günstigerem Ausgangsmaterial und geringeren Energiekosten bei der Herstellung. So kostet 1 t Sprühgrieß der Firma Mepura im Jahr 2019 durchschnittlich 2.265 €. Dieselbe Menge Grieß als Recyclat, welches von Nimex bezogen wird, kostet jedoch nur 1.900 €.

Dieser Preisvorteil muss jedoch vor dem Hintergrund des höheren Energieeinsatzes gesehen werden, der mit der Verwendung von Recyclat einhergeht. Diese betragen wie weiter oben bereits errechnet 900 kWh pro 1 t Recyclat. Bei den durchschnittlichen Kosten für Strom von ca. 0,20 €/kWh ergibt diese weitere 180 €.

Ein erhöhter Verschleiß der Mühlen ist nach Informationen aus der Produktion, trotz der höheren Härte des Recyclates, verglichen mit herkömmlichem Grieß zum jetzigen Zeitpunkt nicht festzustellen.

Der endgültige Preisvorteil beträgt also ca. 185 € pro Tonne.

$$\text{Preisdifferent Sprüh-/Mahlgrieß: } 2.265\text{€} - \left( 1.900\text{€} + 900\text{kWh} * 0,20 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = 185\text{€}$$

Gesamt ergibt sich also ein Preisverminderung von ca. 185 € und eine Einsparung von 13 t CO<sub>2</sub> pro 1 t verwendetem Recyclat in unseren Mühlen was sowohl ein Vorteil im globalisierten Markt ist, da der Preisdruck immer stärker wird und ein günstigerer Einkaufspreis an unsere Kunden weitergegeben werden kann, als auch auf längere Zeit gesehen immense Einsparungen von 96 % der Treibhausgase ermöglicht.

### 3.4 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Entwicklungsergebnisse sollen im eigenen Hause unmittelbar genutzt werden. Alle derzeit betriebenen vier Kugelmühlen sollen dafür nutzbar sein, die Kugelmühlen 1, 3 und 4 werden bereits mit Recyclaten beschickt.

Nach erfolgreichem Abschluss des Vorhabens können die gemahlene Recyclate fast allen heutigen Produkten des Antragstellers zugemischt und somit unmittelbar mit bekannten Handelsnamen in eingeführten Märkten weltweit verwertet werden:

- Aluminiumpulver und -pasten zur Herstellung von Porenbeton(EXPANDIT® BE)
- Aluminiumpulver beschichtet, für die Trockenmörtelindustrie (EXPANDIT®)
- Aluminiumpulver beschichtet mit zusätzlichen funktionalen Eigenschaften für die Trockenmörtelindustrie(OPTONIT®)
- Aluminiumpigmente und -flitter für die Pyrotechnik

Der Einsatz von Reinaluminiumgrieß (99,7 %), das energetisch sehr aufwendig hergestellt wird, kann somit drastisch reduziert werden. Bezogen auf die bisherige Einsatzmenge Reinaluminium könnten jährlich ca. 150 bis 200 t Aluminiumrecyclat im Hause GRIMM eingesetzt werden.

Die Ergebnisse sind branchenweit übertragbar.

Neue, auch wirtschaftlich sinnvolle, Einsatzfelder von Aluminiumrecyclaten würden zudem weitere Anstrengungen initiieren, um Aluminium in den Recyclingkreislauf zurückzuführen und dort durch geeignete Verfahren als Sekundärwerkstoffgemisch (Barren, Granulat, Sprühgrieß) mit reproduzierbaren Spezifikationen (aktiver Al-Gehalt, Legierungsbestandteile, Körnungen) wieder zu vermarkten.

## 4. Fazit

Obwohl das anspruchsvolle Ziel, der Beimischung von bis zu 50 % Aluminiumrecyclat in Aluminiumpulvern und -pasten, die als Expansionsmittel in der Baustoffindustrie eingesetzt werden, nur bis zu einem Anteil von ca. 36 % ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist, kann im Ergebnis des Vorhabens der Einsatz von Reinaluminiumgrieß (99,7 %), das energetisch sehr aufwendig hergestellt wird, mit Recyclaten drastisch reduziert werden.

Nachfolgende Erkenntnisse und Ergebnisse sind dabei zu berücksichtigen:

- Aluminiumrecyclate können in bestimmten Anwendungsfällen (Porenbeton, Putz- und Mörteladditive) eine erwünschte Verzögerung auf die Reaktivität der Produkte haben. Einsatzspezifische Untersuchungen, auch zum Langzeit- bzw. Lagerverhalten sind obligatorisch, für neue Rezepturen aber grundsätzlich erforderlich.
- Es muss darauf geachtet werden (vor allem bei feinen Pulvern), dass das Recyclat bei der Expansion nicht die Gesamtmenge des Gases verringert.
- Je nach Kundenspezifikationen und Produkt ist ein Anteil zwischen 5 % und 40 % im Herstellungsprozess gegeben.
- Die in-Line Laserbeugungsmessung ist ein guter, erster Kontrollpunkt, um die Dimensionen des aktuellen Produktes abzuschätzen, des Weiteren wurde dadurch die Produktion modernisiert.

Bezogen auf die bisherige Ausgangsmenge Reinaluminiumgrieß im Hause GRIMM könnten jährlich ca. 150 bis 200 t Aluminiumrecyclat in Trockenmahlverfahren eingesetzt werden. Somit steht eine ökologisch und betriebswirtschaftlich sinnvolle Lösung für den Einsatz von Aluminiumrecyclaten zur Verfügung.

Die Klimabilanz gegenüber Reinstaluminium ist positiv.

Bei einer Einsparung von 13 t CO<sub>2</sub> pro verwendete Tonne recyceltem Aluminium ist dieses Projekt aus unserer Sicht als voller Erfolg zu werten. Vor allem, da die so hergestellten Produkte nahezu dieselbe Reaktivität aufweisen wie unsere bisherigen Standardprodukte. Auch kann der daraus entstehende Preisvorteil an Kunden weitergegeben werden, was wiederum den Kauf von Produkten mit Recyclat als einem der Grundstoffe anreizt.

## 5. Literaturverzeichnis

- [KYME2020] Korrespondenz mit Peter Stadlberger von Kymera International vom 20.04.2020
- [NIMEX2017] N.N.: NIMEX NE-Metall GmbH, 06311 Helbra,  
<https://www.nimexmetall.de/de/produktion/einsatzmaterial.html>, 18.10.2017
- [JUNG2015] Prof. Dr. J. Tomas: Vorlesung „Stromklassierung“ Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie Stromklassierung, 18.10.2015  
[http://www.mvt.ovgu.de/mvt\\_media/Vorlesungen/VO\\_MVT/Folien\\_MVT\\_4.pdf](http://www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Vorlesungen/VO_MVT/Folien_MVT_4.pdf)  
[http://www.mvt.ovgu.de/mvt\\_media/Vorlesungen/VO\\_MVT/MVT\\_e\\_4.pdf](http://www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Vorlesungen/VO_MVT/MVT_e_4.pdf)
- [RÖMPP1989] Stichwort ‚Aluminium‘, RÖMPP Chemie Lexikon A-CI, Thieme, Stuttgart, 1989
- [UBA2019] Entwicklung der spezifischen Kohlenstoffdioxid Emission des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2018, Umweltbundesamt, Petra Icha, AGEE-Stat und Gunter Kuhs, April 2019

## 6. Anhänge

### Rückführ- und Kreislaufschaltungen von Trockenmahlungen

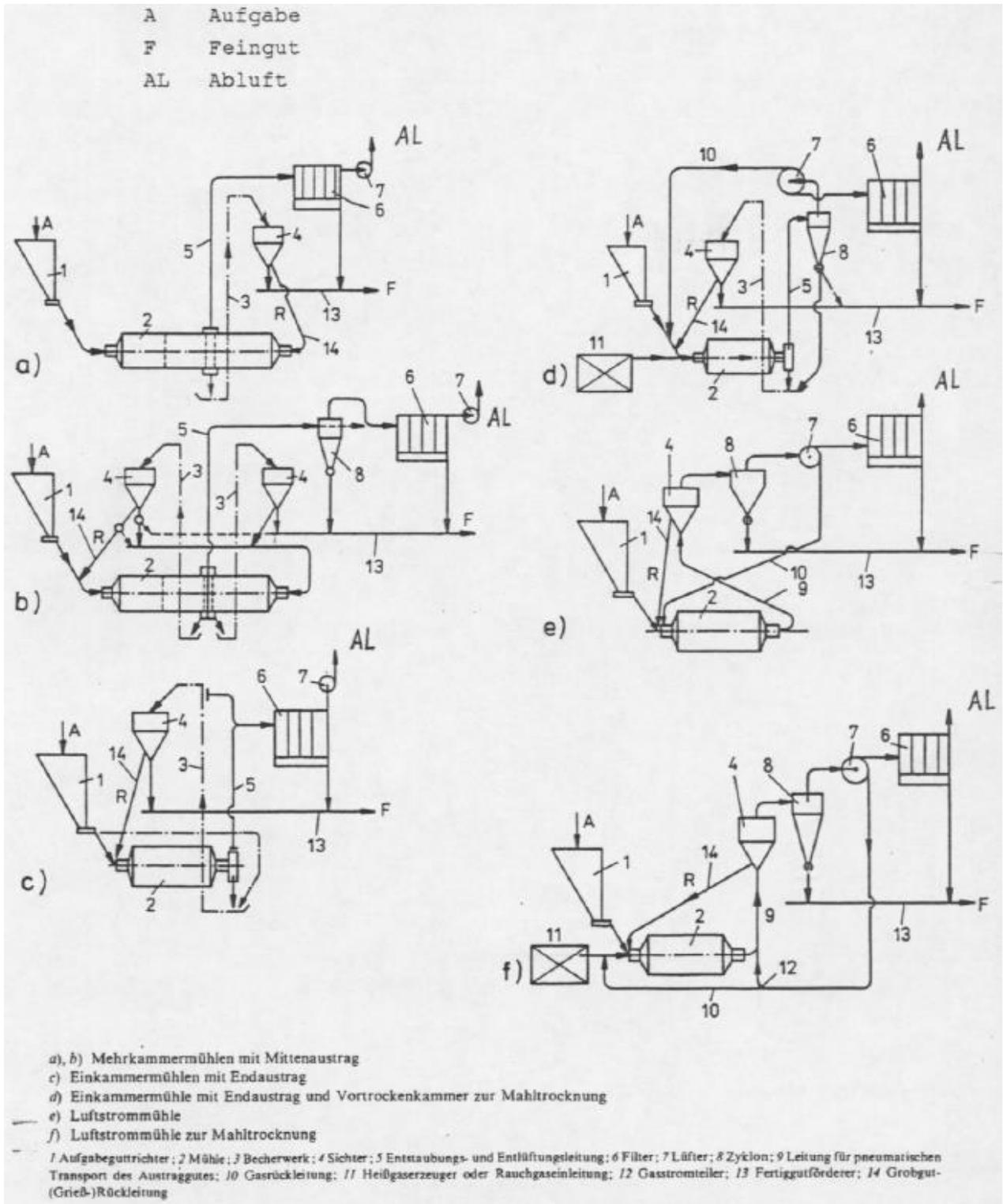


Abb. 6: Beispiele für Rückführ- und Kreislaufschaltungen von Trockenmahlungen [Prof. Dr. J. Tomas: TU Magdeburg, Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik, 17.10.2007]

- Offene Anlagen (praktisch nicht relevant, ggf. im Kleinst- bzw. Labormaßstab)

Anlagen für das Herstellen und Bearbeiten von Aluminiumpulver, in der die Luft in ihrer natürlichen Zusammensetzung und unter dem jeweiligen Atmosphärendruck freien Zutritt zum Aluminiumpulver hat, was heute in Europa undenkbar wäre.

- Geschlossene Anlagen:

Trockenmahanlagen für das Herstellen und Bearbeiten von Aluminiumpulver, in der ein Gasgemisch anderer Zusammensetzung als der atmosphärischen Luft oder anderen Druckes als des atmosphärischen Druckes während des Betriebes aufrechterhalten wird. Hierbei kommt als inertes Gas Stickstoff zum Einsatz. Bei kontinuierlich beschickten Anlagen wird in der Regel das Material durch Schleusen ein- und ausgebracht. Zu den geschlossenen Anlagen gehören auch mit Schutzgas betriebene Mischer, Vakuumanlagen sowie Anlagen in explosionsdruckfester oder explosionsdruckstoßfester Bauweise.