

Diplomarbeit

Recycling von Gipskartonplatten aus gemischten Bauabfällen

Recyclingkonzept für die Gipskartonplattenindustrie

erstellt am

**Institut für Nachhaltige Abfallwirtschaft
und Entsorgungstechnik**

Vorgelegt von:

Harald Schlöglhofer
0135049

Betreuer/Gutachter:

Univ.-Ass. Mag.Dr. Wolfgang Staber, MBA
O.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr. Karl E. Lorber

Leoben, 25.02.2008

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

DANKSAGUNG

Ich möchte mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Diplomarbeit unterstützt haben. Vor allem gilt mein Dank den Herren DI Josef Mitterwallner und HR Dr. Wilhelm Himmel von der Fachabteilung 19D der steiermärkischen Landesregierung, Herrn Dr. Thorsten Hildebrandt von der Fa. Knauf und Herrn Ing. Herwig Glössl von der Fa. Cemex. Sie haben durch die Initiierung dieses Projektes den Grundstein für diese Diplomarbeit gelegt und standen mir stets für Fragen zur Verfügung.

Weiters möchte ich mich noch bei meinem Betreuer Dr. Wolfgang Staber und Dr. Andreas Böhm vom Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung für die fachlichen Hilfestellungen bedanken.

Mein Dank gilt auch den Firmen ARP, KompTech und allmineral, die das Projekt durch die Bereitstellung von technischen Anlagen unterstützten und all den anderen Firmen und Organisationen, von denen ich Informationen bezogen habe.

Besondere Anerkennung verdient mein Vater, der mir während meines gesamten Studiums in jeglicher Hinsicht unterstützend zur Seite stand.

Kurzfassung

Recycling von Gipskartonplatten aus gemischten Bauabfällen **Recyclingkonzept für die Gipskartonplattenindustrie**

In einem zu entwickelnden Aufbereitungsverfahren sollen Gipsabfälle aus Abbruch- und Sanierungstätigkeiten von den Störstoffen befreit werden, um den gewonnenen Recyclinggips wieder in der Gipskartonplattenproduktion einsetzen zu können. Für die Gipsindustrie würde dieser Zugang zu Sekundärrohstoffen eine verringerte Abhängigkeit von natürlichen Ressourcen, die in den nächsten Jahrzehnten eine spürbare Verknappung erleben werden, bedeuten. Hingegen profitiert die Abfallwirtschaft unter anderem dadurch, dass mit der Aufbereitung dieses Abfalls, der bislang deponiert wurde, ein verkaufsfähiges Gut entstehen würde. Zudem verursachen Gipsabfälle bei der Deponierung Probleme, da sie immer wieder zu erhöhten Sulfatwerten führen, die über den vorgeschriebenen Grenzwerten liegen.

Durch eine Reihe von praktischen Versuchen wurde im Zuge dieser Diplomarbeit ein Aufbereitungsverfahren entwickelt, aus dem ein Recyclingmaterial hervorgeht, das den Qualitätsanforderungen der Gipsindustrie entspricht. Die auf dem entworfenen Recyclingkonzept basierende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung soll die beteiligten Unternehmen bei der Entscheidung für oder gegen die Umsetzung dieses Projektes unterstützen.

Abstract

Recycling of gypsum plasterboards from mixed construction waste

Recycling concept for the gypsum plasterboard industry

A recycling method for gypsum waste from reconstruction and destruction works has to be developed to precipitate contaminants. The resulting recycling gypsum should be used for the production of new plasterboards. By using secondary raw material the gypsum industry would reduce its dependence on natural resources, which are going to run short during following decades. Waste industry would profit by transforming waste, which usually gets land-filled, to a saleable good. Furthermore gypsum waste causes problems at landfills. It often leads to increased sulphate values, which exceed the mandatory limit values.

By several practical tests a recycling process for producing material that conforms to the quality requirements of the gypsum industry was developed. Based on this recycling concept the cost-effectiveness was calculated to support the participating enterprises in deciding against or in favour of implementing the project.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 AUSGANGSLAGE.....	4
2 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN.....	5
3 ROHSTOFF GIPS.....	7
3.1 Naturgips	7
3.2 Gips aus technischen Prozessen.....	10
3.2.1 REA-Gips.....	10
3.2.2 Sonstige Gipsarten.....	12
4 GIPSKARTONPLATTEN.....	13
4.1 Typen.....	13
4.2 Marktsituation.....	15
4.3 Herstellung.....	15
4.4 Verbaute Mengen	17
4.5 Entsorgung bzw. Verwertung.....	18
4.5.1 Deponierung.....	18
4.5.1.1 Deponieverordnung.....	18
4.5.1.2 Problematik.....	19
4.5.2 Bestehende Sammel- und Recyclingprogramme.....	22
4.5.2.1 Gypsum Recycling International A/S.....	22
4.5.2.2 New West Gypsum Recycling Inc.	22
4.5.2.3 GFR mbH	23
4.5.2.4 Rigips AG	23
4.5.3 Alternative Verwertungsmöglichkeiten	23
5 SAMMLER/AUFBEREITER UND VERWERTER.....	25
5.1 Firma Knauf	26
5.1.1 Input-Output.....	27
5.1.2 Qualitätsanforderungen an das Recyclingmaterial.....	29
5.1.3 Nutzen am Recyclingkonzept.....	30
5.2 Firma Cemex	30
5.2.1 Bisherige Handhabung von Gipskartonabfällen.....	31
5.2.2 Nutzen am Recyclingkonzept.....	31

6 ENTWICKLUNG DES MECHANISCHEN AUFBEREITUNGSVERFAHRENS ..32

6.1	Versuch: Zerkleinerung und Klassierung	32
6.1.1	Vorbereitung	32
6.1.2	Durchführung	33
6.1.2.1	Aufbereitung mittels Trommelsieb	34
6.1.2.2	Aufbereitung mittels Prallbrecher	36
6.1.3	Ergebnis	38
6.1.3.1	Aufbereitung mit Trommelsieb	38
6.1.3.2	Aufbereitung mit Prallbrecher	39
6.2	Versuch: Dichtesortierung	41
6.2.1	Laborluftsetzmaschine	42
6.2.1.1	Aufbau	43
6.2.1.2	Durchführung	44
6.2.1.3	Ergebnis	45
6.2.2	Luftherd	50
6.2.2.1	Aufbau	50
6.2.2.2	Durchführung	52
6.2.2.3	Ergebnis	53
6.2.3	Windsichtung	55
6.2.3.1	Aufbau	55
6.2.3.2	Durchführung	55
6.2.3.3	Ergebnis	56
6.2.4	Luftsetzmaschine	57
6.2.4.1	Aufbau	57
6.2.4.2	Durchführung	60
6.2.4.3	Ergebnis	62
6.3	Versuch: Selektive Zerkleinerung	65
6.3.1	Vorbereitung	66
6.3.2	Durchführung	67
6.3.3	Ergebnis	67
6.4	Versuch: Aufnahme von Luftfeuchtigkeit	68
6.4.1	Durchführung	69
6.4.2	Ergebnis	70
6.5	Analysemethoden	71
6.5.1	Siebanalyse	71
6.5.2	Kristallwasserbestimmung	72

7	SONSTIGE MÖGLICHKEITEN ZUR AUFBEREITUNG	73
7.1	Sammlung und Vorsortierung	73
7.1.1	Vermeidung von Fehlwürfen.....	73
7.1.2	Handklauben	74
7.2	Sortierung des zerkleinerten Materials.....	74
7.2.1	Sortierung nach dem elastischen Verhalten.....	74
7.2.2	Sortierung nach der Kornform	75
8	RECYCLINGKONZEPT	77
8.1	Abfallaufbereitung	77
8.1.1	Sammlung	79
8.1.2	Vorsortierung.....	79
8.1.3	Zerkleinerung.....	80
8.1.4	Klassierung.....	81
8.1.5	Sortierung.....	81
8.1.6	Selektive Zerkleinerung.....	83
8.1.7	Lagerung	84
8.2	Qualitätssicherung	84
8.3	Logistik.....	85
8.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	85
8.4.1	Firma Knauf.....	85
8.4.2	Firma Cemex.....	86
8.5	Ökologische Effekte	88
9	ERGEBNISSE.....	89
10	ZUSAMMENFASSUNG	90
11	VERZEICHNISSE	92
11.1	Literaturverzeichnis.....	92
11.2	Abkürzungsverzeichnis	96
11.3	Tabellenverzeichnis	97
11.4	Abbildungsverzeichnis	98
ANHANG.....	I

1 Ausgangslage

Gipskartonplatten finden im Hochbau bei der Errichtung von Decken, Wänden und Böden Verwendung. Für ihre Herstellung sind große Mengen von Gips nötig. Dieser stammt zurzeit fast zur Gänze aus dem Tagebau. Stetig knapper werdende Naturgipsressourcen, steigende Energiekosten und erschwerte Abbau- und Transportbedingungen veranlassen die Gipskartonindustrie zur Suche nach alternativen Rohstoffquellen.

Der übliche Entsorgungsweg für Gipskartonplattenabfälle, die meist vermischt mit Bauschutt gesammelt werden, ist die Ablagerung auf Baurestmassendeponien. Problematisch dabei ist vor allem das Sulfat, das sich aus dem Gipskarton löst und in weiterer Folge das Grundwasser gefährden und dem Deponiekörper schaden kann.

Eine Rückführung von aufbereiteten Gipskartonabfällen in die Gipskartonplattenproduktion würde sowohl für den Produzenten als auch für den Entsorger wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen. Aus ökologischer Sicht würden der verringerte Verbrauch an Naturgips und die Schonung von Deponievolumen für das Gipskartonrecycling sprechen.

Die Firma Knauf als Gipskartonplattenproduzent, die Firma Cemex als Abfallsammler und die Fachabteilung 19D „Abfall- und Stoffflusswirtschaft“ des Landes Steiermark haben es sich unter der Federführung des Instituts für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik der Montanuniversität Leoben zur Aufgabe gemacht, ein Recyclingkonzept für Gipskartonplatten aufzubauen.

Die Herausforderung des Vorhabens, aus stark verunreinigten Gipskartonabfällen geeigneten Sekundärrohstoff für die Gipskartonplattenproduktion zu gewinnen, liegt in der Entwicklung eines neuen Aufbereitungsverfahrens. Ist die technische Machbarkeit bewiesen, müssen noch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen stimmen.

Das übergeordnete Ziel dieser Diplomarbeit ist der Aufbau des Recyclingkonzeptes. Hierfür sollen eingangs Recherchen zur abfallwirtschaftlichen Situation, den rechtlichen Rahmenbedingungen und auch zum Stand der Technik im Recycling von Gipskartonabfällen durchgeführt werden. Des Weiteren sind bei den Projektpartnern einerseits die bestehenden Möglichkeiten zur Sammlung und Aufbereitung der Abfälle und andererseits die Anforderungen an das Recyclingmaterial zur Einbringung in die Produktion zu erheben. Aufbauend auf den Anforderungen der Sammlung, Aufbereitung und Verwertung ist dann das Recyclingkonzept zu erstellen. Dieses ist auf technische und wirtschaftliche Machbarkeit zu prüfen.

2 Begriffsbestimmungen

Baurestmassen: Materialien, die bei Bau- und Abbruchtätigkeiten anfallen, ausgenommen Baustellenabfälle [3, § 3].

Baustellenabfälle: Ein Gemisch aus Resten von Baustoffen, Bauhilfsstoffen, Bauchemikalien und Bauzubehör, das meist mit Anteilen an Bodenaushub, Bauschutt, Verpackungsmaterialien, Sonderabfall und sonstigen Bestandteilen vermengt ist und somit nicht nach Stoffgruppen getrennt erfasst und entsorgt werden kann [4, S. 46].

Brandwiderstandsklasse: Die Klasse (F 30, F 60, F 90) gibt an, wie lang ein Bauteil dem Feuer mindestens widerstehen kann. Z.B. widersteht ein Bauteil der Brandwiderstandsklasse F 30 dem Feuer 30 Minuten [2, S. 62].

Gips: Bezeichnung sowohl für das natürlich vorkommende Gipsgestein als auch für die beim Brennen dieser Ausgangsstoffe entstehenden Erzeugnisse [1, S. 6]. Im Zusammenhang mit der Gipsabfallaufbereitung wird in dieser Arbeit der Begriff auch als Bezeichnung für Teilchen von Gipskartonplatten verwendet.

Gipsabfall, Gipskartonabfall: Unterschiedlich zerkleinerte und verunreinigte Gipskartonplatten, die vorwiegend beim Bau oder Abriss von Gebäuden anfallen.

Gipskarton, Gipsplatten, Gipskartonplatten: Platten aus Gips, die beidseitig mit Karton ummantelt sind. Eine detailliertere Beschreibung findet sich im Kapitel 3.

Gipsstein, Rohstein, Naturgips: Gestein, das zum Großteil aus Gips (CaSO_4) besteht und je nach Abbaugbiet verschiedene Begleitbestandteile wie etwa Silikate oder Karbonate enthält.

Inertabfälle: „Abfälle, die keinen wesentlichen physikalischen, chemischen oder biologischen Veränderungen unterliegen; Inertabfälle lösen sich nicht auf, brennen nicht und reagieren nicht in anderer Weise physikalisch oder chemisch, sie bauen sich nicht biologisch ab und beeinträchtigen nicht andere Materialien, mit denen sie in Kontakt kommen, in einer Weise, die zu Umweltbeeinträchtigung führen oder sich negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken könnte. Die gesamte Auslaugbarkeit und der Schadstoffgehalt der Abfälle und die Ökotoxizität des Sickerwassers müssen unerheblich sein und dürfen insbesondere nicht die Qualität von Oberflächenwasser oder Grundwasser gefährden [3, § 3].“

Recyclingmaterial: Endprodukt des Aufbereitungsverfahrens und in weiterer Folge Sekundärrohstoff für die Gipskartonproduktion.

Transferkoeffizient: Transferkoeffizienten sind dimensionslose Kennzahlen, die zur Analyse von Prozessen dienen. Der Transferkoeffizient k_x ist jener Anteil des gesamten in den Prozess eingeführten Gutes oder Stoffes, der in den Output x transferiert wird [5, S. 5].

Trockenbau: Beim Trockenbau werden raumbegrenzende Konstruktionen des Ausbaus für Wand, Decke und Boden in trockener Bauweise montiert. Dabei können neben Gipskartonplatten auch Baustoffe wie Gipsfaserplatten, Holz, Metall oder Kunststoff zum Einsatz kommen [6].

Wärmeleitfähigkeit λ : Kennwert, der die Wärmemenge angibt, die in einer Stunde durch 1 m^2 einer 1 m dicken Schicht eines Baustoffes hindurchgeht, wenn die Temperaturdifferenz 1 °C beträgt [2, S. 26].

3 Rohstoff Gips

Chemisch gesehen handelt es sich bei Gips um Calciumsulfat. Gips ist eine relativ wenig wasserlösliche, salzartige, neutrale Verbindung, die in zwei verschiedenen Hydratstufen vorliegen kann. Es gibt zum einen Calciumsulfat-Dihydrat (Gipsgestein, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) und zum anderen das kristallwasserfreie Anhydrit (CaSO_4). Beide Verbindungen sind Salze einer starken Säure und einer starken Base. Deshalb reagieren wässrige Lösungen von Gips neutral (pH-Wert ca. 6,7). In übersättigten Lösungen von Calcium- und Sulfationen kristallisiert bei Temperaturen unter 40°C Dihydrat und bei Temperaturen über 40°C Anhydrit aus [1, S. 6f], [7, S. 120f].

In Deutschland wurden im Jahr 2000 ca. 78 % der verbrauchten Gipsmenge für die Herstellung von Gipsprodukten (Gipskartonplatten, Baugipse usw.) verwendet. Ca. 17 % des Gipses wurden in der Zementindustrie als Erstarrungsregler eingesetzt. Die restlichen 5 % sind für sonstige Zwecke, wie etwa Düngemittelherstellung oder Medizin, verbraucht worden [7, S. 128].

3.1 Naturgips

Sowohl Dihydrat als auch Anhydrit kommen natürlich vor. Sie bilden sich durch Auskristallisation aus übersättigten wässrigen Lösungen seichter Meeresteile [1, S. 6f]. Die Gipslagerstätten im Salzkammergut entstanden auf diese Weise im jüngeren Perm, also vor 251 bis 270 Millionen Jahren [8].

Calciumsulfat-Lagerstätten werden meist vom erdgeschichtlich jüngeren Kalkstein überlagert. Das Dihydrat bildet sich erst, wenn das Calciumsulfat an die Oberfläche gelangt. Zur Gipskartonproduktion wird von diesen Lagerstätten nur die oberste vergipste Schicht gewonnen [9]. Das tieferliegende kristallwasserfreie Naturanhydrit liegt zwar in größeren Mengen als das Dihydrat vor, allerdings beschränkt sich seine Anwendbarkeit auf die Herstellung von Fließestrichen oder Zement [7, S. 181].

Je nach geologischer Vorgeschichte unterscheiden sich die Gipsgesteine in ihrem Reinheitsgrad, ihrer Farbe und ihrem Gefüge. Abbildung 1 zeigt den farblichen Unterschied der Gipsgesteine aus zwei verschiedenen Lagerstätten. Die mineralischen Verunreinigungen wurden während der Abscheidung des Gipses aus den Meeren niedergeschlagen und bestehen u. a. aus Kalkstein, Mergel, Ton und gelegentlich Sand, Bitumen oder verschiedenen Salzen. Das Gefüge der Gipsgesteine ist sehr unterschiedlich und reicht von feinkörnigen Strukturen bis zu quadratmetergroßen, tafeligen Platten [1, S. 7].



Abbildung 1: Gipsgestein (links: dunkler Gips vom Phyrn, rechts: heller Gips aus Tragöß)

In Tabelle 1 sind die Mengen an jährlich abgebautem Gips für Österreich, einige Nachbarländer und die drei größten gipsproduzierenden Staaten Spanien, USA und Iran aufgelistet. Sowohl die inländische, als auch die weltweite Naturgipsproduktion nahm in dem betrachteten Zeitraum zwischen 2001 und 2005 deutlich zu.

Tabelle 1: Entwicklung der jährlichen Gipsabbaumengen [10, S. 29f]

		2001 [t]	2002 [t]	2003 [t]	2004 [t]	2005 [t]
Österreich	Dihydrat	790.478	847.117	889.727	920.809	911.162
	Anhydrit	138.745	122.085	113.823	117.318	106.032
	gesamt	929.223	969.202	1.003.550	1.038.127	1.017.194
Deutschland	gesamt	1.966.000	1.761.000	1.748.000	1.579.000	1.644.000
Italien	gesamt	1.557.882	1.531.477	1.783.903	1.615.287	-
Schweiz	gesamt	*300.000	*300.000	*300.000	*300.000	*300.000
Spanien	gesamt	10.920.000	11.218.410	11.366.375	12.533.972	12.500.000
USA	gesamt	16.300.000	15.700.000	16.700.000	17.200.000	*17.500.000
Iran	gesamt	8.347.471	8.338.725	11.979.513	14.394.537	*14.000.000
weltweit	gesamt	95.800.000	96.700.000	103.600.000	113.200.000	108.900.000
* geschätzter Wert						

Abbildung 2 zeigt die prozentuelle Aufteilung der weltweiten Naturgipsproduktion 2005 auf die Herkunftsländer. Ein Viertel der Weltproduktion stammt aus den EU31-Staaten¹. Der mit Abstand größte europäische Gipsproduzent ist Spanien. Der Anteil des in Österreich abgebauten Gipses beträgt ca. 0,9 % der weltweiten Produktion. Dies reicht aus um den heimischen Gipsbedarf abzudecken. Wie die Abbildung 3 zeigt, wurden 2005 um ca. 36.000 t Gips (Gipsstein und Stuckgips) mehr exportiert als importiert.

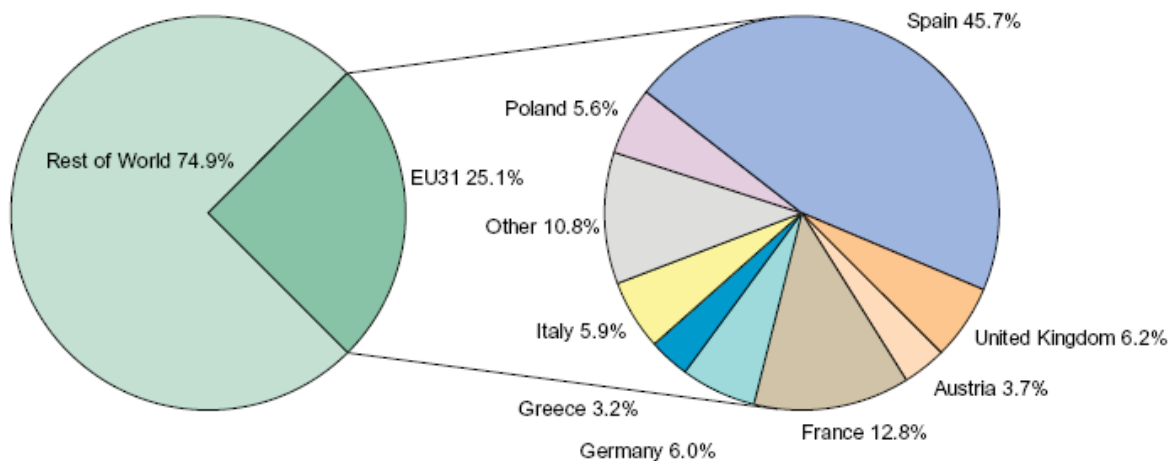


Abbildung 2: Anteil europäischer Staaten an der Gipsproduktion 2005 [11, S. 205]

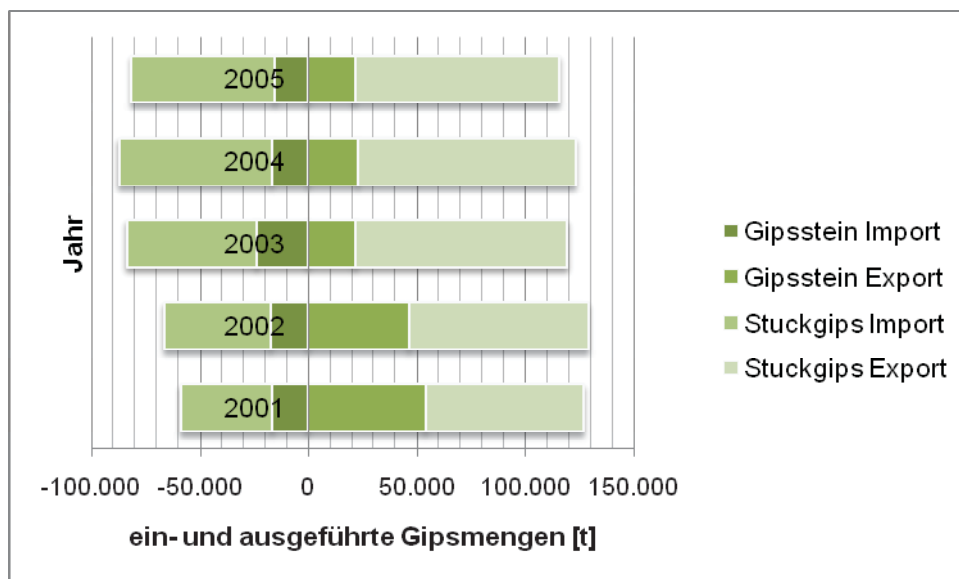


Abbildung 3: Österreichische Handelsbilanz für Gips [11, S. 206ff]

¹ EU31 umfasst die 27 EU-Mitgliedsstaaten, die Schweiz, Norwegen und die Beitrittskandidaten Kroatien und Türkei

Im Jahr 1997 betragen die natürlichen weltweiten Gipsvorkommen nach konservativen Schätzungen 2,3 Mrd. t, davon ca. 800 Mio. t in Europa, 700 Mio. t in den USA, 400 Mio. t in Kanada und 70 Mio. t in Mexiko. Bei einem jährlichen Verbrauch von etwa 100 Mio. t würde dieser Vorrat also bis zum Jahr 2020 erschöpft sein. Andere Prognosen aus dem Jahr 1998 sprechen von einer Reichweite von 30 bis 40 Jahren [7, S. 122]. Zur Reichweite der heimischen Gipsvorräte gibt es keine genauen Prognosen. Die Zeitdauer der Verfügbarkeit der bereits erschlossenen Lagerstätten errechnet sich aus dem Verhältnis des Rohsteinvorrats (in t) zum Jahresbedarf an Gips (in t/a) [9].

3.2 Gips aus technischen Prozessen

Calciumsulfat fällt auch bei bestimmten Prozessen als Nebenprodukt an. Dies geschieht meist durch Umsetzung von Calcium-Verbindungen mit Schwefelsäure oder Schwefeldioxid. Man unterscheidet dabei folgende Gipsarten [1, S. 7f]:

3.2.1 REA-Gips

REA-Gips fällt bei der Rauchgasentschwefelung von Verbrennungsanlagen an. Er wird dabei mit dem Kalk(stein)waschverfahren nach Oxidation mit Luft, Abtrennung der Gipskristalle, Waschen und Filtrieren gezielt gewonnen. REA-Gips ist feuchtes, feinteilig kristallines Dihydrat mit hoher Reinheit und stellt einen direkt verwertbaren Rohstoff dar. Aufgrund seiner Feuchtigkeit muss der REA-Gips vor dem Kalzinierungsprozess getrocknet werden [1, S. 7f].

Seit der Einführung der Rauchgasentschwefelung Mitte der 80er Jahre nimmt die Menge des anfallenden REA-Gipses stetig zu. So stieg der Anfall in Deutschland zwischen 1995 und 2005 um 103 % auf 7,7 Mio. t/a an [12, S. 21]. Bis 2007 wurden in Europa weit über 130 Mio. t REA-Gips in der Gipsindustrie verarbeitet, wodurch die natürlichen Ressourcen erheblich geschont werden konnten [13, S. 68].

Aufgrund der relativ geringen Nutzung kalorischer Kraftwerke zur Energiegewinnung in Österreich, ist auch die anfallende REA-Gipsmenge mit 130.000 t/a (Jahr 2004 inkl. Abfallverbrennung) vergleichsweise klein [14, S. 56]. In Tabelle 2 sind die Mengen an anfallendem REA-Gips ausgewählter österreichischer Kohle- und Ölkraftwerke und deren Verwertungs- bzw. Entsorgungswege aufgelistet. Der größte Teil (2002: 43.380 t) wird dabei in der Zementindustrie als Erstarrungsregler verbraucht [15, S. 139].

Tabelle 2: Aufkommen von REA-Gips einiger österreichischer Wärmekraftwerke

Kraftwerk	Menge in t	Art der Verwertung/Beseitigung
Kohlekraftwerke		
Voitsberg 3 (2002) ¹	47.299	Zement- und Putzmittelindustrie
Mellach (2003) ¹	13.202	Zementindustrie
Riedersbach 1+2 (2004) ²	5.276	Baustoffindustrie
Ölkraftwerke		
Simmering Block 3 (1999) ¹	7.745	Zementindustrie
Salzburg Mitte ¹	915	Deponierung
Salzburg Nord ¹	1.785	Deponierung
Neudorf/Werndorf (1999) ¹	14.147	Zementindustrie

¹ [15, S. 111]² [16, S. 34]

Ein weiterer Grund für den geringen Einsatz von REA-Gips in der österreichischen Gipskartonproduktion ist die meist große Entfernung zwischen den Verbrennungsanlagen und den Gipswerken. Während sich die Gipskartonindustrie in der Nähe der Gipslagerstätten in dünn besiedelten Gegenden angesiedelt hat, befinden sich die Anfallsorte für REA-Gips meist in der Nähe von Ballungszentren (siehe Abbildung 4). Da die Transportkosten sehr hoch sind, wird auf den Naturgips aus nahe gelegenen Lagerstätten zurückgegriffen [17, S. 22].

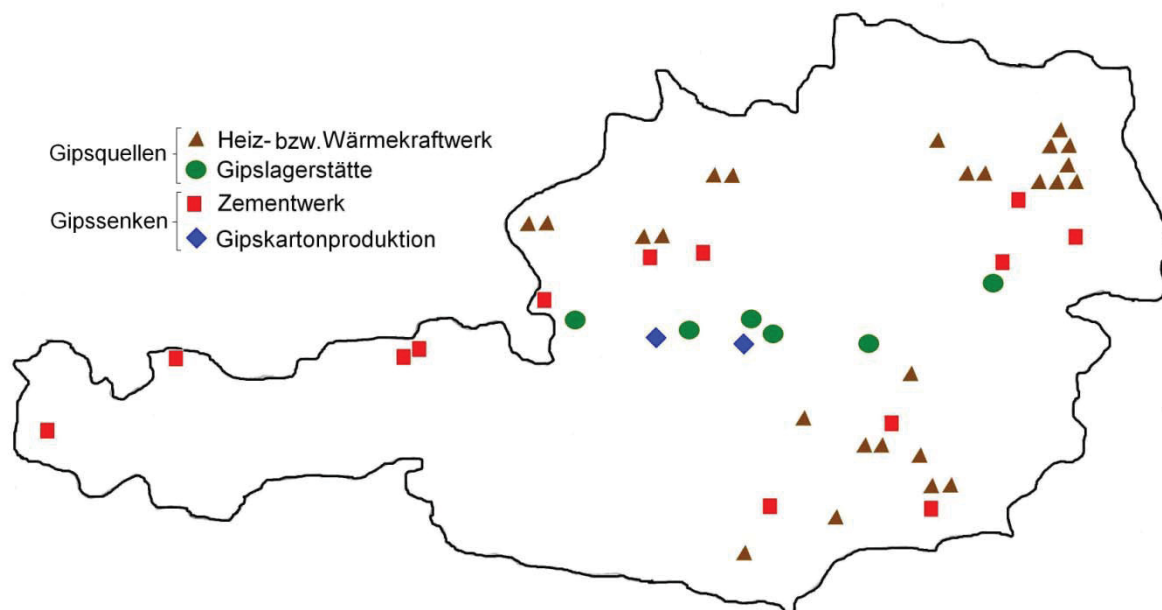


Abbildung 4: Quellen und Senken von Natur- und REA-Gips [18, S. 12ff], [19]

Der REA-Gips aus der Abfallverbrennung wird i.d.R. vermischt mit Schlacke und Zement als Schlackenbeton auf Reststoffdeponien abgelagert. Genaue Massenangaben sind daher

nicht vorhanden. Die Menge ist jedoch in Relation zum REA-Gipsanfall aus Kohle- und Ölkraftwerken sehr gering [15, S. 91].

Weltweit geht man von einer Steigerung der REA-Gipsproduktion in den nächsten Jahrzehnten aus. Begründet wird dies durch den Ausbau der Kapazitäten von Kohlekraftwerken in Entwicklungsländer und gleichzeitiger Zunahme von Rauchgasentschwefelungsanlagen. Weiters rechnet man mit einem verstärkten Anfall von REA-Gips aus Nicht-Kohle-Verbrennung (z.B. Müllverbrennung) [7, S. 123ff].

3.2.2 Sonstige Gipsarten

Neben der Rauchgasentschwefelung gibt es noch zwei weitere relevante Quellen für synthetisch erzeugtes Calciumsulfat, die wie folgt sind:

- Phosphogips: Phosphogips ist ein Nebenprodukt der Phosphorsäure-Herstellung im Nassverfahren und entsteht durch Reaktion der Phosphaterze mit Schwefelsäure. Er spielt jedoch aus wirtschaftlichen und technischen Gründen für die Gipsindustrie keine Rolle [1, S. 8].
- Fluoroanhydrit (synthetischer Anhydrit): Ähnlich wie der Phosphogips entsteht Fluoroanhydrit bei der Flusssäure-Herstellung durch Reaktion von Flussspat mit Schwefelsäure [1, S. 8]. Aufgrund der eingeschränkten Verarbeitbarkeit von kristallwasserfreiem Anhydrit in der Gipsindustrie, wird auch dem Fluoroanhydrit keine wirtschaftliche Bedeutung beigemessen.

Weitere Quellen für synthetischen Gips sind Prozesse wie die Herstellung von Caprolactam, Wein-, Zitronen- oder Oxalsäure oder die Aufbereitung von Dünnsäure aus der Titandioxid-Herstellung [1, S. 8].

4 Gipskartonplatten

Gipskartonplatten finden vor allem als Wand- und Deckenverkleidungen, als Beplankung für Montagewände und bei der Verlegung von Trockenunterböden Verwendung. Es handelt sich dabei um sogenannte Sandwich-Bauelemente [20, S. 2]. Sie bestehen aus einem Gipskern, dessen Flächen und Kanten mit Karton (ca. 160 g/m²) ummantelt sind. Die hohe Zugfestigkeit des Kartons sorgt in Verbindung mit der hohen Druckfestigkeit des Gipses für die nötige Stabilität der Platten. Um das Gewicht der Platten zu reduzieren, ist der Gipskern aufgeport. Die flächenbezogene Masse einer 12,5 mm dicken Gipskartonplatte beträgt ca. 8,5 kg/m². Feuerschutzplatten sind bei gleicher Dicke mit ca. 10 kg/m² etwas schwerer [21], [1, S. 25ff].

Eine Standard-Gipskartonbauplatte ist 2 m lang und 1,25 m breit. Die Platten sind in Dicken von 8 bis 30 mm erhältlich, wobei die gängige Dicke 12,5 mm beträgt [21]. Die Wärmeleitfähigkeit λ liegt bei 0,021 W/m°C, was etwa einem Zehntel des Wertes für Hartholz ($\lambda = 0,2$ W/m°C) entspricht [2, S. 26]. Der Preis einer 12,5 mm dicken Gipskartonbauplatte beträgt 3,19 €/m², Feuerschutzplatten kosten 3,39 €/m² ¹).

Die hygroskopische Wirkung von Gips bedingt eine hohe Wasseraufnahme der Platten in feuchter Umgebung. Lagert man sie zwei Stunden in Wasser (Prüfung nach DIN EN 520), so nehmen nicht imprägnierte Gipskartonplatten 30 bis 50 % des Eigengewichts an Wasser auf. Die darauffolgende Austrockenzeit beträgt 70 Stunden [1, S. 30]. Diese Eigenschaft macht Gipskarton für den Einsatz im Außenbereich, in Nasszellen oder im Kellerbereich nur eingeschränkt verwendbar.

4.1 Typen

Je nach Verwendungszweck gibt es verschiedene Ausführungen von Gipskartonplatten. Es werden dabei folgende Typen unterschieden [1, S. 26]:

- Bauplatten sind die Standardplatten und werden zum Befestigen auf Unterkonstruktionen für Wand- und Deckenbekleidungen und für die Herstellung von Gipsverbundplatten verwendet.
- Feuerschutzplatten finden in den gleichen Bereichen wie Bauplatten Verwendung, sind jedoch brandbeständiger. Gipskarton-Feuerschutzplatten, deren Gipskern durch die Einbringung von Glasfasern armiert ist, entsprechen bei einlagigem Einbau der Brandwiderstandsklasse F 30 (brandhemmend) und sind somit für den Dachgeschoßausbau zulässig (siehe Abbildung 5). Bei zweilagigem Einbau der Feuerschutzplatten wird auch die Klasse F 60 (hochbrandhemmend) erreicht [22, S. 92].

¹ Preis für Einzelplatten bei Hornbach am 23.5.2007



Abbildung 5: Verwendung von Gipskartonplatten im Dachgeschoßausbau

- Imprägnierte Bau- und Feuerschutzplatten zeichnen sich durch eine verzögerte Wasseraufnahme aus.
- Putzträgerplatten kommen vorwiegend als Trägerplatten mit Unterkonstruktionen für Putze zum Einsatz.

In Tabelle 3 sind die normierten Kurzbezeichnungen, die Karton- und Aufdruckfarbe der verschiedenen Gipskartonplatten-Typen aufgelistet.

Tabelle 3: Gipskartonplatten-Typen und deren Bezeichnungen [1, S. 25]

	Kurzbezeichnung für Gipsplatten nach		Kartonfarbe	Aufdruckfarbe der Kennzeichnung
	DIN 18180	DIN EN 520		
Bauplatten	GKB	Typ A	weiß bis gelblich Rückseite: grau	blau
Feuerschutzplatten	GKF	Typ DF		rot
Bauplatten (imprägniert)	GKBI	Typ H2	grünlich	blau
Feuerschutzplatten (imprägniert)	GKFI	Typ DFH2		rot
Putzträgerplatten	GKP	Typ P	grau	blau, rot

Weiters können Gipskartonplatten z.B. mit plastischen Massen, Faservlies oder Folien beschichtet werden. So kann etwa Aluminiumfolie für dampfsperrende Zwecke oder Bleifolie zur Abschirmung von Röntgenstrahlen auf Gipskartonplatten aufgebracht werden. Von Gipskartonplatten-Verbundelementen spricht man bei Kombinationen aus Gipskartonplatten und Dämmstoffplatten aus Schaumkunststoff oder Mineralwollgedämmstoff [1, S. 27].

4.2 Marktsituation

Jährlich werden in Österreich 28 Mio. m² Gipskartonplatten verkauft. Der Großteil davon (ca. 15 Mio. m² bzw. 55 %) stammt von der Fa. Knauf (siehe Abbildung 6). Die Fa. Rigips ist mit einem Marktanteil von ca. 36 % der zweitgrößte Anbieter. Beide Produzenten sind im Gegensatz zu anderen Mitbewerbern sogenannte Systemanbieter, d.h., dass sie außer den Gipskartonplatten auch Zubehör wie Spachtelmassen, Putze und Profile vertreiben. Der verbleibende Marktanteil von ca. 9 % teilt sich auf sonstige Anbieter wie etwa Lafarge auf. Der Vertrieb erfolgt hauptsächlich über Baumärkte, wobei die jeweiligen Anbieter unterschiedliche Handelsketten beliefern [21].

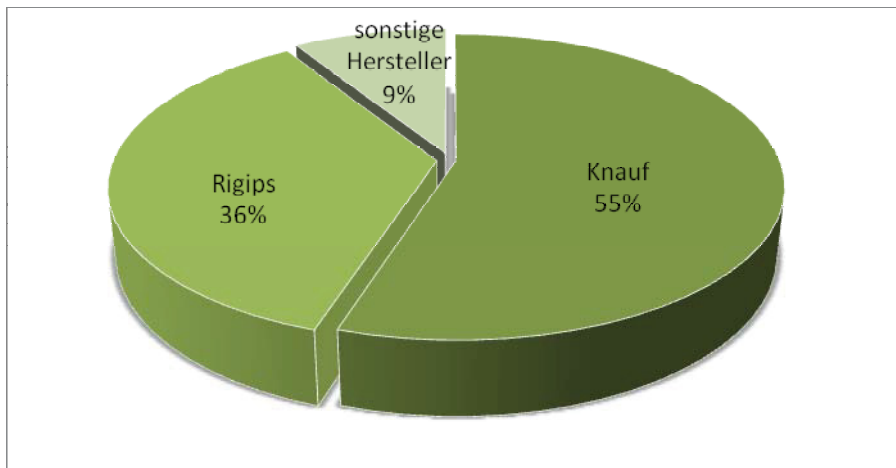
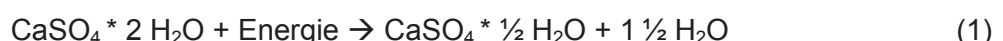


Abbildung 6: Marktanteile bei Gipskartonplatten in Österreich

4.3 Herstellung

Für die Herstellung der Gipskartonplatten wird in Österreich i.d.R. Naturgips verwendet [21]. Auf die Rohstoffversorgung des Standorts Weißenbach der Fa. Knauf wird im Kapitel 5.1 näher eingegangen. Bei der folgenden Beschreibung des Herstellungsprozesses beziehen sich die Buchstaben in Klammern auf Beschriftungen in der Abbildung 7.

Nachdem der Rohstein durch Sprengung oder Abfräsen gewonnen wurde, werden die Gipsbrocken in einem Brecher zerkleinert und auf einer eingehausten Halde gelagert. Da jedem CaSO₄-Molekül zwei Moleküle Kristallwasser anhaften, spricht man von einem Dihydrat. Der Großteil dieses Kristallwassers wird beim folgenden Brennen (Kalzinierung bzw. Dehydratation) in einem Drehofen bei ca. 150°C ausgetrieben. Es bleibt Stuckgips (Halbhydrat) mit einem Kristallwasseranteil von 3 % übrig. Der Stuckgips wird in einer Mühle auf 0,2 mm gemahlen und in Silos gelagert [1, S. 12], [21].



Vor der Gipskartonplattenproduktion wird der Stuckgips mit Wasser zu Gipsbrei angemacht (Rehydratation). Dadurch erlangt der gebrannte Gips durch Bildung eines kristallinen Gefü-

ges die nötige Festigkeit [1, S. 6]. Zur Verbesserung der Produkteigenschaften werden dem Gipsbrei verschiedene Zuschlagstoffe zugegeben (A) [21]:

- Schnellbinder reduzieren die Abbindezeit, die durch die Länge der Bandstraße limitiert ist. Die benötigte Menge an Schnellbinder wird durch regelmäßiges Überprüfen der Aushärtezeit bestimmt.
- Glasfasern erhöhen die Brandbeständigkeit. Sie werden nur bestimmten Chargen beigemischt.
- Karton (als Pulpe zugegeben) verringert die Härte der Gipskartonplatten. Dies verbessert die spätere Bearbeitbarkeit.
- Hydrophobiermittel verzögern die Wasseraufnahme der fertigen Platten [7, S. 126].

Der Gipsbrei wird auf den Karton aufgebracht und sofort mit der zweiten Kartonschicht abgedeckt (B). Auf diese Weise entsteht eine Endlosgipskartonplatte, die nun auf der Bandstraße durch das Abbinden des Gipsbreis zu festem Dihydrat aushärtet (C). Am Ende der Bandstraße schneidet eine Schere die Platten in der gewünschten Länge vom Strang ab (D) [21].

Zur weiteren Trocknung durchfahren die Platten in einem Mehretagentrockner drei verschiedene Temperaturzonen, wobei die Maximaltemperatur von 370°C in der mittleren Zone erreicht wird (E). Eine zu starke Erwärmung der Platten (über 100°C im Kern) ist zu vermeiden, da sich durch austretende Dampfblasen der Karton ablösen kann. Während der Trocknung entweichen mit 1 m³ Abgas ca. 4-5 l Wasser [21].

Nachdem die Gipskartonplatten gesäumt, d.h. mit einer Säge auf die exakte Länge zurechtgeschnitten wurden (F), werden sie gestapelt und für den Versand zum Kunden verpackt (G) [21].

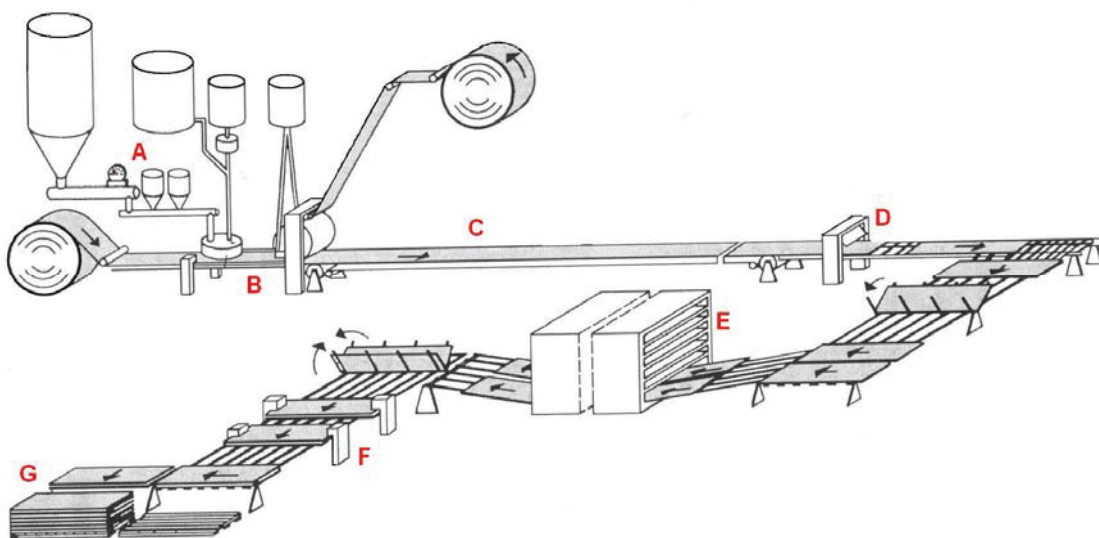


Abbildung 7: Gipskartonplatten-Produktionsablauf [1, S. 32]

4.4 Verbaute Mengen

Es wurden keine Daten zu der Menge an verbauten Gipskartonplatten in Österreich, oder im Speziellen in der Steiermark, gefunden. Daher wurde von vorhandenen Studien für anderen Bundesländer oder Nachbarstaaten auf die Situation in Österreich bzw. der Steiermark geschlossen.

Schätzungen zufolge sind im Baubestand der Schweiz ca. 3 Mio. t Gipsplatten (einschließlich Vollgips- und Gipsfaserplatten) verbaut. Diese Menge wächst jährlich um etwa 250.000 t an [23, S. 14]. Geht man von einer ähnlichen Baustruktur und dem Bevölkerungsverhältnis zwischen der Schweiz und Österreich von 1:1,1 aus, so sind in Österreich ca. 3,3 Mio. t Gipsplatten verbaut.

Abbildung 8 zeigt die Gipsbilanz für das Bundesland Oberösterreich, das von der Einwohnerzahl und der Anzahl der Wohnbauten in etwa mit der Steiermark vergleichbar ist. Zur Hochrechnung auf eine österreichweite Bilanz sollten die Daten mit dem Faktor 6 multipliziert werden. Die Daten stammen aus Mitte der 90er Jahre. Auffallend dabei ist, dass lediglich für den Inputstrom einigermaßen genaue Angaben möglich waren, da die Daten dafür direkt von der Baustoffindustrie stammten. Für das Lager und den Outputstrom gibt es hingegen nur Schätzwerte mit sehr hoher Streuung. Es ist zu berücksichtigen, dass die Daten die Mengen an reinem Gips angeben. Da eine Gipskartonplatte zu ca. 80 % aus Gips besteht, sind die Werte in der ersten Zeile der Abbildung 8 mit dem Faktor 1,25 zu multiplizieren um die Menge an Gipskartonplatten zu errechnen. Unter diesen Annahmen befinden sich im steirischen Baubestand 450.000 bis 2 Mio. t Gipskartonplatten.

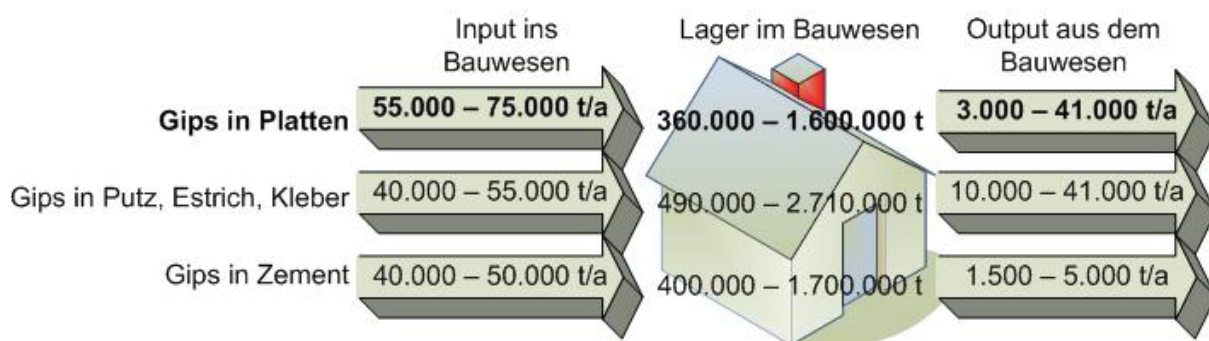


Abbildung 8: Gipsbilanz für Oberösterreich [7, S. 152f]

Auch wenn die obenstehenden Daten sehr große Schwankungsbreiten aufweisen, verdeutlichen sie, dass der Input ins Bauwesen den Output aus dem Bauwesen bei weitem übersteigt. Der Gipsstrom befindet sich also in keinem Fließgleichgewicht. Dies führt zu einem stetigen Lageraufbau des Gipskartonbestandes [7, S. 156].

Im Wohnbau werden zunehmend Massivbauweisen durch Gipstrockenbausysteme ersetzt. Es wird dabei mit einer Verdoppelung der im Neu- und Umbau verwendeten Gipsmengen

innerhalb der nächsten zehn Jahre gerechnet [23, S. 14]. Eine Faustregel besagt, dass in einem normalen Wohnhaus etwa eine Tonne an Trockenbauprodukten verbaut sind [24].

Auch der Trend zum Bau von Fertighäusern wirkt sich auf den Verbrauch von Gipskartonplatten aus. Wurden 1980 in Österreich noch 1.300 Fertighäuser gebaut, so waren es 2002 schon über 5.600, was einem Anteil von 35,7 % aller in diesem Jahr errichteten Wohnbauten entspricht. 84 % aller Fertighäuser werden in Holzrahmenbauweise ausgeführt. Die Wandelemente bestehen dabei aus einem Rahmen aus Kanthölzern, der mit Dämmmaterial gefüllt und beidseitig mit Gipskarton-, Gipsfaser- und/oder Spanplatten geschlossen wird [25]. Zurzeit gehen jährlich ca. 1,25 Mio. m² Gipskartonplatten in die Fertighausindustrie. 80 % davon stammen von der Fa. Knauf [26].

4.5 Entsorgung bzw. Verwertung

Nach der Verweilzeit der gipshaltigen Baustoffe im Baubestand, die für Gipskartonplatten bei durchschnittlich 40 Jahren liegt [7, S. 144], fallen sie als Gipsabfall zur Entsorgung an. Da nur die wenigsten Gipsabfälle sortenrein vorliegen und daher genau erfasst werden können, gibt es zum jährlichen Aufkommen keine konkreten Zahlen. Schätzungen zufolge fallen in der Steiermark jährlich 35.000 bis 40.000 t Gipsabfälle an [27]. Der weltweite Anfall wird im Vergleich dazu auf 10 Mio. t/a geschätzt [23, S. 16].

Zur Entsorgung bzw. Verwertung dieser Mengen stehen zurzeit folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

4.5.1 Deponierung

Da zurzeit nur die Verwertung von Gipsabfällen mit geringem Verschmutzungsgrad möglich ist, wird der Großteil der anfallenden Gipsabfälle auf Baurestmassendeponien abgelagert. Dieser Weg stellt neben einem ökologischen Risiko auch einen großen wirtschaftlichen Verlust dar.

4.5.1.1 Deponieverordnung

Im § 4 der Deponieverordnung 2008 wurden folgende Deponieklassen und -unterklassen festgelegt:

1. Bodenaushubdeponie;
2. Inertabfalldeponie;
3. Deponie für nicht gefährliche Abfälle:
 - a) Baurestmassendeponie,
 - b) Reststoffdeponie,
 - c) Massenabfalldeponie;
4. Deponie für gefährliche Abfälle.

Für Gipsabfälle ist vor allem die Deponierung auf Baurestmassendeponien relevant. Im Anhang 2 der Deponieverordnung sind Gipskartonplatten als eine von mehreren Abfallarten, die ohne analytische Untersuchung angenommen und abgelagert werden dürfen, aufgelistet. In diesem Punkt unterscheidet sich die aktuelle Fassung der Verordnung von der Deponieverordnung 1996, nach der Gipskartonplatten nur aufgrund einer inoffiziellen Gleichstellung mit „Mauersteinen auf Gipsbasis“ auf Baurestmassendeponien deponiert werden durften.

Weisen die Gipsabfälle einen Anteil an Metall, Kunststoff, Holz oder anderen organischen Materialien von insgesamt mehr als 10 Volumsprozent auf, so ist eine analytische Untersuchung zur grundlegenden Charakterisierung durchzuführen. Die Abfälle sind daraufhin entsprechend dem Analyseergebnis einer Deponieklasse bzw. -unterklasse zuzuordnen. Wie im folgenden Kapitel veranschaulicht wird, käme bei dieser Vorgehensweise aufgrund von diversen Grenzwertüberschreitungen eine Ablagerung von Gipskartonplatten auf einer Baurestmassendeponie nicht in Frage.

4.5.1.2 Problematik

Die Löslichkeit von Dihydrat beträgt bei 23°C in reinem Wasser 2,05 g CaSO₄/l bzw. 2,60 g Dihydrat/l [1, S. 10]. D.h. bei einem Flüssig-Feststoffverhältnis von 10 l/kg TM gehen von 1 kg Gips 26 g CaSO₄-Dihydrat in Lösung, davon sind 14,5 g Sulfat. Die unten angeführten Ergebnisse von Elutionsversuchen mit Gipskartonplatten zeigen nur geringe Abweichungen vom Wert für reinen Gips.

In der Praxis wird die Löslichkeit von der Zusammensetzung des Sickerwassers, genauer gesagt von den darin gelösten Salzen beeinflusst. Alkali- und Magnesiumchloride erhöhen beispielsweise die Löslichkeit von Gips. Besonders löslichkeitssteigernd wirken Säuren oder Ammoniumacetat, wodurch das Deponiesickerwasser in der „sauren Phase“ auf Gipsabfälle sehr aggressiv wirkt [28, S. 150].

In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die Analyseergebnisse zweier ungebrauchter Gipskartonprodukte der Fa. Knauf den dazugehörigen Deponiegrenzwerten für das Auslaugverhalten der Abfälle gegenübergestellt. Die Elutionsversuche wurden, wie auch in der Deponieverordnung vorgeschrieben, entsprechend der DIN 38414-S4 durchgeführt. Die auf die Trockensubstanz bezogenen Messwerte in Tabelle 5 (Spalte 4 und 5) wurden mit folgender Formel aus den Analysewerten errechnet:

$$\text{Messwert} \left[\frac{\text{mg}}{\text{kg TS}} \right] = \frac{\text{Messwert} \left[\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right] \cdot 0,08 \text{ l Einwaage} \cdot 100\%}{0,08 \text{ kg Einwaage} \cdot 99,2\% \text{ Trockenrückstand}} \quad (2)$$

Rot markierte, kursiv gedruckte Grenzwerte weisen auf eine Überschreitung des Grenzwertes von zumindest einem Messwert hin. Es wird deutlich, dass Gipskartonabfälle aufgrund des hohen Abdampfrückstandes und Sulfatwertes eigentlich für die Ablagerung auf Baurestmassendeponien nicht geeignet sind. Selbst der erhöhte Grenzwert von 14.000 mg/kg für

Baurestmassendeponien die nur für gipshaltige Abfälle zugelassen sind (Monodeponien) wird bei der Ablagerung reiner Gipskartonabfälle überschritten. Entsprechend den Analyseergebnissen sind die beiden untersuchten Gipsbaustoffe auf einer Massenabfalldeponie abzulagern.

Tabelle 4: Vergleich der Analysenwerte von Gipsabfällen mit Deponiegrenzwerten – Teil 1

	Einheit	Messwert		Deponiegrenzwert		
		Gipskarton-Decke	GKF-Platte	Inertstoff	Baurestmassen	Massenabfall
Datenquelle		[28, S. 59 ff]		[3, Anlage 1]		
Wassergeh.	% FS	0,8	0,8	-	-	-
Geruch	-	leicht muffig	säuerlich	-	-	-
pH-Wert	-	7,2	7,4	6,5 bis 12	6 bis 13	6 bis 13
Leitfähigkeit	mS/m	230	215	150	300	-
Alkalität	mval/l	0,4	0,4	-	-	-

Tabelle 5: Vergleich der Analysenwerte von Gipsabfällen mit Deponiegrenzwerten – Teil 2

	Messwert				Deponiegrenzwert		
	Gipskartondecke	GKF-Platte	Gipskartondecke	GKF-Platte	Inertstoff	Baurestmassen	Massenabfall
Datenquelle	[28, S. 59 ff]		Ergebnis Formel 2		[3, Anlage 1]		
Einheit	mg/l		mg/kg TS				
ADR	2500	2400	25.201	24.193	- ¹	25.000	100.000
CSB	155	100	1.562	1.008	-	-	-
Sulfat	1600	1500	16.129	15.120	1.000 ^{1,2}	6.000 ³	25.000
Eisen	0,02	0,03	0,2	0,3	⁴	-	-
Aluminium	<0,1	0,1	<1,0	1,0	⁴	-	20
Barium	0,05	0,06	0,5	0,6	20	20	300
Chrom ges.	0,01	0,01	0,1	0,1	0,5	2	70
Nickel	0,04	0,08	0,4	0,8	0,4	2	40
Zink	0,05	0,01	0,5	0,1	4	20	200
Cadmium	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,04	0,5	5
Kobalt	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1	2,0	50
Kupfer	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2	10	100
Blei	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,5	2	50
Zinn	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	2	10	200

¹ Statt der Grenzwerte für Chlorid und Sulfat kann ein Grenzwert für den ADR von 4000 mg/kg TM angewendet werden.

² Wird bei einem Abfall der Grenzwert von 1000 mg/kg TM nicht eingehalten, ist eine Annahme dennoch zulässig, wenn die Auslaugung die folgenden Werte nicht überschreitet: 1500mg/l als C₀ bei L/S = 0,1 l/kg und 6000 mg/kg bei L/S = 10 l/kg.

³ Für gipshaltigen Bauschutt und andere gipshaltige Abfälle, sofern letztere auf einem Monokompartiment angelagert werden, ist eine Überschreitung bis zu 14.000 mg/kg Sulfat unter der Bedingung zulässig, dass die Ca-Konzentration im Eluat mindestens die 0,43-fache ermittelte Sulfatkonzentration erreicht; in diesen Fällen ist auch eine Überschreitung des Grenzwertes für die elektrische Leitfähigkeit zulässig.

⁴ Der Wert ist zu bestimmen und in die Beurteilung des Deponieverhaltens mit einzubeziehen.

Ein Nachteil hoher Sulfatkonzentrationen im Deponiekörper ist das sogenannte Sulfat- bzw. Gipstreiben [7, S. 130]. Beim Kontakt von Sulfat mit Beton bzw. Mörtel bildet sich, wie in folgender Reaktion ersichtlich, Tricalciumsulfoaluminathydrat (Ettingrit) [28, S. 140].



Durch den Kristallisationsdruck der Ettingritbildung wird der Beton gedehnt, bis schließlich das Gefüge gesprengt wird. Dies führt zu Korrosionen an Betonteilen des Deponiekörpers, wie etwa Sickerwasserschächten. Wird Gips auf Baurestmassendeponien gemeinsam mit Beton abgelagert, so kann die Ettingritbildung Sulfatmissionen aus dem Deponiekörper vermeiden, allerdings muss für eine vollständige Bindung der Sulfationen der Gipsanteil im Vergleich zum Betonanteil sehr gering (ca. 1 %) sein [28, S. 140].

Ein weiteres Problem, dass die Deponierung von Gipsabfällen mit sich bringt, ist die Entstehung von Schwefelwasserstoff (H₂S). Dies geschieht durch die Sulfatmung, bei der anaerobe Bakterien (z.B. Desulfovibrio oder Desulfotomaculum) Sulfat zu Schwefelwasserstoff reduzieren [29, S. 228]. Schwefelwasserstoff ist ein toxisches, sehr geruchsintensives Gas, welches auf Deponien aufgrund der Verdünnung zwar keine Gesundheitsgefährdung darstellt, jedoch in unmittelbarer Nähe der Deponie zu Geruchsbelästigung führen kann. Die bakterielle Bildung von Schwefelwasserstoff wird durch die gemeinsame Ablagerung der Gipsabfälle mit biologisch abbaubaren Abfällen, wie es u.a. auf einer Massenabfalldepone der Fall wäre, verstärkt [28, S. 166].

Neben dem Auslaugverhalten der Gipsabfälle, ist auch der Verbrauch an Deponievolumen zu berücksichtigen. Die steirischen Baurestmassendeponien weisen eine Restkapazität von insgesamt ca. 3,8 Mio. m³ (Bezugsjahre 2003 bis 2007) [30], [31] auf. Allein die Menge an verbauten Gipskartonplatten in der Steiermark (0,45 bis 1,78 Mio. m³)¹ würde ausreichen, um je nach Schätzung bis zu 47 % des derzeit freien Volumens zu füllen.

Im Fall der Fa. Cemex-Bruck stehen der Restkapazität der firmeneigenen Baurestmassendeponie von 265.000 m³ eine jährliche Menge von 15.000 bis 20.000 t (entspricht nach der Verdichtung 19.000 bis 22.000 m³) gesammelten Gipsabfällen gegenüber [27].

Trotz der angeführten Probleme ist für der Deponierung von Gipsabfällen nur ein relativ geringer Altlastenbeitrag von € 8,00 pro angefangener Tonne [32, § 6 (1)] zu bezahlen.

¹ Stand: Mitte 90er Jahre, Annahmen: gleicher Baubestand in Oberösterreich und der Steiermark; Dichte von Gipsabfällen: komprimiert 800-900 kg/m³. Basisdaten siehe Seite 17

4.5.2 Bestehende Sammel- und Recyclingprogramme

In Europa gibt es einige Unternehmen, die Gipsabfälle sammeln um sie für die Rückführung in die Gipskartonproduktion aufzubereiten [33]. Alle nachfolgend beschriebenen Aufbereitungstechniken verlangen Inputmaterial mit sehr geringem Anteil an Störstoffen und unterscheiden sich in dieser Hinsicht vom Ziel des vorliegenden Projektes wesentlich.

4.5.2.1 Gypsum Recycling International A/S

Der Hauptsitz der Firma Gypsum Recycling International ist in Dänemark. Es gibt Tochtergesellschaften in Norwegen, Schweden, den Niederlanden, Irland, Großbritannien und den Vereinigten Staaten von Amerika. Die Kunden von Gypsum Recycling International sind entweder Abfallsammelfirmen oder gipsverarbeitende Unternehmen, die Gypsum Recycling International mit der Sammlung und Aufbereitung von Gipsabfällen beauftragen und sich dabei verpflichten, das produzierte Recyclingmaterial abzunehmen [34].

Gypsum Recycling International baut in den jeweiligen Regionen ein Gipsabfallsammelsystem auf. Dafür werden Sammelpunkte (z.B. bei öffentlichen Abfallsammelzentren) betrieben, an denen Gipsabfälle mit einem maximalen Verunreinigungsgrad von 3 % angenommen und in speziellen Containern gesammelt werden. Mit LKWs werden die Abfälle von den Sammelpunkten zu Aufbereitungshallen befördert, wo sie bis zur Aufbereitung mit einer mobilen Recyclinganlage gelagert werden [34].

Die Recyclinganlage ist so konzipiert, dass sie (je nach Ausführung) auf einem oder zwei LKWs transportiert werden und so an verschiedenen Standorten eingesetzt werden kann [34]. Die Abfälle werden zuerst durch Walzen oder Hammervorrichtungen zu 40 bis 50 mm großen Stücken zerkleinert und in der nachfolgenden Walzenmühle gemahlen. Die Trennung des Gipses von den Störstoffen erfolgt in einer perforierten Trenntrommel, die drei Abschnitte mit unterschiedlichen Maschenweiten aufweist. Magnetische Störstoffe werden mittels Magnetabscheider abgetrennt. Der letzte Schritt ist eine Trocknung des Gipses mit Mikrowellen, Infrarot-Strahlung oder Gasbrennern [35, S. 3ff].

Das Produkt ist ein sehr reines Recyclingmaterial mit einem hohen Feinanteil (70 % unter 1 mm). Die maximale Korngröße beträgt 13 mm. Das Material wird schließlich zu den vertraglich gebundenen Abnehmern geliefert [34].

4.5.2.2 New West Gypsum Recycling Inc.

New West Gypsum Recycling Inc. ist ein kanadisches Unternehmen mit Niederlassungen in den Vereinigten Staaten von Amerika, Großbritannien und Frankreich. Ähnlich wie Gypsum Recycling International bereitet New West Gypsum Recycling Gipsabfälle mit mobilen Anlagen auf [24].

Die Anlage kann sowohl trockene als auch nasse Gipsabfälle verarbeiten. Im ersten Schritt werden die Gipsabfälle durch Handklauben von Metallteilen, Plastik und sonstigen groben

Störstoffen gereinigt. Danach erfolgt mit einem Magnetabscheider die Abtrennung von Eisenbestandteilen. Die weiteren Aufbereitungsschritte geschehen in einem abgeschlossenen Bereich und sind bisher noch nicht bekannt gegeben worden [24].

4.5.2.3 GFR mbH

Die Gesellschaft für die Aufbereitung und Verwertung von Rohstoffen (GFR) nahm 2007 in Deutschland im Rahmen eines zweijährigen Pilotvorhabens eine Gipsabfallaufbereitungsanlage mit zwei Annahmestellen in Betrieb. Dabei sollen jährlich bis zu 5.000 t Gipsabfälle aus Neu- und Rückbau verarbeitet werden[36].

Die Abfälle werden von den zuliefernden Entsorgungsbetrieben vorsortiert. Technische Details zum Aufbereitungsprozess wurden nicht bekanntgegeben [36].

4.5.2.4 Rigips AG

Rigips ist in Österreich nach Knauf der zweitgrößte Produzent von Gipskartonplatten. Der Produktionsstandort in Bad Aussee ist nur ca. 30 km vom Knauf-Werk in Weißenbach bei Liezen entfernt.

Rigips hat 2007 das Sammel- und Aufbereitungssystem RiCycling eingeführt. Die Gipskartonabfälle werden an Baustellen oder sonstigen Anfallstellen in speziellen Big-bags gesammelt und später auf den leeren Gipskartonpaletten wieder abtransportiert. Nach der Störstoffentfrachtung wird das Recyclingmaterial wieder für die Produktion von Rigips-Platten verwendet [37], [38, S. 3].

Das Aufbereitungsverfahren ist nicht bekannt. Es werden jedoch nur Gipsabfälle mit geringem Fremdstoffanteil angenommen. Gipsabfälle mit Kunststoff, Isoliermaterial, Metallprofilen, Holz oder anderen Störstoffen außer Nägel, Schrauben und Tapeten können nicht verarbeitet werden [38, S. 2].

4.5.3 Alternative Verwertungsmöglichkeiten

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit verschiedener Verwertungsmöglichkeiten für Gipsabfälle diskutiert:

- Bergversatz: Als Bergversatz versteht man die Verwendung von Abfällen zur Verfüllung ehemaliger Bergwerksstollen zur Gewährleistung der Standsicherheit. Da Gipskartonabfälle jedoch über einen brennbaren Anteil (> 5 % Organik) und mangelnde geomechanische Eigenschaften verfügen, sind sie (im Gegensatz zu REA-Gips) als Versatzmaterial nicht geeignet [39, S. 12].
- Düngemittelproduktion: Zermahlte Gipsabfälle können in der Landwirtschaft zur Düngung von Kulturböden mit Schwefel eingesetzt werden. Die Nachfrage ist jedoch gering [39, S. 12].

- Bergbauliche Rekultivierung: Das stark alkalische Milieu von Kaliabraumhalden kann durch das Aufbringen von aufbereiteten Gipsabfällen neutralisiert werden. Dadurch wird die Entwicklung einer Vegetation ermöglicht [39, S. 12]. Da es allerdings in Österreich keinen Abbau von Kalisalzen gibt, ist diese Verwertungsmöglichkeit nicht relevant.
- Müller-Kühne-Verfahren: Bei diesem Verfahren wird das Calciumsulfat bei Temperaturen über 700°C reduzierend in Calciumoxid (CaO) und Schwefeldioxid (SO₂) gespalten. Das Schwefeldioxid kann daraufhin zu Schwefelsäure umgewandelt und das Calciumoxid zu Zementklinker gebrannt werden [39, S. 12], [20, S. 4].

5 Sammler/Aufbereiter und Verwerter

Wie einleitend erklärt und in Abbildung 9 dargestellt, bezieht die österreichische Gipsindustrie zurzeit den Rohstoff (abgesehen von einem sehr geringen Anteil an intern recyceltem Produktionsabfall) zur Gänze aus natürlichen Ressourcen. Hingegen werden Gipsabfälle aus der Bauwirtschaft ohne Rückgewinnung des Wertstoffes Gips auf Deponien entsorgt.

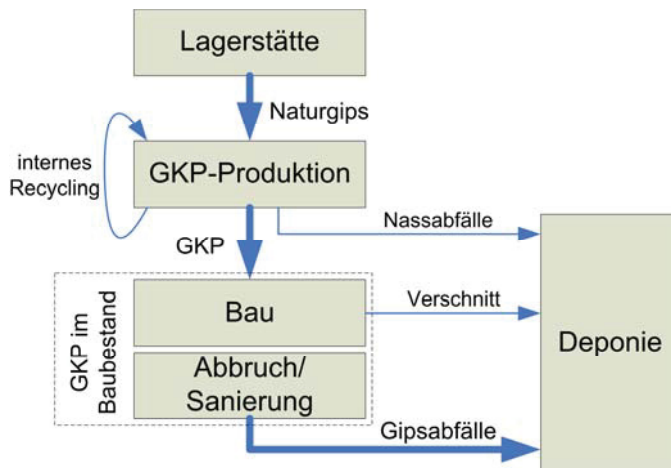


Abbildung 9: Bisherige Handhabung von Gipsabfällen

Das Ziel dieses Projekts liegt nun in der Kreislaufführung von Gips. Dies soll durch die Zusammenarbeit eines Abfallsammelunternehmens (Fa. Cemex) und eines Produzenten von Gipskartonplatten (Fa. Knauf) ermöglicht werden. In Abbildung 10 ist dieser angestrebte Lebenszyklus für Gips in seinen verschiedenen Erscheinungsformen als Rohstoff, Produkt „Gipskartonplatte“ (GKP), Abfall und Recyclingmaterial dargestellt. Die einzelnen Lebensabschnitte sind den jeweils zuständigen Unternehmen zugeordnet. Die Gewinnung von Naturgips und die Produktion von Gipskartonplatten geschehen durch die Fa. Knauf. Die Gipskartonplatten gelangen über den Handel in die Bauwirtschaft und werden in Gebäuden verbaut. Der dabei anfallende Verschnitt wird entweder sortenrein gesammelt oder gelangt mit Bauschutt oder Baustellenabfällen auf die Deponie. Nach durchschnittlich 40 Jahren gelangt der enthaltene Gips durch Abbruch- oder Sanierungstätigkeiten als Abfall wieder in den Kreislauf. Sowohl Bau, als auch Abbruch bzw. Sanierung werden von außenstehenden Firmen oder Personen (hier als „Dritte“ bezeichnet) durchgeführt. Die Fa. Cemex ist schließlich für die gezielte Sammlung und Aufbereitung der Gipsabfälle verantwortlich, wobei die Gipsabfälle auch durch andere Abfallsammelunternehmen zur Aufbereitung angeliefert werden können. Wird nicht nutzbarer Gips auf Deponien der Fa. Cemex entsorgt, so fällt auch diese Tätigkeit in die Zuständigkeit von Cemex. Der Kreislauf schließt sich durch die Einbringung des Recyclingmaterials in die Gipskartonplattenproduktion.

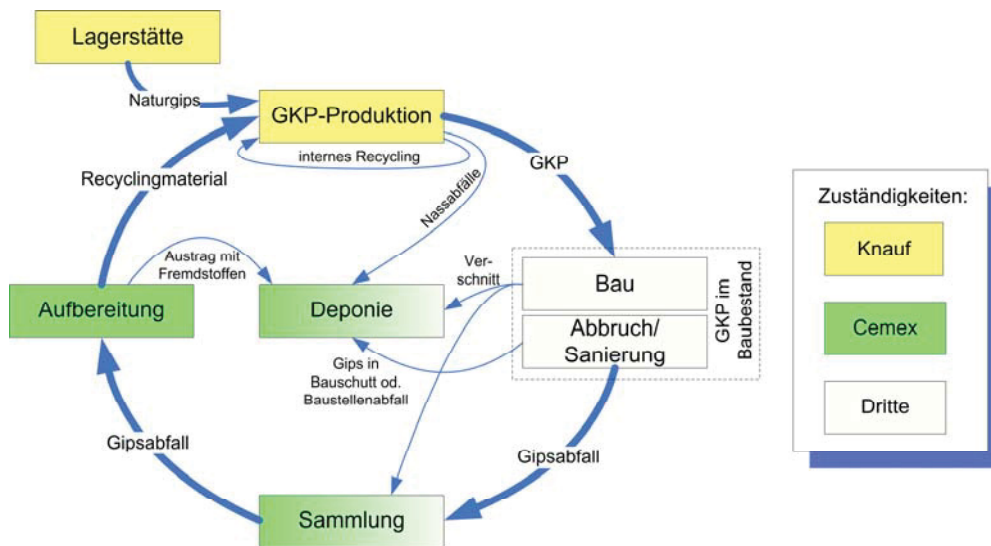


Abbildung 10: Angestrebter Gipskreislauf

In den folgenden Kapiteln wird auf die beteiligten Firmen Knauf und Cemex, deren Ausgangssituation und Nutzen an der Zusammenarbeit eingegangen.

5.1 Firma Knauf

Die Fa. Knauf ist ein weltweit agierendes Unternehmen mit Hauptsitz in Iphofen (Deutschland). 1970/71 wurde in Weißenbach bei Liezen das erste Werk außerhalb von Deutschland erbaut. Heute arbeiten auf diesem Standort ca. 160 Mitarbeiter im Dreischichtbetrieb. Weitere 16 Mitarbeiter sind in den zwei zurzeit aktiven Gipsbergwerken beschäftigt [21].

Die Jahresproduktion an Gipskartonplatten und Zubehör beträgt ca. 320.000 t. Die Hälfte davon ist für den österreichischen Markt bestimmt, der Rest wird nach Osteuropa (vor allem Ungarn, Slowenien und Slowakei) exportiert [21], [40, S. 5].

Das Werk Weißenbach betreibt zurzeit zwei Gipsbergwerke in Hall (25 km Entfernung) und Tragöß (120 km Entfernung). Ende 2007 wurde der Abbau im 15 km entfernten Pyhrn eingestellt. Mit der neu erschlossenen Lagerstätte in Hall soll die Versorgung mit Gips auf weitere 20 Jahre sichergestellt sein [40, S. 3].

2007 wurde am Werksgelände durch den Ankauf eines neuen leistungsfähigeren Brechers der maximale Rohsteindurchsatz erhöht und durch die Verlängerung und Überdachung der Halde die Lagerung von mehr Naturgips zu besseren Bedingungen ermöglicht. Eine Steigerung der produzierten Menge an Gipskarton ist jedoch nicht realisierbar, da die Länge der Bandstraße durch die Lage des Werkes zwischen einer Straße und einer Eisenbahnstrecke begrenzt ist [21].

5.1.1 Input-Output

Der Standort Weißenbach bezieht jährlich 335.000 t Rohstein (Rohgips) aus den Bergwerken. Das entspricht rund 30 LKW-Fuhren pro Tag. Zusätzlich werden jährlich 5.000 t Zuschlagstoffe, 10.000 t Karton und 15.000 t Stahlblech angeliefert und verarbeitet. Dem gegenüber steht eine jährliche Produktion von insgesamt 320.000 t Gipskartonplatten, Spachtelmassen, Putzen und Stahlprofilen [21], [40, S. 5].

Der Ausschussanteil bei der Gipskartonproduktion liegt bei 1,2 %, das entspricht 360.000 m². 58 % des Gipskartonausschusses sind Nassabfälle, die nicht weiter verwertet werden, da sie zu Verklebungen in der Recyclinganlage führen würden. Sie werden daher geshreddert und einem Entsorger weitergegeben. Ein kleiner Teil der Trockenabfälle wird zu Abstandhalter für Gipskartonplattenstapel verarbeitet und mit den Produkten versandt. Der Rest wird in der firmeneigenen Recyclinganlage aufbereitet und wieder in die Produktion eingeschleust. Auch beschädigte Platten aus dem Handel werden von Knauf zurückgenommen und wiederverwertet. Der Anteil von recycelten Produktionsabfällen macht lediglich 0,5 % der eingesetzten Gipsmenge aus [21].

Die Recyclinganlage am Standort Weißenbach wurde Anfang der 90er Jahre gebaut. Es können damit trockene, nicht verunreinigte Gipskartonabfälle aufbereitet werden. Die Anlage wird diskontinuierlich betrieben. Der Durchsatz liegt dabei bei 3 bis 5 t/h. Die Gipskartonabfälle sind in Abbildung 11 und der schematische Aufbau der Recyclinganlage in Abbildung 12 dargestellt [21], [40, S. 6]. Die Gipskartonabfälle werden mit einem Gabelstapler in einen Bunker gekippt und dort mit einem Hydraulikstempel (A) zum Zerkleinerer (B) vorgeschoben. Förderschnecken und ein Becherwerk (C) transportieren die zerkleinerten Platten in einen Puffersilo (D) dessen Austrag das Material in eine Hammermühle (E) fördert. In der Mühle soll sich der Karton vom Gips abtrennen. Der Karton bleibt größtenteils im Überlauf der nachgeschalteten Siebmaschine (F) zurück und wird daraufhin in Big-bags (G) gefüllt. Der Siebdurchgang geht nochmals durch eine Hammermühle (H) und ein Sieb (I), wo wiederum Karton und Gips getrennt werden. Der gewonnene Recyclinggips wird auf einem Förderband (J) dem gebrochenen Naturgips zugegeben und so vor der Ablagerung auf der Halde mit diesem vermischt. Der gesammelte Karton kommt in einen Pulper und wird dann in aufgelöster Form dem Gipsbrei beigemischt. Weiters wird Gipsstaub aus der Luft in der Aufbereitungsanlage gefiltert und wiederum in die Produktion rückgeführt (K) [21].



Abbildung 11: Trockene Gipskartonabfälle

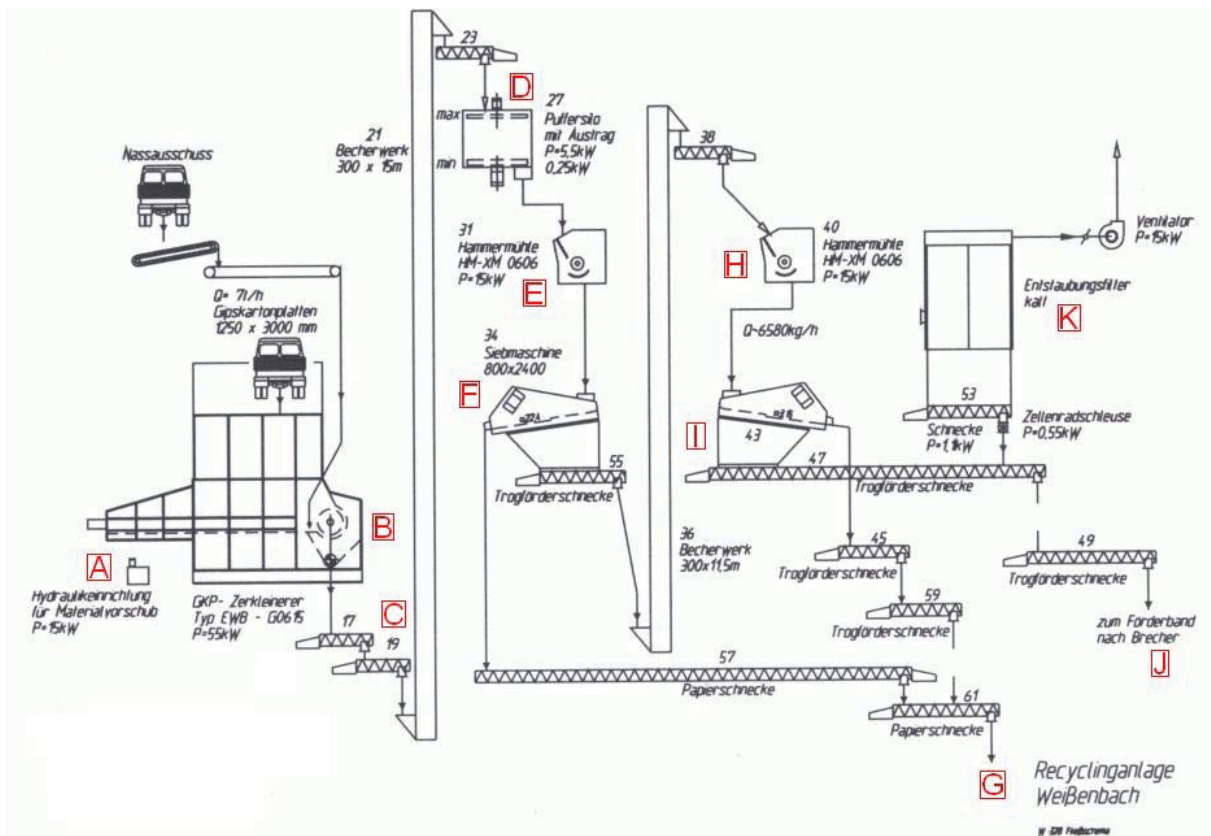


Abbildung 12: Schema der Aufbereitungsanlage Knauf-Standort Weißenbach [21]

5.1.2 Qualitätsanforderungen an das Recyclingmaterial

Das Ziel des geplanten Aufbereitungsprozesses ist neben der Produktion einer wirtschaftlich rentablen Menge vor allem die Einhaltung der Qualitätsanforderungen der Fa. Knauf. Für die Einbringung in den Produktionsprozess muss das Recyclingmaterial folgende Kriterien erfüllen [21]:

- **Reinheitsgrad:** Der Gehalt an Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) ist das wesentliche Kriterium und sollte mindestens 80 % betragen. Da der Reinheitsgrad des verwendeten Naturgipses mit 75-80 % (Pyhrn) bzw. 80-85 % (Tragöß) schon relativ niedrig ist, darf er durch das Recyclingmaterial nicht noch weiter verdünnt werden.
- **Fremdstoffe:**
 - **Mineralische Fremdstoffe:** Sehr harte bzw. abrasive Materialien, wie z.B. Granit, Erze oder Schlacken können die Anlage schädigen und dürfen daher im Recyclingmaterial nicht enthalten sein. Mineralische Stoffe mit geringerer Härte stellen, sofern durch sie der Gipsreinheitsgrad nicht unter den Mindestwert sinkt, kein Problem dar.
 - **Sonstige Fremdstoffe:** Fremdstoffe wie etwa Metall, Textilien, Holz oder Kunststoff dürfen sich nicht im Recyclingmaterial befinden. Anhaftender Karton könnte fallweise in der firmeneigenen Recyclinganlage abgetrennt werden.
- **Freie Feuchte:** Der Wassergehalt (exklusive Kristallwasser) darf 6 % nicht übersteigen, da es andernfalls zu Verklebungen an Transport- oder Aufbereitungsanlagen kommen kann. Fallweise könnte Recyclingmaterial mit bis zu 15 % Feuchtigkeit in der Trocknungsanlage getrocknet werden, was aber wegen der dabei anfallenden Energiekosten zu vermeiden ist.
- **Kantenlänge:** Die Kantenlänge bzw. Korngröße ist theoretisch durch die Zufuhröffnung des Brechers auf 3 m begrenzt. Ist die Korngröße über 40 mm, so muss das Material (gleich wie der Rohstein) im Brecher zerkleinert werden. Ein Vorteil dieses zusätzlichen Arbeitsschrittes ist die bessere Durchmischung mit dem Naturgips, die bei sofortiger Abkippung des Recyclingmaterials zum gebrochenen Rohstein nur beschränkt gegeben wäre.
- **Geruch:** Das Recyclingmaterial muss geruchlos sein, da die späteren Produkte im Innenausbau verwendet werden.
- **Salze:** Da Salze im Gipskern während der Produktion in die Grenzschicht zum Karton transportiert werden und dort auskristallisieren, würde eine zu hohe Salzkonzentration die Kartonhaftung und in weiterer Folge die Festigkeit mindern. Es müssen daher folgende Grenzwerte eingehalten werden:
 - **Chlorid:** unter 0,01 %
 - **K₂O:** unter 0,06 %
 - **Na₂O:** unter 0,04 %
- **pH-Wert:** Der pH-Wert sollte zwischen 5 und 8 liegen.

Glasfasern, die dem Gipskern von Feuerschutzplatten zur Erhöhung der Brandbeständigkeit beigemischt werden, können nach dem Recycling aufgrund deren Zerkleinerung keine Armerungsaufgaben mehr übernehmen. Sie verringern den Reinheitsgehalt des Gipses und sind daher als Verunreinigung anzusehen [40], [41].

5.1.3 Nutzen am Recyclingkonzept

Neben den knapper werdenden Rohstoffvorkommen ist die Fa. Knauf auch mit erschwerten Abbau- bzw. Transportbedingungen konfrontiert. Da die meisten Lagerstätten, die sich innerhalb einer vertretbaren Distanz zum Unternehmensstandort befinden, in Naturschutzgebieten liegen, ist es schwer, für diese Abbaugenehmigungen zu erhalten. Weiters muss auf Anrainer, die sich durch den Abbau und Abtransport gestört fühlen könnten, Rücksicht genommen werden. So hat der Abbau in Hall durch Abfräsen statt durch lautes Sprengen zu erfolgen und für das Bergwerk in Tragöß gibt es eine Fördermengenbeschränkung um den LKW-Verkehr einzudämmen [21].

Durch die angestrebte zehnpromtente Beimischung von Recyclingmaterial im Produktionsprozess erlangt Knauf eine teilweise Unabhängigkeit von der Versorgung mit Naturgips. Die erwähnten Schwierigkeiten beim Abbau und Transport des Naturgipses würden sich verringern. Des Weiteren kann Knauf den umweltschonenden Effekt des Recyclingkonzeptes zur Imageverbesserung nutzen. Wird der Recyclinggips zu einem Preis angeboten, der unter den Produktionskosten für Naturgips liegt, so würde sich auch ein wirtschaftlicher Erfolg einstellen.

5.2 Firma Cemex

Der ehemalige, in Bruck an der Mur ansässige Familienbetrieb Transbeton wurde im Jahr 2002 von Cemex übernommen, einem weltweit agierenden Großkonzern im Bereich der Zementherstellung und Transportbetonlieferung. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird jener Teil des Konzerns, den früher die Firma Transbeton bildete, als Cemex-Bruck bezeichnet.

Cemex-Bruck betreibt einen Container-Service und verfügt über einen eigenen Fuhrpark zum Sammeln von Gewerbemüll aus der Mur-Mürz-Furche und dem Großraum Graz. Die gesammelten Abfälle werden am Firmengelände aufbereitet. Verwertbare Fraktionen wie Eisen, Nichteisenmetalle oder Kunststoffe werden weiterverkauft. Nicht verwertbare Abfälle werden der Verbrennung oder der mechanisch-biologischen Behandlung zugeführt oder auf den firmeneigenen Deponien abgelagert. Cemex-Bruck betreibt eine Bodenaushub- und eine Baurestmassendeponie. Letztere, auf der zurzeit die Gipsabfälle landen, hat ein Restvolumen von 265.000 m³ (Stand Juni 2007), d.h., es können bei einem jährlichen Ablagerungsvolumen von 70.000 m³ noch bis Ende 2010 Baurestmassen deponiert werden [31].

5.2.1 Bisherige Handhabung von Gipskartonabfällen

Am Standort Bruck werden jährlich 15.000 bis 20.000 t Gipsabfälle angeliefert. Der Großteil (ca. 80 %) stammt aus der Mur-Mürz-Furche, der Rest aus dem Raum Graz [27]. Allerdings liegen nur ca. 10 %, also 1.500 bis 2.000 t, nahezu sortenrein vor. Diese „nicht“ verunreinigte Gipsfraktion fällt hauptsächlich beim Einbau der Platten als Verschnitt an. Der Rest der Gipskartonabfälle, also 13.500 bis 18.000 t, stammt aus dem Rückbau von Gebäuden und ist daher mit Holz, Stahlprofilen, Textilien oder Tapeten, die mit den Gipskartonplatten verschraubt oder verklebt sind, verunreinigt. Durch Witterungseinflüsse beim Abbruch, der Zwischenlagerung oder dem Transport variiert auch der Feuchtegehalt der angelieferten Gipsabfälle [42]. Je nach Stückigkeit weisen die Gipsabfälle eine Schüttdichte von 250 bis 300 kg/m³ auf [27].

Reine Gipsabfälle werden unbehandelt auf der Baurestmassendeponie abgelagert. Nach der Komprimierung auf der Deponie weist das Material eine Einbaudichte von etwa 800 bis 900 kg/m³ auf [27]. Gipsabfälle, die mit Baustellenabfällen vermischt sind, werden zuerst geshreddert. Anschließend werden durch Magnetabscheider, Siebe, Windsichter und Handklauen verschiedene Wertstoffe und die heizwertreiche Fraktion aus dem Abfallstrom aussortiert. Die Restfraktion wird auf die Baurestmassendeponie gebracht [42].

5.2.2 Nutzen am Recyclingkonzept

Durch die Entwicklung eines Aufbereitungsverfahrens für Gipsabfälle mit hohen Störstoffanteilen würde sich Cemex einen Technologievorsprung zu anderen Entsorgungsunternehmen verschaffen. Da der bisher übliche Entsorgungsweg der Deponierung aus juristischen Gründen und aufgrund der Verknappung von Deponiekapazitäten immer schwieriger wird, gewinnt diese Möglichkeit der stofflichen Verwertung zunehmend an Wert.

Im Recyclingnetzwerk hat Cemex mit der Fa. Knauf als Kooperationspartner einen sicheren Abnehmer für den aufbereiteten Gips. Durch den stetig steigenden Bedarf an Gipskarton und den gleichzeitig knapper werdenden Naturgips-Ressourcen baut sich Cemex als Anbieter dieses Sekundärrohstoffes ein zukunftsträchtiges Geschäftsfeld auf.

6 Entwicklung des mechanischen Aufbereitungsverfahrens

Durch eine Literaturrecherche wurde versucht, Informationen zur Aufbereitung von verunreinigten Gipsabfällen zu sammeln um auf diesem Wissen aufbauen zu können. Da diese Problemstellung in Österreich gänzlich neu ist und auch zu Anlagen im Ausland keine brauchbaren Informationen gefunden wurden, wurde schließlich bei der Planung der Vorgangsweise auf den Erfahrungen aus der Aufbereitung ähnlicher Abfälle bzw. Rohstoffe aufgebaut.

Die Aufbereitungsversuche wurden entweder im Labormaßstab oder an großtechnischen Anlagen durchgeführt. Je nach benötigten Gerätschaften fanden sie bei folgenden universitären Einrichtungen bzw. Firmen statt:

- Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik (Montanuniversität Leoben)
- Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung (Montanuniversität Leoben)
- Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (RWTH Aachen)
- Fa. Cemex, Bruck an der Mur
- Fa. Knauf, Liezen
- Fa. ARP, Leoben

Im Zusammenhang mit den Aufbereitungs- und Analyseverfahren, die in diesem Kapitel behandelt werden, beschreibt der Begriff „Gips“ Partikel, die aufgrund ihres Aussehens und ihrer Konsistenz als Teile von Gipskartonplatten identifiziert wurden. Der Begriff „Gipsgehalt“ beschreibt daher den Masseanteil der Gipskartonteile an gewissen Fraktionen und ist nicht mit dem Gehalt von Gips im eigentlichen Sinn (Dihydrat, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) zu verwechseln.

6.1 Versuch: Zerkleinerung und Klassierung

Die Zerkleinerung und Klassierung der gesammelten Gipsabfälle stellt den ersten Aufbereitungsschritt dar. Dazu wurden verschiedene Aufbereitungsgeräte auf ihre Tauglichkeit zur Gipsabfallzerkleinerung und in weiterer Folge -klassierung getestet. Die Aufbereitungsprodukte dienten später als Inputmaterial für weiterführende Versuche.

6.1.1 Vorbereitung

Um den Großversuch mit repräsentativem Material durchführen zu können, wurden in den Wochen davor durch die Fa. Cemex ca. 60 m³ Gipskartonabfälle aus Abbruch- und Sanierungsarbeiten gesammelt. Vorab wurden drei verschiedene Teilversuche geplant:

- Im ersten Versuch sollen die Gipsabfälle mit einem Shredder zerkleinert und dann, nach der Abscheidung der magnetischen Störstoffe, in einem Prallbrecher weiterzer-

kleinert werden, wobei sich auch der Karton vom Gipskern lösen soll. Anschließend soll der Stoffstrom in einem Trommelsieb in eine Feinfraktion (32/0 mm) und eine Grobfraktion (> 32 mm) aufgeteilt werden. Die Grobfraktion soll in einem Windsichter von leichten Störstoffen befreit und wieder in die Prallmühle eingebracht werden. Die Feinfraktion soll nach der Abscheidung von Eisen und Nichteisenmetallen das Endprodukt darstellen.

- Der zweite Versuch unterscheidet sich vom ersten Versuch nur durch das Fehlen der Prallmühle. Das zerkleinerte Material aus dem Shredder geht damit sofort in das Trommelsieb.
- Beim dritten Versuch soll der Shredder aus dem zweiten Versuch durch eine Prallmühle ersetzt werden.

6.1.2 Durchführung

Zwei der drei geplanten Teilversuche wurden nicht durchgeführt. Der Shredder konnte nämlich nicht zum Einsatz kommen, da sich im Aufgabematerial zu viele Fremdstoffe befanden. Insbesondere große Betonbrocken hätten den Korb unter der Zerkleinerungswelle, der die obere Korngröße auf 80 mm begrenzen sollte, verstopft. Außerdem stand am Versuchstag noch kein Nichteisenabscheider zur Verfügung. Statt der beiden Versuche mit dem Shredder wurde ein Versuch mit einem Trommelsieb durchgeführt (siehe 6.1.2.1).

Der Störstoffanteil der gesammelten Gipskartonabfälle war höher als im Vorfeld angenommen. Neben schwer vermeidbaren Anhaftungen wie Stahlprofile, Schrauben, Dämmmaterialien oder Kunststofffolien fanden sich im Ausgangsmaterial auch Beton- und Gasbetonbrocken, Textilien, Baustellenabfälle (PET-Flaschen, Papiersäcke, usw.), Keramikteile, Steine und andere Störstoffe, die Großteils auf Fehlwürfe zurückzuführen sind (siehe Abbildung 13).

Die verwendeten Aufbereitungsgeräte waren durch Räder bzw. Raupen mobil, d.h. der Versuchsaufbau konnte innerhalb weniger Minuten verändert werden. Die Beschickung der Geräte erfolgte mit einem Radlader oder einem Baggergreifer. Zur Erstellung einer Massenbilanz wurden die Produkte nach abgeschlossener Aufbereitung abgewogen und für etwaige weitere Behandlungen auf Lager gelegt.

Von den jeweiligen Fraktionen beider Teilversuche wurden mit einer Schaufel Proben entnommen. Dabei wurde darauf geachtet, das Material aus verschiedenen Teilen der Haufen zu entnehmen, um eine repräsentative Zusammensetzung der Stichproben gewährleisten zu können. Für den Transport und die spätere Lagerung wurden die Proben in Plastiksäcke abgefüllt.



Abbildung 13: Aufgabematerial mit Fremdstoffen

6.1.2.1 Aufbereitung mittels Trommelsieb

Beim ersten Aufbereitungsschritt mittels Trommelsieb wurde durch Siebung der Feianteil (32/0 mm) abgetrennt. Um auch große Abfallstücke aufgeben zu können, wurde statt einem Flächensieb ein Trommelsieb verwendet. Nach der Absaugung der Leichtfraktion durch einen Windsichter sollten sich die Gipskartenteile im verbleibenden Siebüberlauf anreichern (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Das Trommelsieb selbst wird von einem Dieselmotor mit einer Leistung von 64 kW betrieben. Die Siebtrommel ist 4,5 m lang und hat einen Durchmesser von 1,8 m.

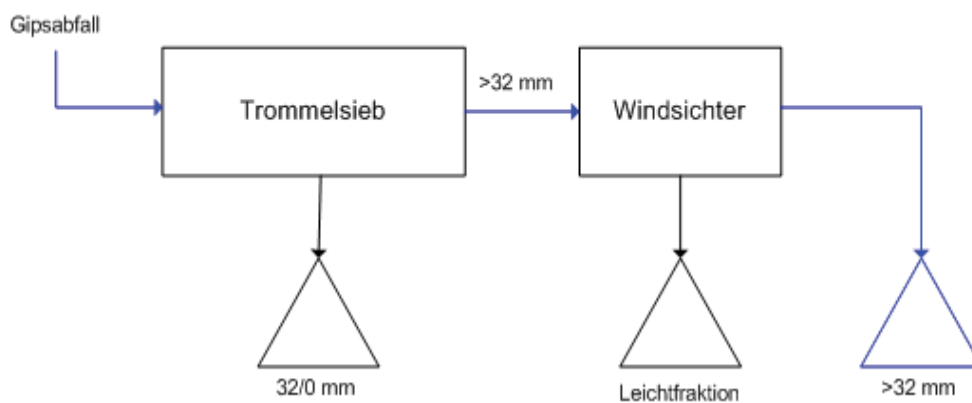


Abbildung 14: Fließbild zum ersten Versuch



Abbildung 15: Beschickung des Trommelsiebes

Um den Gipsanteil im Durchgang aufzukonzentrieren, wurde in einem weiteren Versuch der Siebüberlauf ein zweites Mal gesiebt (siehe Abbildung 16). Dabei sollte der Gips von großflächigen Gipskartonstücken gelöst werden und durch das Sieb gehen. Der erhoffte Effekt blieb allerdings aus. Durch die abermalige Siebung wurden nämlich auch andere Stoffe, wie Karton oder Holzfaserdämmplatten, zerkleinert. Diese machten einen beträchtlichen Teil des zweiten Siebdurchgangs aus.

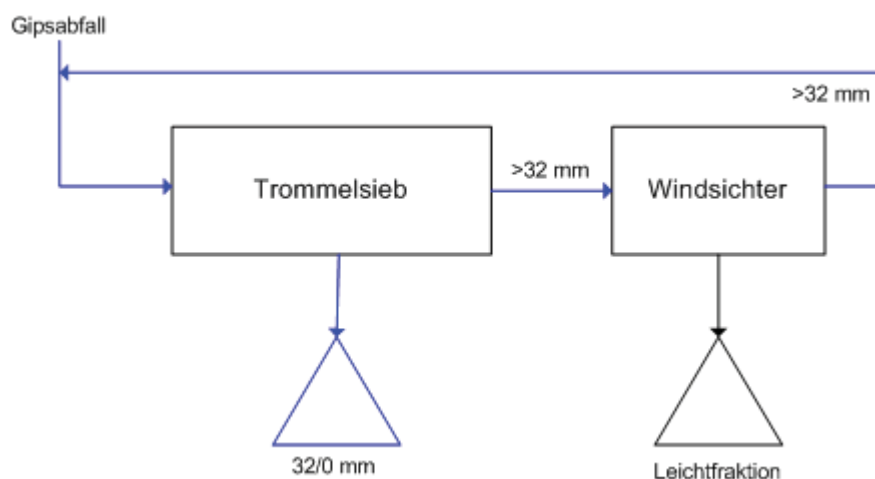


Abbildung 16: Fließbild zum ersten Versuch mit Kreislaufführung

6.1.2.2 Aufbereitung mittels Prallbrecher

Mit dem Baggergreifer wurden grobe Störstoffe, wie Betonbrocken oder Holzfaserdämmplatten aussortiert. Der verbleibende Abfall wurde in den Prallbrecher aufgegeben. Nach der Zerkleinerung wurden mit einem Überbandmagneten magnetische Störstoffe entfernt. Im nachfolgenden Flächensieb wurde der Abfallstrom in eine Grobfraktion (> 32 mm) und eine Feinfraktion ($32/0$ mm) geteilt (siehe Tabelle 25 und Abbildung 18).

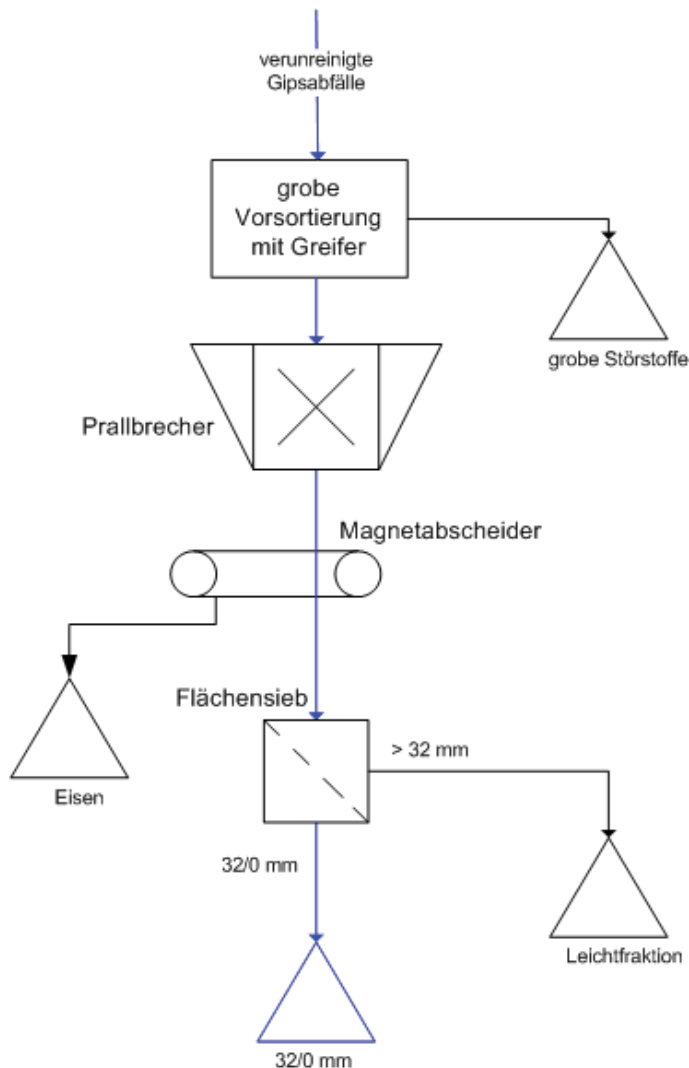


Abbildung 17: Fließbild zum zweiten Versuch



Abbildung 18: Prallbrecher (rechts) und Flächensieb (links)

Der Prallbrecher wird durch ein Dieselaggregat mit einer Leistung von 198 kW angetrieben. Ein Schleuderrotor (A) (1 m breit, 1 m Durchmesser) rotiert mit 400 bis 700 Umdrehungen pro Minute und schlägt das Aufgabematerial gegen die verstellbaren Prallplatten (B) (siehe Abbildung 19). Dadurch kommt es zur gewünschten Zerkleinerung des Materials [43].

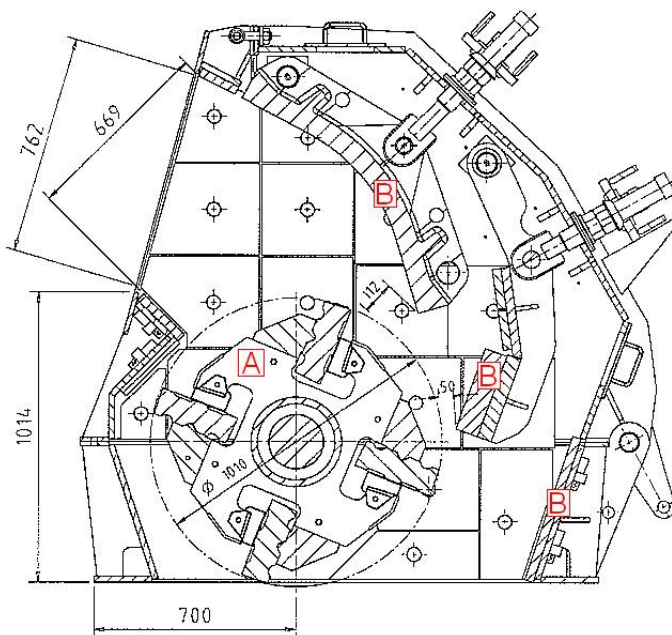


Abbildung 19: Detailansicht des Rotors des verwendeten Prallbrechers [43]

Da elastische Stoffe, wie Karton oder Plastikfolien, auch nach dem Prallbrecher noch sehr großflächig vorliegen, kam es im nachgeschalteten Schwingsieb zu Verstopfungen die durch händisches Entfernen des störenden Materials behoben werden mussten.

6.1.3 Ergebnis

Vorab muss erwähnt werden, dass die stoffliche Zusammensetzung der Feinstfraktion unter 2 mm durch händisches Sortieren nicht feststellbar war. Daher wurde dafür die Zusammensetzung der Feinstfraktion der nächstfeineren Fraktion (4/2 mm) gleichgesetzt. Diese Näherung ist nötig um die gesamte Stoffverteilung berechnen und bilanzieren zu können.

6.1.3.1 Aufbereitung mit Trommelsieb

Von den aufgegebenen 2,72 t entfielen 61 % auf den Siebdurchgang (32/0 mm), 32 % auf den Siebüberlauf (>32 mm) und die restlichen 7 % auf die Leichtfraktion. Die Masseströme und deren stoffliche Zusammensetzung sind in folgendem Sankey-Diagramm (Abbildung 20) veranschaulicht.

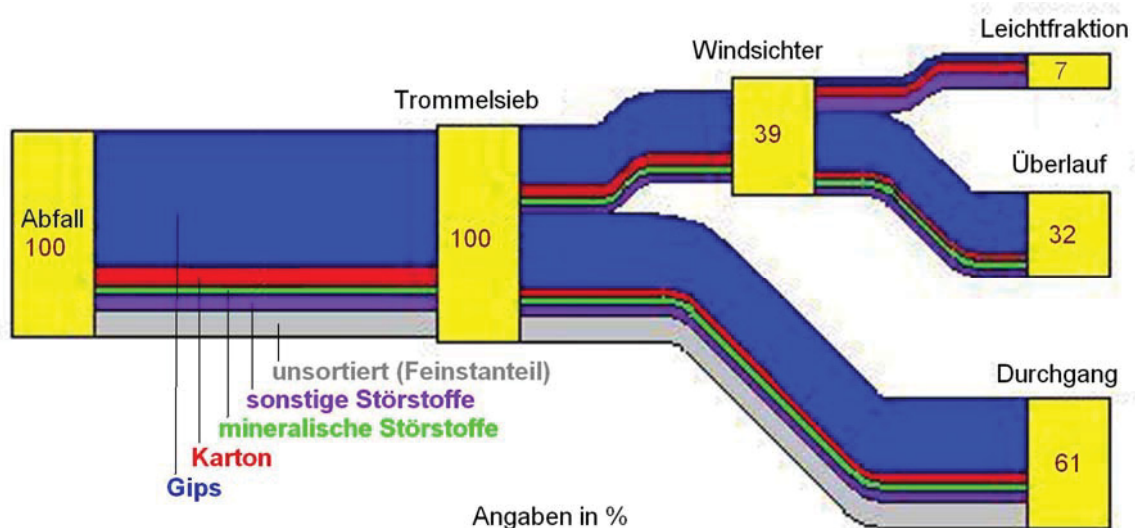


Abbildung 20: Stoffflüsse – Aufbereitung mit dem Trommelsieb

Die ursprüngliche Intention, den Großteil der Störstoffe im Siebdurchgang anzureichern, wurde nicht erreicht. Durch die mechanischen Einwirkungen der Siebtrommel auf den Abfall wurden die meisten Gipskartonteile so weit zerkleinert, dass sie schließlich durch das Sieb gingen. Der Gipsgehalt ist zwar in der Grobfraktion mit 90 % wesentlich höher als in der Feinfraktion mit 70 %, jedoch liegt der Großteil des Gipses im Überlauf in Form von großflächigen Platten (bis zu 50 cm Kantenlänge) vor und ist daher nach wie vor mit dem Karton verbunden. Im Siebdurchgang haftet nur an einem relativ geringen Anteil der grobkörnigeren Gipsstücke Karton.

Etwa ein Drittel des Kartons der Inputfraktion wurde durch den Windsichter abgetrennt. Der erhöhte Kartonanteil in den Fraktionen unter 4 mm erklärt sich u.a. durch den Abrieb während der Siebung im Labor.

Der Gehalt an mineralischen Störstoffen im Aufgabematerial beträgt ca. 3 %. Während in der Feinfraktion Stoffe wie Kies, Ziegelstücke, Glas und Porenbeton zu finden sind, sind es in der Grobfraktion vorwiegend Faserzementplatten. Die mineralischen Störstoffe teilen sich massenmäßig gleich auf Siebdurchgang und -überlauf auf. Es konnte keine Anreicherung in einer bestimmten Kornklasse festgestellt werden.

Alle weiteren Stoffe wurden unter den sonstigen Störstoffen zusammengefasst. Der Gesamtgehalt beträgt ca. 8 % und es kann eine Zunahme mit abnehmender Korngröße beobachtet werden. Auch die Zusammensetzung der sonstigen Störstoffe ändert sich mit der Korngröße. Im Überlauf finden sich vor allem Holzfaserdämmplatten. In den grobkörnigeren Fraktionen des Durchgangs konnten fast nur Lehmbrocken dieser Stoffgruppe zugeordnet werden. Mit abnehmender Korngröße nahm der Anteil an Holz (meist längliche, flache Fasern aus zerstörten Holzfaserdämmplatten) und Dämmwolle zu. Die Leichtfraktion setzt sich zu 26 % aus sonstigen Störstoffen, wie großflächigen Holzfaserdämmplatten, Kunststofffolien, Dämmwolle und beschichtetem Papier zusammen.

In Abbildung 21 ist die Korngrößen- und Stoffverteilung der analysierten Proben zu sehen. Die Werte beziehen sich dabei auf die Gesamtmasse aller Kornklassen. Die gesamten Ergebnisse der Sieb- und Sortieranalyse finden sich in der Tabelle 25 im Anhang.

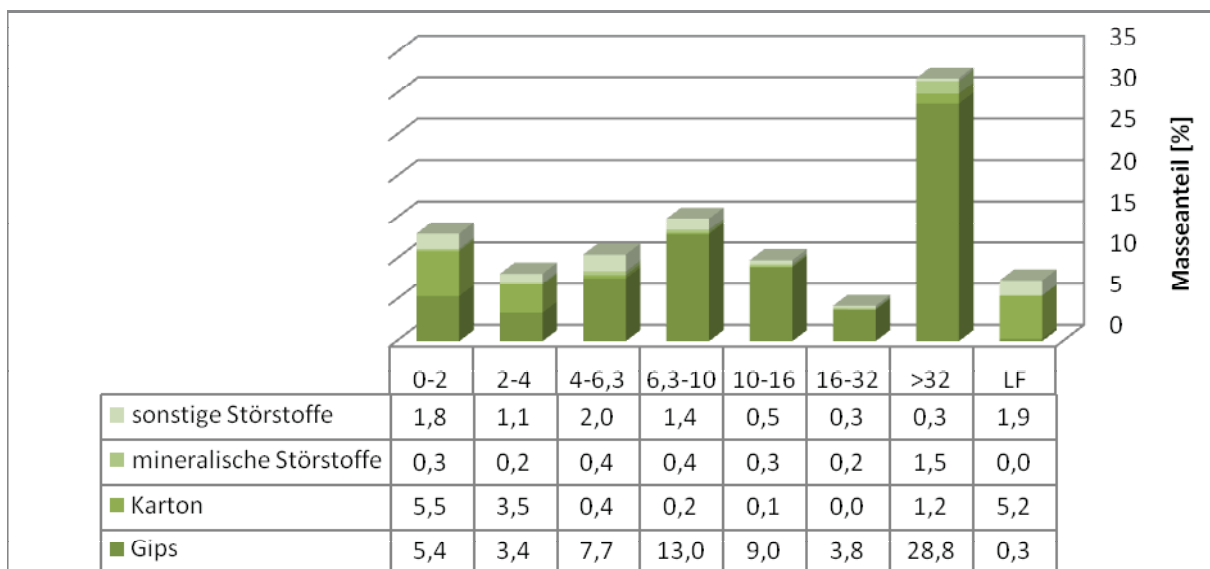


Abbildung 21: Korngrößen- und Stoffverteilung der Trommelsiebprodukte

6.1.3.2 Aufbereitung mit Prallbrecher

Obwohl das Aufgabematerial für den Prallbrecher vom gleichen Haufen genommen wurde wie das Material für das Trommelsieb, unterscheiden sich deren stoffliche Zusammensetzungen, die durch Zusammenfassen aller Teilfraktionen der jeweiligen Versuche errechnet wurden. Neben der hohen Heterogenität der gesammelten Abfälle gibt es noch zwei weitere

Fehlerquellen, die für die Abweichungen im Analyseergebnis verantwortlich sein können: Zum einen wurden die groben Störstoffe, die vor der Zerkleinerung mit dem Prallbrecher abgetrennt wurden, in der Bilanz nicht berücksichtigt. Und zum anderen gingen bei diesem Versuch 20 % der Gesamtmasse in die Feinstfraktion (2/0 mm), deren stoffliche Zusammensetzung abgeschätzt worden ist.

Wie im Sankey-Diagramm (siehe Abbildung 22) veranschaulicht, gelangte der Großteil (96 %) des Aufgabematerials in den Siebdurchgang. Nur 3,7 % entfielen auf den Überlauf. Die restlichen 0,3 % wurden durch den Magnetabscheider abgetrennt und bei der Bilanzierung den sonstigen Störstoffen zugerechnet.

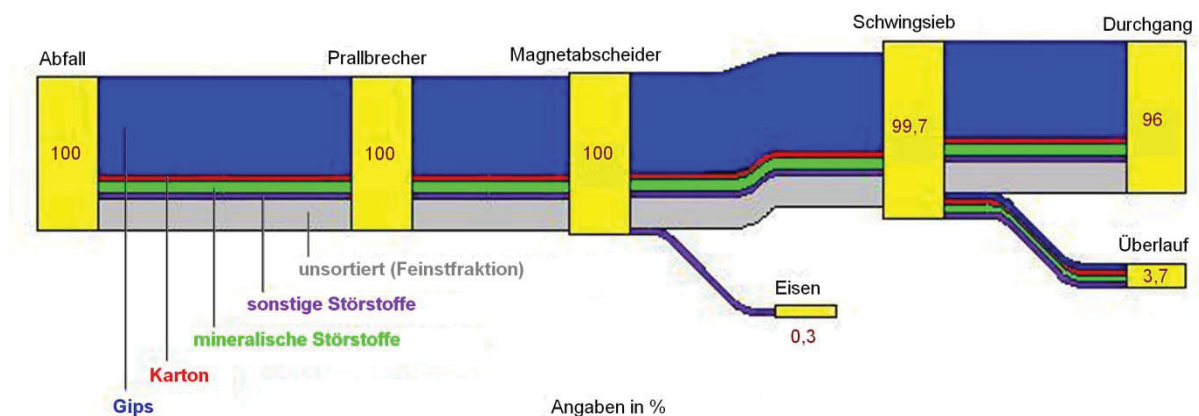


Abbildung 22: Stoffflüsse – Aufbereitung mit Prallbrecher und Schwingsieb

Eine Anreicherung des Wertstoffes Gips im Siebdurchgang ist klar erkennbar. In der Feinstfraktion ist der relative Gipsanteil mit 85 % fast dreimal so hoch wie in der Grobfraktion (29 %). Absolut gesehen gingen 98 % des Gipses in den Siebdurchgang.

Die Hälfte des Kartons landete im Siebüberlauf. Die andere Hälfte verteilt sich auf die unteren Kornklassen, wobei der Kartongehalt mit der Größe der Körnung zunahm. An größeren Gipskörnern haftete oftmals noch Karton.

Bei der Zusammensetzung der mineralischen Störstoffe unterscheiden sich die beiden Siebprodukte deutlich. Während im Siebdurchgang hauptsächlich Ziegelbrocken, Steine und Glas zu finden waren, waren es im Überlauf fast ausschließlich Faserzementplatten und geringe Mengen an Keramik. In der Feinstfraktion konnte, ähnlich wie beim Karton eine vermehrte Anreicherung der mineralischen Störstoffe mit steigender Korngröße bemerkt werden.

Unter den sonstigen Störstoffen fanden sich in allen Kornklassen vor allem Reste von Holzfaserdämmplatten, aber auch Dämmwolle, Kunststoff und Holz. Im Unterschied zu den Produkten aus dem Trommelsieb, kamen keine Lehmbrocken vor. Diese wurden vermutlich so stark zerkleinert, dass sie in die unsortierte Feinstfraktion gelangten.

Der Aufbereitungsversuch hat gezeigt, dass sich mit dem vorliegenden Inputmaterial und den eingesetzten Mitteln ohne weitere Aufbereitungsschritte kein befriedigendes Ergebnis erzielen lässt. Entsprechend den Ergebnissen der Siebanalyse könnte durch eine gezieltere Siebung zumindest ein Gipsanteil von ca. 90 % erreicht werden. Durch weitere Aufbereitungsschritte soll dieses Ergebnis verbessert werden.

In Abbildung 23 ist die Korngrößen- und Stoffverteilung der analysierten Proben zu sehen. Die Werte beziehen sich dabei auf die Gesamtmasse aller Kornklassen. Die gesamten Ergebnisse der Sieb- und Sortieranalyse finden sich in der Tabelle 25 im Anhang.

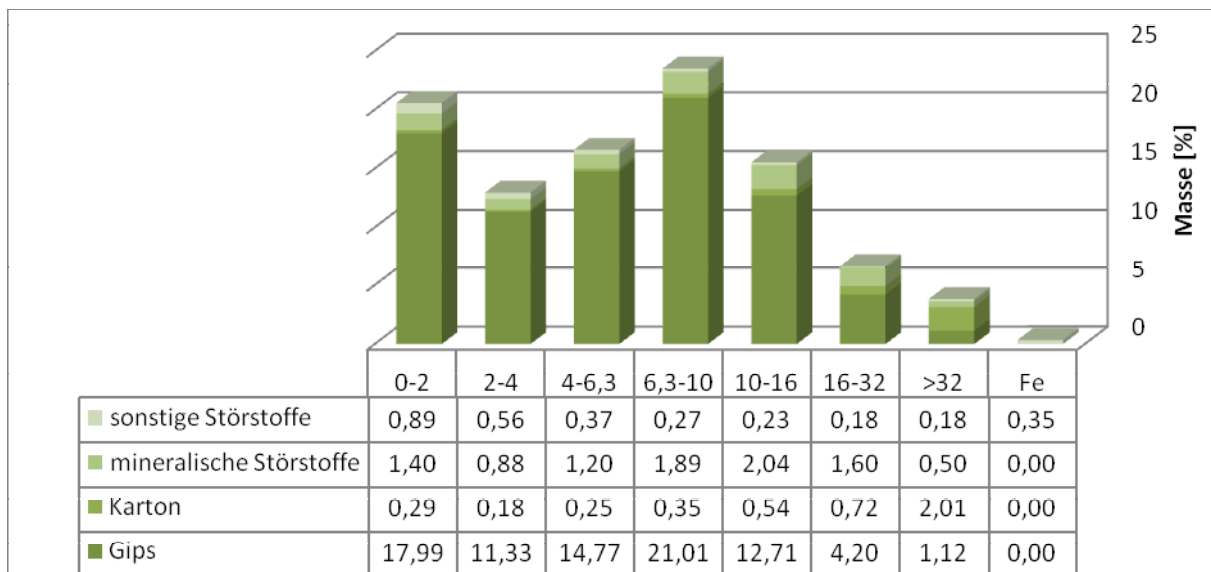


Abbildung 23: Korngrößen- und Stoffverteilung der Pralldrecherprodukte

Erwartungsgemäß sind die Produkte der Aufbereitung mit dem Pralldrecher aufgrund der starken Zerkleinerungswirkung feinkörniger als die Produkte des ersten Aufbereitungsversuches mit dem Trommelsieb. 50 % der Gesamtmasse findet sich im Bereich 0-6,3 mm. Bei der Siebung mit dem Trommelsieb waren es 32 %.

6.2 Versuch: Dichtesortierung

Um Stoffe mit unterschiedlicher Dichte voneinander zu trennen, kann man sich der Dichtesortierung bedienen. Dabei werden durch Flüssigkeiten, Vibrationen oder Luftstöße die Reibkräfte zwischen den Partikeln einer Schüttung kurzfristig aufgehoben, wodurch sich im Aufgabematerial durch die Schwerkraft schwere Partikel nach unten und leichte Partikel nach oben bewegen und sich schließlich eine Schichtung nach der Dichte ergibt. Da sich kleine Partikel mit großer Dichte bei der Dichtesortierung gleich verhalten würden wie große Partikel mit kleiner Dichte (Gleichfälligkeit), sollte zuvor eine Klassierung nach Korngröße erfolgen um diesen Effekt zu mindern.

Um erste Aussagen über die Abtrennbarkeit der Störstoffe mittels Dichtesortierung treffen zu können, wurde die Dichte von vier aussortierten Fraktionen ermittelt. Dazu wurde das zu prüfende, nach stofflicher Zusammensetzung sortierte Material abgewogen und zur Bestimmung des Volumens in einem Messkolben mit Wasser aufgefüllt. Der Quotient aus Masse und Volumen ergibt die Dichte. In Tabelle 6 wurde den gemessenen Werten auch die Dichte des Gipskernes einer unzerstörten Gipskartonplatte gegenübergestellt.

Tabelle 6: Feststoffdichten einzelner Fraktionen

Fraktion	Korngröße	Dichte
Mineralische Störstoffe	2-4 mm	2,36 kg/l
	10-16 mm	2,04 kg/l
Gips	2-4 mm	1,76 kg/l
	10-16 mm	1,21 kg/l
Gipskern einer unzerstörten Gipskartonplatte [1, S. 29]		0,68 kg/l

Es fällt auf, dass die Dichte mit dem Zerkleinerungsgrad der Gipsstücke vermeintlich zunimmt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die spezifische Oberfläche kleinerer Gipsstücke größer ist und daher bei der Messung des Volumens mehr Poren mit Wasser gefüllt werden können, als bei grobkörnigeren Proben.

Die mineralischen Störstoffe weisen in der Kornklasse 4/2 mm eine um 34 % höhere Dichte und in der Kornklasse 16/10 mm eine um 69 % höhere Dichte als die jeweilige Gipsfraktion auf. Aufgrund dieses Dichteunterschiedes konnte im Vorfeld angenommen werden, dass für die vorliegende Problemstellung eine Dichtesortierung zielführend wäre. Auch Störstoffe mit geringer Dichte, wie etwa Karton oder Dämmwolle sollten auf diese Weise vom Gips separiert werden können. Fraglich war hingegen, ob sich auch Stoffe mit einer ähnlichen Dichte wie Gips (z.B. Holz oder Gasbetonsteine: beide 600-800 kg/m³ [2, S. 27]) mit Hilfe von Dichtesortierung abtrennen lassen.

Um diese Annahmen praktisch zu beweisen, wurden in weiterer Folge mit verschiedenen Apparaturen Versuche zur Dichtesortierung durchgeführt. Da das Outputmaterial, also der Gips, möglichst trocken sein soll, wurden Sortierverfahren mit Flüssigkeiten als Trennmedium ausgeschlossen.

6.2.1 Laborluftsetzmaschine

Am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung an der Montanuniversität Leoben wurde mit einer speziellen Versuchsanordnung die Wirkungsweise einer Luftsetzmaschine (siehe Kapitel 6.2.4) nachvollzogen. Dieser Versuch sollte vor allem als Entscheidungshilfe für den logistisch und finanziell aufwändigen Versuch mit einer großtechnischen Luftsetzmaschine dienen.

6.2.1.1 Aufbau

Der Versuchsaufbau besteht, wie in Abbildung 24 skizziert, aus einem Staubsauger zur Erzeugung des Unterdruckes, einem Pulsgeber zur Unterbrechung des Luftstroms, einem Glaszylinder mit luftdurchlässigem Boden und Deckel als Probenbehälter und den Verbindungsleitungen. Durch das Öffnen von Ventilen können die Luftstöße abgeschwächt werden und durch die Regelung der Drehzahl des Pulsgeberantriebes kann die Frequenz der Luftstöße verändert werden.

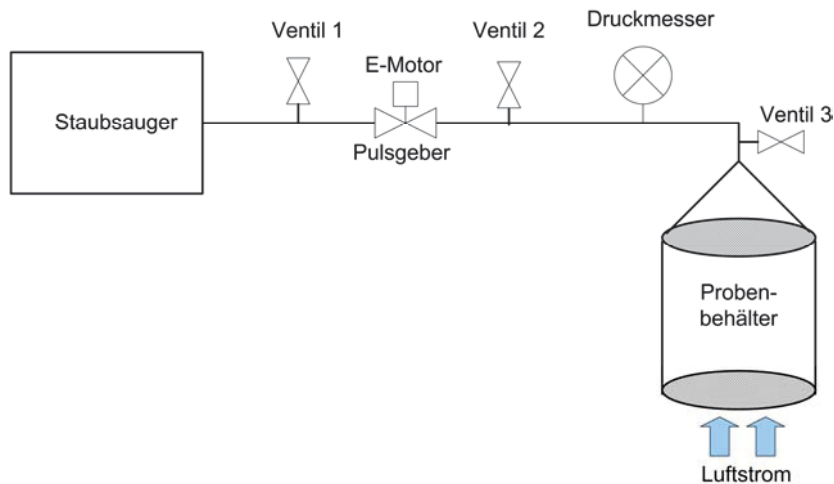


Abbildung 24: Schema der Labor-Luftsetzmaschine

Der Glaszylinder wird ca. bis zur Hälfte mit dem Probenmaterial befüllt und an den Absaugschlauch angeschlossen. Während des Versuches wird durch den Unterdruck Luft durch die Schüttung gesaugt, wodurch die Partikel je nach ihrem Gewicht mitgerissen werden (siehe Abbildung 25). Bei einer Unterbrechung des Luftstromes durch den Pulsgeber fallen die Partikel wieder zu Boden. Dieser Vorgang wiederholt sich in regelmäßigen Abständen, wodurch sich mit der Zeit in der Schüttung eine Schichtung nach der Dichte ergibt. Nach Beendigung des Versuches kann mit einem Stempel die gesamte Schüttung aus dem Zylinder gedrückt und mit einem Spatel in eine Schwer-, Mittel- und Leichtfraktion aufgeteilt werden.



Abbildung 25: Probenbehälter mit durchwirbeltem Material

6.2.1.2 Durchführung

Da bei Dichtesortierungen mit Luftsetzmaschinen eine enge Klassierung des Aufgabematerials vorausgesetzt wird, wurden durch Siebung der Produkte aus den beiden Aufbereitungsversuchen jeweils zwei, auf die Dimension der Laborluftsetzmaschine abgestimmte, Teilmengen vorbereitet. Es wurden also folgende Fraktionen einer Dichtesortierung unterzogen:

- Prallbrecher, 2-4 mm,
- Prallbrecher, 4-6,3 mm,
- Trommelsieb, 2-4 mm,
- Trommelsieb, 4-6,3 mm.

Um den Einfluss der relevanten Parameter auf das Trennergebnis zu untersuchen, wurden zu den vier verschiedenen Aufgabematerialien insgesamt zwölf Versuche mit unterschiedlichen Ventileinstellungen und Drehzahlen durchgeführt. Da aufgrund der Massebilanz des Aufbereitungsversuches die Variante mit dem Prallbrecher vielversprechender schien als die Variante mit dem Trommelsieb, wurden die meisten Dichtesortierungen (8 von 12) mit den beiden Prallbrecherfraktionen durchgeführt. Eine Auflistung der untersuchten Proben und der zugehörigen Einstellungen findet sich in Tabelle 7.

Tabelle 7: Versuchsdaten zur Dichtesortierung

Versuch Nr.			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Aufgabematerial			Prallbrecher 4-6,3 mm					Prallbrecher 2-4 mm			Trommelsieb 4-6,3 mm		TS 2-4	
Versuchsdauer		[min]	3	3	3	3	3	3	3	5	3	3	3	3
Aufgabemenge		[cm ³]	111	111	238	111	111	111	111	111	111	111	111	111
Schicht- höhe	Schwerfraktion	[mm]	10	10		10	10	10	10	10	10	10	10	
	Mittelfraktion	[mm]	22	22		22	22	22	22	22	22	22	22	
	Leichtfraktion	[mm]	10	10		10	10	10	10	10	10	10	10	
Düse Nr.	1	[% offen]	75	0	0	0	0	75	75	75	0	0	75	75
	2	[% offen]	25	25	25	25	0	25	25	25	25	25	25	25
	3	[% offen]	0	0	0	0	0	50	25	25	0	0	0	50
Pulse/min		[1/min]	110	110	110	55	110	110	55	55	55	110	110	110
Dich- teverh.	schwer/mittel	[%]								138	142		143	
	leicht/mittel	[%]								89	66		56	
Proben vorhanden			x	x		x	x	x	x	x	x		x	

Weil bei den Versuchen mit den aufbereiteten Gipsabfällen der luftdurchlässige Deckel bereits nach wenigen Sekunden mit Karton verlegt war, musste dieser während einer kurzen Unterbrechung entfernt werden um den Luftstrom nicht zu behindern. Der Karton wurde im Anschluss der Leichtfraktion zugerechnet.

Alle Schwer-, Mittel- und Leichtfraktionen der durchgeführten Dichtesetzungen wurden händisch in die vier Stoffgruppen Gips, Karton, mineralische und sonstige Störstoffe sortiert. Die Wiegung dieser Stofffraktionen lieferte die Daten für die Bilanz anhand derer die Trennwirkung der Labor-Luftsetzmaschine beurteilt werden konnte.

6.2.1.3 Ergebnis

Die Versuchsdauer wurde bei fast allen Versuchen auf 3 min festgelegt. Die Erhöhung der Dauer auf 5 min bei Versuch 8 brachte nur eine sehr geringe Verbesserung der Trennwirkung.

Die Aufgabemenge von 111 cm³ entspricht in etwa der Hälfte des Volumens des Probenbehälters der Setzmaschine. Eine Vergrößerung der Probenmenge (wie in Versuch 3) hatte zur Folge, dass 2/3 der Schüttung während des ganzen Versuches an den Deckel des Probenbehälters gesaugt wurden und daher keine Setzung zustande kam.

Bei der Wahl der Höhen der Dichteschichten wurde eine Aufteilung nach dem Verhältnis 25 % Schwer-, 50 % Mittel- und 25 % Leichtfraktion festgelegt.

Zur Regelung des Luftstromes standen drei Düsen an der Verbindungsleitung zur Verfügung. Je weiter diese geöffnet waren, desto geringer war der Unterdruck und daher auch die auf die Probepartikel wirkende Saugkraft. Da kleine Partikel durch den Luftstrom leichter mitgerissen werden, mussten beispielsweise bei den Versuchen 6 bis 8 die Düsen weiter geöffnet werden, um statt einer Durchwirbelung der Teilchen die gewünschte Auf-ab-Bewegung zu erreichen. Die Prozentsätze in der Tabelle 7 geben an, wie weit die jeweilige Düse geöffnet war.

Die Pulsfrequenz wurde vorerst auf 110 Luftstöße pro Minute festgelegt. Bei feinkörnigeren Proben bewährte sich jedoch eine geringere Frequenz, um die Setzung zwischen den Luftstößen zu verbessern.

Das Dichteverhältnis gibt das Verhältnis der Schüttdichte der Schwer- bzw. Leichtfraktion zur Mittelfraktion an. Anhand dieser Zahl kann auf die Qualität der Trennung rasch rückgeschlossen werden. Die Schüttdichte wurde jedoch nicht für alle Proben bestimmt.

Bei drei Versuchen wurden keine Proben genommen, da durch das „Nach-oben-Saugen“ keine Setzung stattfinden konnte. Die Gründe dafür waren zu große Aufgabemengen (Versuch 3), zu hohe Frequenz (Versuch 10) oder ein zu hoher Kartonanteil im Aufgabematerial (Versuch 12).

Die nachfolgenden Tabellen enthalten die Ergebnisse nach der Aussortierung und Wiegung der Wert- und Störstoffe. (G = Gips; K = Karton; M = mineralische Störstoffe; S = sonstige Störstoffe; PM = Prallmühle; TS = Trommelsieb)

Aus Tabelle 8 ist ersichtlich, dass die Gipsgehalte in der Mittelfraktion zwischen 94 und 99 % liegen. Dies zeigt, dass sich die Luftsetzmaschine zur Anreicherung von Gips in einer bestimmten Fraktion sehr gut eignet.

In Tabelle 9 ist dargestellt, wie sich das Aufgabematerial auf die Dichte- und in zweiter Ebene auf die Stofffraktionen aufteilt.

Die dimensionslosen Transferkoeffizienten in Tabelle 10 geben an, in welchem Verhältnis sich die einzelnen Stoffe auf die Dichteschichten aufgeteilt haben. So ist etwa ersichtlich, dass der Karton fast ausschließlich in die Leichtfraktion ging. Vor allem kann man jedoch erkennen, dass es durch die gewählten Schichthöhen für Schwer- und Leichtfraktion (jeweils 25 %) zu großen Gipsverlusten in diesen Teilmengen kommt. Durch eine Verbreiterung der Schicht der Mittelfraktion könnte die absolute Menge an Gips in der Zielfraktion gesteigert werden, wobei jedoch auch der Störstoffgehalt steigen könnte. Zur Optimierung der Aufbereitung müsste die Schichthöhe der Zielfraktion soweit erhöht werden, bis der maximal vertretbare Störstoffgehalt erreicht ist.

Tabelle 8: Stoffverteilung in den Dichteschichten (in %)

Versuchnr.	Schwerfraktion				Mittelfraktion				Leichtfraktion			
	G	K	M	S	G	K	M	S	G	K	M	S
1	62,38	0,00	33,82	3,80	95,82	0,00	3,34	0,83	94,24	2,90	0,00	2,86
2	71,62	0,00	24,46	3,92	98,77	0,00	0,75	0,48	93,22	3,89	0,00	2,89
4	67,67	0,00	25,07	7,26	97,34	0,00	1,78	0,87	92,56	3,87	0,20	3,37
5	82,35	0,00	15,41	2,25	98,29	0,00	0,96	0,74	95,45	2,62	0,00	1,92
∑ PB 4-6,3	69,27	0,00	26,50	4,23	97,72	0,00	1,57	0,71	93,78	3,35	0,06	2,82
6	71,71	0,00	27,29	1,01	98,31	0,06	0,49	1,14	93,67	3,61	0,47	2,25
7	73,81	0,00	25,67	0,52	98,45	0,00	0,49	1,06	93,70	4,41	0,11	1,78
8	70,37	0,00	27,82	1,81	98,97	0,00	0,35	0,68	94,60	3,08	0,07	2,25
∑ PB 2-4	72,23	0,00	26,80	0,97	98,48	0,03	0,46	1,03	93,87	3,80	0,25	2,08
9	42,53	0,00	6,41	51,07	93,93	0,36	1,25	4,46	77,19	10,61	0,35	11,85
11	41,88	0,00	7,22	50,89	95,31	0,08	0,24	4,36	71,52	13,42	0,23	14,83
∑ TS 4-6,3	42,21	0,00	6,81	50,98	94,59	0,23	0,77	4,41	74,63	11,88	0,30	13,19

Tabelle 9: Anteile an der Gesamtmasse (in %)

Versuchnr.	Schwerfraktion				Mittelfraktion				Leichtfraktion			
	G	K	M	S	G	K	M	S	G	K	M	S
1	23,35	0,00	12,66	1,42	31,82	0,00	1,11	0,28	27,67	0,85	0,00	0,84
2	15,81	0,00	5,40	0,87	55,50	0,00	0,42	0,27	20,26	0,85	0,00	0,63
4	12,01	0,00	4,45	1,29	55,02	0,00	1,01	0,49	23,82	1,00	0,05	0,87
5	20,62	0,00	3,86	0,56	44,63	0,00	0,44	0,34	28,22	0,78	0,00	0,57
∑ PB 4-6,3	17,53	0,00	6,70	1,07	47,41	0,00	0,76	0,35	24,55	0,88	0,01	0,74
6	22,70	0,00	8,64	0,32	45,10	0,03	0,22	0,52	21,05	0,81	0,11	0,51
7	22,76	0,00	7,92	0,16	42,67	0,00	0,21	0,46	24,19	1,14	0,03	0,46
8	19,42	0,00	7,68	0,50	45,30	0,00	0,16	0,31	25,19	0,82	0,02	0,60
∑ PB 2-4	22,10	0,00	8,20	0,30	44,28	0,01	0,21	0,46	22,94	0,93	0,06	0,51
9	14,49	0,00	2,18	17,41	39,70	0,15	0,53	1,89	18,26	2,51	0,08	2,80
11	15,25	0,00	2,63	18,53	40,45	0,03	0,10	1,85	15,12	2,84	0,05	3,13
∑ TS 4-6,3	14,86	0,00	2,40	17,95	40,06	0,10	0,32	1,87	16,75	2,67	0,07	2,96

Tabelle 10: Transferkoeffizienten

Versuchnr.	Schwerfraktion				Mittelfraktion				Leichtfraktion			
	G	K	M	S	G	K	M	S	G	K	M	S
1	0,28	0,00	0,92	0,56	0,38	0,00	0,08	0,11	0,33	1,00	0,00	0,33
2	0,17	0,00	0,93	0,49	0,61	0,00	0,07	0,15	0,22	1,00	0,00	0,36
4	0,13	0,00	0,81	0,49	0,61	0,00	0,18	0,19	0,26	1,00	0,01	0,33
5	0,22	0,00	0,90	0,38	0,48	0,00	0,10	0,23	0,30	1,00	0,00	0,39
∑ PB 4-6,3	0,20	0,00	0,90	0,50	0,53	0,00	0,10	0,16	0,27	1,00	0,00	0,34
6	0,26	0,00	0,96	0,24	0,51	0,03	0,02	0,39	0,24	0,97	0,01	0,38
7	0,25	0,00	0,97	0,15	0,48	0,00	0,03	0,43	0,27	1,00	0,00	0,43
8	0,22	0,00	0,98	0,35	0,50	0,00	0,02	0,22	0,28	1,00	0,00	0,42
∑ PB 2-4	0,25	0,00	0,97	0,23	0,50	0,01	0,02	0,36	0,26	0,99	0,01	0,40
9	0,20	0,00	0,78	0,79	0,55	0,06	0,19	0,09	0,25	0,94	0,03	0,13
11	0,22	0,00	0,95	0,79	0,57	0,01	0,04	0,08	0,21	0,99	0,02	0,13
∑ TS 4-6,3	0,21	0,00	0,86	0,79	0,56	0,03	0,12	0,08	0,23	0,97	0,02	0,13

Die durch die Dichtesortierung mit der Laborluftsetzmaschine erhaltenen Fraktionen sollten in weiterer Folge analytisch auf ihre chemische Zusammensetzung untersucht werden. Das Hauptinteresse galt dabei dem Dihydratgehalt ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) in der Mittelfraktion, sprich dem Reinheitsgrad des Endproduktes. Nach den Qualitätsanforderungen der Fa. Knauf sollte dieser idealerweise über 80 % liegen.

Die Bestimmung des Gehaltes an Kristallwasser, aus dem man auf den Dihydratgehalt schließen kann, erfolgte, wie in Kapitel 6.5.2 beschrieben, im Labor der Fa. Knauf. Dort wurde auch der Na_2O -Gehalt gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Zusammensetzungen für die Leicht- und Schwerfraktionen wurden nur der Vollständigkeit halber analysiert, sie kommen jedoch nicht als Produkt in Frage.

Tabelle 11: Dihydrat- und Na_2O -Gehalte ausgewählter Fraktionen aus der Dichtesortierung

Fraktion	Probennummer	Material	Kristallwassergehalt	Dihydratgehalt		Na_2O -Gehalt der Gipskörner
				der Gipskörner	der Dichtefraktion	
leicht	6	PM 2-4	16,7%	79,8%	74,7%	0,015%
mittel	2	PM 4-6,3	16,6%	79,3%	78,4%	0,014%
	4	PM 4-6,3	16,7%	79,8%	77,7%	0,014%
	6	PM 2-4	16,7%	79,8%	78,5%	0,015%
	8	PM 2-4	16,7%	79,8%	79,0%	0,014%
	11	TS 4-6,3	16,6%	79,3%	75,6%	0,020%
schwer	2	PM 4-6,3	15,5%	74,1%	53,0%	0,013%
	8	PM 2-4	15,2%	72,6%	51,1%	0,015%

Der Kristallwassergehalt der Gipspartikel in der Leicht- und Mittelfraktion beträgt ca. 16,7 %, was auf einen Dihydratgehalt von 79,8 % schließen lässt. Die Gipskörner der Schwerfraktion weisen einen etwas geringeren Gipsgehalt auf. Multipliziert man den Dihydratgehalt mit dem Masseanteil der Gipskörner der jeweiligen Dichtefraktion, so ergibt sich der Dihydratgehalt der gesamten Dichteschicht (inkl. Störstoffe). Dieser liegt in der als Zielprodukt definierten Mittelfraktion zwischen 75,6 und 79,0 % und genügt somit den Qualitätsanforderungen für die Gipskartonproduktion, auch wenn der ursprünglich gewünschte Mindestwert von 80 % nicht erreicht wurde.

Die Abbildung 26 zeigt die Zusammensetzung der untersuchten Proben. CaSO_4 und das Kristallwasser sind dabei separat dargestellt. Um den Dihydratanteil ablesen zu können, sind die beiden Balken gemeinsam zu betrachten. Unter den Begleitstoffen versteht man alle chemischen Verbindungen in den Gipskörnern außer dem Dihydrat. Die genauen Störstoffanteile sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

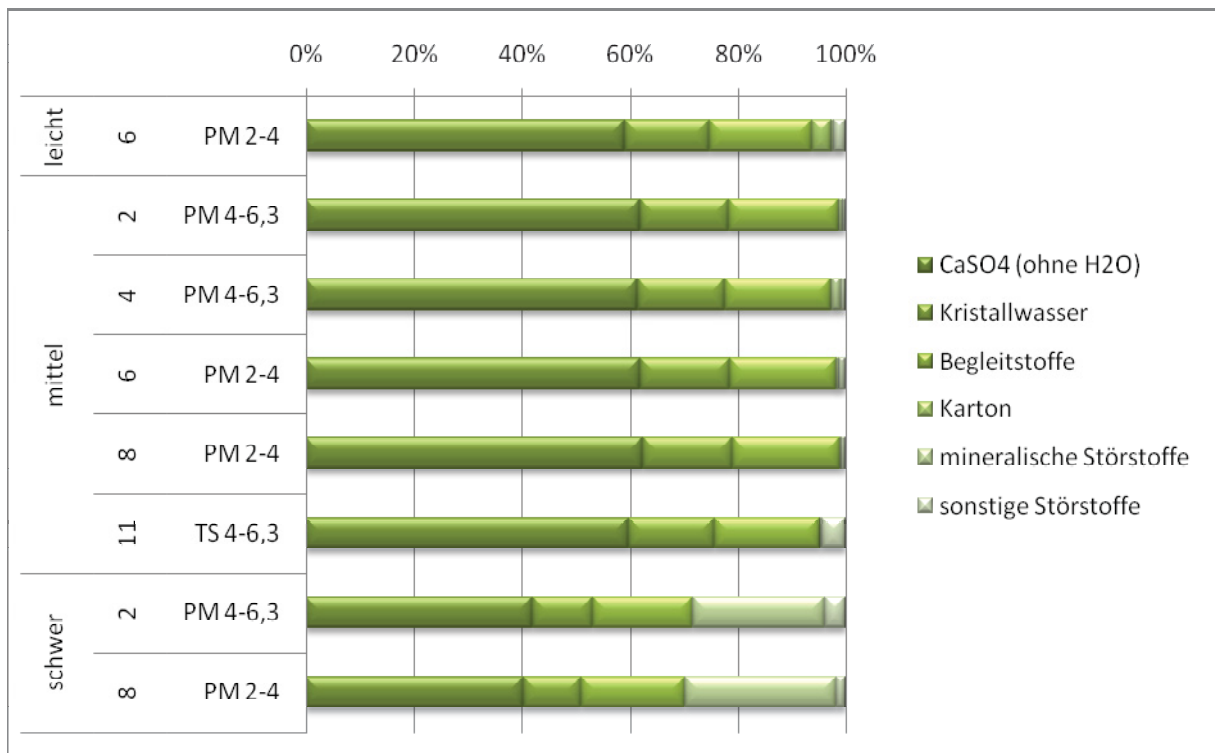


Abbildung 26: Dihydratanteil ausgewählter Fraktionen nach der Dichtesortierung

Die Na_2O -Gehalte liegen zwischen 0,013 und 0,020 % und bleiben daher deutlich unter dem Grenzwert von 0,04 %.

Für vier Proben („2 mittel“, „8 mittel“, „2 schwer“, „6 leicht“) wurden im Zentrallabor der Fa. Knauf weitere Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 aufgelistet. Die Gips- und Na_2O -Gehalte aus der Analyse am Standort Weißenbach wurden dabei bis auf geringe Abweichungen bestätigt. Für die beiden Proben, die der Zielfraktion aus der Dichtesortierung entsprechen („2 mittel“ und „8 mittel“), wurden deutliche Grenzwertüberschreitungen für Eisen- und Aluminiumoxid und geringe Unterschreitungen der Gipszielsollwerte festgestellt (siehe rote, kreisförmige Markierung). Eisen- und Aluminiumoxid weisen auf Tonbeimengungen, die sich bei der Gipsverarbeitung aufgrund ihres Quellverhaltens negativ auswirken, hin. Entsprechend diesem Laborbericht spricht jedoch bei der Stuckgipsерzeugung nichts gegen eine zehnpromtente Beimischung des untersuchten Recyclingmaterials zum Rohstein [9], [44].

Tabelle 12: Ergebnisse der Laboranalyse [44]

			2 Mittel	2 Schwer	6 Leicht	8 Mittel	KNAUF Soll- und Richtwerte für Naturgips
Gips	CaSO ₄ · 2 H ₂ O	%	79,1	74,2	77,7	78,2	> 80 %
Anhydrit	CaSO ₄	%	4,1	3,6	3,4	3,1	< 5 %
Calciumcarbonat	CaCO ₃	%	3,0	3,5	3,7	2,8	ΣCaCO ₃ / MgCO ₃ möglichst < 10 %
Magnesiumcarbonat	MgCO ₃	%	3,9	3,9	3,6	4,0	
Dolomit ¹⁾	CaMg(CO ₃) ₂	%	3,1	3,9	3,4	2,9	
Eisenoxid	Fe ₂ O ₃ gesamt	%	0,50	0,81	0,54	0,52	≤ 0,15
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃ gesamt	%	0,52	0,98	0,54	0,60	≤ 0,30
Natriumoxid	Na ₂ O gesamt	%	0,02	0,03	0,03	0,03	-
Kaliumoxid	K ₂ O gesamt	%	0,15	0,24	0,14	0,17	-
Chlorid		%	0,003	0,003	0,004	0,009	0,01
HCl – unlöslich		%	6,14	10,0	6,72	6,33	< 5 %
restlicher Glühverlust		%	0,51	-	0,46	0,17	≤ 0,1
restliches CaO		%	-	0,33	0,30	1,1	-
Magnesiumoxid	MgO wasserlöslich	%	0,03	0,02	0,03	0,03	< 0,06
Natriumoxid	Na ₂ O wasserlöslich	%	0,01	0,01	0,01	0,01	≤ 0,04
Kaliumoxid	K ₂ O wasserlöslich	%	0,04	0,04	0,04	0,04	≤ 0,06
Quelltongehalt		%	0,50	0,68	0,52	0,49	≤ 0,6

¹⁾ berechnet aus dem Massenverlust der TGA bei 470 -670°C

6.2.2 Luftherd

Luftherde (auch Aeroherde genannt) wurden ursprünglich zur Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen konzipiert. Inzwischen finden sie jedoch auch in der Abfallaufbereitung, etwa beim Recycling von Kabelschrott, Verwendung.

6.2.2.1 Aufbau

Der wesentliche Bestandteil eines Luftherdes ist die sogenannte Herdplatte. Sie kann rechtecks-, trapez- oder auch V-förmig sein und ist ganzflächig mit Rillen versehen, die meist parallel zur Längsseite verlaufen. Die Platte ist in Querrichtung geneigt und wird durch die Löcher in den Rillen mit Luft durchströmt. Der kontinuierliche Luftstrom versetzt einen Teil des Aufgabegutes in einen Schwebезustand und führt so gemeinsam mit den Schüttel- und Stoßbewegungen der Herdplatte zu einer Dichtesortierung [45, S. 240].

Während leichtere Teilchen vom Luftstrom erfasst werden und so in den Leichtgutaustrag nahe der Aufgabeöffnung gelangen, werden schwerere Partikel durch die Wurfbewegung der Herdplatte „bergauf“ in Richtung Schwergutaustrag befördert (siehe Abbildung 27) [45, S. 240].

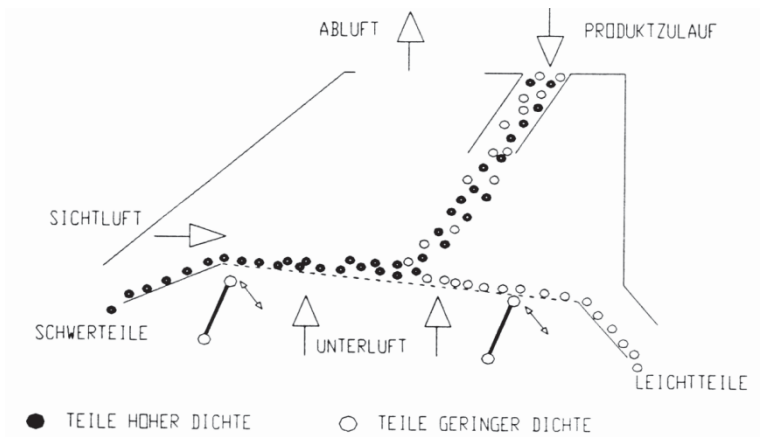


Abbildung 27: Arbeitsweise eines Luftherdes [46]

Bei dem verwendeten Luftherd einer Aufbereitungsfirma handelt es sich um ein Gerät mit trapezförmiger Herdplatte mit einer ca. 90 cm Längsseite. Die Neigung der Platte ist sowohl in Längs- als auch in Querrichtung manuell verstellbar. Entlang der Längsseite verfügt der Luftherd über vier Austragsöffnungen (2, 3, 4, 5) (siehe Abbildung 28). Entsprechend dem Funktionsprinzip, sollen sich die schwersten Teilchen im Behälter 5 und die leichtesten Teilchen im Behälter 2 anreichern.



Abbildung 28: Blick auf die Herdplatte mit Austragschächten

Feinstpartikel werden durch eine Staubabsaugung über der Herdplatte und zwei nachfolgende Zyklone abgeschieden (siehe Abbildung 29). Das Aufgabegut wird von einer Vibrorinne aus einem trichterförmigen Behälter zur Herdplatte gefördert. Sowohl die Fördermenge, als

auch der Luftstrom von unten können verstellt werden. Der Luftstrom der Staubabscheidung und die Frequenz der Schwingbewegung der Herdplatte sind hingegen nicht veränderlich.



Abbildung 29: Luftherd mit Staubabsaugung

6.2.2.2 Durchführung

Bei dem Versuchsmaterial handelte sich um Gipskartonabfälle, die zuvor mit einem Prallbrecher zerkleinert und anschließend mit einem Schwingsieb auf unter 32 mm klassiert wurden. Um die Körnung an die Dimensionen des verwendeten Luftherdes anzupassen, wurde das Material zuvor mit einem Analysesieb auf unter 10 mm gesiebt.

Es wurden daraufhin vier verschiedene Versuche mit dem Luftherd durchgeführt. Die verwendeten Kornklassen und Einstellungen sind in Tabelle 13 dokumentiert. Für die Versuche III und IV wurde das Aufgabematerial zuvor in einer Schneidmühle auf 2 mm gemahlen. Durch die engere Klassierung sollte die Gleichfälligkeit größer, leichter und kleiner, schwerer Partikel vermieden und so der Einfluss der Korngröße auf die Sortierung vermindert werden.

Tabelle 13: Einstellungen zu den Luftherdversuchen

Versuch Nr.	Korngröße	Luftstrom	Querneigung	Längsneigung
I	10 mm	voll	6,9°	5,5°
II	10 mm	voll	9,6°	8,7°
III	2 mm	voll	9,6°	8,7°
IV	2 mm	voll	9,6°	5,5°

Im Anschluss wurden die Proben aus den vier Versuchen abgewogen und mittels Kristallwasserbestimmung auf den Dihydratgehalt untersucht um das Trennergebnis beurteilen zu können.

6.2.2.3 Ergebnis

Die Wiegeergebnisse zeigen das Verhältnis, in dem das Aufgabegut durch die Wurfbewegung und den Luftstrom auf die fünf Produkte aufgeteilt wurde (siehe Tabelle 14 und Abbildung 30). Der Vergleich der einzelnen Versuche veranschaulicht den Einfluss der Herdplattenneigung auf die Masseverteilung. Eine geringe Längsneigung, wie in den Versuchen I und IV, begünstigte den Transport „bergauf“, parallel zur Längsseite und somit die Ausbringung in den letzten Schacht (Nr. 5). Im Versuch I wurde dieser Effekt durch die geringe Querneigung verstärkt. Durch eine größere Querneigung, wie in den Versuchen II bis IV, verkürzte sich die Verweildauer der Teilchen auf der Herdplatte, was zu einer gleichmäßigeren Masseaufteilung führt.

Das Mahlen des Aufgabegutes für die Versuche III und IV führte vor allem dazu, dass mehr Material (15 bzw. 10 % der Aufgabemasse) durch die Absaugung über der Herdplatte abgeschieden wurde.

Der erhoffte Effekt einer klaren Abtrennung von leichten und schweren Störstoffen vom Gips trat nicht ein. Es stellte sich vielmehr eine Klassierung nach Korngröße ein, wobei der Großteil vom Karton und Holz trotz geringerer Dichte und großer Angriffsfläche für den Luftstrom mit den größeren Gipsteilchen in die Produkte mit höheren Ziffern ging.

Da sich Störstoffe mit höherer Dichte optisch nur schwer von Gips unterscheiden, wurden alle Proben mittels Kristallwasserbestimmung auf ihren Dihydratgehalt bzw. Reinheitsgrad untersucht. Allerdings konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Dihydratgehalt und der Entnahmestelle festgestellt werden (siehe Tabelle 14 und Abbildung 31).

Tabelle 14: Masseverteilung und Reinheitsgrade (R°) der Produkte

	Produkte															Σ Masse
	5			4			3			2			Staub			
	Masse		R°	Masse		R°	Masse		R°	Masse		R°	Masse		R°	
	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]	
I	3823	78	75,0	728	15	75,5	207	4	76,0	72	1	76,5	97	2	72,2	4927
II	301	13	80,3	1209	51	77,9	624	26	71,7	163	7	78,4	87	4	75,5	2383
III	75	14	71,7	199	36	77,9	156	28	77,9	43	8	85,1	81	15	77,4	553
IV	838	43	82,7	612	32	78,8	215	11	78,4	80	4	78,8	184	10	78,8	1929

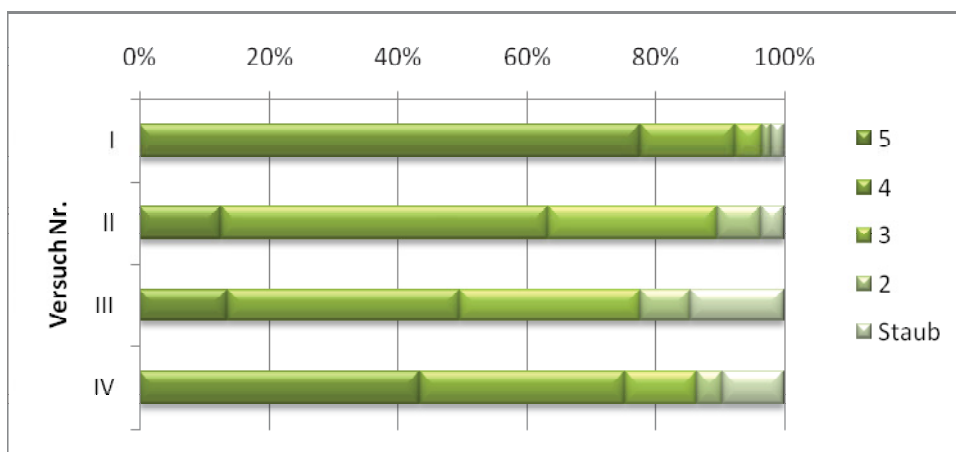


Abbildung 30: Verteilung des Aufgabegutes auf die Produkte

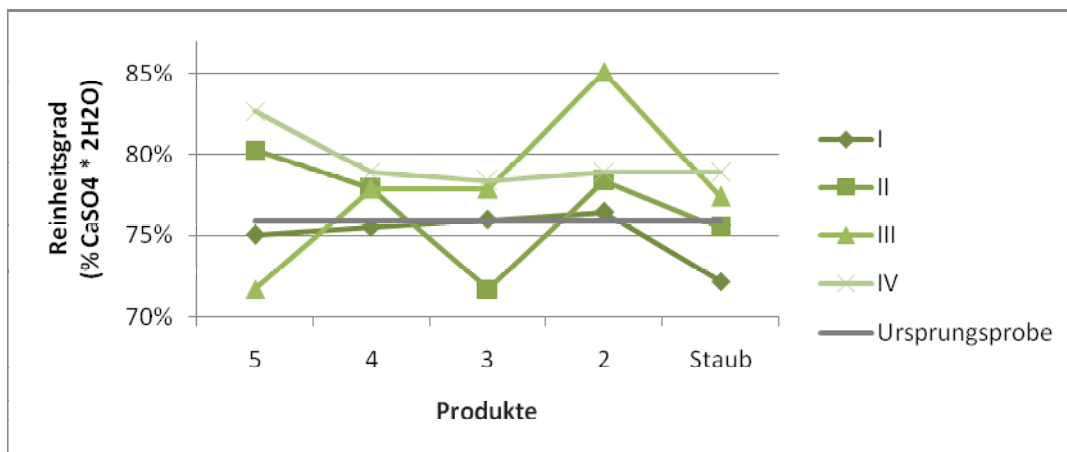


Abbildung 31: Gipsgehalte der Luftherdprodukte

Ein möglicher Grund für das unregelmäßige Ergebnis könnte folgende Fehlerquelle sein: Während der Analyse wird die Probe durch eine Quarzlampe erhitzt. Werden dabei das beinhaltete Holz und der Karton verkohlt, so interpretiert das Analysegerät die dadurch entstehende Gewichtsveränderung als das Verdampfen von Kristallwasser und gibt somit einen verfälschten (erhöhten) Dihydratgehalt an. Aus früheren Versuchen ist bekannt, dass der Reinheitsgrad der sortenreinen Gipskartonteilchen stets unter 80 % liegt. Daraus ist ersichtlich,

dass sehr hohe Werte, wie etwa bei Probe III/2, dem beschriebenen Phänomen zuzuschreiben sind.

6.2.3 Windsichtung

Da bestimmte Störstoffe (hier Leichtgut genannt), wie Karton, Holzfasern oder Dämmmaterial, eine geringere Dichte und/oder eine höhere spezifische Oberfläche haben als Gipsteilchen, kann angenommen werden, dass sie sich durch Windsichtung vom übrigen Material abtrennen lassen. Um dies zu überprüfen, wurden mit einigen Fraktionen Versuche im Labormaßstab durchgeführt.

6.2.3.1 Aufbau

Für diesen Versuch wurde die gleiche Apparatur benutzt, wie für die Versuche zur Dichtesortierung (siehe Abbildung 24 auf Seite 43). Allerdings wurde der Antrieb zur Unterbrechung des Luftstromes nicht aktiviert, sodass das Material im Probenbehälter für die gesamte Dauer des Teilversuches von einer gleichbleibenden Luftmenge angeströmt wurde.

6.2.3.2 Durchführung

Das analysierte Material stammt wie in den vorhergehenden Versuchen aus dem Siebdurchgang des Aufbereitungsversuches mit dem Prallbrecher. Mittels Siebung wurden vier Kornklassen (10/6,3; 6,3/3,15; 3,15/1; 1/0 mm) vorbereitet. Für die kleinste Kornklasse (1/0 mm) konnte der Versuch jedoch nicht durchgeführt werden, da die Korngröße eines Teiles der Probe kleiner ist als die Maschenweite des Siebbodens des Probenbehälters.

Von den restlichen drei Fraktionen wurden pro Versuchsdurchgang ca. 50 ml in den Probenbehälter gegeben und der Windsichtung unterzogen. Durch teilweises Schließen der Düsen am Luftschlauch wurde der auf das Material wirkende Unterdruck dreimal erhöht und somit der Luftstrom verstärkt. Vor jeder Erhöhung wurde das Probenmaterial, das nach oben gesaugt wurde und sich am Deckel des Probenbehälters angesammelt hatte, händisch abgetrennt. Diese Prozedur wurde für jede Kornklasse dreimal durchgeführt. Die resultierenden Fraktionen gleicher Einstellungen und Korngröße wurden zusammengeführt und gewogen.

Da kleine Partikel schon bei geringerem Luftstrom mitgerissen werden, mussten die Düsen-einstellungen den jeweiligen Kornklassen angepasst werden. Außerdem wurde für jede Kornklasse der Abhebezeitpunkt (in cm Wassersäule), sprich der Unterdruck, bei dem sich die ersten Teilchen von der Probenmasse abheben, notiert.

Zur Vereinfachung der Auswertung wurden die durch die Windsichtung erzielten Teilmengen in einer Mikromühle gemahlen. Da dabei nur die spröden Stoffe, wie Gips und Gestein, zermahlen wurden, konnten im Anschluss unzerstörte Teilchen (hauptsächlich Karton und Holz) durch Siebung (Maschenweite 0,7 mm) abgetrennt und gewogen werden.

6.2.3.3 Ergebnis

Die Ergebnisse des Versuches sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Die Fraktionen 1 bis 3 sind jene Mengen, die durch die Sichtung abgetrennt wurden. Fraktion 4 stellt den verbleibenden Rest dar.

Tabelle 15: Ergebnis des Windsichtungsversuches

Korn- klasse	Frakti- on	Abhe- be- punkt	Anteil an Gesamt masse	Stoffanteil pro Fraktion		Stoffanteil an Gesamtmasse		Transferkoeffi- zient	
				Holz, Karton	Rest	Holz, Karton	Rest	Holz, Karton	Rest
[mm]		[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[]	[]
10/6,3	1	15,5	5,0	11,55	88,5	0,58	4,4	0,54	0,04
	2		5,9	3,85	96,1	0,23	5,7	0,21	0,06
	3		22,6	0,86	99,1	0,20	22,4	0,18	0,23
	4		66,5	0,11	99,9	0,08	66,4	0,07	0,67
	Summe		100,0	1,08	98,9	1,08	98,9	1,00	1,00
6,3/3,15	1	8,5	0,7	42,31	57,7	0,31	0,4	0,18	0,00
	2		1,3	10,87	89,1	0,14	1,1	0,08	0,01
	3		5,2	3,19	96,8	0,17	5,1	0,10	0,05
	4		92,7	1,20	98,8	1,12	91,6	0,65	0,93
	Summe		100,0	1,73	98,3	1,73	98,3	1,00	1,00
3,15/1	1	3,5	1,6	9,62	90,4	0,15	1,4	0,04	0,02
	2		2,3	10,67	89,3	0,25	2,1	0,06	0,02
	3		4,4	2,78	97,2	0,12	4,3	0,03	0,04
	4		91,7	4,16	95,8	3,81	87,9	0,88	0,92
	Summe		100,0	4,33	95,7	4,33	95,7	1,00	1,00
1/0	keine Windsichtung			2,47	97,5	2,47	97,5	1,00	1,00

Es zeigte sich eine Abhängigkeit der Trennqualität von der Korngröße. In der Kornklasse 10/6,3 mm wurden bereits beim ersten Windsichtungsschritt mehr als die Hälfte und in den folgenden zwei Schritten weitere 39 % des Leichtgutes abgeschieden, sodass schließlich im Restprodukt nur 7 % zurückblieben. Von der mittleren Kornklasse (6,3/3,15 mm) konnten durch die Sichtung insgesamt 35 % und von der feinsten Kornklasse (3,15/1 mm) nur 12 % vom Leichtgut abgeschieden werden (siehe auch Abbildung 32).

Der Trennerfolg beim grobkörnigen Material ging jedoch zulasten des Masseausbringens an Gips. So wurde zwar der Leichtgutgehalt von 1,08 % in der Gesamtmasse auf 0,08 % in der Fraktion 4 verringert, allerdings wurde dabei etwa ein Drittel des Gipses mit dem Leichtgut abgeschieden.

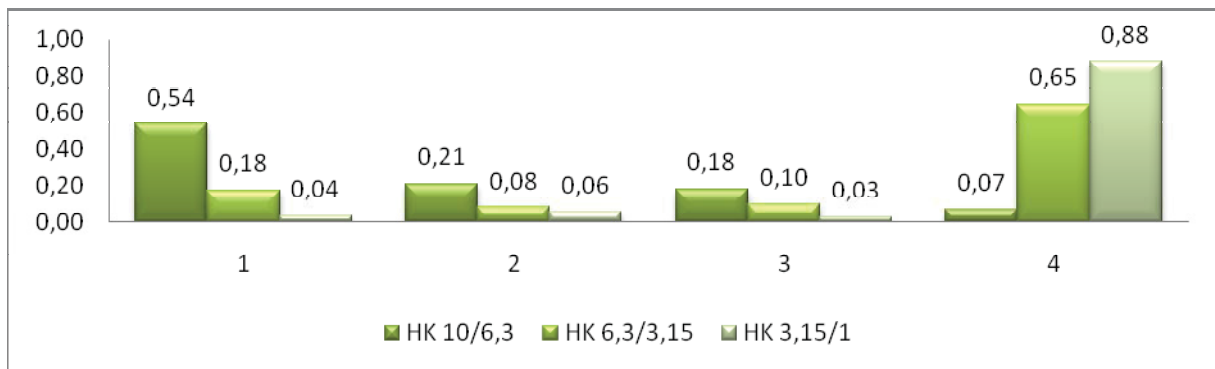


Abbildung 32: Vergleich der Transferkoeffizienten für Holz und Karton

Eine nahezu vollständige Abtrennung von Holz und Karton, wie sie für das Erreichen der Qualitätsanforderungen nötig wäre, wäre mit Windsichtung und vorhergehender Klassierung nach Korngröße also möglich. Hohe Gipsverluste sind dabei allerdings in Kauf zu nehmen.

6.2.4 Luftsetzmaschine

Luftsetzmaschinen wurden bislang fast ausschließlich zur Kohleaufbereitung verwendet [47, S. 123]. Es gab nur wenige Versuche, diesen Gerätetyp auch in der Abfallaufbereitung einzusetzen. Im vorliegenden Fall sollten durch Dichtesortierung mit der Luftsetzmaschine Schwerstoffe im zerkleinerten Gipsabfall vom restlichen Material abgetrennt werden. Eine Drei-Produkttrennung in Leicht-, Mittel- und Schwergut, wie sie beim Versuch mit der Laborluftsetzmaschine durchgeführt wurde, wurde in diesem Fall nicht angestrebt, da die Leichtgutabscheidung mittels selektiver Zerkleinerung zielführender erscheint. Der Versuch zur Schwerstoffabtrennung wurde auf einer Pilotanlage an der RWTH Aachen durchgeführt.

6.2.4.1 Aufbau

Das Herzstück der Luftsetzmaschine ist der ca. 2 m lange und 0,4 m breite Setzgutträger (A) (siehe Abbildung 33). Ähnlich wie bei einem Schwingsieb wird er von einem Exzenterantrieb bewegt. Auf dem Setzgutträger wird das zu trennende Material aufgegeben. Es wird dabei von einem konstanten und einem pulsierenden Luftstrom durchströmt. Der konstante Luftstrom versetzt das Material teilweise in einen Schwebestand, wodurch sich das Setzbett (lockere Schichtung des Aufgabematerials (siehe Abbildung 34)) bildet. Der pulsierende Luftstrom sorgt dafür, dass sich während des Setzvorganges leichtere Teilchen nach oben und schwerere Teilchen nach unten bewegen und sich so zum Austrag hin eine Schichtung nach der Dichte ergibt [48].

Der Transport des Materials von der Aufgabe hin zum Austrag geschieht durch die Neigung und die Rüttelbewegung des Setzgutträgers. Am unteren Ende des Setzbettes teilt ein Schlitzaustrag (B) den Materialstrom in Schwer- und Leichtgut. Das Schwergut wird über ein Zellenrad (C) ausgetragen. Im Gegensatz zu höher entwickelten Modellen, verfügt die Pilotanlage an der RWTH über keinen sensorgesteuerten Schwergutaustrag. Das Zellenrad wird

dabei kontinuierlich angetrieben. Jedoch kann die Drehzahl manuell gesteuert werden. So kann beispielsweise durch eine Verringerung der Zellenradzahl mehr Schwergut vor dem Schlitzaustrag aufgestaut werden um die Wertstoffausbringung im Schwergut zu reduzieren [48].

Um an der Pilotanlage auch mit geringen Mengen an Inputmaterial Versuche durchführen zu können, wird nach dem Austrag das Schwer- und Leichtgut wieder vermischt (siehe Abbildung 35) und über Förderbänder im Kreislauf geführt (siehe Abbildung 36). Die Durchsatzleistung beträgt dabei 6 t/h [48].

Der Luftstrom wird durch ein Gebläse erzeugt. Dabei kann die Luftmenge sowohl über die Drehzahl des Schaufelrades als auch über dessen Schaufelstellung reguliert werden. Ein Flatterventil (D) sorgt für die Pulsierung des Luftstromes [48].

Zur Staubreduktion wird über dem Setzbett und bei den Übergabestellen der Förderbänder Luft abgesaugt und in Zyklonen gereinigt [48].

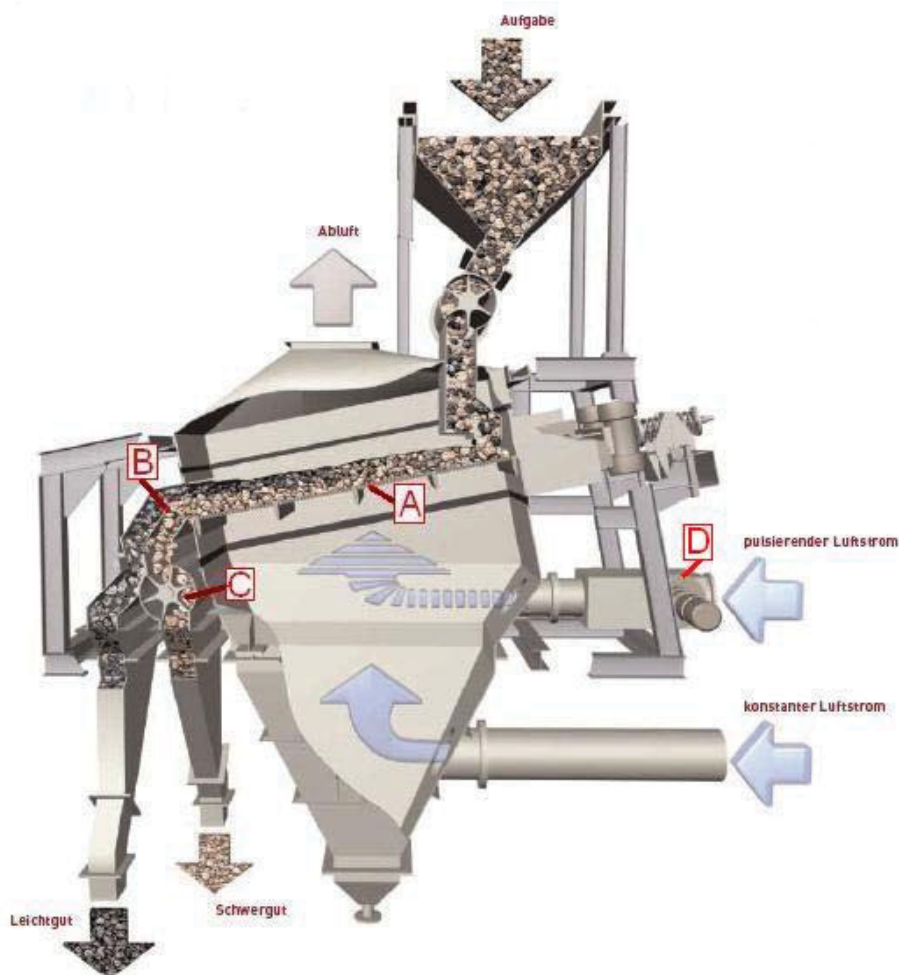


Abbildung 33: Querschnitt einer Luftsetzmaschine [49, S. 8]



Abbildung 34: Setzbett in Ruhe, Blick Richtung Aufgabe



Abbildung 35: Austrag von Schwergut (oben) und Leichtgut (unten)

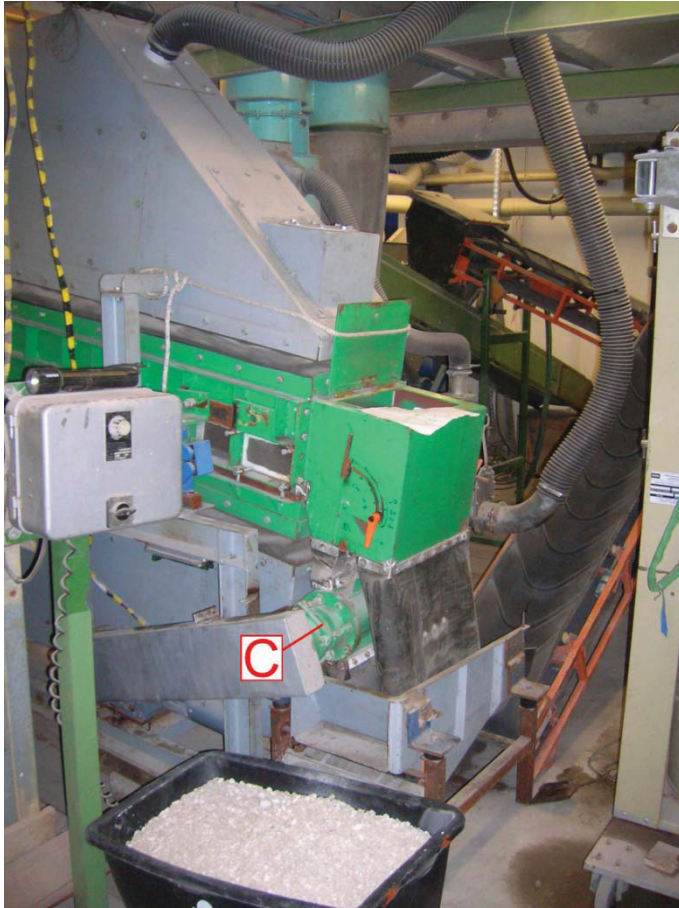


Abbildung 36: Austragsseite der Pilot-Luftsetzmaschine

6.2.4.2 Durchführung

Vor diesem Versuch wurde das Probenmaterial fünf Monate auf dem Gelände der Fa. Cemex in Containern gelagert. Durch die hygroskopische Eigenschaft von Gips und vermutlich zusätzliches Eindringen von Niederschlägen nahm das Material während der Lagerung viel Feuchtigkeit auf. Einer Messung nach DIN 51718 zufolge betrug der Feuchtigkeitsgehalt bezogen auf die Trockenmasse 52,3 %. Da nur Material mit einer maximalen Korngröße von 25 mm das Zellenrad der Pilotanlage durchlaufen kann, wurden vor dem Versuch von der Fa. Cemex Teilchen über 22 mm mit einem Flächensieb abgetrennt.

Um mit der Luftsetzmaschine aussagekräftige Ergebnisse zu erreichen, musste das Material zuvor in einem Trockenschrank ca. 48 Stunden lang bei 80°C getrocknet werden. Da der Feinanteil unter 2 mm in der Luftsetzmaschine nicht gut sortiert werden kann, wurde er durch eine erneute Siebung des getrockneten Materials abgetrennt. Dabei fiel auf, dass der Masseanteil des Feingutes durch die erste Siebung im feuchten Zustand stark zugenommen hatte.

Der eigentliche Versuch begann mit der Füllung des Kreislaufes der Pilotanlage. Dabei wurde die Anlage in Gang gesetzt und ca. 400 Liter des Materials händisch auf die Förderbänder zwischen Austrag und Aufgabe aufgebracht (siehe Abbildung 37). Der Durchsatz beträgt bei dieser Probenmenge 3,9 t/h.



Abbildung 37: Befüllung des Kreislaufes

Nachdem die ersten Versuche gezeigt haben, dass eine Abtrennung schwerer Störstoffe mit dieser Anlage möglich ist, wurde eine Versuchsreihe bestehend aus acht Einzelversuchen gestartet. Dabei wurden jedesmal die Luftmenge und/oder die Einstellung des Schlitzaustrages variiert (siehe Tabelle 16).

Bei den Versuchen 1 bis 4 betrug die Luftmenge jeweils $60 \text{ m}^3/\text{min}$. Die Masseausbringung des Schwergutes wurde durch Vergrößerung des Schlitzaustrages und Erhöhung der Zellenraddrehzahl von Versuch zu Versuch erhöht. Um die Durchwirbelung im Setzbett zu vermindern, reduzierte man für die Versuche 5 bis 8 die Luftmenge auf $40 \text{ m}^3/\text{min}$. Abermals wurden für die einzelnen Versuche durch Variieren des Schlitzaustrages verschiedene Masseverhältnisse von Leicht- zu Schwergut erzielt. Das Ziel vom Versuch 8 lag schließlich in der vollständigen Ausbringung der schweren Störstoffe (selbst der sehr kleinen Schwergutpartikel) ins Schwergut.

Zu jedem Einzelversuch wurden Proben aus dem Schwer- und dem Leichtgut entnommen und später einer Sieb- und Sortieranalyse unterzogen.

Tabelle 16: Einstellungen der Luftsetzmaschine

Versuch	Luftmenge	Massenausbringen [%]	
	[m ³ /min]	Schwertgut	Leichtgut
1	60	5	95
2		5	95
3		10	90
4		15	85
5	40	2	98
6		10	90
7		25	75
8		35	65

6.2.4.3 Ergebnis

Die Proben wurden mit einer Analysesiebmaschine in fünf Kornklassen gesiebt und anschließend händisch in die Stoffgruppen Gips, mineralische Störstoffe und Holz/Karton sortiert. Aus technischer Sicht sind vor allem die Störstoffgehalte in der Zielfraktion (Leichtgut) und aus wirtschaftlicher Sicht die Gipsverluste durch Ausbringung ins Schwertgut von Interesse.

Das Ergebnis der Dichtesortierung ist sehr zufriedenstellend. Die Reinheitsgrade, sprich die Gipsgehalte im Leichtgut, liegen bei allen Versuchen bei ca. 99 % (siehe Tabelle 17, 5. Spalte). Es zeigte sich, dass sich der Reinheitsgrad der Zielfraktionen durch Erhöhung der Schwertgut-Masseausbringung nicht mehr steigern lässt. Wie in Abbildung 38 zu sehen ist, hat eine Vergrößerung des Schlitzaustrages für das Schwertgut nur den negativen Effekt des erhöhten Wertstoffverlustes (siehe Tabelle 18, 2. Spalte). Hervorzuheben ist dabei der Versuch Nummer 5, bei dem bei einem Schwertgutanteil von lediglich 2 % ein Reinheitsgrad von 99,3 % erreicht wurde. Dadurch können 98 % des Gipses in der Aufgabe genutzt werden (siehe Tabelle 19, 5. Spalte).

Tabelle 17: Stoffverteilung in den Dichtefraktionen

Versuchnr.	Schwertgut			Leichtgut		
	Gips	min. Störs.	Holz/Karton	Gips	min. Störs.	Holz/Karton
1	81,95%	17,98%	0,06%	98,92%	0,71%	0,27%
2	84,04%	15,96%	0,00%	99,16%	0,80%	0,14%
3	85,73%	14,27%	0,00%	99,27%	0,75%	0,08%
4	90,98%	8,20%	0,02%	99,13%	0,67%	0,19%
5	79,95%	20,05%	0,00%	99,29%	0,60%	0,10%
6	85,10%	14,90%	0,00%	99,42%	0,43%	0,24%
7	93,95%	6,05%	0,00%	99,66%	0,27%	0,07%
8	91,20%	8,79%	0,01%	99,27%	0,50%	0,13%

Tabelle 18: Anteile an der Gesamtmasse

Versuchnr.	Schwergut			Leichtgut		
	Gips	min. Störsst.	Holz/Karton	Gips	min. Störsst.	Holz/Karton
1	4,10%	0,90%	0,00%	93,97%	0,67%	0,26%
2	4,20%	0,80%	0,00%	94,20%	0,76%	0,13%
3	8,57%	1,43%	0,00%	89,34%	0,68%	0,07%
4	13,65%	1,23%	0,00%	84,26%	0,57%	0,16%
5	1,60%	0,40%	0,00%	97,31%	0,59%	0,10%
6	8,51%	1,49%	0,00%	89,48%	0,39%	0,22%
7	23,49%	1,51%	0,00%	74,75%	0,20%	0,05%
8	31,92%	3,08%	0,00%	64,52%	0,33%	0,08%

Tabelle 19: Transferkoeffizienten

Versuchnr.	Schwergut			Leichtgut		
	Gips	min. Störsst.	Holz/Karton	Gips	min. Störsst.	Holz/Karton
1	0,04	0,57	0,01	0,96	0,43	0,99
2	0,04	0,51	0,00	0,96	0,49	1,00
3	0,09	0,68	0,00	0,91	0,32	1,00
4	0,14	0,68	0,02	0,86	0,32	0,98
5	0,02	0,40	0,00	0,98	0,60	1,00
6	0,09	0,79	0,00	0,91	0,21	1,00
7	0,24	0,88	0,00	0,76	0,12	1,00
8	0,33	0,90	0,04	0,67	0,10	0,96

Die Reduktion der Luftmenge von 60 auf 40 m³ brachte keine messbare Veränderung des Trennergebnisses.

Erwartungsgemäß reicherten sich die schweren mineralischen Störstoffe im Schwergut an. In Abbildung 38 sind die Transferkoeffizienten für mineralische Störstoffe im Schwergut aufgetragen. Der Anteil, der wie beabsichtigt ins Schwergut ging, steigt mit dessen Masseausbringung an. Leichte Fremdstoffe (Holz und Karton) gingen fast zur Gänze ins Leichtgut. Nur geringe Mengen an Karton, der mit Gipsteilchen verwachsen ist, gelangten ins Schwergut.

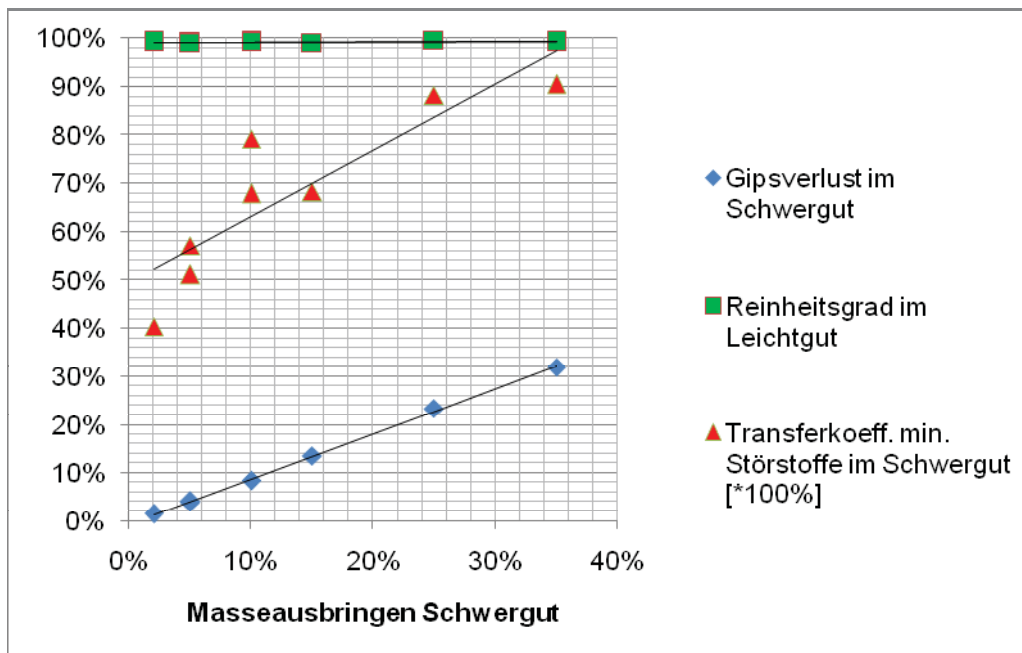


Abbildung 38: Abhängigkeiten vom Verhältnis des Masseausbringens

Kritisch zu betrachten ist, dass der Störstoffgehalt im Inputmaterial, auf den aus den Gehalten in den beiden Dichtefraktionen geschlossen wurde, auffallend gering ist. Während sich aus den Analysen der Produkte vorhergehender Aufbereitungsschritte (Zerkleinerung und Klassierung) und der Interpolation auf die Kornklasse 22/2 mm ein Störstoffgehalt von ca. 14 %¹ ergab, fanden sich in den Proben aus der Luftsetzmaschine nur durchschnittlich 2 %² Störstoffe. Als Grund für die Verringerung der Verunreinigung mit Karton ist anzunehmen, dass sich dieser durch die Abluftabsaugung und Kreislauflührung der Luft in der Luftsetzmaschine in den nachgeschalteten Zyklonen oder unter dem Setzgutträger angesammelt haben. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass das Material durch die Kreislauflührung im Zuge des Versuches die Maschine mehrmals durchfährt und so bei jedem Durchgang Karton abgesaugt werden kann. Die hohen Abweichungen bei den mineralischen Störstoffen könnten sich dadurch erklären, dass durch die vorhergehenden Siebungen bei 22 und 2 mm mehr Fremdstoffe abgeschieden wurden, als in der Interpolation errechnet. Es wäre auch denkbar, dass das verwendete Inputmaterial aufgrund der Heterogenität in seiner Zusammensetzung vom übrigen Prallmühlendurchgang abweicht.

Die folgenden Diagramme zeigen die Korngrößenverteilung und die stoffliche Zusammensetzung der Dichtefraktionen anhand der Probe 5. Da das Leichtgut 98 % des Inputs aus-

¹ 9,30 % mineralische Störstoffe, 2,24 % Karton, 2,11 % sonstige Störstoffe

² 1,88 % mineralische Störstoffe, 0,14 % Holz/Karton

macht, weicht die Korngrößenverteilung des Aufgabematerials nur unwesentlich von der des Leichtgutes ab. Das Leichtgut (siehe Abbildung 39) ist deutlich feinkörniger als das Schwergut (siehe Abbildung 40). Dies ist durch das Prinzip der Gleichfälligkeit großer, leichter und kleiner, schwerer Partikel zu erklären. Aus Abbildung 39 ist ersichtlich, dass sich die Störstoffgehalte in den Kornklassen unter 4 oder über 10 mm am höchsten sind.

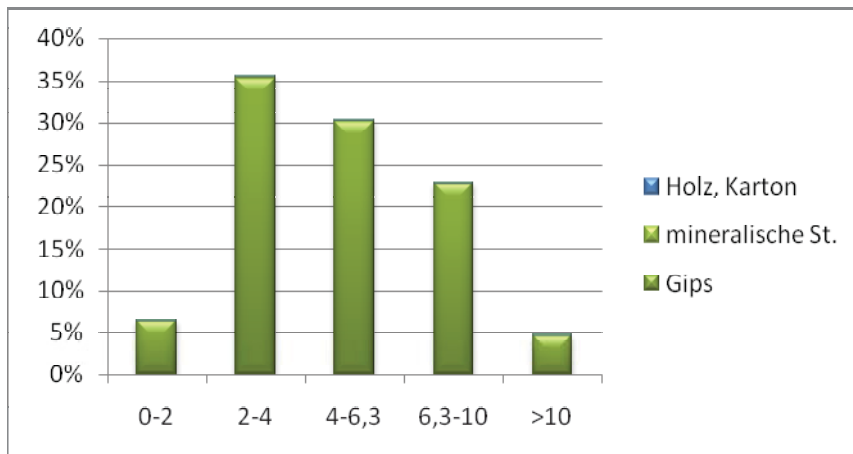


Abbildung 39: Korngrößenverteilung und stoffliche Zusammensetzung des Leichtgutes aus Versuch 5

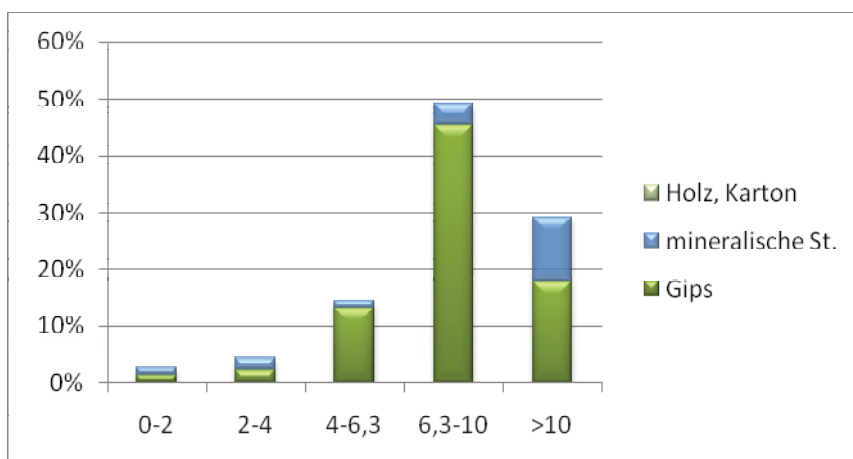


Abbildung 40: Korngrößenverteilung und stoffliche Zusammensetzung des Schwergutes aus Versuch 5

6.3 Versuch: Selektive Zerkleinerung

Wie im Kapitel 6.2.3.2 erwähnt, kann man sich zur Abtrennung bestimmter Störstoffen der selektiven Zerkleinerung bedienen. Das Ziel dieses Aufbereitungsschrittes ist es, die spröden Gipskartonteilchen zu zerkleinern, sodass nur elastische Störstoffe, wie Karton oder Holzfasern, unzerstört bleiben und durch Siebung abgetrennt werden können.

6.3.1 Vorbereitung

Da aus dem vorhergehenden Versuch mit der Luftsetzmaschine nur die von der RWTH zugesandten Stichproben als Inputmaterial zur Verfügung gestanden wären, wurde eigens für den Versuch ein Gemenge aus Gips und den abzutrennenden Störstoffen hergestellt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die stoffliche Zusammensetzung des Inputmaterials genau bekannt ist.

Das Inputmaterial für das Gemenge bestand aus:

- 1,6 m² Gipskartonbauplatte (GKB), Dicke 9,5 mm;
- 0,8 m² Gipskartonbauplatte (GKB), Dicke 12,5 mm;
- 0,7 m² imprägnierte Feuerschutzplatte (GKFI), Dicke 12,5 mm;
- 0,6 m² Holzfaserplatte, Dicke 15 mm.

Da das flächenspezifische Gewicht des Kartons für die Gipskartonplatten mit 160 g/m² bekannt ist, kann aus der Fläche der Platten die Menge an enthaltenen Karton ermittelt werden. Die Masse an Gips und Holzfasern erhielt man durch Wiegen. Das Ausgangsmaterial setzt sich also aus 79 % Gips, 17 % Holzfasern und 4 % Karton zusammen. Der Fremdstoffanteil ist damit viel höher als beim tatsächlichen Inputmaterial für diesen Prozessschritt. Dadurch soll der Trennerfolg leichter nachvollziehbar sein.

Alle Platten wurden mit einer Prallmühle zerkleinert (siehe Abbildung 41). Um die größeren Karton- und Holzfaserplattenstücke abzutrennen, wurde das Produkt bei 32 mm gesiebt. Dabei wurden 13 % der Gesamtmasse (10 % Gips und Karton, 3 % Holzfasern) ausgeschieden.



Abbildung 41: Ausgangsmaterial

6.3.2 Durchführung

Der eigentliche Versuch besteht aus zwei Schritten. Zuerst wurde das Material mit einem Walzenbrecher (siehe Abbildung 42) zerkleinert. Das Ziel war eine maximale Korngröße der Gipskörner von 1 mm. Da dies mit dem etwas klein dimensionierten Brecher (25 cm Walzenbreite) auch bei geringster Spaltbreite nicht in einem Durchgang möglich war, wurde das Material mit einer Korngröße von über 1 mm zwei weitere Male in den Brecher aufgegeben. Das entstehende Feinkorn unter 1 mm wurde abgesiebt und gewogen.



Abbildung 42: Walzenbrecher ohne Verkleidung und Aufgabetrichter

Der zweite Schritt war eine Siebung bei 2 mm. Dabei sollen sich der Gips im Durchgang und die elastischen (nicht zerdrückbaren) Störstoffe im Überlauf anreichern. Die Siebung wurde mit dem Analysesieb im Labor des IAE durchgeführt.

6.3.3 Ergebnis

Nach dem ersten Zerkleinerungsdurchgang mit dem Walzenbrecher wurde ein Feinanteil (<1 mm) von 40 % der Gesamtmasse (50 % des Gipses) abgetrennt. Nach einer Verkleinerung der Spaltbreite und zwei weiteren Zerkleinerungsdurchgängen stieg dieser Anteil auf 71 % der Gesamtmasse (91 % des Gipses). Das pulverförmige Produkt weist keine erkennbaren Störstoffe auf.

Es wird angenommen, dass bei einem größeren Walzenbrecher keine Kreislaufführung des Materials zur vollständigen Zerkleinerung nötig wäre.

Bei der Siebung der Fraktion über 1 mm mit einem 2 mm-Sieb gingen nicht nur die Gipsteilchen der Kornklasse 2/1 mm in den Durchgang, sondern auch Holzfasern, die zwar bis zu

3 cm lang waren, jedoch aufgrund des schmalen Querschnittes durch die Siebmaschen passten (siehe Abbildung 43).



Abbildung 43: Durchgang der Siebung bei 2 mm

Da ein derartig hoher Störstoffanteil für den Recyclinggips inakzeptabel ist, kommt die Siebung bei 2 mm zur Fremdstoffabtrennung nicht in Frage.

6.4 Versuch: Aufnahme von Luftfeuchtigkeit

Bei den durchgeführten Versuchen fiel die hygroskopische Wirkung des Probenmaterials auf. Insbesondere das Material, das nach fünfmonatiger Lagerung für den Versuch mit der Luftsetzmaschine verwendet wurde, wies eine sehr hohe Feuchtigkeit auf.

Da sich dieser Effekt bei der Lagerung von Recyclingmaterial negativ auf die Weiterverarbeitbarkeit auswirken kann, wurde eine Versuchsreihe zur Bestimmung der aufgenommenen Menge an Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von Zeit und Korngröße durchgeführt.

Erwartungsgemäß sollten die Feuchtigkeitsgehalte der Proben mit der Zeit steigen und sich für feinkörnigere Proben (aufgrund der vermuteten größeren spezifischen Oberfläche) stärkere Zunahmen abzeichnen als für grobkörnigeres Material.

Aus der Literatur sind bereits Daten zur Feuchtigkeitsaufnahme von Gipskarton bekannt. Da bei diesen Versuchen jedoch nicht die Lagerfähigkeit von Gipsabfällen, sondern die Eignung von Gipskarton als Baustoff bewiesen werden sollte, weicht die Vorgehensweise und Zielsetzung etwas vom vorliegenden Versuch ab. Es wurde dabei die Gewichtszunahme, die

sich für unzerstörte Gipskartonplatten während der Lagerung bei gleichbleibender Temperatur und Luftfeuchtigkeit einstellt, untersucht (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20: Feuchtigkeitsaufnahme von Gipskartonplatten bei 20°C [1, S. 40]

einwirkende relative Luftfeuchte	40 %	60 %	80 %
Feuchtigkeitsaufnahme in Masse-%	0,3 – 0,6	0,6 – 1,0	1,0 – 2,0

6.4.1 Durchführung

Als Probenmaterial dienten zwei verschiedene fabrikneue Gipskartonplatten der Marke Knauf:

- Gipskartonbauplatte (GKB), Dicke 12,5 mm,
- imprägnierte Feuerschutzplatte (GKFI), Dicke 12,5 mm.

Die Platten wurden in einem Laborprallbrecher zerkleinert. Anschließend wurden von jedem Plattentyp vier Kornklassen hergestellt. Diese Proben und jeweils ein unzerkleinertes Stück (ca. 10 * 10 cm) der beiden Platten wurden auf Plastikteller eingewogen und im Freien gelagert. Eine digitale Wetterstation diente dabei zur Kontrolle der Luftfeuchtigkeit und Temperatur.



Abbildung 44: Probematerial mit verschiedenen Korngrößen

Um die Menge an aufgenommener Luftfeuchtigkeit zu ermitteln wurden die Proben in regelmäßigen Abständen gewogen.

Da die verzögerte Wasseraufnahme der GKFI-Platten durch eine Imprägnierung der gesamten Platte erreicht wird, darf nicht angenommen werden, dass sie auch im zerkleinerten Zustand weniger Feuchtigkeit aufnehmen als GKB-Platten.

6.4.2 Ergebnis

Aus den Wiegeergebnissen und den jeweiligen Anfangsmassen der Proben konnte man direkt auf die aufgenommene Wassermenge schließen. Im folgenden Diagramm (Abbildung 45) wurden die durchschnittlich aufgenommene Wassermenge aller Proben und die zum Zeitpunkt der Wiegung herrschende relative Luftfeuchtigkeit gegen die Zeit aufgetragen. Es zeigt sich dabei ein direkter Zusammenhang der beiden Parameter. Die Gipsproben haben je nach Feuchtigkeit der Umgebungsluft von ihr Wasser aufgenommen oder wieder abgegeben. Im Durchschnitt verändert sich bei einer einprozentigen Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit der Gehalt an aufgenommener Feuchte um 0,01 %.

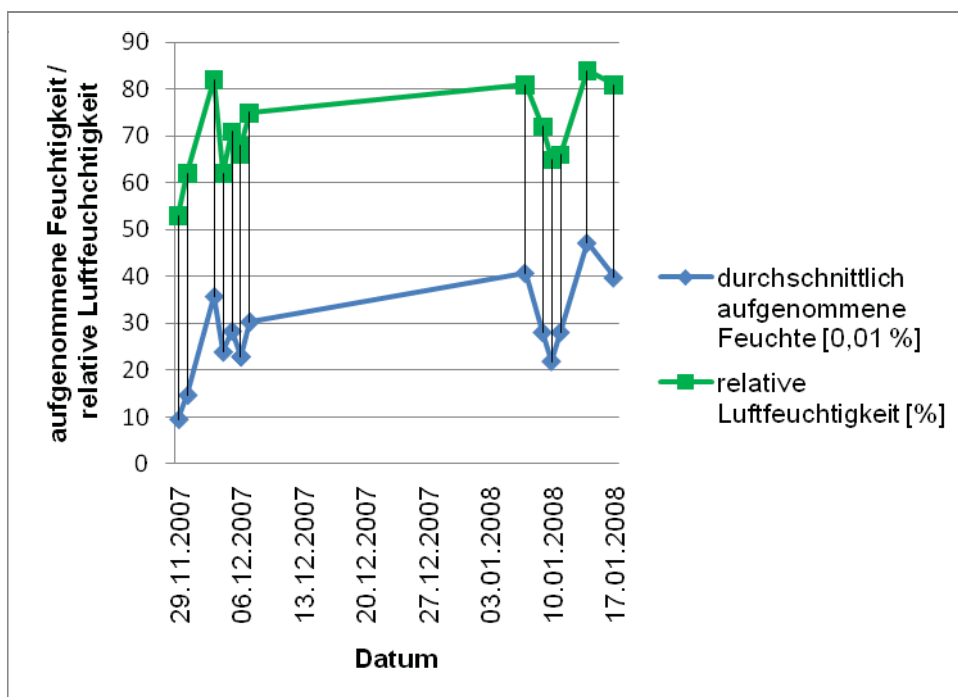


Abbildung 45: Zeitverlauf der Wasseraufnahme und der relativen Luftfeuchtigkeit

Ein eher überraschendes Ergebnis lieferte die Analyse der Feuchtigkeitsaufnahme durch die Einzelproben. Der Versuch widerlegte die Vermutung, dass die Wasseraufnahme bei abnehmender Korngröße (aufgrund der Vergrößerung der spezifischen Oberfläche) zunimmt. Wie Abbildung 46 zeigt, ist eher der umgekehrte Trend zu beobachten. Die Daten geben die Menge der aufgenommenen Luftfeuchtigkeit nach ca. siebenwöchigem Versuch bei einer momentanen relativen Luftfeuchtigkeit zum Zeitpunkt der Wiegung von 84 % an.

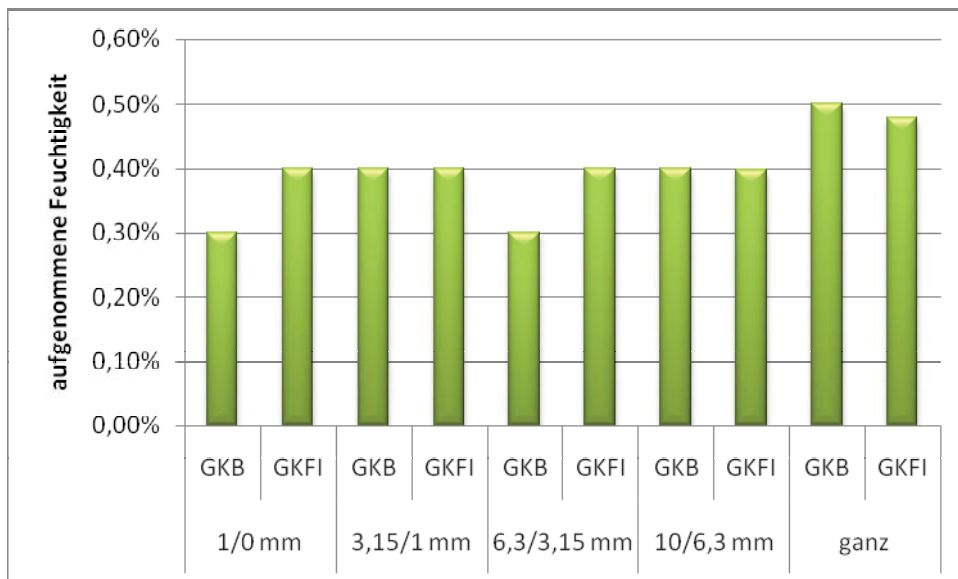


Abbildung 46: Zusammenhang zwischen Korngröße und Wasseraufnahme

Besonders auffallend sind die vergleichsweise hohen Feuchtigkeitsaufnahmen der beiden unzerkleinerten Proben. Zur Untersuchung dieses Phänomens wären weitere Versuche notwendig gewesen, für die keine Zeit mehr war. Möglich wäre, dass der anhaftende Karton mehr Feuchte aufnehmen kann als der Gips. Da bei den feinkörnigen Proben der Karton im Zuge der Aufbereitung teilweise abgetrennt wurde, wäre dies eine mögliche Erklärung für das unerwartete Ergebnis. Ebenso kann vermutet werden, dass durch die Zerkleinerung des porösen Gipskerns die spezifische Oberfläche nicht wie angenommen vergrößert wird.

Die eingewogene Anfangsmenge betrug bei den zerkleinerten Einzelproben ca. 100 g und bei den unzerkleinerten Platten ca. 80 g. Da die Messgenauigkeit der Waage mit 0,1 g für die geringen Gewichtsunterschiede etwas zu gering war, konnten nur Sprünge im Promillebereich festgestellt werden.

Der hohe Feuchtigkeitsgehalt des Aufgabematerials für die Luftsetzmaschine konnte im Nachhinein durch das unplanmäßige Eindringen von Niederschlag durch die Abdeckplane erklärt werden.

6.5 Analysemethoden

Zur Bewertung der Aufbereitungsversuche wurden quantitative und qualitative Analysen der Produkte durchgeführt. Der Vergleich mit den Qualitätsanforderungen an das Recyclingmaterial gibt Aufschluss über die Tauglichkeit der einzelnen Aufbereitungsschritte.

6.5.1 Siebanalyse

Um die stoffliche Zusammensetzung und die Korngrößenverteilung der Proben festzustellen, wurde eine Trockensiebung mit anschließender händischer Sortierung der jeweiligen Frak-

tionen durchgeführt. Ziel dieser Analyse war es herauszufinden, in welchen Fraktionen sich welche Störstoffe anreicherten und welche Fraktionen für eine weitere Aufbereitung zur Erzielung des gewünschten Sekundärrohstoffes geeignet sind.

Die Siebanalyse wurde mit einer Siebmaschine durchgeführt. Bei der Auswahl der verwendeten Siebe orientierte man sich an den bei großtechnischen Siebungen üblichen Siebschnitten. Folglich ergaben sich zu jeder Probe je nach Maximalkorngröße bis zu sechs Kornklassen: 2/0 mm, 4/2 mm, 6,3/4 mm, 10/6,3 mm, 16/10 mm und >16 mm. Um den Abrieb der Gipspartikel durch die rotierende Bewegung der Siebe zu minimieren, wurde die Dauer der Siebung auf fünf Minuten beschränkt und die Drehzahl gering gehalten.

Die Aussortierung der Störstoffe erfolgte händisch nach optischen Merkmalen. Im Zweifel konnten mineralische Störstoffe nach Prüfung der Konsistenz durch Zusammendrücken oder Anritzen erkannt werden. Im Anschluss wurden die einzelnen Fraktionen gewogen und fotografiert. Die Fraktionen unter 2 mm Korngröße wurden nicht aussortiert, da dies mit freiem Auge unmöglich ist. Siebüberläufe aus den Zerkleinerungsversuchen wurden keiner Siebanalyse unterzogen, da dies für Fraktionen mit derart hohen Anteilen an folienartigen Stoffen nicht zielführend wäre.

6.5.2 Kristallwasserbestimmung

Die Kristallwasser- bzw. Dihydratanalysen wurde mit speziellen Analysegeräten durchgeführt. Dafür wurden zuerst die aussortierten Gipskartenteile der jeweiligen Dichtefraktion in einer Mühle gemahlen. Anschließend wurden 10-12 g des Pulvers auf die Probenschale eingewogen und mit einer Infrarotlampe bestrahlt, wodurch die freie Feuchte verdampft wird. Die weitere Erhitzung mit einem Quarzstrahler sorgte für die Verdampfung des stärker gebundenen Kristallwassers. Durch die automatische Wiegung der Probe vor und nach Abtrennung des Kristallwassers wird dessen prozentueller Gehalt errechnet. Multipliziert man diesen Wert entsprechend der folgenden Formel mit dem gravimetrischen Umrechnungsfaktor, so erhält man den Reinheitsgrad R° .

$$R^\circ [\%] = KW [\%] * 4,7785$$

Diese Methode dient normalerweise der Schnellbestimmung des Dihydratgehaltes von Rohgips.

7 Sonstige Möglichkeiten zur Aufbereitung

Nachfolgend angesprochene Punkte wurden im Zuge dieser Diplomarbeit aus verschiedenen Gründen nicht weiter verfolgt. Sie könnten jedoch nach eingehender Untersuchung zusätzlich oder statt eines anderen Aufbereitungsschrittes in das Sammel- und Aufbereitungskonzept eingegliedert werden.

7.1 Sammlung und Vorsortierung

Folgende Maßnahmen könnten zur Störstoffabtrennung vor dem ersten Zerkleinerungsschritt dienen:

7.1.1 Vermeidung von Fehlwürfen

Wie im Kapitel 6.1.2 beschrieben, war das Inputmaterial stark mit vermeidbaren Fremdstoffen verunreinigt. Die Hinweise des Abfallsammlers Cemex an die Kunden, nur Gipskartonabfälle in die entsprechenden Container zu werfen, wurden also (bewusst oder unbewusst) missachtet.

Anhand verschiedener Beispiele aus der Abfallwirtschaft wurde bewiesen, dass Fehlwürfe durch den Einsatz spezieller Container, die auf den zu sammelnden Abfall abgestimmt sind, vermieden werden können. Diese Gipskartonsammelcontainer sollten also über eine Öffnung verfügen, die den Einwurf von Gipskartonplatten begünstigt, aber gleichzeitig den Einwurf von Fremdstoffen erschwert. Ein Container mit einer seitlicher Einwurföffnung und einem versperrbaren horizontalen Deckel würde beispielsweise das Einkippen von Bauschutt verhindern und gleichzeitig den Gipskartonabfall vor Niederschlag schützen. Um den Transport der Sammelbehälter zu vereinfachen, wäre eine Ausführung als Abroll- oder Absetzcontainer (je nach Volumen) anzuraten. Außerdem sollten sich die Container farblich von den üblichen Bauschuttmulden unterscheiden und entsprechend beschriftet sein. Durch diese Maßnahmen sollten zumindest unbewusste Fehlwürfe minimiert werden können.

Als Nachteil des Einsatzes spezieller Container sind vor allem die Anschaffungskosten anzuführen, außerdem würden sich gegenüber herkömmlichen Bauschuttcontainern logistische Probleme ergeben, da die Gipscontainer nur zur Gipssammlung verwendet werden könnten.

Um die Kunden zu einer möglichst sortenreinen Sammlung zu motivieren, sollte ein dementsprechender finanzieller Anreiz in Form von Nachlässen bei den Entsorgungsgebühren geboten werden. Der Grundpreis für sortenreine Gipsabfälle sollte deutlich unter dem Entsorgungspreis für Bauschutt liegen und je nach Verschmutzungsgrad erhöht werden.

7.1.2 Handklauben

Eine weitere Möglichkeit, Störstoffe vor der Aufbereitung abzutrennen, wäre die händische Vorsortierung. Dabei fährt der Abfall auf einer Vibratorrinne an Arbeitern, die entweder Stör- oder Wertstoffe händisch vom Band entfernen, vorbei.

An der Aussortierung der Wertstoffe (also Gipskarton) wäre vorteilhaft, dass die Zielfraktion, abgesehen von anhaftenden Störstoffen, sortenrein vorliegen würde. Gipskartonstücke kleinerer Korngröße ginge jedoch verloren. Außerdem würde, da das Inputmaterial mehr Gipskarton als Störstoffe beinhaltet, die Wertstoffaussortierung eine höhere Massenbewegung durch die Arbeiter bedingen.

Umgekehrt würde bei der Aussortierung der Störstoffe ein gewisser Fremdstoffanteil in der Wertstofffraktion verbleiben. Der Vorteil des geringeren Masseanteils von Störstoffen im Inputmaterial wird jedoch dadurch relativiert, dass der Großteil des Gipskartons in Form von großflächigen Platten vorliegt und so durch weniger Handgriffe aussortierbar wäre als die Störstoffe.

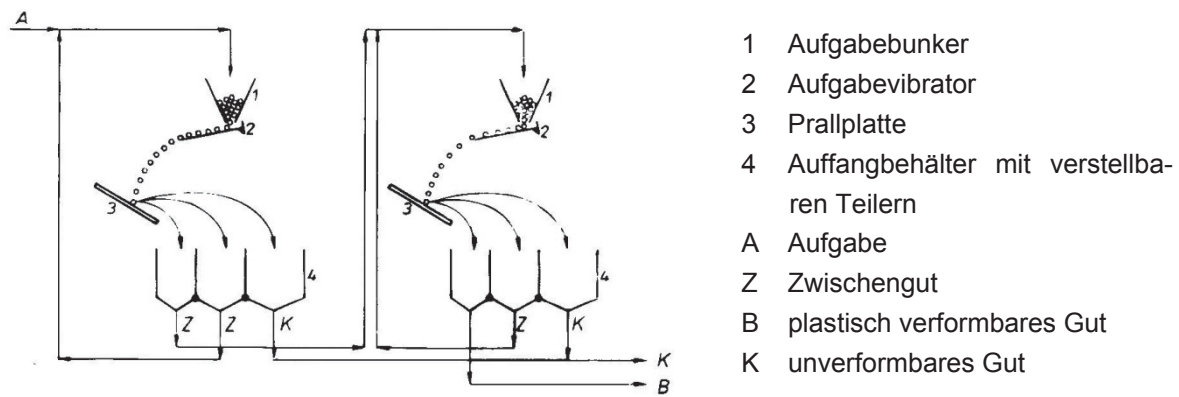
Um eine gründliche Aussortierung erreichen zu können, sollte der Abfall auf der Vibratorrinne nicht zu hoch aufgeschüttet sein und die Bandgeschwindigkeit nicht zu schnell sein. Dadurch wird jedoch der Durchsatz verringert. Wird das Ausleseband mit sechs Arbeitern besetzt, so fallen pro Stunde € 150 (6 * € 25) Personalkosten an, was die Wirtschaftlichkeit der Aufbereitung stark schmälern würde [42].

7.2 Sortierung des zerkleinerten Materials

Folgende Schritte sind Beispiele für Maßnahmen, die alternativ zur Luftsetzmaschine bzw. der selektiven Zerkleinerung zur Störstoffabscheidung aus dem zerkleinerten und klassierten Material dienen könnten:

7.2.1 Sortierung nach dem elastischen Verhalten

Der sogenannte Prallsprungprozess beruht auf Unterschieden im elastischen Verhalten der zu trennenden Körner. Dabei wird das Material von einer Aufgabevorrichtung auf eine geneigte Platte fallen gelassen und entsprechend seinem elastischen Verhalten zurückgeworfen. Ist ein Korn plastisch verformbar, wie etwa Gipskartonstücke, so ist dessen Wurfweite nach dem Rückprall durch den Energieverlust weniger weit als für ein unverformbares Korn, wie etwa Beton- oder Gesteinsbrocken. Zur Verbesserung des Trennschnittes, wäre eine zweistufige Ausführung mit Kreislaufführung der Körner mit mittlerer Wurfweite möglich (siehe Abbildung 47) [50, S. 466ff].

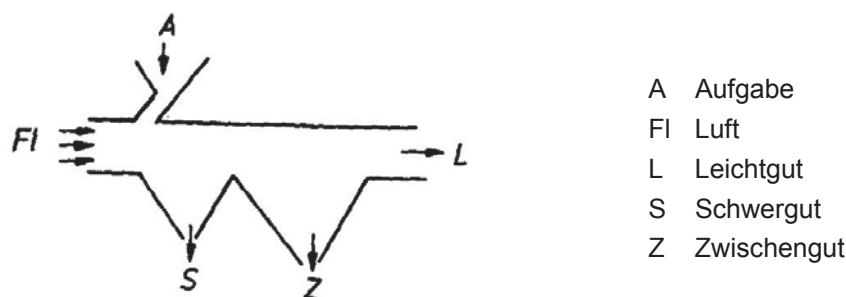


- 1 Aufgabebunker
- 2 Aufgabevibrator
- 3 Prallplatte
- 4 Auffangbehälter mit verstellbaren Teilen
- A Aufgabe
- Z Zwischengut
- B plastisch verformbares Gut
- K unverformbares Gut

Abbildung 47: Fließbild einer zweistufigen Prallsprunganlage [50, S. 468]

7.2.2 Sortierung nach der Kornform

Einige Störstoffe in den Gipsabfällen, wie etwa Karton oder Holzfasern, unterscheiden sich in ihrer Kornform stark von den Gipskörnern. Dadurch wirken in einem Fluid unterschiedliche Widerstandskräfte auf die Teilchen. Dieser Effekt kann u.a. bei der Gegenstrom- oder Querstromsortierung genutzt werden. Wie in Abbildung 48 verdeutlicht, werden dabei die Partikel des Aufgabegutes je nach Kornform und Dichte von einem Luftstrom abgelenkt und in verschiedene Fraktionen sortiert [50, S. 468f].

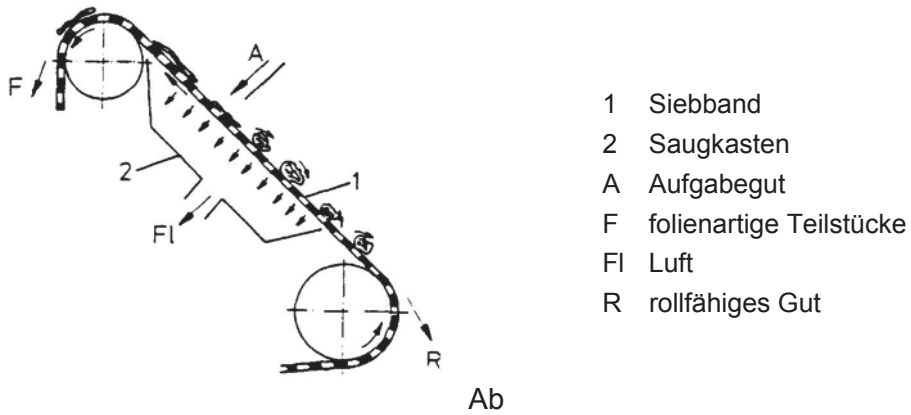


- A Aufgabe
- FI Luft
- L Leichtgut
- S Schwergut
- Z Zwischengut

Ab-

Abbildung 48: Querstrom-Aerosortierung mit einem Horizontalstromsichter [50, S. 109]

Eine weitere Möglichkeit der Ausnutzung formabhängiger Widerstandskräfte bietet der Siebbandscheider mit Absaugung (siehe Abbildung 49). Folienartige Teilstücke werden dabei an ein ansteigendes Siebband gedrückt, indem unter dem Band Luft abgesaugt wird. Sie werden dadurch mit dem Band nach oben befördert, während sich rollfähige Teilchen nach unten bewegen [50, S. 469f].



- 1 Siebband
- 2 Saugkasten
- A Aufgabegut
- F folienartige Teilstücke
- Fl Luft
- R rollfähiges Gut

bildung 49: Wirkprinzip eines Siebbandscheiders [50, S. 469]

8 Recyclingkonzept

Die Aufbereitung der Gipsabfälle zum Recyclinggips erfolgt zur Gänze durch die Fa. Cemex. Die Fa. Knauf kauft schließlich das fertige Material von Cemex an und mischt es zur nachfolgenden Gipskartonproduktion dem gebrochenen Naturgips bei.

Berechnungsgrundlage für die Auslegung der Anlagen und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist eine jährliche Inputmenge von 40.000 t. Es handelt sich dabei um das von Cemex geschätzte Massenpotential für Gipsabfälle in der Steiermark. Die Aufbereitungsanlage soll im Einschichtbetrieb laufen. Bei 1.750 Betriebsstunden pro Jahr ergibt sich also ein stündlicher Durchsatz von maximal 25 t.

Wird der Einzugsbereich ausgedehnt und somit die Menge an angelieferten Gipsabfällen erhöht, so kann die nötige Erhöhung des Tagesdurchsatzes durch eine Umstellung auf Zwei- oder Dreischichtbetrieb erfolgen.

Als Standort für die Anlage wurde das Cemex-Firmengelände in Röthelstein gewählt. Da sich dort auch die firmeneigene Kompostieranlage und ein Kieswerk befinden, können bereits vorhandene Anlagen und Geräte, wie z.B. die Brückenwaage oder ein Radlader, auch für die Gipsaufbereitung genutzt werden. Als Alternative dazu würde sich der Bau der Anlage in der Nähe des Knauf-Werkes in Weißenbach bei Liezen anbieten.

8.1 Abfallaufbereitung

Das Aufbereitungsverfahren und dessen Stoffströme sind in nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Die Zahlen im Sankey-Diagramm geben an, welche Anteile des Aufgabematerials die einzelnen Prozessschritte (graue Kästchen) durchlaufen oder in ein bestimmtes Produkt (gelbes Kästchen) gehen. In Hinsicht auf die Störstoffabtrennung mittels selektiver Zerkleinerung wurden ab der Luftsetzmaschine alle elastischen Fremdstoffe in der Stofffraktion „Holz und Karton“ zusammengefasst.

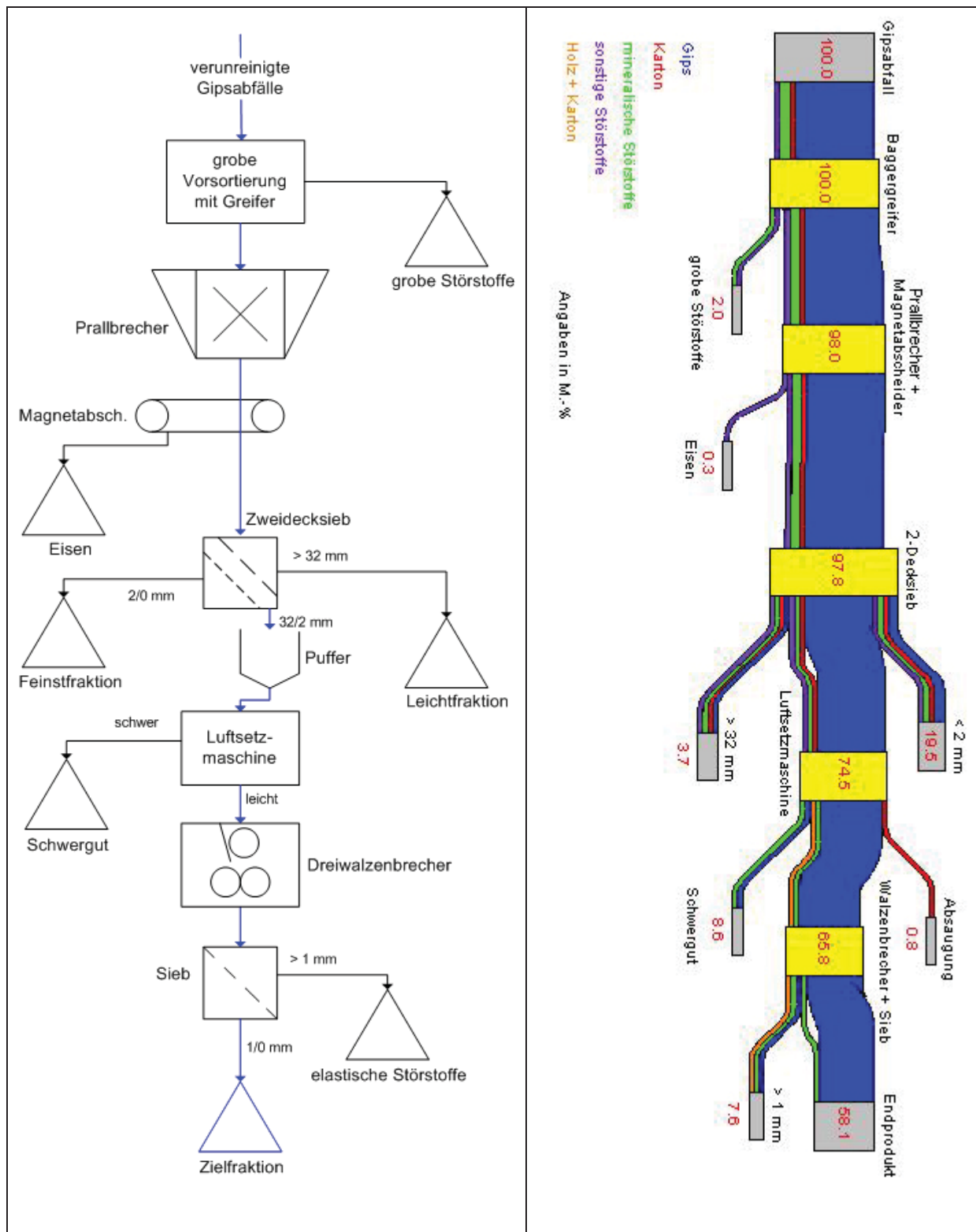


Abbildung 50: Fließbild (links) und Sankey-Diagramm (rechts) zum Aufbereitungsverfahren

Das Aufbereitungsverfahren basiert auf den Erkenntnissen aus den durchgeführten Versuchen (siehe Kapitel 6). Da die Versuche an verschiedenen Standorten sowie mit Labor- und Großanlagen durchgeführt werden mussten, konnte während der Planungsphase nie die

komplette Prozesskette ausprobiert werden. Daher stammen die Daten zur Erstellung der Bilanz aus verschiedenen Einzelversuchen. Aufgrund der fehlenden Daten, mussten auch einige Annahmen getroffen werden. So wurde beispielsweise für die nicht sortierbare Feinstfraktion (2/0 mm) aus dem Aufbereitungsversuch die gleiche stoffliche Zusammensetzung, wie für die Fraktion (4/2 mm) angenommen. Die berechneten Stoffflüsse sind daher als Schätzung auf der Basis experimentell erhobener Daten zu verstehen.

Um die oben angeführten Fehlerquellen zu minimieren, wurde beschlossen, den gesamten Aufbereitungsprozess unter Berücksichtigung der bisherigen Erfahrungen noch einmal durchlaufen zu lassen. Dabei soll auch eruiert werden, wie sich unterschiedliche Störstoffgehalte auf die Sortier- und Klassierleistungen der Apparate auswirken.

Die meisten Aufbereitungsgeräte sind semimobil ausgeführt. Damit ist gemeint, dass ihre Anordnung ohne großen Aufwand verändert werden kann. Dies wird durch Ausstattung der Geräte mit Rädern, Raupen oder Kufen ermöglicht. Die erwarteten Zerkleinerungs-, Sortier- bzw. Klassierleistungen der angekauften Geräte werden mit den Herstellerfirmen vertraglich vereinbart.

Alle abgetrennten Fremdstoffe werden in Containern (z.B. 30 m³ Abroll-Container) gesammelt. Sind diese voll, werden sie gegen leere Container ausgetauscht und an den der Fraktion entsprechenden Entsorgungseinrichtungen entleert.

8.1.1 Sammlung

Die Gipsabfälle werden in Containern, die auf Baustellen bereitgestellt werden, gesammelt und mit LKWs zur Aufbereitungsanlage transportiert. Der Störstoffanteil des Materials vom Aufbereitungsversuch betrug ca. 19 %, es ist somit mit Fehlwürfen zu rechnen. Die Sammelbehälter sind als Abrollcontainer ausgeführt und daher mit dem Fuhrpark der Fa. Cemex-Bruck kompatibel. Zusätzlich zu den von Cemex gesammelten Abfällen, werden auch Lieferungen anderer Abfallsammelunternehmen angenommen.

Die Entleerung erfolgt durch Abkippen auf einem überdachten Lagerplatz. Dort werden sie mit einem Radlader aufgehäuft. Um große Mengen an Gipsabfällen einlagern zu können und genügend Platz für die Sortier- und Umschichtungsarbeiten zu haben, sollte eine Fläche von etwa 2000 m³ überdacht sein.

8.1.2 Vorsortierung

Die Vorsortierung passiert im Zuge der Beschickung des Prallbrechers. Dabei werden mit einem Umschlagbagger und der zugehörigen Greiferzange grobe Störstoffe, die sich optisch klar von Gipskarton unterscheiden und mit wenig Aufwand separiert werden können, aussortiert.

Da während des Aufbereitungsversuches die Menge an aussortierten groben Störstoffen nicht erhoben wurde, wird für die Erstellung der Bilanz ein Massenanteil von 2 % vom Gesamtinput angenommen. Weiters wird angenommen, dass mit dieser Fraktion kein Gips ausgetragen wird.

Die Aufbereitung findet in einer an den Lagerplatz angrenzenden, ca. 2000 m² großen Halle statt. Zur Reduktion der Staubemission verfügt die Halle über eine Entstaubungsanlage. Diese saugt an den Stellen der Staubentwicklung, also den Aufbereitungs- und Fördergeräten, Luft ab und reinigt sie mittels Zyklonen.

8.1.3 Zerkleinerung

Zur Zerkleinerung wird ein Sekundärprallbrecher verwendet. Das Aufgabematerial wird mit einem Greifer in den Aufgabebunker (A) des Brechers befördert (siehe Abbildung 51). Durch die schlagende Beanspruchung werden die Gipskartonplatten zertrümmert und der Großteil des Kartons vom Gipskern gelöst. Der Abstand der Schlagleisten zum Rotor ist so zu wählen, dass ein hoher Feinanteil unter 2 mm vermieden wird. Um den Standort des Prallbrechers einfach verändern zu können, ist dieser mit einem Raupenfahrwerk (B) ausgestattet und kann mit einer Funkfernsteuerung manövriert werden.

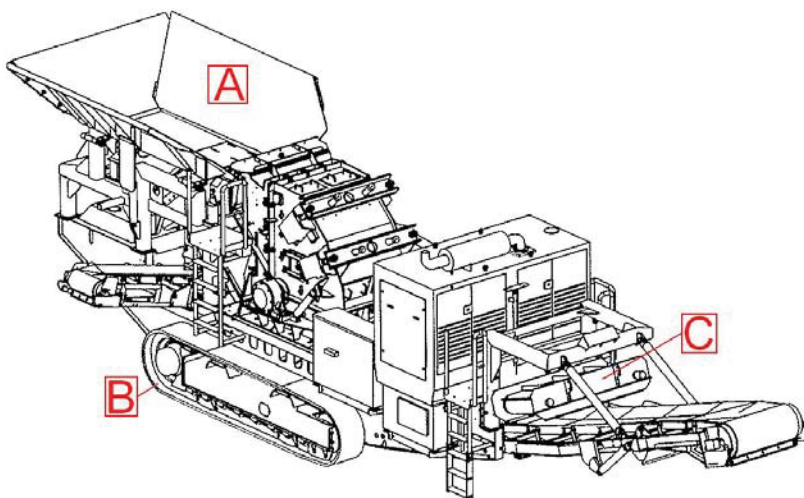


Abbildung 51: Mobiles Prallbrecher [51]

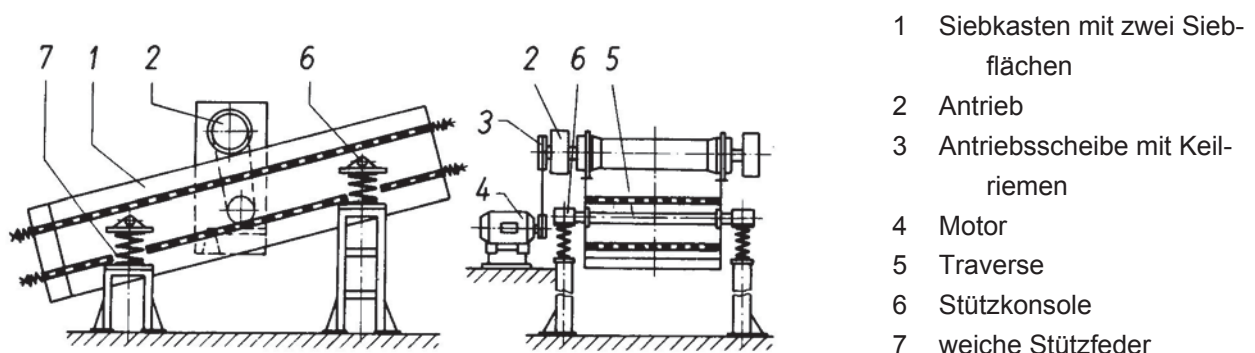
Unmittelbar nach der Zerkleinerung wird das Material durch einen Magnetabscheider (C) von Eisenbestandteilen entfrachtet. Entsprechend den Erfahrungen aus dem Aufbereitungsversuch macht die Eisenfraktion ca. 0,3 % des Inputs aus. Es wird dabei kein Gips ausgetragen. Das gewonnene Eisen kann als Wertstoff weiterverkauft werden.

8.1.4 Klassierung

Die erste Klassierung erfolgt mit einem Flächensieb mit einer Maschenweite von 32 mm. Das Hauptziel ist dabei die Anreicherung der sogenannten Leichtfraktion (sprich großflächige Leichtstoffe, wie Karton, Kunststofffolien, Tapeten oder Textilien) im Siebüberlauf. Dabei werden ca. 3,6 % des Inputs abgeschieden. Da diese Fraktion über einen Gipsgehalt von 23 % verfügt, gehen mit der Leichtfraktion ca. 1,1 % des Gipses verloren. Gleichzeitig wird dadurch der Gipsgehalt von 83 % in der Siebaufgabe auf 85 % im Siebdurchgang erhöht. Der Siebüberlauf wird einer Abfallverbrennungsanlage zugeführt.

Die Sortierbarkeit der Feinstfraktion mit der Luftsetzmaschine muss noch untersucht werden. Kann diese, ähnlich wie die Pilotanlage, kein zufriedenstellendes Sortierergebnis für die Kornklasse 2/0 mm garantieren, so ist durch eine zweite Siebung diese Fraktion abzutrennen. Dies ist auch das Szenario, das für die Bilanzierung des Aufbereitungsprozesses und die daraus abgeleitete Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angenommen wurde. Der Masseanteil dieser Feinstfraktion liegt bei ca. 20 %, mit einem Gipsgehalt von ca. 85 %. Dies bedeutet einen Verlust von ca. 18 % des Gesamtgipses. Wie die Erfahrung zeigte, ist es wichtig, die Siebung nur mit trockenem Material durchzuführen. Andernfalls werden die aufgeweichten Gipskörner durch die mechanische Beanspruchung soweit zerkleinert, dass der Masseanteil der Feinstfraktion auf 2/3 der Aufgabe steigen kann.

Durch die Verwendung einer Zweideck-Siebmaschine (siehe Abbildung 52) können beide Siebungen mit einem Gerät durchgeführt werden. Das Zielprodukt ist in diesem Fall das Mittelkorn mit einer Korngröße zwischen 2 und 32 mm.



- 1 Siebkasten mit zwei Siebflächen
- 2 Antrieb
- 3 Antriebsscheibe mit Keilriemen
- 4 Motor
- 5 Traverse
- 6 Stützkonsole
- 7 weiche Stützfeder

Abbildung 52: Kreiswucht-Schwingsiebmaschine [52, S. 221]

8.1.5 Sortierung

Zur Abtrennung der Störstoffe mit einer höheren Dichte als Gips wird eine Luftsetzmaschine verwendet. Das Material wird, wie in Kapitel 6.2.4 beschrieben, auf dem Setzgutträger durch Luftstöße von unten aufgelockert, sodass sich eine Sortierung nach der Dichte ergibt. Die Störstoffe höherer Dichte reichern sich dabei im Schwergut an und werden damit am Ende des Setzgutträgers durch einen Schlitzaustrag und ein nachfolgendes Zellenrad ausgeschie-

den. Durch ständige radiometrische Messung der Schwergutdichte wird die Drehzahl des Zellenrads gesteuert um den Wertstoffverlust gering zu halten.

Wie oben erwähnt ist der geringe Störstoffgehalt des Inputmaterials, der nach der Analyse der Schwer- und Leichtgutproben errechnet wurde, nicht eindeutig nachvollziehbar. Daher wurde für diese Kalkulation ein etwas höherer Gehalt von 5 % (3 % mineralische Störstoffe, 2 % Holz/Karton) angenommen. Das Masseausbringen des Schwergutes wurde dazu mit 10 % angenommen. Das Schwergut besteht zu 85 % aus Gips und zu 15 % aus mineralischen Rohstoffen. Die Hälfte des eingebrachten Kartons wird durch die Abluftabsaugung über dem Setzgutträger abgeführt. Der Gipsgehalt im Leichtgut beträgt nach der Dichtesortierung 97,2 %.

Die Luftsetzmaschine kann nur gute Trennergebnisse liefern, wenn das Setzbett eine konstante Höhe (ca. das Sechsfache der Maximalkorngröße) aufweist. Allerdings kann es durch die vorhergehenden Prozessschritte, z.B. durch unregelmäßige Beschickung des Brechers oder Verstopfen des Siebes, zu Unterbrechungen des Materialflusses kommen. Daher wird der Luftsetzmaschine ein Puffer zum Ausgleich dieser Schwankungen vorgeschaltet. Ein Aufgabe- und Dosierbunker mit einem Volumen von 20 m³ kann soviel Inputmaterial bevorraten, um einen einstündigen Ausfall der vorhergehenden Prozesse auszugleichen. Das Material wird über ein Abzugsband in die Aufgabeöffnung der Luftsetzmaschine gefördert.

Muss die Feinfraktion <2 mm vor der Dichtesortierung mit der Luftsetzmaschine ausgeschleust werden, so würde sich ein DryFlow Separator zur Wertstoffgewinnung aus diesem Stofffluss anbieten (siehe Abbildung 53). Der Aufbau und die Arbeitsweise dieses Gerätes sind ähnlich zur Luftsetzmaschine. Sie wurde eigens für die trockene Dichtesortierung im Feinkornbereich (0,05 bis 2 mm) entwickelt und wäre dadurch eine überlegenswerte Ergänzung zur Luftsetzmaschine. Sie könnte in einer zweiten Ausbaustufe der Anlage zur verbesserten Gipsausbeute hinzugefügt werden.

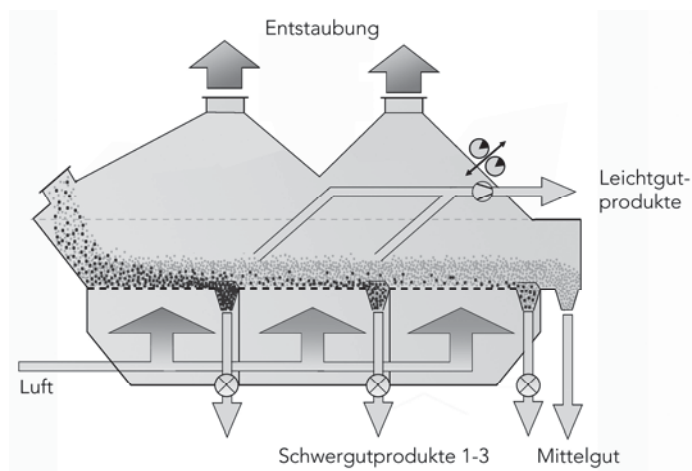


Abbildung 53: CDF-Separator zur Dichtesortierung im Feinkornbereich [53]

8.1.6 Selektive Zerkleinerung

Die selektive Zerkleinerung ermöglicht die Abtrennung der elastischen Störstoffe, die im Gegensatz zu den spröden Gipsteilchen das Walzwerk unzerkleinert verlassen.

Bei Glattwalzwerken ist ein Zerkleinerungsverhältnis von 1:4 (maximal 1:5) möglich [54]. Da im Inputmaterial theoretisch Partikel mit einer Korngröße von bis zu 32 mm vorkommen können, ist eine Vorzerkleinerung nötig. Beide Zerkleinerungsschritte werden in einem Dreiwalzenbrecher (siehe Abbildung 54) kombiniert. Da der Gips zum Anbacken neigt, sind die Zwischenräume der Brechleisten auf der Vorbrechwalze mit verschleißbeständigem Gummi ausgekleidet. Die Nachbrechstufe besteht aus zwei Glattwalzen, die über feine Rillen oder aufgeschweißten Raupen verfügen um den Einzug zu verbessern. Sie zerkleinern die Gipsteilchen (und etwaige spröde Störstoffe) auf 1 mm.

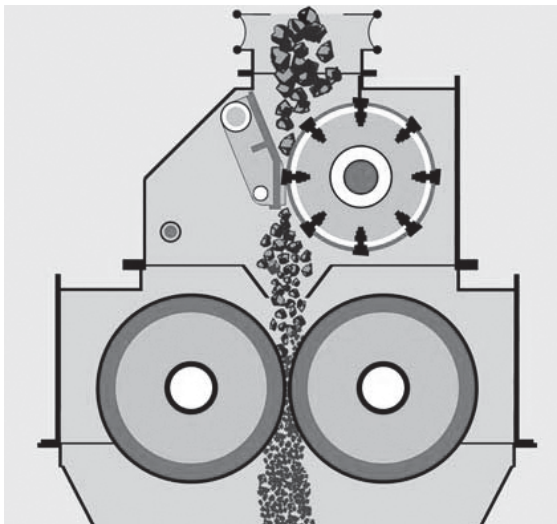


Abbildung 54: Dreiwalzenbrecher

Alternativ dazu könnten auch ein Vierwalzenbrecher oder zwei hintereinander geschaltete einfache Glattwalzwerke verwendet werden.

Da das Produkt sehr fein ist, erfolgt der Transport vom Walzenbrecher zur Siebmaschine mit einem staubgekapselten Förderband.

Bei der anschließenden Siebung mit einer Maschenweite von 1 mm bleiben die weitgehend unzerstörten Störstoffe, wie Karton oder Holz, im Siebüberlauf und werden so vom Gipsstrom getrennt. Da bei derart geringen Korngrößen und möglicher Oberflächenfeuchtigkeit die Gefahr der Stechkornbildung sehr groß ist, werden dynamische Siebmatten (sogenannte Spansiebbeläge) verwendet. Wie in Abbildung 55 dargestellt ist, werden dabei (zusätzlich zur Kreis- und Linearschwingung des Siebes) die elastischen Siebmatten abwechselnd entspannt und gedehnt. Dadurch werden sie von Stechkörnern freigehalten [55, S. 4].

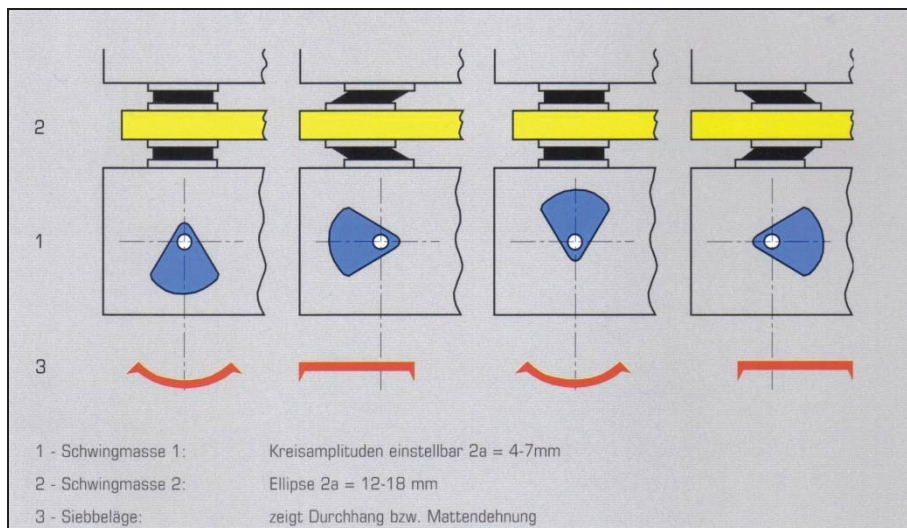


Abbildung 55: Funktionsweise einer Siebmaschine mit Spannsiebbelägen [55, S. 5]

Durch die vollständige Abtrennung der elastischen Störstoffe steigt der Gipsgehalt der Zielfraktion auf 98,7 %.

8.1.7 Lagerung

Nach der erfolgten Aufbereitung wird das Recyclingmaterial mit einem Schneckenförderer in einen Hochsilo transportiert. Da dessen Volumen mit 300 m³ der zwei- bis dreifachen Tagesproduktion entspricht, ist eine gewisse Unabhängigkeit von den Abtransportterminen gewährleistet. Es könnte daher auch an Tagen, an denen das Fahrverbot für LKWs gilt, produziert werden.

8.2 Qualitätssicherung

Eine erste Sichtkontrolle der Gipsabfälle erfolgt durch den LKW-Fahrer, der den Abfallcontainer von der Baustelle oder einem anderen Anfallsort abholt. Entspricht der Abfall nicht den Annahmekriterien, so kann er, wie bisher, nach einer etwaigen Abtrennung von Wertstoffen auf der Baurestmassendeponie abgelagert werden.

Die nächste Kontrolle geschieht bei der Beschickung des Prallbrechers. Die Gipsabfälle werden mit einem Baggergreifer aufgegeben. Dabei können durch den Baggerführer grobe Fremdstoffe erkannt und entfernt werden.

Um auf Abweichungen des Endproduktes von den Zielvorgaben reagieren zu können, werden direkt nach dem letzten Aufbereitungsschritt in regelmäßigen Intervallen Proben aus dem Materialstrom gezogen. Diese werden durch Kristallwasserbestimmung mit Geräten, wie sie auch bei Knauf für die Kontrolle der Naturgipsqualität verwendet werden, auf ihren Dihydratgehalt untersucht. Gleichzeitig kann auch die freie Feuchte bestimmt werden.

Schließlich erfolgt bei der Fa. Knauf eine Eingangskontrolle jeder eingehenden LKW-Fuhre, wobei im firmeneigenen Labor neben dem Dihydrat- und dem Feuchtigkeitsgehalt auch die Konzentrationen bestimmter Salze bestimmt werden können.

8.3 Logistik

An der Aufbereitungsanlage werden zusätzlich zu den von Cemex gesammelten Gipsabfällen auch Lieferungen anderer Sammelunternehmen angenommen. Idealerweise erfolgt sowohl die Sammlung der Abfälle als auch der Abtransport der abgetrennten Störstofffraktionen mit den Abrollkippern. Durch die zentrale Lage der Aufbereitungsanlage im Einzugsgebiet könnten die Sammelwege minimiert werden. Auch die Wege zur Baurestmassendeponie in Bruck und zur Müllverbrennungsanlage in Niklasdorf sind mit 17 bzw. 25 km kurz gehalten.

Der Transport des Recyclinggipses von der Aufbereitungsanlage zum Knauf-Werk wird an eine Spedition ausgeschrieben. Da das Material sehr feinkörnig bzw. zum Teil sogar staubförmig ist, ist es für den Transport mit Silo-Fahrzeugen geeignet. Es wird dabei bestmöglich vor Niederschlägen und Wind geschützt.

Zur Beladung fährt der LKW unter den Hochsilo, aus dem das Material nach Öffnen der Entnahmeöffnung ausfließt. Zum Entladen kippt der LKW den Silo hoch, sodass der Gips an der untersten Stelle abgepumpt werden kann.

Bei einer täglichen Produktion von ca. 100 m³ Recyclingmaterial und einem Fassungsvermögen der Silo-LKWs von 60 m³ sind täglich zwei Fahrten zum Abtransport nötig. Durch den großzügig dimensionierten Silo der Aufbereitungsanlage ist die Spedition bei der zeitlichen Planung der Abtransporte flexibler.

Aufgrund der hohen Transportkosten, sind die zurückzulegenden Wegstrecken gering zu halten. Wird die Aufbereitungsanlage wie vorgesehen in Röthelstein errichtet, so kostet der Transport nach Weißenbach 12 €/t, das sind 80 % des Zielpreises für Recyclinggips von 15 €/t.

8.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In diesem Kapitel werden für die beiden beteiligten Firmen die aus dem Recyclingnetzwerk resultierenden Kosten und Erlöse gegenübergestellt um die Wirtschaftlichkeit beurteilen zu können.

8.4.1 Firma Knauf

Die Kosten für den Abbau und die Anlieferung des Naturgipses belaufen sich auf 15 €/t. Ist dies, wie geplant, auch der Preis für den Recyclinggips, so verursacht die Beimischung des Sekundärrohstoffes keine Erhöhung oder Senkung der Rohstoffkosten.

Zur Annahme und Lagerung des Recyclingmaterials muss jedoch ein Silo mit Austragsboden errichtet werden. Das Volumen entspricht mindestens dem Fassungsvermögen eines Silo-transporters, also 60 m³. Die Kosten dafür werden auf ca. 300.000 € geschätzt [9].

8.4.2 Firma Cemex

Die Fa. Cemex ist alleiniger Betreiber und Besitzer der Aufbereitungsanlage. Sie muss daher auch die Anschaffungskosten für die nötigen baulichen Einrichtungen und technischen Anlagen zur Gänze übernehmen. Da die Anlage auf dem eigenen Firmengrund errichtet wird, muss kein Grundstück angekauft oder gepachtet werden.

Die Anschaffungskosten (exkl. Mehrwertsteuer) für die baulichen Einrichtungen und technischen Anlagen sind in Tabelle 21 aufgelistet. Für einen Teil der technischen Anlage wurden konkrete Angebote bei Herstellerfirmen eingeholt. Die restlichen Posten wurden zur Vereinfachung geschätzt.

Tabelle 21: Anschaffungskosten der Aufbereitungsanlage

Posten	Beschreibung / Typ	Quelle	Preis
bauliche Einrichtung			
Hallen	inkl. Fundament und Installationen	[56]	560.000 €
Brückenwaage	inkl. Verwaltungsgebäude	[56]	100.000 €
Hochsilo	Volumen: 300 m ³ , inkl. Fördereinrichtungen	[56]	150.000 €
technische Anlagen			
Umschlagsortierbagger	Caterpillar M318D MH	[57]	190.700 €
Radlader	Caterpillar 930H	[57]	121.300 €
Prallbrecher ¹	Maschinenfabrik Liezen R-CI 100-100/T	[51]	284.600 €
Dreiwalzenbrecher	Aubema 2323/06-08	[54]	180.000 €
Luftsetzmaschine ¹	allmineral allair	[58]	371.000 €
Aufgabe- und Dosierbunker	Volumen: 20 m ³	[56]	100.000 €
Zweidecksiebmaschine ¹	Harrer HSM-Exzenter Starrschwinger	[59]	55.600 €
Eindecksiebmaschine ¹	Harrer HSM-Exzenter Starrschwinger	[59]	42.500 €
Leichtgutförderer		[56]	10.000 €
Summe			2.165.700 €

¹ inkl. Förderbänder

In Tabelle 22 sind jene Kosten angeführt, die sich direkt proportional zur Menge an verarbeiteten Gipsabfällen verhalten. Neben dem Transport des Recyclingmaterials von der Aufbereitungsanlage zum Knauf-Werk in Liezen sind dies die Entsorgungskosten für die entfrachteten Störstoffe. Die Transportkosten für die Anlieferung der Gipsabfälle scheinen in der Berechnung nicht auf, da diese vom Abfallverursacher getragen werden.

Tabelle 22: Jährliche variable Kosten

Posten	Quelle	Menge pro Jahr	Kosten pro Einheit	jährliche Kosten
Gipstransport	[60]	24.000 t	12 €/t	288.000 €
Entsorgung auf Deponie inkl. Transport	[56]	14.500 t	24 €/t	348.000 €
Entsorgung durch Verbrennung inkl. Transport	[56]	1.500 t	85 €/t	127.500 €
Summe				763.500 €

Die Kosten für Instandhaltung, Strom und Personal sind zwar zum Teil von der behandelten Abfallmenge abhängig, wurden jedoch für diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wie Fixkosten bewertet. Weitere Fixkosten, wie Steuern oder Abschreibungen, wurden für diesen groben Überblick nicht berücksichtigt.

Tabelle 23: Jährliche Fixkosten [56]

Posten	jährliche Kosten	
Personal	Produktionsleitung	70.000 €
	Facharbeiter	65.000 €
	Hilfsarbeiter	50.000 €
Instandhaltung	75.000 €	
Strom	36.000 €	
Summe	296.000 €	

Die Haupteinnahmequelle aus dem Gipsrecycling stellen für die Fa. Cemex die Entsorgungsgebühren für die Gipsabfälle dar. Diese sind vom Abfallverursacher für die Übernahme der Abfälle zu zahlen und richten sich nach dem Grad der Verunreinigung. Während die Entsorgung von reinen Gipsabfällen 35 €/t kostet, so sind bei Fremdstoffanteilen bis zu 20 % 50 €/t, von 20 bis 50 % 70 €/t und bei mehr als 50 % 150 €/t zu bezahlen. Für die folgende Berechnung wurde ein Durchschnittspreis von 40 €/t herangezogen [56]. Die weiteren Einnahmen setzen sich aus dem Verkauf des Recyclingmaterials an Knauf und aus dem Erlös für Alteisen aus den Gipsabfällen zusammen (siehe Tabelle 24).

Tabelle 24: Einnahmen [56]

Posten	Menge pro Jahr	Ertrag pro Einheit	jährliche Einnahmen
Übernahme der Gipsabfälle	40.000 t	40 €/t	1.600.000 €
Verkauf von Gips	24.000 t	15 €/t	360.000 €
Verkauf von Eisen	120 t	85 €/t	10.200 €
Summe			1.970.200 €

Der Cash-Flow, der sich durch Abzug der zahlungswirksamen Ausgaben (763.500 € + 296.000 €) von den erfolgswirksamen Erträgen (1.970.200 €) ergibt, beträgt ca. 910.000 €/a. Da die Anschaffungskosten für die Anlagen ca. 2,2 Mio. € betragen, errechnet sich durch Division der Anschaffungskosten durch den Cash-Flow die Amortisationsdauer von etwa drei Jahren. D.h., dass die Anlage ab dem vierten Jahr einen jährlichen Gewinn von 910.000 € (abzüglich Steuern) abwirft und somit eine hohe Rentabilität aufweist.

8.5 Ökologische Effekte

Durch die Bildung des Netzwerkes gelingt es den Stoffkreislauf für Gips zu schließen. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen für die beteiligten Betriebe ist auch der ökologische Nutzen, wie z.B. die Ressourcenschonung, nicht von der Hand zu weisen.

Durch die langfristig angestrebte zehnjährige Beimischung von Sekundärrohstoff, verringert sich der jährliche Naturgipsbedarf von Knauf um ca. 40.000 t. Dies schont die natürlichen Ressourcen und die Umwelt der Abbaugebiete. Da der Großteil der Gipsabfälle recycelt werden kann, sinkt auch der Verbrauch an Deponievolumen und die Probleme durch die Sulfatmission im Deponiekörper werden gemindert.

Die Einsparung des Energieeinsatzes für die Naturgipsgewinnung hebt den Energieeinsatz für die Abfallaufbereitung auf.

Allerdings werden sich durch die Ausweitung des Einzugsgebietes für die Gipsabfallsammlung die Transportstrecken für die Sammelfahrzeuge erhöhen. Wird die Aufbereitungsanlage in Röthelstein gebaut, so muss das Recyclingmaterial ca. 120 km von der Recyclinganlage in Bruck zum Knauf-Werk in Weißenbach transportiert werden. Bei der Variante des Baus in Weißenbach würden die Transportstrecken des Recyclingmaterials zwar stark verkürzt, jedoch die des Gipsabfalls noch weiter erhöht.

9 Ergebnisse

Im Zuge dieser Diplomarbeit gelang es, ein Aufbereitungskonzept zu entwickeln, welches die stoffliche Verwertung stark verunreinigter Gipsabfälle ermöglicht. Die geplante Abtrennung der Störstoffe erfolgt durch verschiedene Zerkleinerungs-, Klassier- und Sortierprozesse. Die Praxistauglichkeit der einzelnen Aufbereitungsschritte konnte anhand mehrerer Versuche bewiesen werden. Es ist jedoch anzumerken, dass die Versuche in einem Zeitraum von mehreren Monaten und mit teils unterschiedlichen Materialien durchgeführt wurden. Es wäre daher sinnvoll zur genaueren Beurteilung der gesamten Aufbereitungskette einen weiteren Großversuch durchzuführen. Dabei sollten alle Einzelprozesse des entwickelten Aufbereitungsverfahrens in der entsprechenden Abfolge innerhalb kurzer Zeit vom selben Material durchlaufen werden.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergab einen Cash-Flow von ca. 900.000 €/a. Die Anlage hätte sich damit bei einer Investitionssumme von 2,3 Mio. € innerhalb von nur drei Jahren amortisiert. Da einige Daten auf Schätzungen beruhen, ist zwar mit einem Abweichen der tatsächlichen Kosten und Erlöse zu rechnen, dennoch kann anhand dieser Zahlen unter Berücksichtigung einer gewissen Schwankungsbreite das Vorhaben als rentabel angesehen werden.

Aufgrund der nachgewiesenen technischen Machbarkeit und der errechneten Wirtschaftlichkeit des Recyclingkonzeptes, entschlossen sich schließlich die Firmen Cemex und Knauf das Vorhaben umzusetzen. Bis zur tatsächlichen Realisierung wird es noch der positiven Ergebnisse des noch ausstehenden Großversuches bedürfen. Auch die Frage der Zusammenarbeit zwischen Knauf und Cemex gilt es noch zu regeln. Vorbehaltlich dieser Punkte, kann das übergeordnete Ziel der Diplomarbeit, welches in der Schaffung eines Recyclingnetzwerkes für Gipskartonplatten in der Steiermark bestand, als erreicht betrachtet werden.

10 Zusammenfassung

Nach Darlegung der Ausgangslage im Kapitel 1 und den Begriffsbestimmungen im Kapitel 2 wird im Kapitel 3 der Rohstoff Gips, seine Entstehung, chemische Zusammensetzung und stofflichen Eigenschaften beleuchtet. Durch die Gegenüberstellung des jährlichen Gipsverbrauchs und den Schätzungen für die weltweit vorhandenen natürlichen Ressourcen wurde verdeutlicht, dass sich für den Rohstoff Gips eine Verknappung abzeichnet. Weiters wurde auf Alternativen zum Naturgips in Form von synthetisch hergestellten Gipsarten, vor allem REA-Gips, eingegangen und deren industrielle Entstehung und Verwendung diskutiert.

Im Kapitel 4 werden Gipskartonplatten aus zweierlei Blickwinkeln betrachtet. Zuerst wurden die Herstellung und Verwendung des Produktes Gipskartonplatte und dessen Produktvarianten beschrieben. Im zweiten Schritt wurde die Handhabung von Gipskartonplatten als Abfall erläutert. Dabei ist im Speziellen auf die Rechtslage und den daraus resultierenden Problemen bei der Deponierung eingegangen worden. Weiters wurden verschiedene Wege der stofflichen Verwertung aufgelistet und diskutiert.

Das Kapitel 5 beschäftigt sich mit den Firmen Cemex als Abfallsammler- und aufbereiter und Knauf als Produzent von Gipskartonplatten. Es wurden dabei die Unternehmen beschrieben und auf deren bisherigen Umgang mit Gipsabfällen sowie den für sie zu erwartenden Nutzen am Recyclingprojekt eingegangen. Weiters wurden die Qualitätsanforderungen der Fa. Knauf an das Recyclingmaterial festgehalten und begründet.

Auf die Grundlagen und Rahmenbedingungen der ersten fünf Kapitel folgt im Kapitel 6 der praktische Teil mit der Beschreibung der durchgeführten Versuche zur Entwicklung eines mechanischen Aufbereitungsverfahrens. Mit dem Ziel der möglichst vollständigen Störstoffabtrennung mit trockenen Aufbereitungsschritten wurden, aufbauend auf den Erfahrungen aus der Rohstoff- und Abfallaufbereitung, differenzierte Ansätze verfolgt. In Versuchen mit verschiedenen Zerkleinerungs- und Sortierapparaten wurde deren Anwendbarkeit für Gipsabfälle bewertet und verglichen. Neben den Funktionsprinzipien der Geräte und der Vorgehensweise bei den Versuchen wurden auch die Analyse der Proben und deren Ergebnisse diskutiert und dokumentiert.

Im Kapitel 7 wurden verschiedene Maßnahmen beschrieben, die ergänzend oder alternativ zu den in Kapitel 6 untersuchten Aufbereitungsschritten durchgeführt werden könnten. Ihre Praxistauglichkeit für die vorliegende Aufgabenstellung wurde nach wirtschaftlichen bzw. technischen Gesichtspunkten bewertet.

Im Kapitel 8 ist anhand der Erkenntnisse aus den Aufbereitungsversuchen und den Recherchen ein Recyclingkonzept erstellt worden. Dieses beinhaltet die technische Planung des Aufbereitungsverfahrens, sowie Überlegungen zur Qualitätssicherung und Logistik. Außerdem wurden die Ausgaben, die bei einer Realisierung des Projektes anfallen würden, den zu

erwartenden Einnahmen gegenübergestellt, wodurch Aussagen über die Wirtschaftlichkeit des Konzeptes getroffen werden konnten. Abschließend sind die ökologischen Effekte des Vorhabens diskutiert worden.

Abschließend wurden im Kapitel 9 die Ergebnisse der Diplomarbeit mit den anfangs gesetzten Zielen verglichen und diskutiert. Dabei wurde auch auf die Realisierung des Recyclingprojektes eingegangen, die, vorbehaltlich eines noch ausstehenden großtechnischen Versuches und der Regelung der Zusammenarbeit zwischen den Partnern, von den Projektpartnern angestrebt wird.

11 Verzeichnisse

11.1 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (Hrsg.): Gips-Datenbuch. 2. Auflage, Darmstadt: 2006.
- [2] Pretzler: Landtechnik und Baukunde – Planen und Bauen in der Landwirtschaft. Graz: Leopold Stocker, 1990. – ISBN 3-7020-0595-1.
- [3] BGBl. 39/2008. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008).
- [4] Scheibengraf, Martin; Reisinger, Hubert: Abfallvermeidung und -verwertung. Wien, Umweltbundesamt, 2005.
- [5] Norm ÖNORM S 2096-1 2005-01-01. Stoffflussanalyse – Teil 1: Anwendungen in der Abfallwirtschaft – Begriffe.
- [6] Die Deutsche Bauindustrie: Konstruktionen und Leistungsbereiche des Trockenbaus. Online im WWW unter URL: <http://www.bauindustrie.de>. – Downloads. Stand: Jänner 2008
- [7] Arendt, Markus: Kreislaufwirtschaft im Baubereich - Steuerung zukünftiger Stoffströme am Beispiel von Gips. Heidelberg: Ruprecht-Karls-Universität, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Dissertation, 2000.
- [8] Geologische Bundesanstalt (Hrsg.): Die Entstehung der Alpen - Wie Meeresablagerungen zu Hochgebirgen wurden. Online im WWW unter URL: <http://www.geologie.ac.at>. Stand: September 2007
- [9] Hildebrandt, Thorsten (Knauf): E-Mail vom 22. Jänner 2008. – Fragen zum Recyclingprojekt.
- [10] Hetherington, L.E.; Brown, T.J.; Benham, A.J.; Lusty, P.A.J.; Idoine, N.E.: World Mineral Report 2001-05. Keyworth: British Geological Survey, 2007. – ISBN 978-0-85272-592-4.
- [11] Hetherington, L.E.; Brown, T.J.; Lusty, P.A.J.; Idoine, N.E.; Bide, T.; Hobbs, S.F.; Naden, J.: European Mineral Statistics 2001-05. Keyworth: British Geological Survey, 2007. – ISBN 978-0-85272-594-8.
- [12] Vallenthin, Mark et al.: Umweltdaten Deutschland. Ausgabe 2007, Dessau: Umweltbundesamt, 2007.

- [13] Hamm, Heiner; Hüller, Rolf; Demmich, Jörg: Recycling von Gipsplatten. In: Strunk, Petra: ZKG International Nr. 5-2007. Gütersloh: Bauverlag, 2007, S. 68-74
- [14] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2006. Wien: BMLFUW, 2006. – ISBN 3-902 010-70-3.
- [15] Winter, Brigitte; Szednyi, Ilona; Reisinger, Hubert; Böhmer, Siegmund; Janhsen, Thomas: Abfallvermeidung und -verwertung – Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich. Wien: Umweltbundesamt (Hrsg.), 2005.
- [16] Walzl, Josef; Pitter, Manfred; Ferchhumer, Günther: Umwelterklärung für die Kraftwerke Riedersbach 1 und Riedersbach 2. Linz: Energie AG Oberösterreich, 2004.
- [17] Sundl, Karin: Entsorgung und Verwertung von Gipskartonplatten. Online im WWW unter URL: <http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at>. Stand: März 2007.
- [18] Birsak, L.; Malcik, W.; Sitte, Ch.; Sonnenberg, Ch.: Hölzel-Weltatlas. Wien: Ed. Hölzel, 1995. – ISBN 3-85116-137-8.
- [19] Vereinigung der österreichischen Zementindustrie: Produktionsstandorte. Online im WWW unter URL: <http://www.zement.at>. Stand: Oktober 2007.
- [20] Hummel, Hans-Ulrich: Recycling von Gipsplatten. Online im WWW unter URL: <http://www.b-i-m.de/Public/BVGips/damasemhummel.htm>. Stand: März 2007.
- [21] Hildebrandt, Thorsten (Knauf): Interview am 2. April 2007.
- [22] Bau-Profi Stadlbauer (Hrsg.): Bauen, Sanieren, Renovieren. 29. Jahrgang, Wels, 1998.
- [23] Meier, Rolf: Gips-Recycling senkt Abfallkosten. In: Schweizerischer Maler- und Gipsunternehmer-Verband (Hrsg.): applica 13-14/2007. Wallisellen: applica, 2007, S. 14-16.
- [24] New West Gypsum Recycling Inc.: Wiederaufbereitung. Online im WWW unter URL: <http://www.nwgypsum.com>. Stand: Dezember 2007.
- [25] Österreichischer Fertighausverband (Hrsg.): Informationen. Online im WWW unter URL: <http://www.fertighaus.org>. Stand: Oktober 2007.
- [26] Hildebrandt, Thorsten (Knauf): E-Mail vom 18. Juli 2007. – Informationen zu Gipskartonplatten.
- [27] Glössl, Herwig (Cemex): Interview am 29. November 2007.
- [28] Lechner, P.: Fachgrundlage zur Beurteilung der Deponiefähigkeit von Bauschutt. Band 1, Wien: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie (Hrsg.), 1991.

- [29] Braunegg, Gerhart: Mikrobiologie (Skriptum zur Vorlesung an der Montanuniversität Leoben im WS 2003/04).
- [30] Mitterwallner, Josef (Land Steiermark): E-Mail vom 6. November 2007. – Abfalldaten. Angehängte Datei: baurestmassen_restkapazitäten.xls.
- [31] Glössl, Herwig (Cemex): E-Mail vom 4. Juni 2007. – Massenbilanz zum Aufbereitungsversuch.
- [32] BGBl. 24/2007: Bundesgesetz vom 7. Juni 1989 zur Finanzierung und Durchführung der Altlastensanierung (Altlastensanierungsgesetz).
- [33] Kersten, Hans-Jörg (Bundesverband der Gipsindustrie e.V.): E-Mail vom 10. Mai 2007. - Recycling Gipsplatten.
- [34] Gypsum Recycling International A/S: Informationen. Online im WWW unter URL: <http://www.gypsumrecycling.biz>. Stand: Dezember 2007.
- [35] Deutsches Patent- und Markenamt: Übersetzung der europäischen Patentschrift EP 1 421 995 B1. München, 2006. – DE 603 00 809 T2.
- [36] Weißflog, Eckhard (GFR): E-Mail vom 1. Juni 2007. – Aufbereitung von GKP-Abfällen.
- [37] Haslwanter, Katrin (Rigips): Rigips RiCycling schließt den Kreis. Online im WWW unter URL: <http://www.rigips.at>. Stand: Jänner 2008.
- [38] Murer, Reto (Rigips): RiCycling von Gips. Online im WWW unter URL: <http://www.rigips.ch>. – Download. Stand: Jänner 2008.
- [39] Radeloff, Dagmar; Reitberger, Franz: Herstellung und Entsorgung von Gipsplatten. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), 2007. – ISBN 978-3-940009-39-5.
- [40] Hildebrandt, Thorsten (Knauf): Werk Weißenbach (Bildschirmpräsentation). Weißenbach, 2007.
- [41] Hildebrandt, Thorsten (Knauf): E-Mail vom 7. Mai 2007. – Informationen zu Gipskartonplatten.
- [42] Glössl, Herwig (Cemex): Interview am 15. März 2007.
- [43] Liebmann, Isabella (Maschinenfabrik Liezen): E-Mail vom 10. Juli 2007. – Datenblatt zu Prallbrecher R-Ci 100-100.
- [44] Hildebrandt, Thorsten (Knauf): E-Mail vom 27. November 2007. – Analyseergebnisse.

- [45] Kirchberg, Helmut: Aufbereitung bergbaulicher Rohstoffe. Band 1, Jena: Wilhelm Gro-nau, 1953.
- [46] Deutsches Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): Operationsbaustein Luftherd. Online im WWW unter URL: <http://www.pe.mw.tum.de> – Recyclingleitfaden. Stand November 2007.
- [47] Kellerwessel, Hans: Aufbereitung disperser Feststoffe: mineralische Rohstoffe, Sekun-därrohstoffe, Abfälle. Düsseldorf: VDI, 1991 – ISBN 3-18-401068-6.
- [48] Weitkämper, Lars (RWTH Aachen): Interview am 15. November 2007.
- [49] allmineral Aufbereitungstechnik GmbH & Co. KG (Hrsg.): allmineral Produktinformation. Online im WWW unter URL: <http://www.allmineral.com>. Stand: Dezember 2007.
- [50] Schubert, Heinrich: Aufbereitung fester Stoffe – Band II: Sortierprozesse. Stuttgart: Deutscher Verband für Grundstoffindustrie, 1996. – ISBN 3-342-00555-6.
- [51] Liebmann, Isabella (Maschinenfabrik Liezen): E-Mail vom 11. Jänner 2008. – Angebot zu Prallbrecher.
- [52] Schubert, Heinrich: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe – Band I. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1989 – ISBN 3-342-00289-1.
- [53] Schiffers, Andreas (CALA Aufbereitungstechnik): Vortrag am Seminar „Sortieren in der Mineral- und Sekundärrohstoffindustrie“ in Leoben am 17. Jänner 2008: Trockene Dich-tesortierung im Feinkornbereich.
- [54] Noss, Manuel (Aubema): E-Mail vom 11. Jänner 2008. – Angebot für Brecher.
- [55] Binder+Co (Hrsg.): bivitec – Schwersiebzbare Schüttgüter in hoher Trennschärfe (Pros-pekt)
- [56] Glössl, Herwig (Cemex): Interview am 8. Februar 2008.
- [57] Kiedl, Anton (Zeppelin): E-Mail vom 11. Februar 2008. – Angebot für Bagger.
- [58] Breuer, Heribert (allmineral): Interview am 17. Jänner 2008.
- [59] Nöst, Thomas (Harrer): E-Mail vom 17. Jänner 2008. – Angebot zu Siebmaschinen.
- [60] Schuller, Brigitte (Spedition Huber): Fax vom 16. Jänner 2008. – Preisanfrage zu Silo-transport.

11.2 Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
ADR	Abdampfrückstand
AMR	(Lehr- und Forschungsgebiet) Aufbereitung mineralischer Rohstoffe
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
FA	Fachabteilung
Fa.	Firma
Fe	Eisen
FS	Frischsubstanz
G	Gips
GFR	Gesellschaft für die Aufbereitung und Verwertung von Rohstoffen mit beschränkter Haftung
GKB	Gipskartonbauplatte
GKFI	imprägnierte Feuerschutzplatte
GKP	Gipskartonplatte
GRI	Gypsum Recycling International A/S
HK	Holz und Karton
IAE	Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik
K	Karton
KW	Kristallwasser
L	Leichtfraktion bei Dichtesortierung
LF	Leichtfraktion
LG	Leichtgut
LKW	Lastkraftwagen
M	mineralische Störstoffe
M (bei Dichtesortierung)	Mittelfraktion bei Dichtesortierung
min.	mineralisch
min	Minute
MU	Montanuniversität (Leoben)
n.n.	nicht nachweisbar
NWGR	New West Gypsum Recycling
PB	Prallbrecher
R°	Reinheitsgrad (Gipsgehalt)
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
RWTH	Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule (Aachen)
S	sonstige Störstoffe
S (bei Dichtesortierung)	Schwerfraktion bei Dichtesortierung
SG	Schwergut
sonst.	sonstige
St.	Störstoffe
TM	Trockenmasse
TS	Trommelsieb

11.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entwicklung der jährlichen Gipsabbaumengen	8
Tabelle 2: Aufkommen von REA-Gips einiger österreichischer Wärmekraftwerke	11
Tabelle 3: Gipskartonplatten-Typen und deren Bezeichnungen	14
Tabelle 4: Vergleich der Analysenwerte von Gipsabfällen mit Deponiegrenzwerten – Teil 1	20
Tabelle 5: Vergleich der Analysenwerte von Gipsabfällen mit Deponiegrenzwerten – Teil 2	20
Tabelle 6: Feststoffdichten einzelner Fraktionen.....	42
Tabelle 7: Versuchsdaten zur Dichtesortierung	45
Tabelle 8: Stoffverteilung in den Dichteschichten (in %).....	47
Tabelle 9: Anteile an der Gesamtmasse (in %).....	47
Tabelle 10: Transferkoeffizienten.....	47
Tabelle 11: Dihydrat- und Na ₂ O-Gehalte ausgewählter Fraktionen aus der Dichtesortierung.....	48
Tabelle 12: Ergebnisse der Laboranalyse.....	50
Tabelle 13: Einstellungen zu den Luftherdversuchen	53
Tabelle 14: Masseverteilung und Reinheitsgrade (R°) der Produkte	54
Tabelle 15: Ergebnis des Windsichtungsversuches.....	56
Tabelle 16: Einstellungen der Luftsetzmaschine.....	62
Tabelle 17: Stoffverteilung in den Dichtefraktionen.....	62
Tabelle 18: Anteile an der Gesamtmasse	63
Tabelle 19: Transferkoeffizienten.....	63
Tabelle 20: Feuchtigkeitsaufnahme von Gipskartonplatten bei 20°C.....	69
Tabelle 21: Anschaffungskosten der Aufbereitungsanlage	86
Tabelle 22: Jährliche variable Kosten	87
Tabelle 23: Jährliche Fixkosten.....	87
Tabelle 24: Einnahmen	88
Tabelle 25: Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 6.1	I

11.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gipsgestein (links: dunkler Gips vom Phyrn, rechts: heller Gips aus Tragöß)	8
Abbildung 2: Anteil europäischer Staaten an der Gipsproduktion 2005	9
Abbildung 3: Österreichische Handelsbilanz für Gips	9
Abbildung 4: Quellen und Senken von Natur- und REA-Gips	11
Abbildung 5: Verwendung von Gipskartonplatten im Dachgeschoßausbau	14
Abbildung 6: Marktanteile bei Gipskartonplatten in Österreich	15
Abbildung 7: Gipskartonplatten-Produktionsablauf	16
Abbildung 8: Gipsbilanz für Oberösterreich.....	17
Abbildung 9: Bisherige Handhabung von Gipsabfällen	25
Abbildung 10: Angestrebter Gipskreislauf	26
Abbildung 11: Trockene Gipskartonabfälle	28
Abbildung 12: Schema der Aufbereitungsanlage Knauf-Standort Weißenbach.....	28
Abbildung 13: Aufgabematerial mit Fremdstoffen	34
Abbildung 14: Fließbild zum ersten Versuch.....	34
Abbildung 15: Beschickung des Trommelsiebes.....	35
Abbildung 16: Fließbild zum ersten Versuch mit Kreislaufführung	35
Abbildung 17: Fließbild zum zweiten Versuch.....	36
Abbildung 18: Prallbrecher (rechts) und Flächensieb (links).....	37
Abbildung 19: Detailansicht des Rotors des verwendeten Prallbrechers	37
Abbildung 20: Stoffflüsse – Aufbereitung mit dem Trommelsieb.....	38
Abbildung 21: Korngrößen- und Stoffverteilung der Trommelsiebprodukte	39
Abbildung 22: Stoffflüsse – Aufbereitung mit Prallbrecher und Schwingsieb	40
Abbildung 23: Korngrößen- und Stoffverteilung der Prallbrecherprodukte.....	41
Abbildung 24: Schema der Labor-Luftsetzmaschine.....	43
Abbildung 25: Probenbehälter mit durchwirbeltem Material.....	44
Abbildung 26: Dihydratanteil ausgewählter Fraktionen nach der Dichtesortierung	49
Abbildung 27: Arbeitsweise eines Luftherdes	51
Abbildung 28: Blick auf die Herdplatte mit Austragsschächten	51
Abbildung 29: Luftherd mit Staubabsaugung	52

Abbildung 30: Verteilung des Aufgabegutes auf die Produkte	54
Abbildung 31: Gipsgehalte der Luftherdprodukte.....	54
Abbildung 32: Vergleich der Transferkoeffizienten für Holz und Karton.....	57
Abbildung 33: Querschnitt einer Luftsetzmaschine	58
Abbildung 34: Setzbett in Ruhe, Blick Richtung Aufgabe.....	59
Abbildung 35: Austrag von Schwergut (oben) und Leichtgut (unten).....	59
Abbildung 36: Austragsseite der Pilot-Luftsetzmaschine	60
Abbildung 37: Befüllung des Kreislaufes.....	61
Abbildung 38: Abhängigkeiten vom Verhältnis des Masseausbringens	64
Abbildung 39: Korngrößenverteilung und stoffliche Zusammensetzung des Leichtgutes aus Versuch 5	65
Abbildung 40: Korngrößenverteilung und stoffliche Zusammensetzung des Schwergutes aus Versuch 5.....	65
Abbildung 41: Ausgangsmaterial.....	66
Abbildung 42: Walzenbrecher ohne Verkleidung und Aufgabetrichter	67
Abbildung 43: Durchgang der Siebung bei 2 mm.....	68
Abbildung 44: Probematerial mit verschiedenen Korngrößen	69
Abbildung 45: Zeitverlauf der Wasseraufnahme und der relativen Luftfeuchtigkeit	70
Abbildung 46: Zusammenhang zwischen Korngröße und Wasseraufnahme	71
Abbildung 47: Fließbild einer zweistufigen Prallsprunganlage	75
Abbildung 48: Querstrom-Aerosortierung mit einem Horizontalstromsichter	75
Abbildung 49: Wirkprinzip eines Siebbandscheiders	76
Abbildung 50: Fließbild und Sankey-Diagramm zum Aufbereitungsverfahren.....	78
Abbildung 51: Mobiler Prallbrecher	80
Abbildung 52: Kreiswucht-Schwingsiebmaschine	81
Abbildung 53: CDF-Separator zur Dichtesortierung im Feinkornbereich	82
Abbildung 54: Dreiwalzenbrecher	83
Abbildung 55: Funktionsweise einer Siebmaschine mit Spannsiebbelägen	84

Anhang

Tabelle 25: Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 6.1

Auf- berei- tungsart	Kornklasse / Fraktion	Masse [%]	Stoffanteil pro Kornklasse				Anteil an der Gesamtmasse				Transferkoeffizienten			
			Gips [%]	Karton [%]	min. St. [%]	sonst. [%]	Gips [%]	Karton [%]	min. St. [%]	sonst. [%]	Gips []	Karton []	min. St. []	sonst. []
Trommelsieb	Leichtfraktion	7,4	3,82	70,33	0,00	25,85	0,28	5,21	0,00	1,91	0,00	0,32	0,00	0,20
	> 32 mm	31,9	90,34	3,82	4,84	1,00	28,77	1,22	1,54	0,32	0,40	0,08	0,47	0,03
	16-32 mm	4,2	88,82	0,74	4,29	6,15	3,77	0,03	0,18	0,26	0,05	0,00	0,06	0,03
	10-16 mm	9,8	91,64	0,83	2,59	4,94	9,02	0,08	0,25	0,49	0,13	0,01	0,08	0,05
	6,3-10 mm	14,9	86,89	1,18	2,68	9,25	12,95	0,18	0,40	1,38	0,18	0,01	0,12	0,15
	4-6,3 mm	10,5	72,82	3,84	4,22	19,13	7,65	0,40	0,44	2,01	0,11	0,03	0,14	0,22
	2-4 mm	8,2	41,60	42,40	2,00	14,00	3,42	3,48	0,16	1,15	0,05	0,22	0,05	0,12
	0-2 mm	13,0	41,60	42,40	2,00	14,00	5,42	5,53	0,26	1,82	0,08	0,34	0,08	0,20
	Summe 2-32 mm	47,7	77,15	8,75	3,03	11,08	36,80	4,17	1,44	5,29	0,52	0,26	0,44	0,57
	Summe 0-32 mm	60,7	69,52	15,97	2,81	11,71	42,23	9,70	1,70	7,11	0,59	0,60	0,53	0,76
	Gesamt	100,0	71,28	16,13	3,24	9,34	71,28	16,13	3,24	9,34	1	1	1	1
Summe >2 mm	87,0	75,73	12,19	3,43	8,65	65,86	10,60	2,98	7,52	0,92	0,66	0,92	0,80	
Prallbrecher	Eisen	0,3	0	0	0	100	0,00	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,11
	> 32 mm	3,8	29,38	52,72	13,11	4,79	1,12	2,01	0,50	0,18	0,01	0,46	0,05	0,06
	16-32 mm	6,7	62,69	10,74	23,87	2,70	4,20	0,72	1,60	0,18	0,05	0,17	0,17	0,06
	10-16 mm	15,5	81,89	3,49	13,12	1,49	12,71	0,54	2,04	0,23	0,15	0,12	0,21	0,08
	6,3-10 mm	23,5	89,32	1,49	8,03	1,15	21,01	0,35	1,89	0,27	0,25	0,08	0,20	0,09
	4-6,3 mm	16,6	89,02	1,50	7,25	2,23	14,77	0,25	1,20	0,37	0,18	0,06	0,13	0,12
	2-4 mm	13,0	87,47	1,40	6,82	4,31	11,33	0,18	0,88	0,56	0,14	0,04	0,09	0,18
	0-2 mm	20,6	87,47	1,40	6,82	4,31	17,99	0,29	1,40	0,89	0,22	0,07	0,15	0,29
	Summe 2-32 mm	75,3	85,04	2,71	10,11	2,14	64,01	2,04	7,61	1,61	0,77	0,47	0,80	0,53
	Summe 0-32 mm	95,8	85,56	2,43	9,40	2,60	82,00	2,33	9,01	2,50	0,99	0,54	0,95	0,82
	Gesamt	100,0	83,12	4,34	9,51	3,02	83,12	4,34	9,51	3,02	1	1	1	1
Summe >2 mm	79,4	81,99	5,10	10,21	2,69	65,13	4,05	8,11	2,14	0,78	0,93	0,85	0,71	