BEAUFTRAGT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

ReMin -Verbundvorhaben: GipsRec2.0 – Technische Vorbereitung der Verfügbarmachung von Gipsfaserplatten und Synthesegipsen zur Herstellung von RC-Gips

TP1: Technische Untersuchungen und Bewertungen

Förderkennzeichen 033R267A

Abschlussbericht

MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH (Koordination)

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)

Öko-Institut e.V.

Kurzzusammenfassung: Im Projekt GipsRec 2.0 wurden technische, wirtschaftliche und ökologische Untersuchungen und Bewertungen der Potenzialerschließung von End-of-Life Gipsfaserplatten und von diversen Synthesegipsen, mit dem Ziel der Schließung von Stoffkreisläufen von Bauprodukten auf Gipsbasis sowie die Sicherstellung der Rohstoffversorgung, durchgeführt. Die Resultate des Projektes zeigen, dass Gipsfaserplatten sich mechanisch aufbereiten lassen. Das Materialergebnis ist eine Gipsfraktion in einer für die Gipsindustrie verwertbaren Qualität. Die über 10-Jahre angesetzte Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigte, dass die entwickelte Recyclingtechnologie wirtschaftlich eingesetzt werden kann, wenn sie mit einer Recyclinganlage für Gipskartonplatten kombiniert wird (zweite Aufbereitungslinie). Die Untersuchung der synthetischen Gipse zeigte, dass einige Materialarten auf Grund ihrer Eigenschaften ohne weiteres einsetzbar sind und teilweise schon wiederverwendet werden. Bei anderen Arten der Synthesegipse schränken die Eigenschaften die Verwertung ein. Die Grundlagenuntersuchungen für die Aufbereitung von Batteriesäure zeigten im Rahmen des Projektes das größte Potenzial für eine zukünftige Verwertung in der Gipsindustrie. Im Rahmen der Ökobilanzierung gemäß ISO 14040 und 14044 wurde festgestellt, dass das System Synthesegips derzeit noch höhere Umweltlasten verursacht als die Vergleichssysteme. Auch für das System RC-Gips fiel die Bilanz zunächst schlechter aus als für die Vergleichssysteme. Grund dafür sind Transporte und die Art der Verwertung von Sekundärabfällen (insbesondere die energetische Verwertung der papier- und kunststoffreichen Fraktion). Werden nach der Substitutionsmethode Gutschriften für die Koppelprodukte bei der Verwertung der Sekundärabfälle erteilt, stellt sich das Ergebnis für das System RC-Gips in den meisten Wirkungskategorien besser dar als in den Vergleichssystemen. Die Hauptempfehlung des Projektes GipsRec 2.0 ist daher, das Recycling von Gipsabfällen voranzutreiben, da die Deponierung zu einem Ressourcenverlust führt und sich nicht mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft vereinbaren lässt.

Abstract: In the GipsRec 2.0 project, technical, economic and ecological investigations and assessments of the potential development of end-of-life gypsum fiberboards and various synthetic gypsums were carried out with the aim of closing material cycles of gypsum-based building products and securing the supply of raw materials. The results of the project show that gypsum fiberboards can be processed mechanically, and the resulting material is a gypsum fraction of a quality that can be used by the gypsum industry. The economic analysis, which was scheduled to run over 10 years, showed that the recycling technology developed can be used economically if it is combined with a recycling plant for gypsum plasterboards (second processing line). The investigation of the synthetic gypsums showed that some types of material can be used without further due to their properties and are already being reused in some cases. For other types of synthetic gypsum, the properties limit their use. The basic investigations into the processing of battery acid within the framework of the project showed the greatest potential for future use in the gypsum industry. As part of the life cycle assessment according to ISO 14040 and 14044, it was found that the synthetic gypsum system currently causes even higher environmental impacts than the comparison systems. The balance for the RC gypsum system was also initially worse than for the comparison systems. The reasons for this are transport and the type of recycling of secondary waste (in particular the energy recovery of the paper and plastic-rich fraction). If credits are issued for the co-products in the recycling of secondary waste according to the substitution method, the result for the RC gypsum system is better in most impact categories than in the comparison systems. The main recommendation of the GipsRec 2.0 project is therefore to promote the recycling of gypsum waste, as landfilling leads to a loss of resources and is not compatible with the principles of the circular economy.

Tabellenverzeichnis **7**

Abbildungsverzeichnis **9**

1 Einleitung **13**

1.1 Hintergrund **13**

1.1.1 Gips als Rohstoff 13

1.1.1.1 Ausgangssituation 13

1.1.1.2 Struktur und Phasenausbildungen des Gipses 14

1.1.1.3 Gipsquellen 16

1.1.1.4 Die Entstehung von Gipsabfällen und ihre Entsorgungswege 17

1.1.2 Gipsfaserplatten 19

1.1.2.1 Verwendung 19

1.1.2.2 Zusammensetzung 19

1.1.2.3 Recycling 20

1.1.2.4 Stand der Wissenschaft 21

1.1.3 Synthetische Gipse 23

1.1.3.1 Allgemein 23

1.1.3.2 Übersicht synthetische Gipse 23

1.1.3.3 Stand der Technik 24

1.1.3.4 Zwischenfazit zu Recyclingtechnologien 28

1.2 Regulatorischer Rahmen für die Behandlung von Gipsabfällen **29**

1.2.1 EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG 29

1.2.2 EU-Deponierichtlinie 1999/31/EG 29

1.2.3 Kreislaufwirtschaftsgesetz 30

1.2.4 Abfallverzeichnisverordnung 31

1.2.5 Sammlung, Sortierung, Transport 31

1.2.6 Abfallverbringungsverordnung 32

1.2.7 Gewerbeabfallverordnung 32

1.2.8 Deponieverordnung 32

1.2.9 Bundesimmissionsschutzgesetz 33

1.2.10 Verbandsvorgaben zur Qualitätssicherung 34

1.3 Zielsetzung **36**

2 Potentialerhebungen **38**

2.1 Methodik **38**

2.1.1 Gipsfaserplatten 38
2.1.2 Synthetische Gipse 40
2.2 Ergebnisse der Literatur- und Materialrecherche 42
2.2.1 Gipsfaserplatten 42
2.2.2 Synthetische Gipse 47
3 Technische Untersuchungen und Bewertungen von RC-Gips Quellen 56
3.1 Gipsfaserplatten 56
3.1.1 Eigenschaften und potenzielle Einsatzgebiete 56
3.1.2 Durchführung und Auswertung der Experteninterviews 61
3.1.2.1 Zielstellung und methodische Vorgehensweise 61
3.1.2.2 Ergebnisse der qualitativen Untersuchung – Auswertung der Experteninterviews 64
3.1.3 Versuche zur mechanischen Aufbereitung und verwendete Aggregate 72
3.1.3.1 Generelle methodische Vorgehensweise 72
3.1.3.2 Manuelle Vorsortierung 73
3.1.3.3 Manuelle Vorzerkleinerung 74
3.1.3.4 Hauptzerkleinerung - Versuche mittels Stachelwalzenbrecher und Hammermühle 74
3.1.3.5 Versuchsreihe Zerkleinerung und Klassierung am Standort GRA MUEG 90
3.1.3.6 Versuche mit dem 10G-Linearschwingsieb (Flachdecksieb) 100
3.1.3.7 Versuche zur Abreinigung der Papierfraktion im Technikum der Firma TRENNSO 105
3.1.4 Ableitung einer Prozesskette für die großtechnische Realisierung 110
3.1.5 Versuche zur Nassaufbereitung 111
3.1.6 Gesamtauswertung der Forschungsergebnisse Recycling GFP 128
3.2 Synthetischer Gips 132
3.2.1 Synthesegips aus Batteriesäureaufbereitung (Versuchsdurchführung) 132
3.2.2 Analytik der Stoffströme (Analytische Untersuchungen) 134
3.2.2.1 Bestimmung des Gipsgehaltes/Reinheitsgrads 134
3.2.2.2 Bestimmung der Schwermetallgehalte 137
3.2.2.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen 145
4 Standortanalyse Recyclinganlagen für GFP 154
5 Diskussion der Ergebnisse und Interpretation 156
6 Ökologische Betrachtung von RC-Gipses 160
6.1 Methodik 160
6.2 Ergebnisse 160

6.3 Resümee 161

7 Ökonomische Betrachtung von RC-Gipsen 162

7.1 Methodik 162

7.2 Gewinn- und Verlustrechnung 163

7.2.1 Neuerrichtung einer Gipsrecyclinganlage für Gipsfaserplatten 163

7.2.2 Erweiterung einer bestehenden Anlage um eine zusätzliche Aufbereitungslinie 166

7.3 Ergebnisse und Diskussion 168

8 Zusammenfassung und Empfehlungen 169

9 Literatur 174

Anhang 1 Dr.-Ing. R. Maletz, M.Sc. L. Gerking, Prof. Dr.-Ing. habil. Ch. Dornack,
Forum für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V.
Untersuchungsbericht „Errichtung einer Anlage zur Behandlung von gipshaltigen Abfällen im Rahmen des Forschungsprojektes GipsRec2.0“

Anhang 2 Dr. M.Buchert; Dr. F. Mayer, J. Schütz, Öko-Institut e.V.
„Ökobilanz zum Recycling von Gipsfaserplatten und Synthesegips aus Bleisäurebatterien“
Dr. Andreas Ciroth, Critical Review, Bericht zur Ökobbilanz

Anhang 3 Dr. K. Weimann, BAM
Untersuchungsergebnisse zu Versuchen mit Synthesegipsen

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Verwendungsmöglichkeiten der Gipsphasen 16

Tabelle 2 Aufkommen an Primärrohstoffen und Recyclingrohstoffen nach Sektoren 17

Tabelle 3 Qualitätskriterien Bundesverband der Gipsindustrie 35

Tabelle 4 Auswahl der wichtigsten technischen Qualitätsanforderungen synthetischer Gipse 41

Tabelle 5 Rohstoffbilanz für Gips in Deutschland (2019), Daten BV Gips gerundete Zahlen 47

Tabelle 6 Schwermetallgehalte v. Phosphogipsen unterschiedlicher Herkunftsländer im Vergleich 50

Tabelle 7 Durch den BVG bereit gestellte Produktionszahlen von Gipsplatten 67

Tabelle 8 Durch den BVG aktualisierte Produktionszahlen von Gipsplatten 69

Tabelle 9 Durch den BVG aktualisierte Produktionszahlen von Gipsplatten 2019/2020 69

Tabelle 10 Konzeptioneller Ansatz zu Verfahrensschritten für die GFP-Aufbereitung im Versuch 73

Tabelle 11 Versuchsrandbedingungen der Vorversuche im Jehmlich-Technikum 75

Tabelle 12 Versuchsrandbedingungen der Zerkleinerung V01 – V07 mit Hammermühle Jehmlich-Technikum. 81

Tabelle 13 Versuchsrandbedingungen der Siebung V08 – V09 mit Siebmaschine FS 40 Russell Finex im Jehmlich-Technikum. 82

Tabelle 14 Versuchsreihen Klassierung 94

Tabelle 15 Zusammenfassung Untersuchungsergebnisse nach Absiebung 98

Tabelle 16 Chemische Untersuchungsergebnisse nach Absiebung 99

Tabelle 17 Übersicht des versandten Probematerials 101

Tabelle 18 Mengenbilanz Siebversuche 102

Tabelle 19 Untersuchungsergebnisse der Versuche bei DSS mit dem 10G-Linearschwingsieb 103

Tabelle 20 Zusammenfassung Versuchsergebnisse Technikum Fa. TRENNSO 107

Tabelle 21 Perkolatrückstand (Sieb) 118

Tabelle 22 Ergebnisse der Separationsversuche 1 118

Tabelle 23 Ergebnisse der Separationsversuche 2 119

Tabelle 24 Ergebnisse der Veraschungsversuche Siebrückstand 120

Tabelle 25 Ergebnisse der Veraschungsversuche Anhaftungen 120

Tabelle 26 Ergebnisse der Veraschungsversuche getrocknetes Perkolat 120

Tabelle 27 Vergleichswerte aus der Literatur 1 120

Tabelle 28 Vergleichswerte aus der Literatur 2 121

Tabelle 29 Ergebnisse der Separationsversuche Perkolatorrückstand (Sieb) 123

Tabelle 30 Ergebnisse der Separationsversuche Anhaftungen 123

Tabelle 31 Ergebnisse der Separationsversuche Perkolat 123

Tabelle 32 Ergebnisse der Veraschungsversuche Siebrückstand 125

Tabelle 33 Ergebnisse der Veraschungsversuche Anhaftungen 125

Tabelle 34 Ergebnisse der Veraschungsversuche Perkolat 125

Tabelle 35 Vergleichswerte aus der Literatur Modellgips 125

Tabelle 36 Vergleichswerte aus der Literatur Papier 126

Tabelle 37 Rahmenbedingungen für den Betrieb einer Aufbereitungsanlage für GFP 164

Tabelle 38 Gewinn- und Verlustrechnung Errichtung und Betrieb einer Gipsrecyclinganlage für GFP 165

Tabelle 39 Beschreibung / Erläuterung der geänderten Rahmenbedingen 166

Tabelle 40 Gewinn- und Verlustrechnung Erweiterung einer bestehenden Gipsrecyclinganlage 167

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Vereinfachter Materialverlauf Gips 14

Abbildung 2 Größenverteilung der befragten Unternehmen nach Mitarbeiterzahl 39

Abbildung 3 Produktion von Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten in Deutschland (2009-2021) in Mio. m²/a [2.1] 43

Abbildung 4 Produktion von Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten in Deutschland (2009-2021) in Mio. t/a [2.1] 43

Abbildung 5 Anfall von Bauschutt (blau) und Bauabfällen auf Gipsbasis (orange) [2.9] 44

Abbildung 6 Anfall von Bauschutt (blau) und Bauabfällen auf Gipsbasis (orange) im Verhältnis zur im Jahr 2004 als Bezugsjahr erfassten Menge [2.9] 45

Abbildung 7 REM-Aufnahmen von Fluorogips (1/2), Titanogips (3/4) und Gipskristallen aus Versuchen zur Klärschlammbehandlung (5/6). 51

Abbildung 8 REM-Aufnahmen von Phosphogipsen aus Kroatien (1/2), Griechenland (3/4) und Litauen (5/6) 53

Abbildung 9 Rauchgasreinigung in deutschen Müllverbrennungsanlagen, unterteilt nach eingesetzten Reinigungsverfahren - Bezugsgröße ist die Kapazität der MVA - eigene Berechnungen 54

Abbildung 10 Potentiale und Ist-Werte bei der Verwertung von Bleisäurebatterien zu Gips - eigene Berechnungen. 55

Abbildung 11 Unterschiede zwischen Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten [1.58] 56

Abbildung 12 Unterschiede zwischen Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten [1.58] 57

Abbildung 13 Ausgangmaterialien für die Versuche, links Produktionsrückstände Fermacell Seesen rechts Faserplatten aus Fertigung von Fermacell Seesen. 75

Abbildung 14 Versuche Stachelwalzenbrecher (20mm / 10mm Pyramiden), Zerkleinerungseffekt unzureichend, Stachelwalzen setzen sich zu 76

Abbildung 15 Versuch mit der Hammermühle: links zerkleinertes Material, rechts Papierfaserreste im Siebkorb 77

Abbildung 16 Vorversuche mit der Hammermühle bei der Firma Jehmlich (V05), Aufbereitungsprodukt 78

Abbildung 17 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V03 (Stachelwalze, RC300-S30; mittlerer Spalt; kaum Zerkleinerungswirkung) 79

Abbildung 18 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V06 (Hammermühle, 4mm Siebkorb) 80

Abbildung 19 Zerkleinerungsprodukt V 01 und V 03 82

Abbildung 20 Zerkleinerungsprodukt V05 und V07 83

Abbildung 21 Siebkörbe Hammermühle V01 – V06 und Siebkorb 8mm aus V07 (feuchtes Material) 83

Abbildung 22 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V01 (Hammermühle, Siebkorb 4 mm, 60 Hz) 84

Abbildung 23 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V02 (Hammermühle, Siebkorb 4 mm, 50 Hz) 85

Abbildung 24 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V03 (Hammermühle, Siebkorb 8 mm, 60 Hz) 86

Abbildung 25 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V04 (Hammermühle, Siebkorb 8 mm, 50 Hz) 87

Abbildung 26 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V05 (Hammermühle, Siebkorb 6 mm, 60 Hz) 88

Abbildung 27 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V06 (Hammermühle, Siebkorb 6 mm, 50 Hz) 89

Abbildung 28 Angelieferte Gipsplattenabfälle Gipsrecyclinganlage MUEG/ Größpösna 91

Abbildung 29 Hammermühle HM 342 Fa. Jehmlich 92

Abbildung 30 Zerkleinertes Material für Siebversuche 93

Abbildung 31 Installation RUSSELL Sieb 94

Abbildung 32 Illustration der Ergebnisse der Siebversuche mit dem FINEX SEPARATOR 30 (Russell-Sieb). 95

Abbildung 33 Änderung der Ausbeute an Unterkorn in Abhängigkeit von der Siebdauer 96

Abbildung 34 Illustration der Ergebnisse der Tastversuche 97

Abbildung 35 Darstellung Versuchsprotokoll 97

Abbildung 36 Grafische Darstellung des Gipsanteils im Siebunterlauf 99

Abbildung 37 10G-Linearschwingsieb Fa. DSS 101

Abbildung 38 Illustration Ergebnisse Linearschwingsieb DSS 102

Abbildung 39 Mechanische und chemische Untersuchungsergebnisse der Versuche mit dem 10G-Linearschwingsieb 104

Abbildung 40 Technikum Fa. TRENNSO Turbomühle ARES 500 105

Abbildung 41 Papierfraktion Versuch 1 DSS Irland Inputmaterial Versuche TRENNSO 106

Abbildung 42 Prozesskette zur Aufbereitung von GFP 110

Abbildung 43 Technische Versuchsanordnung Perkolationsversuch 113

Abbildung 44 Gipsschlamm getrocknet (links), Faserstoff gereinigt (rechts) 113

Abbildung 45 Perkolat A und B im Imhofftrichter 114

Abbildung 46 Perkolat ungerührt und abgesetzt (links), Perkolat gerührt (rechts) 115

Abbildung 47 Perkolierter Faserstoff aus Grobfraktion mit Begleitstoffen 115

Abbildung 48 Eckdaten des Perkolator-Versuchs mit „pre consumer“ GFP 116

Abbildung 49 Eckdaten des Perkolator-Versuchs mit „post consumer“ GFP 117

Abbildung 50 Ergebnisse der Untersuchungen zur Faserqualität 119

Abbildung 51 Versuchungsauswertung Versuch „pre-costumer“ 122

Abbildung 52 Ergebnisse der Untersuchungen zur Faserqualität 1 124

Abbildung 53 Ergebnisse zur Untersuchung der Faserqualität 2 124

Abbildung 54 Versuchsauswertung 126

Abbildung 55 Synthetischer Gips der mit Kalkmilch (links) bzw. Calciumcarbonatsuspension (rechts) aus Altbatteriesäure gefällt wurde 133

Abbildung 56 Verlauf des Masseverlustes einer gipshaltigen Probe bei der thermogravimetrischen Untersuchung 135

Abbildung 57 Verlauf der Messkurven bei der thermogravimetrischen Untersuchung von mit unterschiedlichen Fällungsmitteln gefällten Gipsen aus dem gleichen Versuchsansatz 135

Abbildung 58 Gipsgehalte der in den Fällungsversuchen hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure 136

Abbildung 59 Arsengehalte [mg/kg] der in den Fällungsversuchen mit $CaCO_3$ (blau) und Kalkmilch (grün) hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure 137

Abbildung 60 Cadmiumgehalte [mg/kg] der in den Fällungsversuchen mit $CaCO_3$ (blau) und Kalkmilch (grün) hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure 138

Abbildung 61 Bleigehalte [mg/kg] der in den Fällungsversuchen mit $CaCO_3$ (blau) und Kalkmilch (grün) hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure 138

Abbildung 62 Zinngehalte [mg/kg] der in den Fällungsversuchen mit $CaCO_3$ (blau) und Kalkmilch (grün) hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure 139

Abbildung 63 Gegenüberstellung der Arsengehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen aus zwei Versuchsansätzen, deren Versuchsparameter sich nur im Ziel-pH-Wert unterschieden. Die Fällungsmittel waren jeweils wieder $CaCO_3$ -Suspension (blau) oder Kalkmilch (grün) 140

Abbildung 64 Gegenüberstellung der Cadmiumgehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen aus zwei Versuchsansätzen, deren Versuchsparameter sich nur im Ziel-pH-Wert unterschieden. Die Fällungsmittel waren jeweils wieder $CaCO_3$ -Suspension (blau) oder Kalkmilch (grün) 140

Abbildung 65 Gegenüberstellung der Bleigehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen aus zwei Versuchsansätzen, deren Versuchsparameter sich nur im Ziel-pH-Wert unterschieden. Die Fällungsmittel waren jeweils wieder $CaCO_3$ -Suspension (blau) oder Kalkmilch (grün) 141

Abbildung 66 Gegenüberstellung der Zinngehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen aus zwei Versuchsansätzen, deren Versuchsparameter sich nur im Ziel-pH-Wert unterschieden. Die Fällungsmittel waren jeweils wieder $CaCO_3$ -Suspension (blau) oder Kalkmilch (grün) 141

Abbildung 67 Gegenüberstellung der Arsengehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen in Abhängigkeit von der Rührdauer des Versuchsansatzes ($CaCO_3$-Suspension (blau), Kalkmilch (grün)) 142

Abbildung 68 Gegenüberstellung der Cadmiumgehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen in Abhängigkeit von der Rührdauer des Versuchsansatzes ($CaCO_3$-Suspension (blau), Kalkmilch (grün)) 143

Abbildung 69 Gegenüberstellung der Bleigehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen in Abhängigkeit von der Rührdauer des Versuchsansatzes ($CaCO_3$-Suspension (blau), Kalkmilch (grün)) 143

Abbildung 70 Gegenüberstellung der Arsengehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen in Abhängigkeit von der Rührdauer des Versuchsansatzes ($CaCO_3$-Suspension (blau), Kalkmilch (grün)) 144

Abbildung 71 Synthetische Gipse im Vergleich: SEM-Aufnahmen von REA-Gips, RC-Gips (obere Reihe) und BS-Gipsen (mittlere Reihe) in gleicher Vergrößerung sowie vergrößerte Ausschnitte der BS-Gips-Aufnahmen (untere Reihe) 146

Abbildung 72 BS-Gipse aus dem gleichen Versuchsansatz mit Kalkmilch als Fällungsmittel jedoch unterschiedlichen Versuchsdauern von 3, 4 und 5 Stunden 147

Abbildung 73 Vergrößerungen von BS-Gipskristallen aus Fällungsversuchen in unterschiedlichem Maßstab 149

Abbildung 74 Vergleich von Nahaufnahmen von BS-Gipskristallen mit RC-Gipskristallen 150

Abbildung 75 Fällungsversuch mit Kalkmilch, ohne Energieeintrag durch Rühren, Übersichtsbild und Vergrößerung 150

Abbildung 76 Vergrößerungen von BS-Gipskristallen aus Fällungsversuchen mit Kalkmilch mit variierten Rührgeschwindigkeiten 151

Abbildung 77 Vergrößerungen von KS-Gipskristallen und den durch Lösung in Altbatteriesäure mit anschließender Fällung hergestellten KS-BS-Gipskristallen 153

Abbildung 78 Abdeckung von Gipsrecyclinganlagen in Deutschland und Bedarf 155

Abbildung 79 Erderwärmungspotenzial bei einer Betrachtung der untersuchten Systeme nach der Substitutionsmethode 161

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

1.1.1 Gips als Rohstoff

1.1.1.1 Ausgangssituation

Mit Gips werden sowohl das in der Natur vorkommende Gipsgestein und dessen entsprechende Nebenprodukte und Abfälle aus industriellen Prozessen als auch die Produkte, die beim Brennen dieser Ausgangstoffe entstehen, bezeichnet. Naturgips und Naturanhydrit kommen gesteinsbildend in der Natur in großen und leicht zugänglichen Lagerstätten vor. Sie können von der Lagerstätte her mit weniger wasserlöslichen Verbindungen wie Kalkstein, Dolomit oder Tonen verunreinigt sein, die jedoch in geringen Mengen die Brauchbarkeit des Rohstoffs nicht beeinträchtigen. Die vorkommenden Gesteine haben sehr unterschiedliche Gefüge, von feinkörniger Struktur über blättrigen Gips (Mariengips) bis zu Fasergips oder durchscheinende, kompakte Gipse (Alabaster) [1.1].

Vor dem Hintergrund steigender Gipsnachfrage im deutschen Bausektor, dem vielfach von Kontroversen begleiteten Abbau von Naturgips und nicht zuletzt durch den mittel- und langfristig zu erwartenden deutlichen Rückgang von REA-Gips (Ausstieg aus der Kohleverstromung) kommt dem Recycling von Gips eine hohe strategische Bedeutung zu. Die Bedeutung eines hochwertigen Recyclings von Gipsfaserplatten liegt zusätzlich in der intendierten Reduzierung der Parameter wie TOC und Schwermetallgehalt, um deren Eignung für den Verwertungskreislauf ebenfalls sicherzustellen. Der Rohstoff Gips wird nicht nur in der Bauindustrie, sondern auch in der Keramik-, der Lebensmittelindustrie und in der Pharmazie verwendet. In der Lebensmittelindustrie wird Gips beispielsweise eingesetzt, da er pH-neutral und nicht giftig ist [1.2].

Der jährliche Gipsverbrauch in Deutschland ist ausgehend von den 1970ern und 1980er Jahren von rund 4 Mio. t auf rund 10 Mio. t in den letzten Jahren angestiegen [1.3]. Die Energiewende in Deutschland und der Ausstieg Deutschlands aus der Kohleverstromung und mit der damit einhergehenden Schließung von Kohlekraftwerken bis 2038 wird einen stark zurück gehenden Anfall von REA-Gips zur Folge haben, d. h. die derzeit wichtigste Versorgungsquelle für den deutschen Gipsmarkt wird nach und nach schwächer und langfristig vollständig versiegen [1.2]. Die zweite Rohstoffquelle, heimischer Naturgips, hat aufgrund vielfältiger Nutzungskonflikte (Naturschutz, Tourismus etc.) nur begrenzte bzw. erschwerte Möglichkeiten, die auftretenden Lücken zu schließen [1.6].

Naturgips ist ein wertvoller nicht erneuerbarer Rohstoff, daher kommt für die Zukunft dem Recycling von Gips eine steigende Bedeutung für die zumindest teilweise Schließung dieser sich abzeichnenden Lücke zu. Die Deckung des künftigen Bedarfs mit natürlichen Rohstoffen und die Erschließung neuer Abbaustätten ist aufgrund verschiedener Umweltbelange schwierig [1.6].

1.1.1.2 Struktur und Phasenausbildungen des Gipses

Im Folgenden wird auf die verschiedenen Phasenausbildungen des Gipses und deren Nutzungsmöglichkeiten eingegangen. Auch wird betrachtet, wie man die Phasen ineinander umwandeln kann und welcher Stand der Technik zur industriellen Herstellung angewandt wird. Gips ist ein natürlich vorkommender, mineralischer Rohstoff, der hauptsächlich aus Calciumsulfat besteht. Dieser Stoff kann verschiedene, chemische Modifikationen annehmen, die sich anhand der Hydratationsstufe bestimmen. Die häufigste Form des natürlich vorkommenden Gipses ist das Calciumsulfat-Dihydrat ($CaSO_4 * 2H_2O$). Vollständig hydratisiert liegt das Gestein als Rohmaterial vor und wird ebenfalls bei der Abbindung mit Wasser gebildet. Bei Temperaturen unter 40 °C ist nur das Dihydrat stabil [1.8].

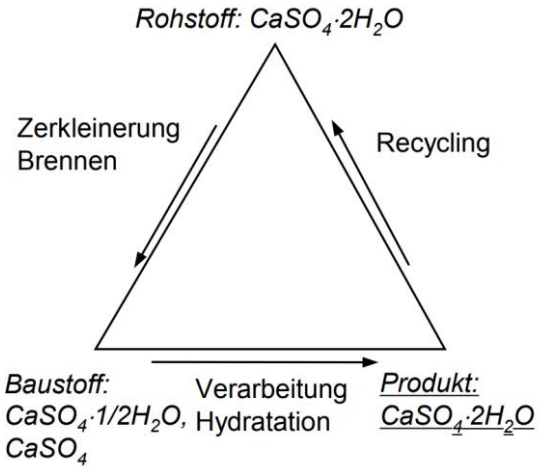


Abbildung 1 Vereinfachter Materialverlauf Gips

Beim Brennen von Dihydrat entstehen in Abhängigkeit von der Brenntemperatur Halbhydrate oder kristallwasserfreies Anhydrit. Calciumsulfat-Halbhydrat ($CaSO_4$+1/2 H_2O) untergliedert sich dabei in zwei weitere Phasen. Das α-Halbhydrat wird zur Herstellung von Formgipsen oder Spezialgipsen verwendet. Das β-Halbhydrat wird vorwiegend zur Herstellung von Gipsplatten in der Bauindustrie genutzt. β-Halbhydrat wird schon bei Temperaturen über 40 °C gebildet, jedoch so langsam, dass eine technisch wirtschaftliche Produktion bei ca. 180 °C realisiert wird [1.8]. Die Form der Anhydrite (kristallwasserfreier Gips) teilt sich ebenfalls in verschiedene Modifikationen. Zunächst werden sie in die Phasen Anhydrit I, II und III eingeteilt. Anhydrit I entsteht erst bei Temperaturen über 1.180 °C und ist für die technische Nutzung als einzige Phase nicht interessant.

Der Anhydrit II wird schon bei Temperaturen ab 200 °C langsam gebildet. Es untergliedert sich wiederum in drei Modifikationen, die Unterschiede hauptsächlich in der Löslichkeit aufweisen [1.8].

Des Weiteren ist der Anhydrit III zu nennen, welcher schon bei Temperaturen von über 100 °C gebildet werden kann. Hier existieren ebenfalls zwei Modifikationen der entsprechenden Phase, die mit α-Anhydrit III und β-Anhydrit III bezeichnet werden. Eine Stabilisierung dieser beiden Gipsformen ist schwierig, da sie hygroskopisch sind und schnell in das Halbhydrat übergehen [1.8].

Für das Entwässern und Umwandeln der Gipsrohstoffe können verschiedene Anlagen und Verfahren angewandt werden, wobei die eingesetzte Korngröße für die Prozesssteuerung von Bedeutung ist. Im Allgemeinen wird die Temperatur in der Praxis weit höher eingestellt als die vorab genannten Bildungstemperaturen. Dadurch kann die Verweilzeit wesentlich niedriger ausfallen und damit die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erheblich verbessert werden. Die Reinheit der einzelnen Phasen kann hingegen durch diese Methode nicht gewährleistet werden. Der technisch gebrannte Gips ist also immer ein Phasengemisch, obgleich die Prozessführung so gewählt wird, dass eine Phase möglichst hoch konzentriert vorliegen soll [1.8].

Zur Herstellung von β-Halbhydraten kommen verschiedene Brennaggregate zum Einsatz. Eine Möglichkeit ist das Brennen zwischen 120 °C und 180 °C in einem kontinuierlich betriebenen Drehrohrofen. Dieser erlaubt eine relativ hohe Korngröße von bis zu 60 mm. Eine andere Möglichkeit bei gleichem Temperaturniveau ist der Umsatz in einem Kocher, der sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich betrieben werden kann. Ein weiteres Verfahren ist der Einsatz einer Trägergas-Brennanlage. Diese Methode ist durch eine sehr kurze Verweilzeit im Aggregat gekennzeichnet, weshalb das Material bereits mit der Feinheit der Endkorngröße zugeführt werden muss. Im Aggregat ist die Einstellung von zwei Brennstufen möglich. Dies ermöglicht einerseits die separate Herstellung von Stuckgips und relativ reinem Hochbrandgips. Andererseits lässt sich Putzgips als Gemisch aus den jeweiligen Komponenten generieren [1.9].

Weiterhin kann technisch gebrannter Anhydrit auch in den oben genannten Brennaggregaten bei Temperaturen zwischen 300 und 900°C hergestellt werden. Zusätzlich besteht für diese Phase die Möglichkeit einen Rostbandofen einzusetzen. Es können außerdem beheizte Mühlen verwendet werden, die eine Kombination von Zerkleinerung und Phasenumwandlung gewähren [1.9]. Die Herstellung von α-Halbhydrat wird ausschließlich im Autoklaven umgesetzt. Dies kann mit einer direkten oder indirekten Dampfheizung realisiert werden, wobei sich nach ca. 4 Stunden ein Druck von 4 bis 5 bar aufbaut. Das dabei entstehende Halbhydrat wird anschließend getrocknet.

Eine andere Möglichkeit ist das drucklose Umsetzen mit einer Säure oder einer Salzlösung bei Temperaturen zwischen 80 und 150 °C. Der Inhalt eines gefüllten Autoklaven beträgt 0,5 bis 10 m³ und der eingesetzte Gips darf eine Korngröße von bis zu 300 mm aufweisen [1.9].

Die möglichen Einsatzgebiete der jeweiligen Phasen und Modifikationen sind beispielhaft dargestellt in Tabelle **1**.

Tabelle 1 Verwendungsmöglichkeiten der Gipsphasen

Anwendung	Bindemittel
Formengips	
Hartformengips	α – Halbhydrat
Modellgipse	α/β – Halbhydrat
Dentalgipse	
Medizinische Gipse	
Gipskartonplatten	
Gipswandbauplatten	β – Halbhydrat
Gipsdeckenplatten	
Gipsfaserplatten	
Estriche	Natürlicher / synthetischer Anhydrit
Fließestriche	REA-Anhydrit
Gipsspachtelmassen	α – Halbhydrat

1.1.1.3 Gipsquellen

Neben dem bergmännisch gewonnenen Naturgips aus i.d.R. oberirdischen Steinbrüchen, der 2020 5,2 Mio. t betrug [1.10], spielen insbesondere synthetische Gipse, die als Nebenprodukte in unterschiedlichen industriellen Prozessen anfallen, eine wichtige Rolle. Naturanhydrit wird in der Baustoffindustrie zur Herstellung von Calciumsulfatfließestrich in relevanten Mengen verwendet. Dieser Naturrohstoff wird teilweise durch Fluoroanhydrit (Flusssäureanhydrit, Fluoranhydrit) substituiert sowie durch technisch aus REA-Gips hergestelltem Thermoanhydrit oder Alpha-Halbhydrat. REA-Gips aus der Entschwefelung in Kohlekraftwerken (REA = **R**auchgas-**E**ntschwefelungs-**A**nlagen) steht mit großem Abstand an erster Stelle der synthetischen Gipse und hat in der Vergangenheit mindestens 50 % des Naturgips und Anhydritbedarfes in Deutschland gedeckt.

Spätestens mit dem „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ der Bundesregierung vom 28. September 2010 zeichnete sich ab, dass der Ausstieg aus der Kohleverstromung und damit der mittelfristige Wegfall des wichtigsten Rohstoffs der deutschen Gipsindustrie, nämlich des REA-Gipses, nur noch eine Frage der Zeit ist. In den letzten 15 Jahren wurden im Mittel jährlich rund 7 Mio. Tonnen REA-Gips produziert, aktuell (2020) ist die REA-Gips-Menge bereits auf 3,86 Mio. Tonnen zurückgegangen [1.10].

Tabelle 2 Aufkommen an Primärrohstoffen und Recyclingrohstoffen nach Sektoren

Primärrohstoffe	Menge	Referenzjahr
- Bergbauproduktion	5,2 Mio. t (BGR)	2020
- Import	0,197 Mio. t (BGR)	2020
- Export	0,743 Mio. t (BGR)	
- Primärrohstofferzeugung	5,2 Mio. t (BGR)	
Recyclingrohstoffe		
- Gesamt aufkommen (Gipsabfall) davon recyclingfähig	0,741 Mio. t (Destatis) ca. 50%	2020
- Import	Nicht erfasst	
- Export	Nicht erfasst	
- Sekundärrohstofferzeugung	0,063 t (BVG)	2020
- Weitere Sekundärrohstoffe	3,86 Mio. t REA-Gips	2020

Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung (2016) [1.11] ging zunächst von einer Verfügbarkeit von REA-Gips bis 2050 aus. Mit dem Kohleausstiegsgesetz vom August 2020 wird die REA-Gips-Menge spätestens in 2038 auf null zurückgehen, und mit Blick auf den aktuellen Koalitionsvertrag ist mit dem Kohleausstieg bereits in 2030 zu rechnen. Andere geeignete synthetische Gipse sind z.B. Milchsäuregips und Zitronensäuregips. Ihre Menge ist jedoch von untergeordneter Bedeutung oder sie werden bereits vollständig von der Gipsindustrie verwendet. Die genannten Zahlen sind in Tabelle **2** dargestellt [1.9].

1.1.1.4 Die Entstehung von Gipsabfällen und ihre Entsorgungswege

Gipsabfälle entstehen im Laufe des gesamten Produktzyklus von Gipsbaustoffen. Sie fallen bei An- und Abfahrvorgängen als sortenreine Produktionsabfälle oder beim Ausbau, Umbau oder bei Sanierungen als abgebaute Gipsplatten oder bei konsequenter Getrennthaltung als sortenreine Verschnittabfälle an. Ausgebaute gipsgebundene Platten aus Abbruch- und Sanierungsmaßnahmen weisen zusätzlich Verunreinigungen auf. Dazu zählen unter anderem Installationsmaterial, Fliesen, Holz, Metalle, Dämmstoffe, Putz, Folien, Bitumenpappe, Papier, Bauschaum und Mörtel. Beim Abbruch von Gebäuden treten Gipsabfälle als Bestandteil von Bauschutt auf.

Diese sind oft mit mineralischen Baustoffen wie Mauerwerk oder Beton gemischt und weisen den höchsten Verunreinigungsgrad auf [1.2]. Die Zuordnung der Gipsabfälle zu einem Abfallschlüssel nach der AVV erfolgt anhand ihrer Sortenreinheit. Die Sortenreinheit gibt den Gehalt eines Stoffes in einem Gemisch an. Abfälle mit einer hohen Gipsreinheit, die keine Verunreinigungen durch gefährliche Stoffe aufweisen, unterliegen dem Abfallschlüssel AVV 17 08 02. Zu ihnen zählen sortierte Bau- und Abbruchabfälle, Verschnittabfälle sowie sortenreine Produktionsabfälle. Abfälle, die einen mittleren Gipsgehalt, wie z.B. Gipsestriche oder Gipsputze, welche z.Z. diesbezüglich noch nicht recycelfähig sind, werden ebenfalls unter der AVV 170802 geführt, was beim praktischen Umgang mit diesen Abfällen bei Gipsrecycling immer wieder zu Missverständnissen bzgl. der Recycelfähigkeit führt. Werden gipshaltige Abfälle aus Sanierungsmaßnahmen oder Umbauten, zusammen mit anderen Bauabfällen bei Rückbau vermischt, so fallen diese unter die AVV 17 09 04 „Gemischte Bau- und Abbruchabfälle“.

Gipshaltiger Abfall wie Porenbeton mit einem sehr geringen Anteil an Gips, wird mittlerweile auch unter der AVV 17 01 01 Beton geführt. Um den Gips im Stoffkreislauf zu belassen, müssen Gipsabfälle vorher durch selektiven Rückbau oder ein Aufbereitungsverfahren wieder in einen sortenreinen Zustand überführt werden. Der aus den Bauabfällen wiedergewonnene Gips könnte somit eine weitere Bezugsquelle für die Gipsindustrie sein. Vor allem, da Gipsplatten vermehrt in den 1970er Jahren Verwendung fanden, kann davon ausgegangen werden, dass die Mengen an Gipskartonplatten aus dem Gebäuderückbau künftig zunehmen werden [1.2].

Im Jahr 2016 betrug die Menge an Bauabfällen auf Gipsbasis 641.000 Tonnen, was etwa 0,3 Prozent der in Deutschland angefallenen Menge an mineralischen Bauabfällen entspricht. Von den Gipsabfällen wurden 29.000 Tonnen (4,5 Prozent) recycelt und 257.000 Tonnen (40,1 Prozent) im Bergbau verwertet. Der restliche und größte Anteil von 355.000 Tonnen (55,4 Prozent) wurde auf Deponien entsorgt [1.13]. In 2020 lag der Anfall bei ca. 741.000 t, wobei die Verwertungsquote mit 442.000 t (59,6 Prozent) bereits deutlich höher lag als 2016. Beseitigt wurden 299.000 t (40,4 Prozent) [1.12]. Dabei ist die Beseitigung nur auf Deponien der Klassen I und II zulässig, die zudem sehr kostspielig ist [1.14].

Die in der Statistik erfassten Mengen an Bauabfällen auf Gipsbasis können nicht zu 100 Prozent recycelt werden. Denn die unter dem Abfallschlüssel 17 08 02 zusammengefassten Abfälle beinhalten neben recycelbaren Gipsplattenabfällen auch mineralische Bauabfälle, wie Beton oder Ziegel mit Gipsanhaftungen. Nach Schätzungen der Gipsindustrie ist davon auszugehen, dass nur circa die Hälfte, also rund 300.000 Tonnen recycelbar sind [1.14].

Ein weiterer Entsorgungsweg, durch den der Gips dem Stoffkreislauf entzogen wird, ist der Export von recycelbaren, gipshaltigen Abfällen mit dem Abfallschlüssel 17 08 02 nach Tschechien. Dort werden sie als Auffüll- und Abdeckmaterial für die Sanierung/Rekultivierung von Tagebaurestlöchern genutzt. Es werden jährlich schätzungsweise etwa 100.000 Tonnen recycelfähige Gipsabfälle aus Deutschland exportiert [1.13].

1.1.2 Gipsfaserplatten

1.1.2.1 Verwendung

Der größte Einsatz an Gipsfaserplatten liegt innerhalb des Bausektors für den Innen- bzw. Trockenbau. Das Produktportfolio der Hersteller ist vielseitig und legt Unterschiede in der **Plattengeometrie**, in den **Eigenschaften** und in den **Bestandteilen** dar. Die Eigenschaften der Platte müssen je nach Einsatzbereich angepasst werden. Dies wird durch Zuschlagstoffe oder durch Änderungen im Herstellungsverfahren durchgeführt. Teilweise werden Beschichtungen oder Imprägnierungen zur Erhöhung der Wasserabweisung aufgetragen [1.8].

Die Geometrie der Platte drückt sich in der Länge, Breite und Dicke, aber auch in der allgemeinen Form und dem strukturellen Aufbau aus. Weiterhin unterscheidet sich die Geometrie der Platten in den Ausbildungen der Kanten. Diese kann scharfkantig, abgerundet, abgeflacht oder gewinkelt ausgeführt sein [1.9].

1.1.2.2 Zusammensetzung

Gipsfaserplatten bestehen hauptsächlich aus Gips, Papierfasern und Wasser. Im Allgemeinen setzen sich diese beiden Hauptkomponenten mit Anteilen von ca. 80 M.-% Gips mit eventuellen Additiven und 20 M.-% Papierfasern zusammen. Im einfachsten Fall werden diese Komponenten gemischt und anschließend mit Wasser versetzt. Im Nachgang findet die Pressung und Aushärtung in Plattenform statt. Der Gips geht dabei in das Dihydrat über. Es existiert jedoch eine Vielzahl an unterschiedlich hergestellten und unterschiedlich zusammengesetzten Platten [1.8].

Die Zusammensetzung der Platte ist ebenso vielseitig, wie die Herstellungsverfahren. Neben den bereits erwähnten Hauptbestandteilen Gips, Papier und Wasser können zur Einstellung der Eigenschaften verschiedene Zuschlagstoffe eingebracht werden. Dazu gehören beispielsweise Entschäumer, Verflüssiger [1.15], Hydrophobierungsmittel [1.16], Dispergiermittel, Stabilisierer [1.17], und Zusätze für den Brandschutz [1.16] sowie Abbindebeschleuniger. Beim Anmaischen der Papierfasern wird meist eine Stärkelösung eingesetzt.

Es wurden weiterhin Entwicklungen für eine brand- und schimmelhemmende Wirkung, sowie ein emissionsärmeres Brandverhalten durch Zuschlagstoffe aus Borverbindungen untersucht [1.18].

Eine weitere, unüblichere Variante ist die Substitution der Papierfasern innerhalb der Gipsfaserplatte [1.19]. Um eine höhere Schlagfestigkeit zu erhalten, haben sich amerikanische Erfinder eine Platte mit einem Glasfasermaschennetz entwickelt [1.20]. Diese wirken sich auf das Recycling negativ aus, da die Verarbeitung und Zerkleinerung der Werkstoffe zu gesundheitlich einschränkenden Staubemissionen führen kann [1.21]. Üblicher ist der Einsatz von Holzfasern, anstelle des Papiers [1.22]. Grundsätzlich können alle möglichen Formen von Fasern, wie Metallfasern, Steinfasern, Synthesefasern oder Wolle eingesetzt werden [1.23-1.25].

1.1.2.3 Recycling

Gipsfaserplatten, die aus dem Gebäudeabbruch stammen, werden in Deutschland hauptsächlich deponiert oder als nicht verwertbarer Abfallstoff aus Recyclinganlagen ausgetragen [14]. Die bestehenden Gipsrecyclinganlagen bereiten diesen Baustoff nicht im Sinne einer stofflichen Trennung und Rückgewinnung der Bestandteile auf. Der effektive Aufschluss und die Trennung der Fasern vom Gips sind mit den im Gipskartonplattenrecycling verwendeten Aggregaten technisch schwer zu realisieren, da die Fasern in großem Umfang in den RC-Gips gelangen können. Dadurch übersteigt der Gehalt an organischen Stoffen im RC-Gips den geforderten Grenzwert der Gipsindustrie von 1,0 – 1,5 M.-% zur weiteren Herstellung von Gipsplatten [1.14].

Eigenschaften und Zusammensetzungen der verschiedenen Platten haben einen großen Einfluss auf das Verfahren zur Aufbereitung der Gipsfaserplatten, sowie auf die Transportbedingungen. Die Größe der angelieferten Platten bestimmt beispielsweise, ob aufgrund der Sperrigkeit eine Vorzerkleinerung notwendig ist oder welche Transportfahrzeuge verwendet werden können. Die Dicke hat Einfluss auf die Robustheit der Platten bei möglichen Zerkleinerungsprozessen. Anhand der Schichtstruktur, die bei manchen Platten auftritt, kann nach einer Zerkleinerung eine Delamination in den Lagerhaufwerken entstehen. Mit Kenntnis der allgemeinen Eigenschaften der Platten können die Behandlungsaggregate bestimmt werden, die die Inhaltsstoffe fraktionieren sollen.

Im Rahmen der Datenrecherche wurde festgestellt, dass zur Verwertung von Gipsfaserplatten relativ wenig Untersuchungen veröffentlicht wurden. In einem Bericht des UBA zur ökobilanziellen Betrachtung des Gipskartonplattenrecyclings wurde erwähnt, dass zwei Anlagen in Frankreich auch Gipsverbundplatten, wie beispielsweise die Gipsfaserplatten, annehmen und recyceln [1.14]. Des Weiteren gibt es eine laufende Doktorarbeit im IWARU Institut für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen und Umwelt (IWARU) an der FH Münster [1.26].

Im Rahmen dieses Projektes wurde zur Erstellung einer verbesserten Datenlage eine Umfrage bei den Mitgliedsunternehmen des deutschen Abbruchverbandes (DA) speziell zu Gipsfaserplatten und deren Entsorgung durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Detail unter Pkt. 2 – Potentialerhebungen - dargestellt.

1.1.2.4 Stand der Wissenschaft

Im Auftrag der Firma Lindner AG wurde ein Forschungsbericht zur Verwertung von Gipsfaserabfallstoffen durch thermische Behandlung und Umwandlung zum α-Halbhydrat angefertigt. Hierbei wurden betriebsbedingte Abfälle bei der Produktion von Gipsfaserplatten in einem Autoklaven im Nassverfahren wieder in die Form des α-Halbhydrates umgewandelt und damit zur erneuten Abbindung nutzbar gemacht. Diese Vorgehensweise bezieht sich jedoch nur auf sortenreine Produktionsabfälle, sodass eine Anwendung des Verfahrens auf Abfälle von Gipsfaserplatten aus dem Gebäudeabbruch nicht geeignet ist [1.27].

Der Forschungsbericht beschreibt ein Verfahren, welches in ein Patent überführt wurde. Es sieht keine vorgeschaltete Zerkleinerung vor, da die verwendeten Abfälle schon in einer geeigneten Stückgröße anfallen. So können diese bei Temperaturen zwischen 105 bis 150 °C batchweise zusammen mit REA-Gips in Mischverhältnissen zwischen 1:10 bis 10:1 in den Autoklaven gegeben werden [1.27]. In maximal 90 Minuten ist der Sättigungsdampfdruck der jeweiligen Temperatur erreicht. Der Suspension können verschiedene Additive beigemischt werden. Nach der Umbildung wird der Autoklav entleert und das α-Halbhydrat abgetrennt. Dieses kann nun der Produktion neuer Gipsfaserplatten zugeführt werden. Das Verfahren ist spezialisiert auf sortenreine Abfälle aus der betriebseigenen Produktion. Es werden keine Gipsabfälle aus dem Gebäuderückbau oder anderen Anfallorten betrachtet [1.27]. Dieses Vorhaben wurde durch das Umweltinnovationsprogramm vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit gefördert [1.27].

Ein Patent der GFR Gesellschaft für die Aufbereitung und Verwertung von Reststoffen mbH befasst sich mit der stofflichen Verwertung von mit organischem Material verunreinigtem Gips [1.28]. Besonderes Augenmerk wurde hier auf die Verwertung von Gipsabfällen mit organischen Verunreinigungen, wie Gipsvollplatten, Gipskarton-, oder Gipsfaserplatten und mineralisch gebundene Holzspanplatten gelegt. Aufgrund der negativen Auswirkungen von organischen Inhaltsstoffen auf die Eigenschaften der Endprodukte, muss eine Entfernung dieser Bestandteile erfolgen. Das Patent beschreibt eine vorgeschaltete Zerkleinerung und Aussortierung von anderen Störstoffen, die bei Abfällen aus dem Gebäudeabbruch üblicherweise vorkommen.

Anschließend wird das Material in einem Dreh- oder Wirbelschichtofen mit einer geregelten Sauerstoffzufuhr bei Temperaturen zwischen 450 und 950 °C zu Anhydrit gebrannt. Da die verwendeten Materialien Schadstoffe, wie Quecksilber enthalten können, sollte eine Reinigung des Abgases ebenfalls erfolgen.

Möglich ist auch eine Zumischung mit anderen Abfällen, die SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 und CaO enthalten zur Substitution von Alkalianregern. Darunter zählen beispielsweise Stein- und Braunkohleflugaschen oder Rückstände aus der Holz- und Papierverbrennung. In Abhängigkeit der eingesetzten Abfälle und Additive entsteht entweder ein qualitativ hochwertiges Anhydrit ($CaSO_4$-Gehalt: mind. 80 M.-%), zur Verwendung als Binder oder Estrich, oder ein anhydrithaltiges Bindemittel ($CaSO_4$-Gehalt: mind. 35 M.-%), welches für den Landbau, Dammbau, Bergbaumörtel oder Abbinderegler für Zement verwendet werden kann [1.28].

2013 wurde ein Patent zur Verwendung von Gipsbau-, Gipskarton- und Gipsfaserplatten aus dem Gebäudeabbau oder als Rückstände bei der Fertigung derartiger Platten, als Abbinderegler bei der Herstellung von Zement verfasst [1.29]. Hier werden zunächst in einer Vorsortierung die Störstoffe entfernt. In einer anschließenden Zerkleinerung kann die Korngröße eingestellt werden. Diese sollte nicht höher als die Korngröße des verwendeten Zementes sein. Auch die Zumischung an gipshaltigen Abfallstoffen sollte nicht mehr als 8,6 M.-% in Bezug auf die eingesetzte Zementmenge betragen [1.30].

Neben einer Patent- und Verfahrensrecherche auf nationaler und internationaler Ebene zur Thematik des Recyclings von Gipsfaserplatten wurden Gespräche mit Fachpersonal auf den Gebieten Recyclingtechnik und Baustofftechnik geführt. Darunter waren Telefonate mit den zuständigen Wissenschaftlern der Bauhaus Universität Weimar. Außerdem wurden Recherchen an der TU Bergakademie Freiberg und der Fachhochschule München durch telefonische Gespräche mit Experten für Baustofftechnik und Recyclingmaschinen angestellt. Keiner der befragten Experten hatte über das im Vorstehenden in Erfahrung gebrachte Wissen hinaus Kenntnis bezüglich weiterer Aktivitäten in den eigenen und fremden Forschungseinrichtungen zur Aufbereitung und zum Recycling von Gipsfaserplatten.

Erst im Jahr 2023 wurde ein weiteres Projekt zum Recycling von Gipsfaserplatten identifiziert. Im Forschungskolleg Verbund.NRW, einem vom Land Nordrhein-Westfalen geförderten Graduiertenkolleg, widmet sich ein interdisziplinäres Team der RWTH Aachen University und der FH Münster der Ressourceneffizienz im Bauwesen. Nach einer ersten Kohorte promoviert seit Beginn 2021 Herr Wojciech Walica. Er startete die Doktorarbeit mit dem Recyclingpotenzial von Gipskartonplatten [1.31] und beschäftigt sich mittlerweile auch mit Gipsfaserplatten [1.26].

Die vorgestellten Patente und Forschungsergebnisse lassen erkennen, dass ein Durchbruch beim Recycling von Gipsfaserplatten bisher nicht erzielt werden konnte. Die wenigen bisher entwickelten Lösungsansätze sind zurzeit aufgrund der Wirtschaftlichkeit und der Anwendbarkeit nicht bzw. nur begrenzt umsetzbar. Die MUEG mbH als ambitioniertes Unternehmen auf dem Gebiet des Gipsrecyclings, hat es sich zur Aufgabe gemacht, das Recyclingpotential dieser Abfälle vollständig zu erschließen.

1.1.3 Synthetische Gipse

1.1.3.1 Allgemein

Die synthetischen Gipsarten sind meist Koppelprodukte, die in Folge von chemischen Reaktionen bei der Neutralisation oder Behandlung sulfat- oder schwefelhaltiger Medien entstehen. Man unterscheidet die Synthesegipse anhand des jeweiligen Verfahrens und des Prozessschrittes, in dem sie anfallen. Unter Pkt. 1.1.3.1 ist eine kurze Übersicht der als Rohstoffquelle relevanten Synthesegipse aufgeführt. Eine umfangreiche Beschreibung zu Herkunft, anfallenden Mengen und einsatzrelevanten Eigenschaften von synthetischen Gipsen ist im Rahmen der Potentialerhebung unter Pkt. 2.2.2 dargestellt.

1.1.3.2 Übersicht synthetische Gipse

- REA-Gips
  Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kraftwerken und Verbrennungsanlagen, wichtigste Rohstoffquelle für die Gipsindustrie
- Phosphogips
  der Gips, der bei dem Nassherstellungsverfahren für Phosphorsäure anfällt, größte Anfallmenge neben dem REA.
- Fluorogips
  Gips, der bei der Herstellung von Flusssäure aus Flussspat durch Aufschluss mit Schwefelsäure anfällt, trockener Anhydrit als Pulver mit hoher spezifischer Oberfläche und damit hoher Reaktivität.
- Titanogips
  Nebenprodukt bei der Herstellung von Titandioxid als Weißpigment durch Neutralisation von verdünnter Schwefelsäure mit Kalkstein, fällt als Dihydrat an
- Zitronensäuregips
  entsteht als Neutralisationsprodukt bei der Herstellung von Zitronensäure in der Lebensmittelindustrie, hochreiner Anhydrit

- Milchsäuregips
  ebenfalls ein Neutralisationsprodukt der Lebensmittelindustrie, Verwendung ist durch Geruchsbelastung eingeschränkt
- Formiatgipse
  entstehen bei der Herstellung von Ameisensäure
- Gipse aus der Klärschlammbehandlung
  entstehen bei verschiedenen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm. Die Verfahren sind noch in der Entwicklung, bei flächendeckender Umsetzung einer Aufbereitungsmethode besteht ein größeres Potential
- Gipse aus der Batteriesäureaufbereitung
  Fallen bei der Aufbereitung von verdünnter Schwefelsäure aus Blei-Säure-Batterien an und sind damit ebenfalls eine potentielle Sekundärrohstoffquelle, zur Gewinnung dieses Neutralisationsgipses wurden im Rahmen dieses Projektes umfangreiche Untersuchungen durchgeführt.

1.1.3.3 Stand der Technik

Ergebnisse der Patentrecherche

Im Rahmen einer Patentrecherche konnte eine Vielzahl verschiedener Aufbereitungs-, und Verwertungsmöglichkeiten für synthetische Gipse herangezogen werden. Hauptsächlich finden sich zu dieser Thematik chinesische oder russische Patente. Auf europäischer Basis ist nur ein sehr geringer Anteil der Patente vorhanden.

Ein Patent zur Zusammenfassung der meisten Patente für Aufbereitungsmethoden von synthetischen Gipsen betrifft eine komplexe Aufbereitung und Behandlung von Phosphorgips [1.45]. In dieser Erfindung wird der Phosphorgips zunächst fein zerkleinert und dann unter Zugabe von einer 15%igen Schwefelsäure bei 50 bis 80 °C aufgeschlossen, gemischt und bestimmte Metalle in Lösung gebracht. Nach Abtrennung der Lösung wird diese gekühlt, um die Phosphate auszufällen. Diese können dann abgetrennt und für die Herstellung von Düngemitteln verwendet werden [1.46]. Nach der Fällung der restlichen Metalle kann das Wasser in den Waschprozess zurückgeführt werden. Der mit Schwefelsäure behandelte Gipsschlamm wird unter Zugabe von Ammoniakwasser und CO_2 in Ammoniumsulfat und Calciumcarbonat überführt [1.45].

Nach einem chinesischen Patent können synthetische Gipse zusammen mit dem Abfallstoff Manganschlacke als Zuschlagstoff in der Zementindustrie verwendet werden. In bestimmten Anteilen werden keine negativen Einflüsse auf die Zementeigenschaften hervorgerufen [1.47].

Übersicht über die generellen Aufbereitungstechnologien

Die mechanische Gipsaufbereitung ist der wichtigste Bestandteil des Gipsrecyclings und wird mit verschiedenen Technologien durchgeführt. Die Aufbereitungsprozesse werden dabei in verschiedene Grundoperationen unterteilt. Bei der Gipsaufbereitung kommen in der Regel die Zerkleinerung, die Klassierung sowie die Sortierung zum Einsatz. Hilfsprozesse beinhalten die Lagerung, Förderung und Dosierung. Durch mechanische Einwirkungen wird der Gipsabfall in ein Produkt, den Recyclinggips, umgewandelt. Die Stoffzusammensetzung des Produkts unterscheidet sich dabei stark vom Ausgangsmaterial. Die nach Klassier- und Sortierprozessen verbleibenden Reststoffe enthalten aufgrund der begrenzten Wirkungsgrade technischer Prozesse weiterhin anteilig verwertbaren Gips [1.48].

Zerkleinerung

Die Zerkleinerung hat das Ziel, Zwischenprodukte oder Produkte mit bestimmten Partikelgrößen zu erzeugen und Wertstoffe aus Materialverbunden aufzuschließen [1.48]. Beim Rückbau von GFP fallen in der Regel grobstückige Abfallchargen an. Somit wird beim Recycling von GFP sowie Hartgipsen (Formgipse oder Wandbauplatten) eine Vorzerkleinererung erforderlich. Es handelt sich hierbei um einen Prozess, der die Gipsabfälle grob zerkleinert und erste Materialverbünde auftrennt. Typisches Beispiel für Vorzerkleinerer sind Maschinen, bei denen zwei gegenläufig rotierende werkzeugbestückte Wellen den Abfall erfassen, ihn einziehen und grob zerkleinern.

Für die Hauptzerkleinerung des Gipsmaterials kommen unterschiedliche Aggregate in Frage, die nachfolgend in ihren Wirkprinzipien kurz erläutert werden:

- Prallmühle
  Die Prallmühle führt durch eine Aufprallbeanspruchung zu dem Aufschluss von Verbundmaterialien. Die Mühle besteht aus einem aufklappbaren Gehäuse, einem schnelllaufenden Rotor mit auswechselbaren Schlagleisten sowie fest installierten Prallplatten. Das aufgegebene Material wird nach Eintritt von den schelllaufenden Schlagleisten erfasst, anteilig zerkleinert und mit hoher Geschwindigkeit gegen die Prallplatten geworfen. Dort erfolgt durch den Aufprall die Nachzerkleinerung. Die abgeprallten Stücke werden erneut von den Schlagleisten erfasst.

Durch Variation der Geometrie der Prallplatten, Drehzahl des Rotors, Größe des Brechspaltes können Materialeigenschaften berücksichtigt sowie das Ergebnis des Zerkleinerungsprozesses optimiert werden. Eine zusätzlich am Austrag eingebaute Mahlbahn fördert den Zerkleinerungsprozess und begrenzt die maximale Partikelgröße. Das zerkleinerte Material fällt auch hier nach unten und wird mit einer Fördereinrichtung abtransportiert.

- Schraubenmühle

  Mit einer Schraubenmühle wird eine schonende Zerkleinerung von Gipskartonplatten oder Gipsfaserplatten gewährleistet. Drei gegenläufig, langsam laufende Walzen zerkleinern hierbei Gipse mittlerer Härte.

- Walzenbrecher:

  Walzenbrecher sind Zerkleinerungsmaschinen, welche angetriebene Glatt- oder Profilwalzen haben, die gegenläufig arbeiten. Das zugeführte, vorzerkleinerte Gipsmaterial wird eingezogen und mechanisch zerkleinert. Diese Zerkleinerungsmaschinen eignen sich für das Feinzerkleinern von weichen bis mittelharten Gipsen.

Klassierung

Die Klassierung ist ein Trennverfahren, bei dem die einzelnen verschieden großen Partikel eines Aufgabegutes in Grobfraktion und Feinfraktion getrennt werden. Dafür wird die Partikelgröße ausgenutzt. Bei der Siebklassierung wird das Siebgut über einen Siebboden mit bestimmten Maschenweiten bewegt. Feine Partikel fallen durch die Öffnungen und bilden das Produkt, den Siebdurchgang oder die Feinfraktion. Die auf dem Siebboden verbleibenden groben Partikel bilden das zweite Produkt, den Siebüberlauf oder die Grobfraktion. Im Recycling findet die Klassierung Anwendung, wenn Material aus einem vorherigen Aufbereitungsprozess für den nachfolgenden Prozess einen definierten Korngrößenbereich aufweisen muss oder eine bestimmte Partikelgröße abgetrennt werden soll. Beim Gipsrecycling sind besonders das Spannwellensieb und das Trommelsieb vertreten. Eine Vibrationssiebmaschine wird im Labor verwendet. Spannwellensiebe besitzen auf Federn gelagerte Siebkästen, die mit Exzentern angetrieben werden. An den Siebkästen befinden sich Querstreben an denen elastische Siebböden, die Siebbeläge, befestigt sind. Im Betrieb werden die Siebbeläge abwechselnd gespannt und entspannt. Dieser Wechsel führt zu einer hohen Beschleunigung und einer Auflockerung des Materials.

Die Vorwärtsbewegung über die Sieblänge wird durch die Neigung der Maschine um circa 15 bis 20 Grad erreicht. Trommelsiebe hingegen bestehen aus einem zylinderförmigen Mantel mit Sieböffnungen, dem Siebmantel. Über Laufräder, auf denen der Trommelkörper gelagert ist, erfolgt der Antrieb und die Rotation. Das aufgegebene Material wird am Siebmantel bis auf eine bestimmte Höhe nach oben getragen, bis es dann nach unten gleitet.

Aufgrund der Neigung des Trommelsiebs zwischen 4 und 6 Grad wird eine Vorwärtsbewegung induziert. Während feine Partikel durch den Siebmantel nach unten fallen, verbleiben die groben Bestandteile im Siebüberlauf bis zu ihrem Austrag am Ende des Mantels [48]. Im Vergleich zu den anderen beruht die Funktion einer Vibrationssiebmaschine auf der Erzeugung von Relativbewegungen zwischen Siebboden und Aufgabegut. Der Siebboden wird in mehrere Richtungen bewegt [1.50].

Der Transport der Partikel durch die Sieböffnungen erfolgt durch das Wirken von Trägheits-, Schwer- und Strömungskräften [1.51]. Im Labor wird die Siebmaschine für die Ermittlung von Partikelgrößenverteilungen verwendet.

Sortierung

Die Sortierung bezeichnet das Auftrennen einzelner Partikel eines Stoffgemisches in Stoffklassen mit gleichen Stoffeigenschaften und hat einen großen Einfluss auf die Qualität des Recyclingproduktes [1.2]. Dichte, Form, Magnetisierbarkeit und elektrische Leitfähigkeit sind die wesentlichen Trennmerkmale. Der Trennerfolg ist ein Maß dafür, wie gut sortiert wird. Er ist von mehreren Faktoren abhängig. Negativen Einfluss haben unter anderem eine sehr breite Partikelgrößenverteilung, stark unterschiedliche Kornformen oder Verbundmaterialien. Voraussetzung für eine gute Sortierung ist die Konditionierung beziehungsweise die Vorbehandlung des Materials mit vorgeschalteter Klassierung oder Aufschlusszerkleinerung. Trotz Vorbehandlung können die negativen Einflüsse meist nicht vollständig ausgeschlossen werden. Daher ist der Trennerfolg der Sortiermaschinen begrenzt. Die Erfüllung der gewünschten Anforderungen an das Endprodukt können durch zusätzlich eingesetzte Aufbereitungstechnik erreicht werden [1.48]. Es gibt viele unterschiedliche Sortierverfahren wie Handsortierung, Siebung, Sichtung, Magnetabscheidung u.a.m..

In einem Zick-Zack-Sichter wird das Ausgangsmaterial über eine Zellradschleuse einem zick-zackförmigen Kanal zugeführt. Dieser wird von unten nach oben mit Luft durchströmt. Hier wird mit Hilfe der Sinkgeschwindigkeit der Teilchen das Leichtgut vom Schwergut getrennt. Der Luftstrom reißt leichte Partikel mit, während die schweren Partikel gegen den Strom nach unten fallen. Diese werden am Fuß des Sichters ausgeschleust [1.51].

Trommelmagnete dienen der Abtrennung von magnetisierbaren Metallteilen aus dem Aufgabegut. Sie bestehen aus einem festmontierten Permanentmagneten und einem Trommelmantel aus nicht magnetisierbarem Metall. Die Trennung erfolgt durch das Ausheben von magnetisierbaren Bestandteilen innerhalb des Magnetfeldes des Permanentmagneten am Trommelmantel.

Während die nicht magnetisierbaren Partikel den Mantel herabgleiten, bis sie senkrecht nach unten fallen, bleiben die magnetischen Teile haften und werden unterhalb der Trommel hinter einem Scheitelblech aus nicht magnetisierbarem Metall abgeworfen [1.48].

Die händische Sortierung, auch Handklaubung genannt, ist eine Methode zur Einzelkornsortierung. Die Sortierung erfolgt durch die visuelle Unterscheidung optischer Merkmale und das Ergreifen einzelner Partikel per Hand. Dabei steht das Sortierpersonal an einem circa 0,16 Meter je Sekunde laufenden Gurtförderer, greift gezielt bestimmte Stoffe aus dem geförderten Materialgemisch und wirft sie in dafür vorgesehene Abwurfschächte [1.48].

1.1.3.4 Zwischenfazit zu Recyclingtechnologien

Die Kreislauffähigkeit von Gips ermöglicht es, sortenreine Gipsabfälle nach der Aufbereitung als Sekundärrohstoff für die Gipsindustrie zu nutzen. Bisher werden vor allem Gipsplatten recycelt [1.2]. Nach der idealerweise getrennten Erfassung der Bauabfälle auf Gipsbasis werden diese zur Recyclinganlage transportiert. Das angelieferte Material wird vor der Materialaufgabe manuell oder mit Hilfe eines Baggers vorsortiert. Fremdstoffe beziehungsweise unerwünschte Stoffe wie große Metallteile, sonstiger Bauschutt oder Folien können zum Teil aussortiert werden. Dabei wird nach optischen Kriterien getrennt. Im Anschluss folgt die Aufgabe des Materials. Als Nächstes trennt ein Magnetabscheider, ein besonders starker Magnet, Eisen-Metalle ab. Anschließend werden in mehreren Zerkleinerungsschritten die Materialverbunde, wie Gipskörper und Papier, aufgeschlossen und eine bestimmte Partikelgröße erzeugt. Beim Recycling wird der Aufschluss mit einer selektiven Zerkleinerung erreicht, welche das spezifische Zerkleinerungsverhalten von Gips und Kartonage nutzt. Der Gips wird mit Druck- oder Prallbeanspruchung zerkleinert. Das Papier beziehungsweise die Kartonummantelung wird im Rahmen der Gipszerkleinerung ebenfalls durch Druck- oder Prallbeanspruchung mit zerkleinert. Generell dienen Scherbeanspruchungen der Aufschlusszerkleinerung, das heißt der Trennung der Kartonage vom Gipsstoff. Zerkleinert wird in mehreren Stufen. Nach jeder Zerkleinerung erfolgt jeweils eine Siebung des Materials. Bei der Klassierung beziehungsweise Siebung werden das Papier und die Störstoffe abgetrennt. Durch die Sieböffnungen wird der Siebdurchgang transportiert, welcher meist aus Gipspartikeln bis zu einer Größe von rund 1 mm besteht. Die Korngröße kann jedoch je nach Anlagenauslegung variieren.

Da es bei der Aufbereitung von gipshaltigen Materialien zu starken Staubentwicklungen kommt, werden die Aggregate abgekapselt und der Staub abgesaugt und über Filter entfernt [1.14]. Der Erfolg des genannten Aufbereitungsverfahrenes wird stark von der Sortenreinheit des Ausgangsmaterials beeinflusst. Diese kann durch eine Vorsortierung erhöht werden.

Bei Abfällen mit einem hohen Gipsanteil werden durch eine Negativsortierung Fremdstoffe beziehungsweise Störstoffe entfernt. So werden die gipshaltigen Baustoffe angereichert. Bei Abfällen, die einen geringen bis mittleren Gipsanteil aufweisen, kann eine Positivsortierung zielführender sein. Dabei werden die Gipsbestandteile aus dem Material abgetrennt und angehäuft.

Das aus der Sortierung hervorgehende Gipsmaterial kann mit Hilfe des beschriebenen Verfahrens zu Recyclinggips aufbereitet werden, der dann wiederum für die Herstellung von Gipsbaustoffen eingesetzt werden kann [1.2]. Voraussetzung ist jedoch die Einhaltung der Qualitätsparameter der Gipsindustrie.

1.2 Regulatorischer Rahmen für die Behandlung von Gipsabfällen

1.2.1 EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG

Die EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG (AbfRRL) ist eine Richtlinie der Europäischen Union (EU), welche von jedem Mitgliedstaat in nationales Recht umgesetzt werden musste. Unter anderem schreibt sie eine fünfstufige Abfallhierarchie vor, welche die Priorität der Abfallbehandlung festlegt. Demnach hat die Vermeidung Vorrang, dann die Wiederverwendung, das Recycling, die Verwertung und zuletzt die Beseitigung. Neben dieser Hierarchie gibt die Richtlinie Recyclingquoten für nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle vor. Danach müssen die Mitgliedsstaaten nach Artikel 11 Absatz 2b der Richtlinie seit dem 01.01.2020 für nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle, darunter Baustoffe auf Gipsbasis, eine Recyclingquote von mindestens 70 Prozent erfüllen.

1.2.2 EU-Deponierichtlinie 1999/31/EG

Eines der Hauptziele der Deponierichtlinie ist die Verpflichtung der Mitgliedstaaten, alle ihnen möglichen Maßnahmen zu treffen, um das Entstehen von Methangas in Deponien zu verhindern und damit die Erwärmung der Erdatmosphäre einzudämmen. Um den unterschiedlichen abfallpolitischen Ausrichtungen der Mitgliedstaaten Rechnung zu tragen, verlangt die Richtlinie die deutliche Reduzierung der Ablagerung von organischem Abfall, ohne konkrete Maßnahmen vorzuschreiben, verbunden mit einer wirkungsvollen Gaskontrolle für Deponien.

Am 19. Dezember 2002 beschloss der Rat, Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Deponien festzulegen. Für Abfälle von Gipsprodukten gilt Absatz 2.2.3 der Gesetzgebung [1.56].

„*Ungefährliche Materialien auf Gipsbasis sollten nur auf Deponien für ungefährliche Abfälle in Zellen entsorgt werden, in denen keine biologisch abbaubaren Abfälle angenommen werden. Für Abfälle, die zusammen mit gipsbasierten Materialien deponiert werden, gelten die in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 angegebenen Grenzwerte für den gesamten organischen Kohlenstoff und den gelösten*

organischen Kohlenstoff". Der Hauptgrund für den Ausschluss von Gipsabfällen von der Liste der auf Deponien für Inertabfälle zulässigen Abfälle ohne Prüfung ist die Aufnahme des Parameters „Sulfat", der allen Gipsprodukten eigen ist.

Der Sulfatanteil von Gips, der mit biologisch abbaubarem Abfall auf einer Mülldeponie vermischt wird, kann unter anderem in Schwefelwasserstoff (H2S) zerfallen, ein gefährliches Gas, das in hohen Konzentrationen tödlich ist und in niedrigen Konzentrationen nach faulen Eiern riecht [1.56].

1.2.3 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Die europarechtlichen Zielvorgaben der Abfallrahmenrichtlinie wurden mit dem Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) im Jahre 2012 in nationales Recht umgesetzt. Dieses verfolgt neben der Umsetzung, die Sicherstellung der Förderung der Kreislaufwirtschaft, die Schonung der natürlichen Ressourcen und den Schutz der Menschen sowie der Umwelt. Das Gipsrecycling unterliegt gemäß § 2 Absatz 1 KrWG den Bestimmungen über die Verwertung von Abfällen. Abfälle sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder muss. Gemäß § 3 Absatz 1 Satz 2 KrWG sind Abfälle zur Verwertung Abfälle, die verwertet werden. Die Gipsabfälle stammen aus Abbruch- und Sanierungsmaßnahmen. Das KrWG fasst diese Abfälle in § 3 Absatz 6a KrWG, welche durch Bau- und Abbruchtätigkeiten entstehen, als „Bau- und Abbruchabfälle" zusammen. Recycling ist nach dem Gesetz das Durchlaufen eines Verwertungsverfahrens, wodurch die Gipsabfälle zu Recyclinggips aufbereitet werden, der der gipsverarbeitenden Industrie als Rohstoff dient. Eine Aufbereitungsanlage ist eine entweder stationäre oder mobile Anlage. In ihr werden aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen mittels Sortierung, Zerkleinerung sowie Klassierung definierte Gesteinskörnungen hergestellt. Das Ende der Abfalleigenschaft wird in § 5 des KrWG geregelt. Ein Stoff verliert demnach seine Abfalleigenschaft, sobald dieser ein Verwertungsverfahren durchlaufen hat und so beschaffen ist, dass er bestimmte Funktionen erfüllt, ein Interesse an ihm besteht und er erfolgreich vermarket werden kann, er alle technischen und rechtlich geltenden Rahmenbedingungen bezüglich seiner Funktion erfüllt und seine Verwendung keine schädlichen Auswirkungen auf Mensch oder Umwelt hat. Das Vermeidungspotenzial bei Baustoffen auf Gipsbasis besteht in einer abfallarmen Produktion der Baustoffe, Einsatz von betriebseigenen Fehlchargen und Schnittresten als Rohstoff für neue Gipsprodukte, Reduktion des Anteils gefährlicher Stoffe in gipshaltigen Baustoffen sowie einer möglichst vollständigen Verarbeitung, z. B. Reduktion des Verschnittes bei der Verarbeitung von Gipskartonplatten auf ein Mindestmaß.

1.2.4 Abfallverzeichnisverordnung

Die Abfallverzeichnisverordnung (AVV) vom 10. Dezember 2001 ist eine Bundesrechtsverordnung. Sie dient der europaweiten einheitlichen Abfallbezeichnung und der Einstufung von Abfällen nach ihrer Gefährlichkeit. § 2 Absatz 1 AVV bestimmt, dass Abfälle, die nach anderen Rechtsvorschriften zu bezeichnen sind, mit den sechsstelligen Abfallschlüsselnummern des der Verordnung beiliegenden Abfallverzeichnisses zu kennzeichnen sind.11 Diese Nummern haben die Funktion, Abfälle zu kategorisieren, und dienen der Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette der Abfallwirtschaft. Sie beschreiben unter anderem Transportgenehmigungen oder Anlagengenehmigungen.

Die Abfallschlüsselnummer dient der Zuordnung des Abfalls nach der Herkunft und der Abfallart. Es werden bei den bisherigen Gipsrecyclingverfahren auch Gipsabfälle aus Sortieranlagen mit AVV 19 12 09, Produktionsabfälle bzw. Fehlchargen mit AVV 10 13 99 sowie Formgipse 10 12 06 angenommen. Der mengenmäßig größte Anteil sind Gipsabfälle, die dem Abfallschlüssel 17 08 02 unterliegen. Mit ihm werden Baustoffe auf Gipsbasis bezeichnet mit Ausnahme derjenigen Abfälle, die unter den Abfallschlüssel 17 08 01 fallen. Abfälle unter der Nummer 17 08 01 sind Baustoffe auf Gipsbasis, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind und somit nicht recycelfähig. Die ersten beiden Ziffern 17 kennzeichnen den Abfall als Bau- und Abbruchabfall. Die nächsten zwei Ziffern 08 bezeichnen „Baustoffe auf Gipsbasis“ und mit den letzten Ziffern wird die Abfallart „Baustoffe auf Gipsbasis mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 08 01 fallen“ bezeichnet.

1.2.5 Sammlung, Sortierung, Transport

Bei gipshaltigen Baustoffen sind hinsichtlich der Sammlung, des Transports und der anschließenden Behandlung (Verwertung oder Beseitigung) verschiedene Aspekte und Anforderungen zu beachten. Um eine Verunreinigung mit anderen Stoffen (z. B. Schadstoffen) zu vermeiden und dadurch eine stoffliche Verwertung zu gewährleisten, sind Baustoffe auf Gipsbasis grundsätzlich an der Anfallstelle zu sortieren und getrennt zu lagern. Nass aufgebrachte Baugipse können beim Abtrag nicht sortenrein sortiert werden, da diese meist mit Putzträgern oder Mauerwerk vermischt sind. Baugipse sind daher nicht als Gipsmaterial verwertbar. Bei der Monofraktion Gipskartonplatten ist eine Trennung des Gipses vom Ständerwerk und den Wärmedämmungen aus Hartschaum meistens technisch möglich. Sammler und Beförderer gefährlicher Abfälle benötigen eine Beförderungserlaubnis nach § 54 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Sammler und Beförderer von nicht gefährlichen Abfällen müssen grundsätzlich ihre Tätigkeit nach § 53 KrWG der zuständigen Behörde anzeigen. Diese Vorschriften gelten für alle gewerblichen Abfalltransporte auf öffentlichen Straßen in Deutschland, auch für ausländische Unternehmen und für grenzüberschreitende Abfallverbringungen.

1.2.6 Abfallverbringungsverordnung

Für grenzüberschreitende Abfallverbringungen innerhalb und außerhalb der EU gelten zusätzlich die Regelungen der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 (Abfallverbringungsverordnung) bzw. des Abfallverbringungsgesetzes (AbfVerbrG).

1.2.7 Gewerbeabfallverordnung

Die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) von 2017 ist eine weitere Bundesrechtsverordnung, die die Getrenntsammlungspflicht der bei einem Rückbau anfallenden Bau- und Abbruchabfälle, die im Kapitel 17 der Anlage der Abfallverzeichnis-Verordnung genannt sind, einführte. Darunter befinden sich Baustoffe auf Gipsbasis. Erzeuger und Besitzer sind dazu verpflichtet, diese getrennt zu sammeln, zu befördern und nach § 8 Absatz 1 des KrWG vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen. Es besteht eine Getrennthaltungspflicht ab dem Entstehungsort, das heißt entstandene Abfälle müssen bereits auf der Baustelle getrennt gehalten werden. Anlagen, in der Abfälle vor der Verwertung unter anderem durch Sortierung, Zerkleinerung, Siebung und Sichtung vorbehandelt werden, müssen eine Recyclingquote von 30 Massenprozent aufweisen. Zusätzlich schreibt die Gewerbeabfallverordnung die Kontrolle des einer Anlage gelieferten Materials und das Führen eines Betriebstagebuches vor. Die GewAbfV fordert eine getrennte Erfassung von Gipsabfällen (AVV 17 08 02). Recyclingfähige sortenreine Gipsbauplatten werden hier nicht ausdrücklich von Fraktionen, die aufgrund von Anhaftungen (z. B. Fliesen, Putze) nicht recyclingfähig sind, unterschieden [1.53].

1.2.8 Deponieverordnung

Die Deponieverordnung (DepV) basiert auf den EU-Richtlinien 1999/31/EG und 2003/33/EG. Sie regelt unter anderem die Kriterien für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien. Gipsabfälle dürfen nur abgelagert werden, wenn sie bestimmten Annahmekriterien einer Deponieklasse nach der DepV entsprechen. Die Beseitigung von Gipsabfällen ist auf Deponien der Klassen I und II zulässig. Mäßig belastete Gipsabfälle gehören zu der Deponieklasse I. Stärker belastete Gipsabfälle werden der Deponieklasse II zugeordnet. Die genauen Zuordnungskriterien sind der DepV zu entnehmen. Gipsabfälle sind aufgrund ihrer bautechnischen Eigenschaften und des Sulfatgehalts für das herkömmliche Bauschuttrecycling nicht geeignet. Der Sulfatgehalt im Eluat hält in der Regel die Zuordnungswerte der Deponieklassen I bis II ein [1.53]. Eine Verwertung von Gipsabfällen als Deponieersatzbaustoff ist gemäß § 14 Abs. 2 DepV nicht zulässig. Die Einführung von Abfallannahmekriterien für Produkte mit hohem Sulfatgehalt im Juli 2005 hat viele Akteure in der Baulieferkette motiviert, Recyclinglösungen zu prüfen.

Darüber hinaus traten zum 01.01.2024 neue Regelungen gemäß § 7 Absatz 3 der Deponieverordnung (DepV) in Kraft. Somit dürfen folgende Abfälle nicht durch den Abfallerzeuger und Abfallbesitzer einer Deponie der Klasse 0, I, II, III oder IV zur Ablagerung zugeführt werden:

1. Abfälle, die zur Vorbereitung zur Wiederverwendung oder zum Recycling getrennt gesammelt werden;

ausgenommen hiervon sind diejenigen Abfälle,

a) die bei der anschließenden Behandlung getrennt gesammelter Abfälle entstehen und

b) bei denen eine Ablagerung auf Deponien den Schutz von Mensch und Umwelt am besten oder in gleichwertiger Weise wie die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling gewährleistet,

oder

2. Abfälle, die einer Verwertung zugeführt werden können; ausgenommen hiervon sind diejenigen Abfälle, bei denen eine Ablagerung auf Deponien den Schutz von Mensch und Umwelt am besten oder in gleichwertiger Weise wie die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling gewährleistet. Die in § 6 Absatz 2 Satz 2 und 3 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes festgelegten Kriterien sind zu berücksichtigen. [1.53]

Mit dieser Regelung ist somit die Beseitigung recycelfähiger Gipsabfälle zukünftig auf Deponien nicht mehr möglich.

1.2.9 Bundesimmissionsschutzgesetz

Anlagen zum Brennen von Gips werden als „Anlagen zum Brennen von Bauxit, Gips, Kieselgur, Quarzit oder Ton zu Schamotte“ entsprechend der vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BImschV, Anhang 1, Anlage 2.4.2) nach dem vereinfachten Verfahren gemäß §19 BImSchG ohne Öffentlichkeitsbeteiligung genehmigt. Im Kapitel 5.4.2.4 der TA-Luft sind die spezifischen Anforderungen an Anlagen zum Brennen von u.a. Gips aufgeführt. Diese Anforderungen umfassen sowohl die baulichen und betrieblichen Anforderungen als auch die zulässigen Emissionswerte.

Auf Grund der Staubbelastung und des Anlagendurchsatzes unterliegt die Inbetriebnahme einer Gipsrecyclinganlage formaljuristisch den Regelungen des Bundesimmissionsschutzgesetzes. Die Gipsindustrie verlangt für den aufbereiteten Recyclinggips einen Produktstatus [1.55]. Aufbauend auf § 5 KrWG 12 (Ende der Abfalleigenschaft) und dessen Ausführungen in Absatz 1 wurden für die Anlagenstandorte Einzelfalllösungen im Rahmen der BImSch-Genehmigung gefunden.

Die nach Absatz 2 gegebene Ermächtigung für die Bundesregierung, durch Rechtsverordnung allgemeingültige Regelungen zu treffen, wurde bisher nicht genutzt [1.55].

1.2.10 Verbandsvorgaben zur Qualitätssicherung

Recyclinggips ist das Endprodukt einer Gipsrecyclinganlage, welches neben dem Natur- und REA-Gips als neue Rohstoffquelle für die Gipsindustrie dienen soll. Um die Qualität dieses Sekundärrohstoffes zu garantieren, wurden auf nationaler Ebene seitens der Gipsindustrie Qualitätsempfehlungen für Recyclinggips definiert.

Bereits 2013 hat der Bundesverband der Gipsindustrie e.V. Qualitätsanforderungen für Recyclinggips festgelegt, der in Aufbereitungsanlagen aus Gipsabfällen hergestellt wird. Im Rahmen des darin festgelegten Qualitätsmanagements werden regelmäßig und engmaschig Qualitätsparameter des Recyclinggipses untersucht. Zusätzlich werden Standards der Recyclinganlagen in Bezug auf Eingangs- und Produktionskontrolle definiert und deren Überwachung vorgeschrieben

Erstprüfung aller Qualitätsparameter vor Anlieferung und QM – Audit [1.54].

Das Qualitätsmanagement-Audit vor Erstlieferung dient dazu, die Bedingungen der Annahme, Lagerung, Aufbereitung der Abfälle nach verschiedenen Herkünften (H1, H2), die Ausschleusung und Entsorgung der Störstoffe, die ordnungsgemäßen Durchführungen der Analysen nach genormten Verfahren und in akkreditierten Laboratorien und die genehmigungsrechtlichen Fragen (Annahmeerlaubnis, BImSch-Genehmigung, Herstellung Produkt) überprüfen zu können. Annahmebedingungen mit Trennung Herkunft H1 ohne Anhaftung = Fertighausbau, Weiterverarbeitung, Verschnitt Neubau und H2 Rückbau, Abriss sind Voraussetzung [1.54].

Für die Annahme von RC-Gipsen müssen die Qualitätskriterien gem. Tabelle **3** erfüllt werden. Die technischen Parameter müssen chargenweise nachgewiesen werden. Die gesundheitlichen und umweltbezogenen Parameter müssen je nach Qualität des Inputmaterials mindestens einmal jährlich oder pro Quartal nachgewiesen werden [1.55]. Die anzuwendenden Analysenmethoden sind in [1.54] enthalten. Bei mobilen Anlagen sind diese Parameter zusätzlich nach Inbetriebnahme bei Standortwechsel nachzuweisen (Erstprüfung). Die Regelungen zur Einhaltung der Qualitätsempfehlungen sowie die Festlegung von Probenahme- und Analyse-Intervallen sind unverzichtbarer Bestandteil der jeweils abzuschließenden Liefer- und Abnahmeverträge für RC-Gips [1.54]. Prinzipiell gibt es keine gesonderten Anforderungen an die Farbe von Recyclinggips. In der Praxis hat sich allerdings herausgestellt, dass dunkle Farbtöne bei den Abnehmern eher unerwünscht sind.

Tabelle 3 Qualitätskriterien Bundesverband der Gipsindustrie

Technische Parameter		
Parameter	**Einheit**	**Zielwert**
Korngröße	Mm	< 1
Feuchte	Ma-%	≤ 5 (≤ 10)*
$CaSO_4$ x $2H_2O$	Ma-%	≥ 85 (≥80)*
Org. Kohlenstoff TOC	Ma-%	≤ 1 (≤ 1,5)*
Sichtbare Verunreinigungen	-	Ausschluss
Geruch	-	neutral
Magnesiumsalze wasserlöslich als MgO	Ma-%	≤ 0,02 (≤ 0,1)*
Natriumsalze wasserlöslich als Na_2O	Ma-%	≤ 0,02 (≤ 0,04)*
Kaliumsalze wasserlöslich als K_2O	Ma-%	≤ 0,02 (≤ 0,06)*
Chlorid	Ma-%	≤ 0,01 (≤ 0,02)*
pH-Wert	-	5 bis 9

Eluatparameter		
Parameter	**Einheit**	**Zielwert**
As	µg/l	< 15
Pb	µg/l	< 40
Cd	µg/l	< 2
Cr	µg/l	< 30
Cu	µg/l	< 50
Ni	µg/l	< 50
Zn	µg/l	< 150
Hg	µg/l	< 0,5
Phenole/Phenolindex	µg/l	< 20

Gesundheitliche Parameter		
Parameter	**Einheit**	**Zielwert**
Fluorid	Ma.-%	≤ 0,02
Radioaktivität Gem. RP 112 (Index)	-	< 0,5
Asbest	-	Asbestfrei
As	mg/kg	< 4
Be	mg/kg	< 0,7
Pb	mg/kg	< 22
Cd	mg/kg	< 0,5
Cr	mg/kg	< 25
Co	mg/kg	< 4
Cu	mg/kg	< 14
Mn	mg/kg	< 200
Ni	mg/kg	< 13
Hg	mg/kg	< 1,3
Se	mg/kg	< 16
Te	mg/kg	< 0,3
Tl	mg/kg	< 0,4
V	mg/kg	< 26
Zn	mg/kg	< 50
PAK	mg/kg	< 0,2

Die Spezifikationen unterscheiden sich im Detail jedoch von Standort zu Standort und werden bilateral zwischen dem Recycler und dem Verwerter, abhängig von deren Rohstoffversorgungssituation, festgelegt [1.55]. Die Unterschiede sind aber gering und betreffen in Abgrenzung von Naturgips zu REA-Gips die Begrenzung von Spurenelementen aber auch organische Stoffe.

1.3 Zielsetzung

Im Projekt GipsRec2.0 sollen technische, wirtschaftliche und ökologische Untersuchungen und Bewertungen der Potenzialerschließung von End-of-Life Gipsfaserplatten sowie von diversen Synthesegipsen durchgeführt werden. Ziel ist die Ausweitung der Sekundärrohstoffpotenziale für die RC-Gips Herstellung. Das Recycling von Gips ist in Deutschland von zunehmender Bedeutung. Dies liegt einerseits daran, dass der Gipsverbrauch in den vergangenen Jahrzehnten stark angestiegen ist. Der Bausektor verbraucht große Mengen an Gips nicht nur als Zumahlstoff in der Zementproduktion, sondern nicht zuletzt für die Produktion von Gipsprodukten im Innenausbau. Hierzu zählen neben Gipskartonplatten, Gipswandbauplatten, Gipsestrichen oder Gipsputzen auch Gipsfaserplatten. Aufgrund der hervorragenden Baustoffeigenschaften von Gips ist dieser Anstieg der Produktion von gipshaltigen Baumaterialien sowohl in Deutschland als auch in anderen Industrieländern weiterhin ungebrochen. Mehr als 50% des derzeit in Deutschland verbrauchten Gipses entstammt als sogenannter REA-Gips den Rauchgasentschwefelungsanlagen aus der Kohleverstromung, der Restbedarf wird derzeit noch fast ausschließlich aus dem Abbau von heimischem Naturgips gedeckt. Bautechnisch sind Primär- und REA-Gipse nahezu gleichwertig, so dass diese bei gleichwertiger Reinheit in gleicher Weise zur Herstellung verschiedener Gipsprodukte geeignet sind.

Vor dem Hintergrund der Energiewende in Deutschland ist mit einem starken Rückgang des Angebots an REA-Gips zu rechnen, während gleichzeitig die Ausweisung neuer Gipsabbauflächen zunehmend schwieriger wird. Dies liegt daran, dass Naturgips als Primärmaterial nicht unbegrenzt verfügbar ist und der Naturgipsabbau zudem teilweise mit erheblichen Eingriffen in die Natur sowie weiteren Umweltbelastungen verbunden ist.

Aufgrund der schon seit den 1960er Jahren stark ansteigenden Gipsverbräuche im Bauwesen wird mittlerweile seit Jahrzehnten ein anthropogenes Gipslager im Baubestand aufgebaut. Schon zu Beginn der 1990er Jahre wurden bereits mehr als 5 Mio. t Gips pro Jahr in Deutschland produziert. Etwa zeitgleich war ein starker Anstieg in der Produktion von Gipskartonplatten und anderen Bauelementen aus Gips zu verzeichnen.

Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Lebens- / Nutzungsdauer von Gipsprodukten wie Wandbau- oder Gipskartonplatten von 25-40 Jahren ist damit zu rechnen, dass der Anfall von Gips in Baurestmassen in den kommenden Jahren weiter ansteigen wird [2.4].

Entsprechend existiert bereits seit einigen Jahren das Recycling von Gipsabfällen aus Abbruch- und Rückbaumaßnahmen. Während das Recycling von Baugipsen (Estriche und Putze) sowohl technisch und aus mangelnder Sortenreinheit auch ökonomisch nicht darstellbar ist, lassen sich Gipsplatten vergleichsweise einfach und sortenrein aus Rückbau oder Instandsetzungs-, Umbau- oder Neubaumaßnahmen separieren. Das Recycling von Gipskartonplatten wird seit ca. 10 Jahren in Deutschland auch in einer stationären Anlage der MUEG betrieben. In dieser Anlage wird beim Recycling von Gipskartonplatten und Formteilen aus Gips eine Qualität des RC-Gipses erreicht, der die sehr hohen Qualitätsstandards des Bundesverbandes der deutschen Gipsindustrie erfüllt. Mit der MUEG-Recyclinganlage in Großpösna bei Leipzig existieren mittlerweile vier derartige Recyclinganlagen in Deutschland, d.h. in Zweibrücken (REMONDIS), in Pulheim (New West Gypsum Germany GmbH) und in Ennigerloh (Tadick Urban Mining GmbH).

Um die abzusehende steigende Nachfrage nach RC-Gips als Substitut für REA- und Naturgips zu erfüllen, reichen die bisher produzierten Mengen an RC-Gips aus Gipskartonplatten nicht aus und könnten auch bei einer Recyclingquote von 100% den Bedarf nicht decken. Daher ist es vor dem Hintergrund des abzusehenden Rückgangs an REA-Gipsen zwingend erforderlich, nach neuen Quellen für das Gipsrecycling zu suchen. Gipsfaserplatten werden mittlerweile ebenfalls in nennenswerten Mengen produziert, jedoch noch nicht recycelt. Dies liegt primär am Papierfasergehalt von ca. 20 M.-%, der in den Messungen zur Qualitätskontrolle den TOC-Gehalt dominiert. Mit den bisherigen Aufbereitungsmethoden ist es bisher nicht gelungen, den von der Gipsindustrie vorgegeben Grenzwert von < 1,0 bzw. < 1,5 M.-% auch für recycelte Gipsfaserplatten einzuhalten.

Weiterhin entsteht Gips bzw. Anhydrit auch in chemischen Prozessen. So wird z.B. bei der Neutralisation von Schwefelsäure mit Kalksuspensionen Gips gebildet. Darüber hinaus kann Gips als Nebenprodukt bei der Herstellung von organischen Fruchtsäuren wie Zitronensäure oder Weinsäure gewonnen werden. Es sollte daher geprüft werden, bei welchen industriellen Prozessen ebenfalls Gips entsteht und in welcher Qualität diese Abfallgipse vorliegen bzw. ob sie sich für eine weitere Aufbereitung zu RC-Gips eignen.

Im Fokus steht der Wiedereinsatz in der Bauindustrie. Die gipshaltigen Fraktionen sollen auf eine Eignung für den Wiedereinsatz in der Gipsplattenproduktion untersucht werden.

Somit kann Naturgips eingespart werden und aufgrund des Wegfalls der REA-Gipsmengen kann dieser Stoffstrom teilweise ersetzt werden. Weitere Möglichkeiten zur stofflichen Verwertung können in der Zementproduktion oder der Einsatz als Spezialgips (Dentalgips, vor allem Formgips etc.) sein.

2 Potentialerhebungen

2.1 Methodik

2.1.1 Gipsfaserplatten

Die Menge an in Deutschland produzierten Gipsfaserplatten (GFP) wird in verschiedenen Datenbanken, z.B. Statista oder Destatis, erfasst. Die Mengenangaben liegen dabei in m² produzierte Gipsfaserplatte pro Jahr [2.1] vor. Über Angaben zur Dichte der GFP [2.2] kann diese Menge in Masseangaben umgerechnet werden.

Anhand von Literaturangaben zur Nutzungsdauer von Gipsplatten, von durchschnittlich 25 bis 40 Jahren, Gipsplatten kann die bei Rückbauarbeiten anfallende Menge an Gipsplatten abgeschätzt werden [2.3, 2.4]. In persönlichen Gesprächen mit Vertretern der Gipsindustrie wurde eine mögliche Lebensdauer von Gipsplatten von mehr als 50 – 80 Jahren genannt (siehe Kap 3.1.2.1). Auf Basis der statistisch erfassten Masseverhältnisse zwischen Gipsfaserplatten und Gipskartonplatten kann auch die Masse an zurückgebauten Gipsfaserplatten abgeschätzt werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde außerdem in Zusammenarbeit mit dem deutschen Abbruchverband eine Umfrage zu Gipsfaserplatten bei den Mitgliedsunternehmen durchgeführt. In dieser Umfrage wurden sowohl Fragen zum (Abbruch-)Unternehmen als speziell zu Gipsfaserplatten gestellt. Im Einzelnen wurden die folgenden Daten abgefragt:

1. Branche und Unternehmensgröße
2. Anfall und gegebenenfalls Menge von gebrauchten GFP
3. ob Informationen zum bundesweiten Anfall von gebrauchten GFP vorliegen
4. Selektiver Rückbau und getrennte Sammlung von GFP
5. ob die GFP recycelt oder entsorgt werden und auf welche Art dies erfolgt
6. durchschnittliche Transportentfernungen zur Entsorgung bzw. zur Behandlungsanlage
7. durchschnittliche Kosten der Entsorgung

8. ob die Problematik von anhaftenden Asbestfasern bisher als Problem in Zusammenhang mit Gipsfaserplatten aufgetreten ist

9. ob der Feuchtegehalt der rückgebauten GFP bekannt ist.

Der Rücklauf der Fragebögen über den Deutschen Abbruchverband war mit 65 Fragebögen durchaus zufriedenstellend. Bei einer Mitgliederanzahl des Deutschen Abbruchverbandes von zum damaligen Zeitpunkt mehr als 600 Unternehmen und vor dem Hintergrund, dass einige Unternehmen ausschließlich Abbruch- bzw. Rückbaumaßnahmen im Tiefbau durchführen bzw. dass z.B. auch Ingenieurbüros zu den Mitgliedsunternehmen zählen, konnte ein Rücklauf von über 10 % der interessierenden Unternehmen festgestellt werden

Die Unternehmen wurden in Abhängigkeit von der Anzahl ihrer Mitarbeiter in kleine (1-10 Beschäftigte), mittlere (11-50 Beschäftigte) und große Unternehmen (> 50 Beschäftigte) unterschieden. Von 5 % der befragten Unternehmen gab es keine Angaben zur Unternehmensgröße. Eine Übersicht über die Verteilung der Mitarbeiteranzahl der befragten Abbruchunternehmen gibt die nachfolgende Grafik, A1. Wie aus dieser Darstellung ersichtlich, stammen rund 54 % der beantworteten Fragebögen aus Unternehmen mittlerer Größe, ca. 26 % der Fragebögen wurden von großen Betrieben und 15 % von kleinen Betrieben beantwortet. Die vorliegenden Antworten zeigen Unterschiede zwischen den Antworten der Betriebe in Abhängigkeit von der Größe.

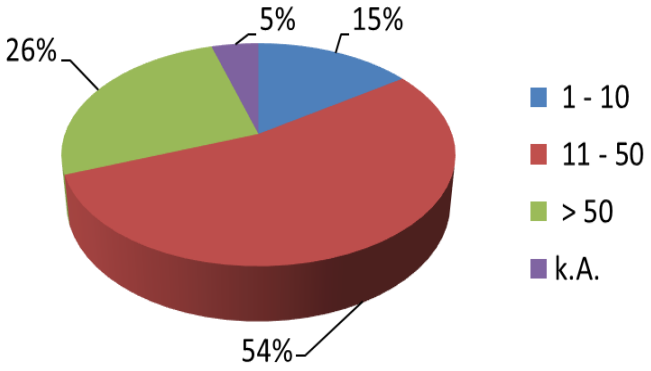


Abbildung 2 Größenverteilung der befragten Unternehmen nach Mitarbeiterzahl

In verschiedenen Fällen musste wegen Unklarheiten auch telefonisch nochmals bei den Unternehmen nachgefragt werden.

2.1.2 Synthetische Gipse

Neben den natürlichen Gipsvorkommen entsteht Calciumsulfat-Dihydrat in einer Vielzahl von technischen Prozessen als ein Neben- oder Koppelprodukt, das in Folge von chemischen Reaktionen bei der Neutralisation oder Behandlung sulfat- oder schwefelhaltiger Medien anfällt.

Der weitaus größte Anfall dieser sogenannten synthetischen Gipse entstammt als REA-Gips der Rauchgasentschwefelung von mit fossilen Energieträgern betriebenen Kraftwerken und zeichnet sich durch seine hohe Reinheit aus [2.5, 2.7].

Man unterscheidet die Synthesegipse anhand des jeweiligen Verfahrens und des Prozessschrittes, in dem sie anfallen und benennt sie nach den Prozessen, in denen sie entstehen (Rauchgasentschwefelungsanlagen-(REA-)gips, Fluorogips, Titanogips u.a.). Teilweise werden diesen Gipsen unterschiedliche ASN AVV (Abfallschlüsselnummern aus der europäischen Abfallverzeichnisverordnung) zugeordnet. Auch in Bezug auf die Eigenschaften und die Zusammensetzung des Gipses sowie in Abhängigkeit von den Anforderungen des vorgesehenen Verwendungszwecks kann es Unterschiede geben, die einen Einfluss auf das erforderliche Aufbereitungsverfahren haben.

Für die Erfassung des Potentials von synthetischen Gipsen wurden zunächst bereits vorhandene Daten ausgewertet sowie weiterhin in Expertengesprächen die aktuellen Mengen und eventuell weitere vorhandene Möglichkeiten der Gewinnung von Sekundärgipsen angesprochen.

Außerdem wurden im Rahmen des Projektes verschiedene synthetische Gipse aus unterschiedlichen Industriezweigen eruiert. Aufgrund der Corona-Pandemie wurden die Betriebe jedoch nicht besucht, sondern die Proben wurden nach der Kontaktaufnahme per Post verschickt. Zum Vergleich wurden auch Phosphorgipse aus einem anderen Forschungsprojekt (SCALE, durchgeführt im EU-Forschungsprogramm Horizon 2020) akquiriert und untersucht. Die eingesetzten Methoden zur Bewertung der Qualität dieser synthetischen Gipse umfassen sowohl chemisch-physikalische Analysemethoden als auch Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie. Dabei wurden als Hauptkriterien für synthetische Gipse der Gipsgehalt, Schwermetallgehalte sowie die Kristallstruktur der Gipse und ihre Korngrößenverteilung ausgewählt.

Tabelle 4 Auswahl der wichtigsten technischen Qualitätsanforderungen synthetischer Gipse

Parameter	gemessen als	Einheit	Qualitätskriterium für Gips*
Feuchtigkeitsgehalt	H_2O	Ma.-%	$\leq$ 5 ($\leq$ 10)*
Gipsgehalt	$CaSO_4 \times 2H_2O$	Ma.-%	$\geq$ 85 ($\geq$ 80)*
Organischer Kohlenstoff	TOC	Ma.-%	$\leq$ 1,0 ($\leq$ 1,5)*
Asbest	nicht nachweisbar		
versch. Schwermetalle		mg/kg	div.
Salze, z.B. Chloride	Cl	Ma.-%	$\leq$ 0,01 ($\leq$ 0,02)*

Das Probenmaterial umfasste Phosphorgipse (aus Kroatien, Griechenland, Litauen, Südafrika), Titanogips (Italien), Fluorogips, REA-Gips sowie Gips aus Versuchen zur Klärschlammbehandlung. Es wurden nicht alle Untersuchungsmethoden bei allen untersuchten Gipsen angewandt.

Ein weiterer Schwerpunkt im Bereich synthetische Gipse waren Versuche zur Gewinnung von Sekundärgipsen mittels Fällungsversuchen mit calciumhaltigen Basen aus Altbatteriesäure. Die Altbatteriesäure wurde für die Arbeiten in diesem Projekt durch die Firma Clarios Recycling GmbH aus Buchholz, zur Verfügung gestellt.

Alle Gipse wurden vor den analytischen Untersuchungen im Temperaturbereich von 42-47°C getrocknet und etwaige Agglomerate wurden in einem Achatmörser manuell zerkleinert. Der Reinheitsgrad der Gipse wurde thermogravimetrisch in Anlehnung an die TGA-Methode zur Analyse von REA-Gips nach VGB PowerTech, im Temperaturbereich 25-910°C in Stickstoffatmosphäre, bestimmt [2.5, 2.6]. Diese Untersuchungen wurden mittels eines Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Selb, Deutschland) durchgeführt, es wurden jeweils zwischen 30 und 60 mg Probe eingesetzt.

Die Schwermetallkonzentrationen der Gipse wurden mittels ICP-OES gemessen (Thermo IRIS Intrepid II XSP in Kombination mit Thermo Timberland IIS Autosampler, Thermo Fisher Scientific GmbH, Dreieich, Deutschland). Dazu erfolgte zuvor ein Mikrowellenaufschluss des Gipses unter Verwendung von Flusssäure und Borsäurelösung in Anlehnung an die TGA-Methode zur Analyse von REA-Gips nach VGB PowerTech [2.6].

Von jeder zu untersuchenden Probe erfolgten zwei Mikrowellenaufschlüsse und aus jedem Aufschluss wurden zwei Messungen mittels ICP durchgeführt, so dass 4 Messergebnisse pro Probe vorlagen. Für die Auswertung konnten diese Werte gemittelt bzw. Ausreißer konnten erkannt werden und unberücksichtigt bleiben.

Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung (SEM) wurde mit einem FEI XL 30 Wolframkathoden-Rasterelektronenmikroskop durchgeführt, das bei 20 keV betrieben wurde und einen Sekundärelektronendetektor verwendete. Vor der Analyse wurden alle Proben mit einer 30nm dicken Schicht aus Gold versehen.

2.2 Ergebnisse der Literatur- und Materialrecherche

2.2.1 Gipsfaserplatten

Gipsfaserplatten stellen nach Gipskartonplatten die zweitgrößte Menge der in Deutschland produzierten Gipsplatten dar. Abbildung 3 zeigt die Gipsplattenproduktion in Deutschland, unterteilt in Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten in Millionen m² pro Jahr, über einen Zeitraum von 13 Jahren von 2009 bis 2021. In diesem Zeitraum wurden zwischen 26 und 33 Millionen m² GFP pro Jahr produziert, demgegenüber betrug die Produktion von Gipskartonplatten 222 bis 249 Millionen m² pro Jahr. Entsprechend umfasste – bezogen auf die Fläche – die GFP-Produktion in diesen Jahren nur zwischen 11-14 % der Gipskartonplattenproduktion. Dieser Anteil an GFP bzw. das Verhältnis von GFP zu Gipskartonplatten hat sich über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren nur unwesentlich verändert.

Bezogen auf die Masse an verbautem und zeitlich versetzt wieder anfallenden gebrauchten Gipsplatten ist das Potential der GFP aufgrund des größeren Gewichts pro m² jedoch etwas höher. Für Gipskartonplatten wird mit 8,5 kg/m² gerechnet, bei GFP wird mit 15 kg/m² gerechnet [z.B. 2.2, Kap.3.1.2.2]. Der Papier- bzw. Kartonanteil von Gipskartonplatten beträgt ca. 10 – 15 M-% [2.4], der Papieranteil von GFP wird mit 20 M-% (siehe Kap. 1.1.2.2.) angegeben.

Gipskartonplatten mit einem Papier-/Kartonanteil von 12,5% haben dementsprechend eine Masse von 7,44 kg Gips/m². Der Gipsanteil von GFP mit einem Gewicht von 15 kg/m² entspricht einen Gipsgehalt von 12 kg/m².

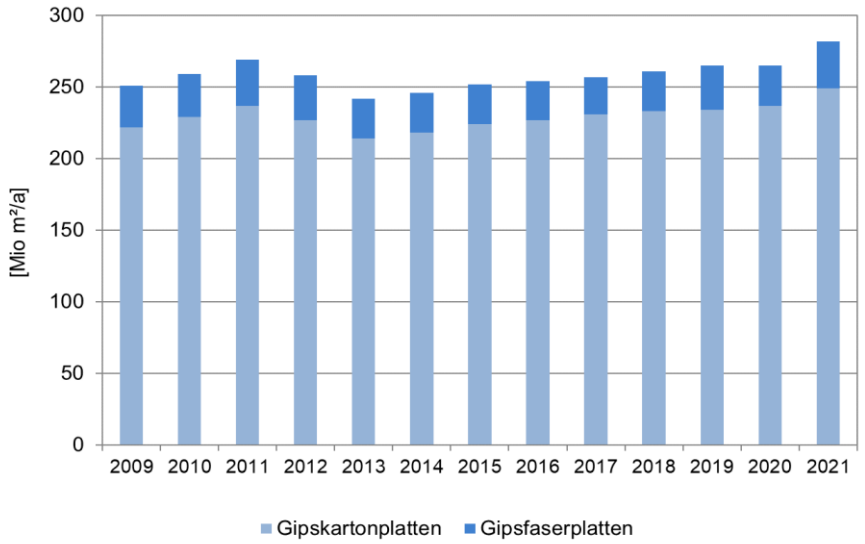


Abbildung 3 Produktion von Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten in Deutschland (2009-2021) in Mio. m²/a [2.1]

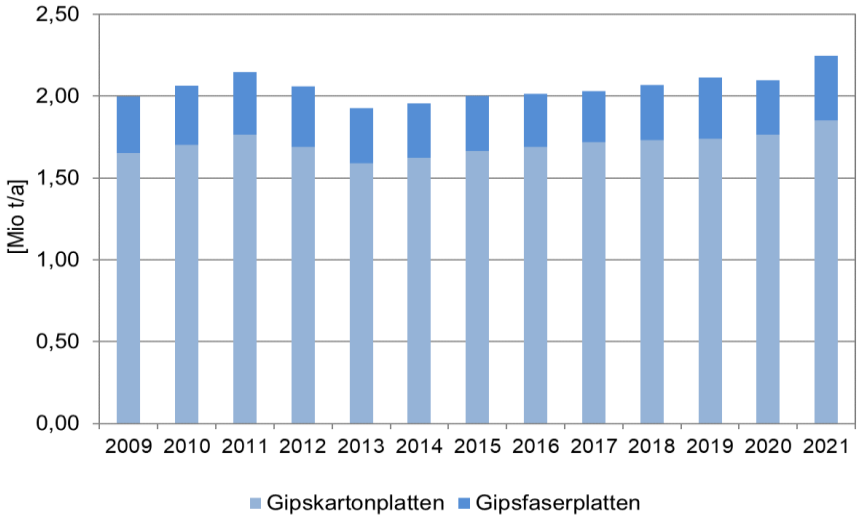


Abbildung 4 Produktion von Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten in Deutschland (2009-2021) in Mio. t/a [2.1]

Bezogen auf die Masse beträgt die GFP-Produktion immerhin zwischen 18 und 22% der Gipskartonplattenproduktion.

Unter der Annahme, dass die Produktionsdaten seit Beginn der 2000er Jahre in etwa in der gleichen Größenordnung liegt, würde bei einer Nutzungsdauer von 25-40 Jahren und einer angenommenen Verwertbarkeit von 50% - damit das Potential von Sekundärgips aus GFP ab dem Jahr 2025 bis 2040 auf bis zu 200.000 t/a anwachsen.

Ein Anstieg des Anfalls von Bauabfällen auf Gipsbasis aus Abbruchmaßnahmen lässt sich auch bei der Betrachtung der Entwicklung des Aufkommens an mineralischen Bauabfällen feststellen. Seit dem Jahr 2000 erscheinen alle zwei Jahre Monitoringberichte zu Bauabfällen der Arge Kreislaufwirtschaft Bau (einem Zusammenschluss von am Bau beteiligten Wirtschaftszweigen und -verbänden, im Jahr 2000 noch Kreislaufwirtschaftsträger Bau benannt), in denen das Aufkommen von Bauabfällen erfasst und ausgewertet wird [2.9]. Der erste Monitoringbericht enthielt die Zahlen für das Jahr 1996. Mit den Zahlen von 2004 wurden erstmals Bauabfälle auf Gipsbasis gesondert erfasst. Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt die erfasste Menge an Bauschutt und an Bauabfällen auf Gipsbasis ab dem Jahr 2004 in absoluten Zahlen.

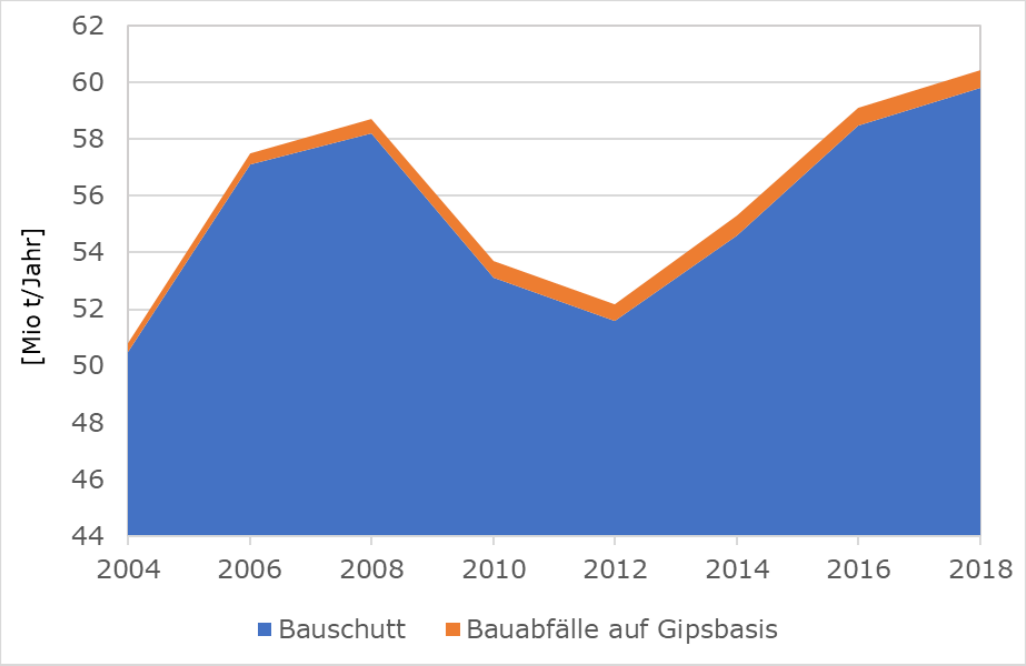


Abbildung 5 Anfall von Bauschutt (blau) und Bauabfällen auf Gipsbasis (orange) [2.9]

Im Verlauf des Betrachtungszeitraums ist ein Anstieg sowohl des Bauschutt- als auch des Gipsabfallanfalls zu verzeichnen. Auf den ersten Blick ist nicht ersichtlich, dass die Bauabfälle auf Gipsbasis im Verhältnis zu Bauschutt deutlich stärker anwachsen. Setzt man die angefallenen Massen ins Verhältnis zum Bezugsjahr 2004, ergibt sich die in Abbildung 6 dargestellte Entwicklung.

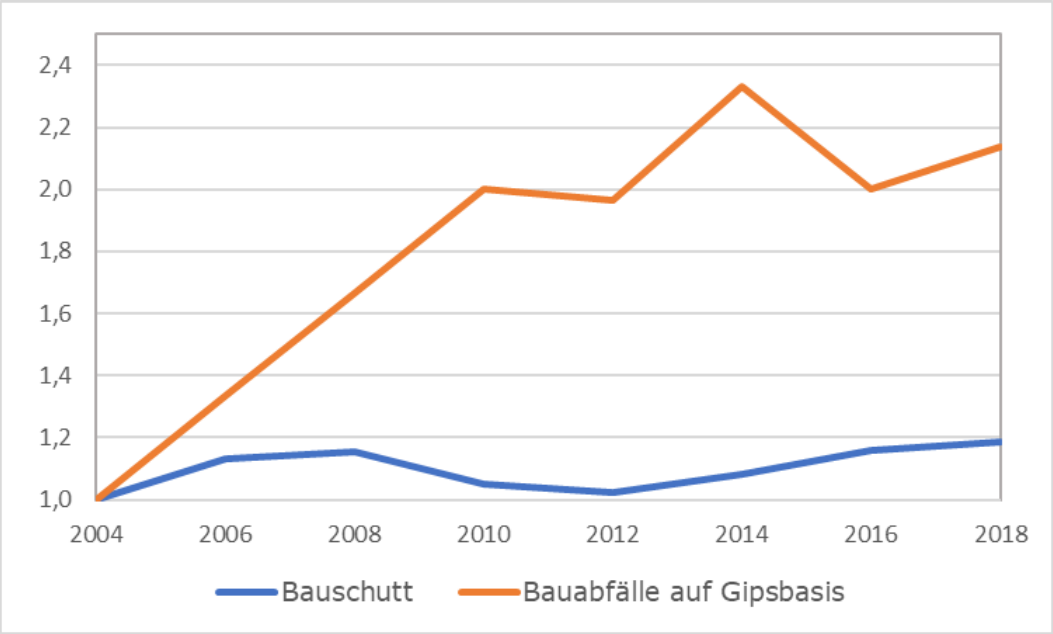


Abbildung 6 Anfall von Bauschutt (blau) und Bauabfällen auf Gipsbasis (orange) im Verhältnis zur im Jahr 2004 als Bezugsjahr erfassten Menge [2.9]

Während sich der Bauschuttanfall im Betrachtungszeitraum um knapp 20% erhöht hat, hat sich die Menge an Gipsabfällen mehr als verdoppelt. Dieser starke Anstieg ist also nicht auf erhöhte Abbruchaktivitäten zurückzuführen. Möglicherweise wurde die Erfassungslogistik für die getrennte Sammlung dieser Abfälle verbessert, zu vermuten ist jedoch ebenfalls, dass sich der Anteil an Gipsabfällen im Abbruchmaterial auch aufgrund der in den vergangenen Jahrzehnten gestiegenen Menge an verbauten Gipsprodukten erhöht hat. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass in diesen gipsbasierten Bauabfällen zwar überwiegend, aber nicht nur Gipsplatten unterschiedlichen Typs enthalten sind. Andere Gipsabfälle, wie z.B. Putzreste oder Gipsestriche, können ebenfalls zu dieser Abfallkategorie gezählt werden.

In der gemeinsam mit dem deutschen Abbruchverband durchgeführten Umfrage unter Abbruchunternehmen wurde festgestellt, dass die meisten der befragten Unternehmen einen selektiven Rückbau von Gipsplatten durchführen. In diversen telefonischen Rückfragen musste leider festgestellt werden, dass die Unterscheidung zwischen Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten nur gesichert in einem Unternehmen durchgeführt wurde. Mehr als 20% der Betriebe gaben an, dass in ihren Rückbauvorhaben keine Gipsfaserplatten anfallen. Daher muss man davon ausgehen, dass sich der überwiegende Anteil der Angaben auf Gipskartonplatten bezieht. Daher können die nachfolgenden Aussagen nur auf den angenommenen Anteil von GFP an der Gesamtgipsplattenproduktion bezogen werden.

Knapp 95% der Unternehmen bauen Gipsteile selektiv zurück und sammeln Gipsabfälle getrennt. Von den kleinen Unternehmen waren dies 100%, von den mittleren Unternehmen 91 % und 94% der großen Betriebe praktizierten ebenfalls diese Verfahrensweise.

Die Menge an bei Abbruchmaßnahmen getrennt gesammelten Gipsplatten unterschied sich ebenfalls in Abhängigkeit von der Betriebsgröße. Kleine Firmen gaben im Mittel einen Gipsabfallanfall von 74 t/a an, rechnet man die Betriebe, die keine Angabe dazu machten, ein ergibt sich ein Anfall von 52 t/a pro Betrieb. Mittlere Unternehmen verzeichneten ein Gipsplattenaufkommen von 185 t/a, unter Einrechnung der Betriebe ohne Angabe ergibt sich ein Durchschnitt von 153 t/a. Die Menge an gebrauchten Gipsplatten im Rückbau von großen Unternehmen lag mit 708 t/a deutlich höher, bei Berücksichtigung der Betriebe ohne Angabe lag diese Zahl bei 619 t/a.

Große Unterschiede gab es auch bei Transportentfernungen und Entsorgungskosten. Während kleine Unternehmen die Entsorgungskosten mit 96 €/t bei einer Transportentfernung von im Mittel 25 km angeben, hatten mittlere Unternehmen zwar mit 93 €/t etwas niedrigere Entsorgungskosten jedoch bei einer deutlich höheren durchschnittlichen Transportentfernung von 63 km. Große Unternehmen gaben mit 90 €/t nochmals niedrigere Entsorgungskosten bei gleichzeitig der höchsten mittleren Transportentfernung von 111 km an.

Allerdings transportieren nur wenige Unternehmen die Gipsplatten zu einer Gipsrecyclinganlage. Rückfragen ergaben, dass dies ist vor allem auf die langen Transportwege zu den Recyclinganlagen und die vergleichsweise günstigen Deponiekosten zurückzuführen ist. Ein weiterer Grund, der das Recycling behindert, ist die Sorge um eine mögliche Kontamination mit Asbestfasern. Fast 50% der Betriebe hatten bereits Probleme mit möglichen Asbestkontaminationen.

Die Angaben zur geschätzten Nutzungsdauer der gebrauchten Gipsplatten lagen zwischen 5 und 50 Jahren, die durchschnittliche Schätzung betrug 23 Jahre. Diese Schätzungen bestätigten die bereits vorliegenden Zahlen zur Nutzungsdauer von Gipsplatten. Angaben zum Feuchtegehalt der Gipsplattenabfälle waren kaum vorhanden und daher auch nicht auswertbar.

Grundsätzlich ist das Recycling von Gipsplatten ein Thema, dem die befragten Betriebe sehr aufgeschlossen gegenüberstehen. Die getrennte Sammlung der Gipsplatten findet umfangreich statt, während die Übergabe an Recyclingunternehmen aufgrund der oftmals großen Transportentfernungen noch ausbaufähig ist.

Insbesondere die Telefonate mit verschiedenen Unternehmen haben gezeigt, dass noch Klärungsbedarf bei der Unterscheidung zwischen Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten auf den Baustellen besteht. Eine Unterscheidung ist jedoch notwendig, damit die Gipsplatten optimal recycelt werden können.

2.2.2 Synthetische Gipse

Wie bereits beschrieben stammt der mit Abstand größte Anteil an synthetischen Gipsen aus der Rauchgasentschwefelung von Kraftwerken mit fossilen Energieträgern. Zwischen 2000 und 2010 wurden durchschnittlich etwas mehr als 7 Millionen Tonnen REA-Gips pro Jahr für den Einsatz in der Gipsindustrie verbraucht. Im Zuge der Energiewende wurden bereits Kraftwerke in Deutschland stillgelegt und dies schlägt sich bereits in den Zahlen von 2019 nieder, die vom Bundesverband der Gipsindustrie in Deutschland bereitgestellt wurden.

Tabelle 5 Rohstoffbilanz für Gips in Deutschland (2019), Daten BV Gips gerundete Zahlen

Herkunft	Mio. t	%
Naturgips/Anhydrit	4,9	53,7
REA-Gips	4,0	44
RC-Gips	0,17	1,9
andere synthetische Gipse (nur Gipsindustrie)	0,034	0,4
Summe	9,1	100,0
andere Industrien (geschätzt)	0,9	
Gesamt	10,0	

[2.8, Dr. J. Demmich 2021]

Der eingesetzte REA-Gips betrug im Jahr 2019 nur noch 4 Millionen Tonnen bzw. 44% des für die Gipsproduktion genutzten Gipses. Diese Angaben werden bestätigt durch das unter Pkt. 1.1.1.3 dargestellte Gipsaufkommen für das Jahr 2020. Da im Verlauf der Energiewende bis spätestens 2038 die derzeit noch betriebenen Kohlekraftwerke in Deutschland stillgelegt werden sollen, ist infolge der so entstehenden Lücke an Rohstoff für die Gipsindustrie neben einer erhöhten Nachfrage nach Naturgips und RC-Gips auch mit einer verstärkten Nachfrage nach geeigneten synthetischen Gipsen zu rechnen.

Die in Tabelle 5 für die Nutzung von synthetischen Gipsen in der Gipsindustrie aufgeführte Menge von 34.000 t im Jahr 2019 bezieht sich nur auf die bereits gesichert bekannte Masse. Darüber hinaus wird der Anfall von synthetischen Gipsen aus verschiedenen Prozessen auf ca. 900.000 t für dieses Jahr abgeschätzt.

Im Rahmen von Experteninterviews (siehe Kapitel 3.1.2) konnten zusätzlich spezifischere Informationen zu synthetischen Gipsen eruiert werden. Aufgrund der teilweise sehr guten stofflichen Eigenschaften von synthetischen Gipsen kann festgestellt werden, dass zahlreiche synthetische Gipse bereits vollständig oder fast vollständig in den Stoffkreislauf übernommen werden können.

Ein nahezu vollständig wieder verwerteter synthetischer Gips ist Fluorogips, der als Anhydrit bei der Produktion von Flusssäure anfällt. Dieser Gips findet Verwendung in der Herstellung von Estrich und Porenbeton. Es fallen jedoch nur wenige Tonnen jährlich (< 10 t/a) an.

Zitronensäuregips fällt ebenfalls als Anhydrit an - jedoch in der Lebensmittelindustrie. Es gibt zwei Hersteller von Zitronensäure in der EU, die in Belgien und Österreich ansässig sind. Auch dieser Synthesegips ist von sehr guter Qualität und wird zu 100% verwertet. Ein Einsatzgebiet ist die Porenbetonherstellung. Die jährlich entstehende Menge an Zitronensäuregips beträgt ca. 30.000 t.

Ein weiterer Synthesegips aus der Lebensmittelindustrie ist der Milchsäuregips. Hier wurde ein Produzent in den Niederlanden ermittelt. Milchsäuregips ist jedoch infolge des Herstellungsprozesses mit Milchsäure verunreinigt, was zu Geruchsbelastung führt. Das Material wird daher ausschließlich in Pilzsubstraten und nicht in der herkömmlichen Gipsindustrie verwendet. Die Jahresanfallmenge beträgt ca. 30.000 t.

Bei der Herstellung von Ameisensäure entstehen die sogenannten Formiatgipse. Diese Gipse haben ebenfalls geringe Verunreinigungen. Es sind in der EU zwei Hersteller bekannt, die anfallende Menge an Formiatgips beträgt jedoch nur etwa 3.000 t jährlich.

In der Produktion von Titandioxid nach dem Dünnsäureverfahren fällt ebenfalls Gips als Nebenprodukt an, der sogenannten Titanogips. Dieses Verfahren wird in Deutschland nicht mehr angewandt. Ein Unternehmen in Frankreich produziert derzeit nach dem Dünnsäureverfahren. Der dabei anfallende Titanogips, ca. 150.000 t pro Jahr, hat nur eine Reinheit von 60-70%, Verunreinigungen und einen hohen Wassergehalt. Eine Aufbereitung dieses Materials für einen Einsatz in der Bauindustrie wäre sehr aufwändig, so dass dieser Titanogips derzeit deponiert wird. Titanogipshalden befinden sich auch in anderen europäischen Ländern, z.B. Italien.

Zurzeit werden in Deutschland verschiedene Verfahren zur Nutzung von Phosphor aus Klärschlämmen, die bei der Reinigung kommunaler Abwässer anfallen, untersucht. Welche Verfahren sich letztendlich flächendeckend in Deutschland durchsetzen werden, ist noch unklar. Teilweise können bei diesen Verfahren auch synthetische Gipse anfallen. Ein interessantes Verfahren ist das Tetraphosverfahren, das derzeit in Hamburg in größerem Maßstab erprobt wird. In diesem Verfahren könnten pro Jahr 10.000 t Gips hoher Reinheit als Nebenprodukt anfallen.

Falls sich diese Gipse als geeignet erweisen und falls sich das Verfahren im Markt durchsetzen kann, besteht hier ein noch größeres Potential an synthetischen, in der Bauindustrie einsetzbaren Gipsen.

Die weltweit größte Menge an synthetischen Gipsen stellen Phosphogipse dar. Seit mehreren Jahrzehnten werden diese Gipse, die bei der Herstellung von Phosphorsäure für die Düngemittelindustrie als Reststoffe entstehen (vgl. 1.1.32), aufgehaldet. Der jährliche Anfall beträgt weltweit etwa 180 Millionen Tonnen pro Jahr, entsprechend große Halden an Phosphogipsen finden sich weltweit. Diese Gipshalden sind aufgrund der unterschiedlichen Verfahren, mit denen die Rohphosphate verarbeitet wurden, sehr heterogen zusammengesetzt. Derzeit wird in Europa, in Belgien, erst ein Verfahren umgesetzt, in dem Phosphogips in einer Qualität anfällt, die eine Verwertung ermöglicht [2.10].

In Phosphogipsen finden sich in der Regel Schwermetalle, Phosphatrückstände oder auch – in Abhängigkeit von dem verarbeiteten Rohphosphorerz – radioaktive Verunreinigungen. Eine Aufbereitung ist daher sehr aufwändig, könnte allerdings bei steigenden Preisen für Gips oder Gipsprodukte zu einem späteren Zeitpunkt wieder interessant werden. Aufgrund der starken Nachfrage nach Gips wird schon seit Jahren in Hinblick auf eine spätere Nutzung in der Bauindustrie geforscht [2.11]. Die innerhalb des Projektes akquirierten Phosphogipse wurden in Hinblick auf vorhandene Schwermetallgehalte sowie auf ihre kristalline Struktur hin untersucht. Die Schwermetallgehalte wurden bis auf Cadmium und Quecksilber, die mit ICP-MS gemessen wurden, mittels ICP-OES bestimmt. Die Ergebnisse finden sich in der nachfolgenden Tabelle 6. Zur Einordnung sind in der Spalte rechts außen die Qualitätsempfehlungen des Bundesverbands der Gipsindustrie [2.5] dargestellt.

Tabelle 6 Schwermetallgehalte v. Phosphogipsen unterschiedlicher Herkunftsländer im Vergleich

	Kroatien	Griechenland	Litauen I	Litauen II	Südafrika	Richtwert*
Arsen	2,63	1,72	37,90	1,42	13,67	< 5,1
Blei	1,66	1,72	4,49	10,87	7,77	< 56
Cadmium**	1,80	1,06	0,01	0,07	0,01	< 1,6
Chrom	33,38	3,13	0,14	7,07	0,97	< 15
Kobald	35,72	0,83	3,75	236,61	4,26	< 4
Kupfer	n.n.	0,10	8,80	2,22	19,33	< 16
Mangan	2,64	0,79	22,14	47,68	13,39	< 76
Molybdän	0,16	0,08	0,56	n.n.	0,25	< 5
Nickel	1,67	0,11	n.n.	4,22	0,19	< 20
Quecksilber**	1,88	0,02	0,15	0,52	0,21	< 1,4
Zink	6,94	1,75	2,47	146,57	0,10	< 47
* gemäß den Qualitätsanforderungen des BV Gips, **gemessen mit ICP-MS						

Es wurde festgestellt, dass, bis auf den Gips aus Griechenland, alle Phosphogipse in Bezug auf mindestens ein Element deutlich zu hohe Gehalte aufwiesen. Da, außer dem Gips aus Kroatien, alle Gipse in getrocknetem Zustand übermittelt wurden, wurde auf eine vergleichende Feuchtigkeitsbestimmung verzichtet. Der kroatische Phosphogips hatte einen Wassergehalt von 13,6 %, was auch den an anderer Stelle festgestellten hohen Wassergehalten von Phosphogipsen entspricht, die eine Aufbereitung entsprechend aufwändiger machen.

Die rasterelektronenmikroskopischen (REM-)Untersuchungen zeigten unterschiedliche Kristallstrukturen und Kornverteilungen der synthetischen Gipse. Bei diesen Untersuchungen ging es vor allem darum, die Form der Gipskristalle sowie die Korngrößenverteilungen festzustellen. In der Gipsindustrie werden in Abhängigkeit von den jeweiligen zukünftigen Anwendungen unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzten Rohgipse gestellt. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass eine gedrungene Kornform vorteilhafter ist als eine längliche Kornform, plattige Körner sind für die Weiterverarbeitung günstiger als nadelige Kristalle. Ein breites Kornband ist ebenfalls für die Verwertung der synthetischen Gipse von Vorteil. [2.8]. In der nachfolgenden Abbildung 2.x 6 sind REM-Aufnahmen von verschiedenen synthetischen Gipsen (Fluorogips, Titanogips und Gips aus Versuchen zur Klärschlammbehandlung) in zwei unterschiedlichen Vergrößerungen dargestellt. Während der Fluorogips sehr günstig geformte Gipskristalle und ein schmales Kornband aufweist, sind die Kristalle des Titanogipses plattig, verfügen jedoch über ein breiteres Kornband. Demgegenüber ist der Gips als Nebenprodukt aus der Klärschlammbehandlung durch seine nadelige Struktur eher ungünstig geformt da die Verarbeitung dieser Kristallformen, z.B. bei der Entwässerung, ungleich schwieriger ist.

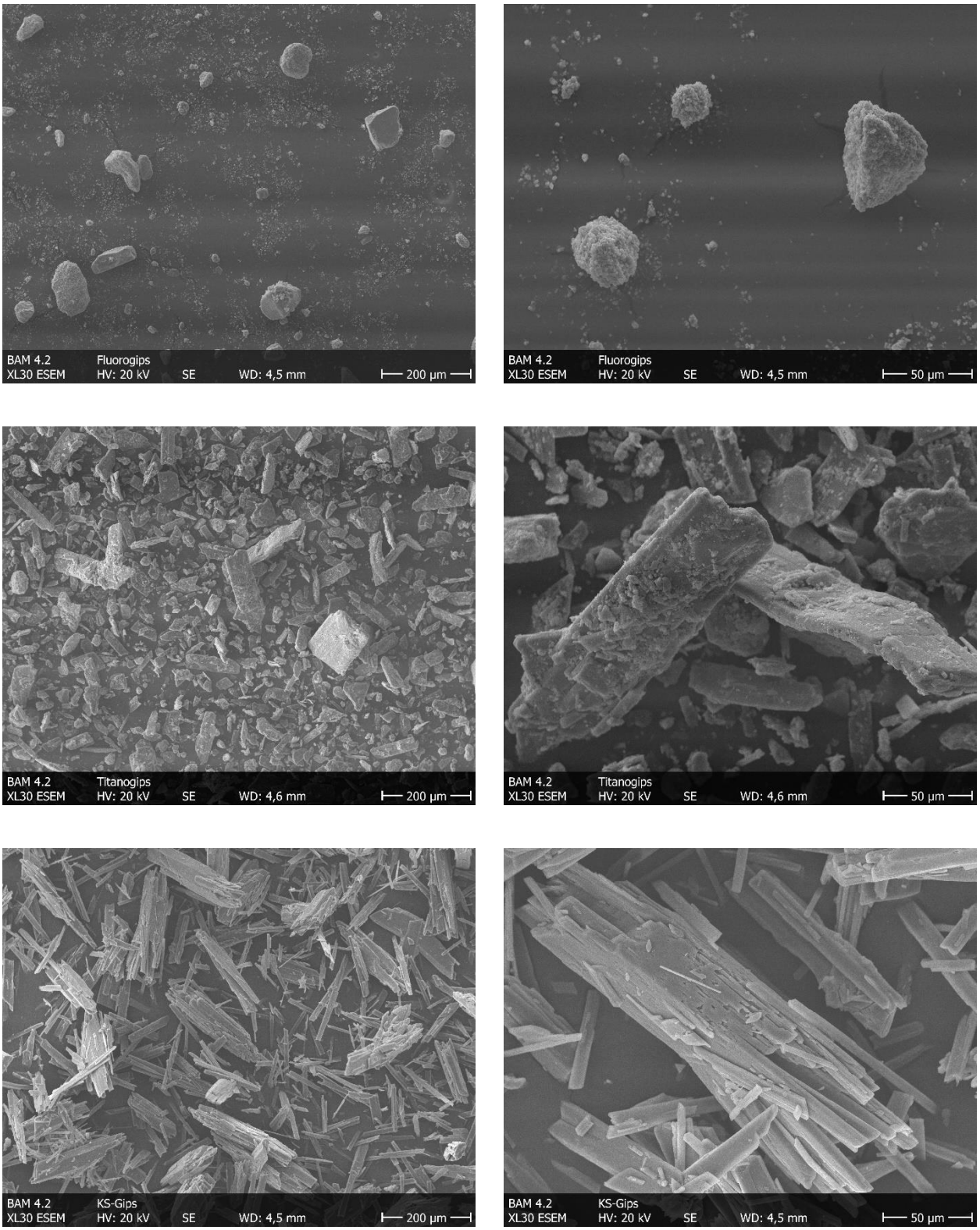


Abbildung 7 REM-Aufnahmen von Fluorogips (1/2), Titanogips (3/4) und Gipskristallen aus Versuchen zur Klärschlammbehandlung (5/6).

In Abbildung 8 sind die untersuchten europäischen Phosphogipse aus Kroatien, Griechenland und Litauen im gleichen Maßstab abgebildet. Diese Phophogipse weisen ein breites und damit günstiges Kornband auf, während der Gips aus Litauen dazu eine besonders günstige gedrungene Kornform aufweist, sind die beiden anderen Kristallformen eher plattig, aber ebenfalls geeignet.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Kristallformen und die Korngrößenverteilung der untersuchten synthetischen Gipse - bis auf den Gips aus den Versuchen zur Klärschlammaufbereitung - für eine weitere Verwertung geeignet erscheinen. Aufgrund der gemessenen Schwermetallgehalte sowie des bei Phosphogipsen üblichen hohen Wassergehalts sind jedoch die Möglichkeiten zum direkten Einsatz in der Gipsindustrie nicht gegeben.

In Deutschland fällt außerdem REA-Gips aus Müllverbrennungsanlagen (MVA) an. Die Menge an REA-Gips aus MVA im Vergleich zu REA-Gips aus Kohlekraftwerken fällt in Deutschland klein aus. Eigenen Berechnungen zufolge werden 8.000-10.000 t/a an Gips aus MVA produziert und in der Gipsindustrie bzw. Zementindustrie genutzt. Von rund 70 MVA in Deutschland MVA erfolgt bei ~40 Anlagen die Entschwefelung durch trockene oder quasi-trockene Verfahren, bei denen kein Gips entsteht. REA-Gips kann ausschließlich in sog. nassen Verfahren zur Rauchgasreinigung wie sie derzeit in 23 von 65 MVA mit einer Kapazität von insgesamt ca. 20,64 Millionen Tonnen Abfälle pro Jahr genutzt werden. Die Kapazität der Anlagen, in denen Gips anfällt, der auch verwertet wird, beträgt knapp 2,9 Millionen Tonnen bzw. 14,1% der gesamten Abfallverbrennungskapazität. Zukünftig dürfte die Menge an REA-Gips aus MVA abnehmen, da insgesamt ein Trend hin zu trocknen und quasi-trocknen REA zu beobachten ist [2.12]. Dies liegt darin begründet, dass nasse Entschwefelungsverfahren durch eine geringere Energieeffizienz[1] gekennzeichnet sind und nicht abwasserfrei sind. Bei Ersatzbrennstoff-Kraftwerken (EBS-KW), die in der Funktionsweise ähnlich zu MVA sind, technisch, aber neuer sind, konnte beispielsweise keine einzige Anlage in Deutschland identifiziert werden, die eine Nass-Entschwefelung durchführt.

[1] Bei der nassen REA muss das Rauchgas nochmals vor der DeNOx (Entstickung) aufgeheizt werden

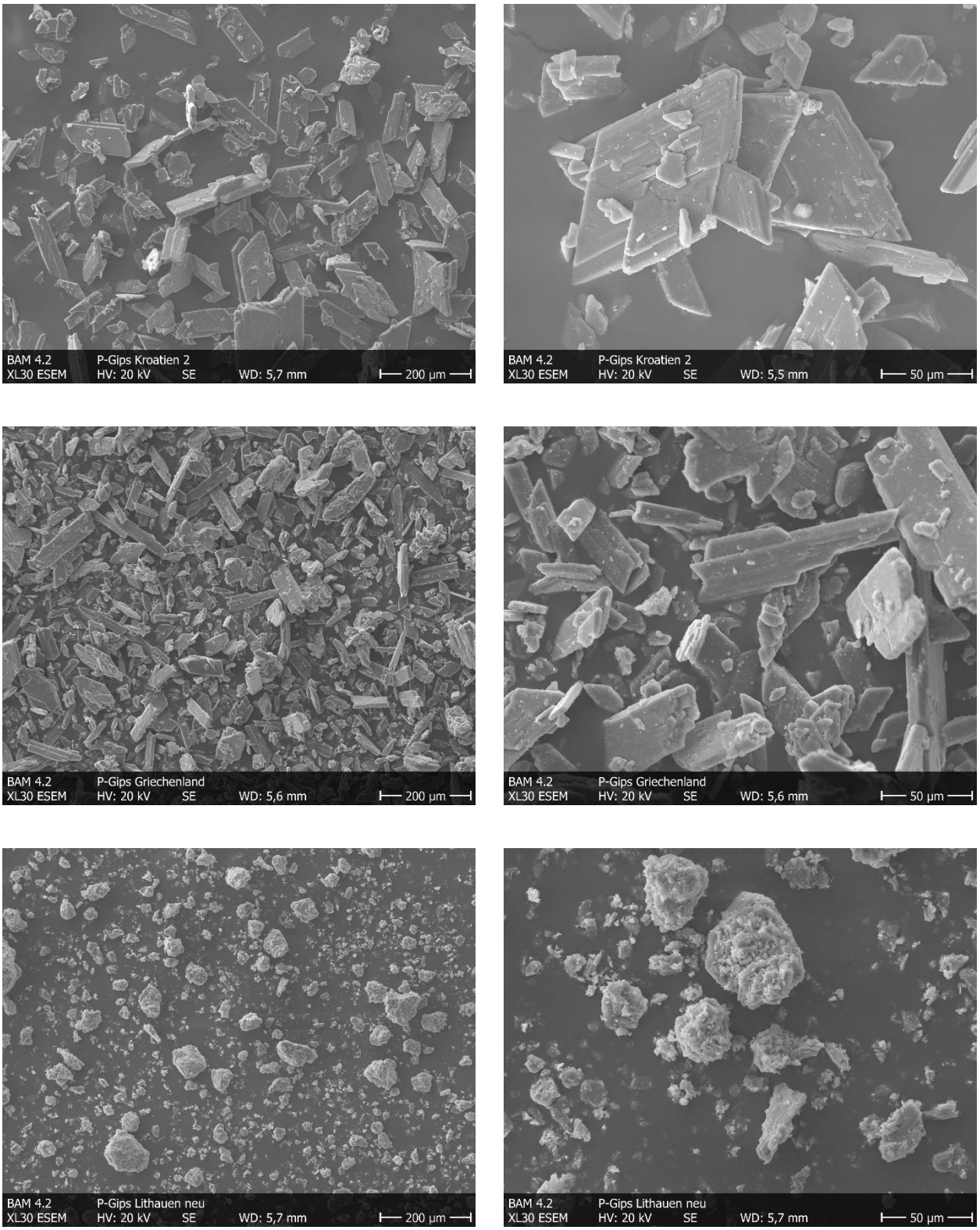


Abbildung 8 REM-Aufnahmen von Phosphogipsen aus Kroatien (1/2), Griechenland (3/4) und Litauen (5/6)

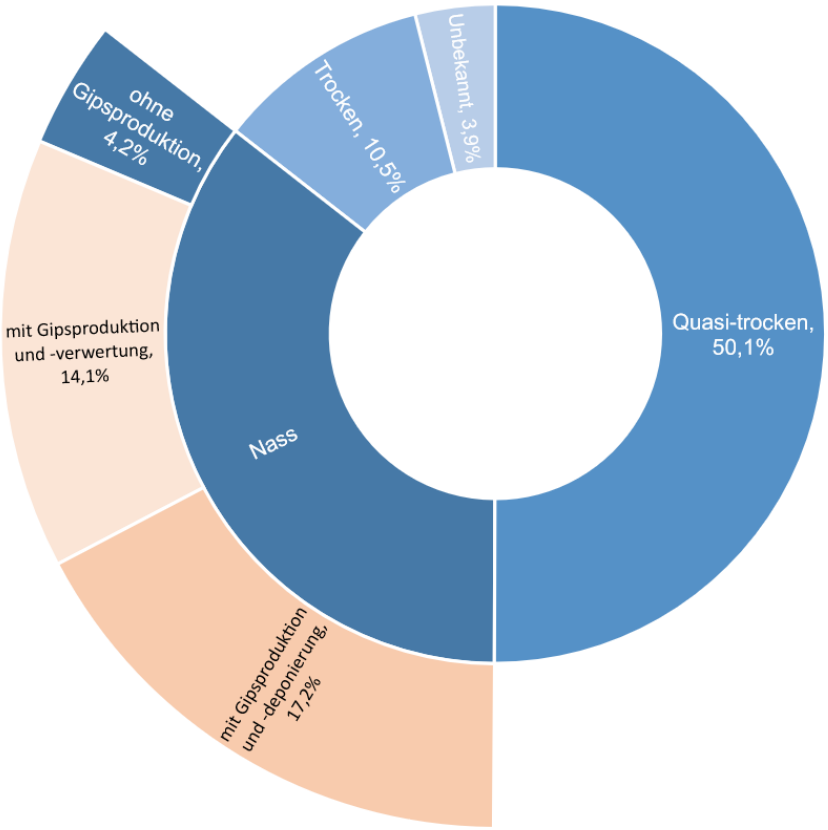


Abbildung 9 Rauchgasreinigung in deutschen Müllverbrennungsanlagen, unterteilt nach eingesetzten Reinigungsverfahren - Bezugsgröße ist die Kapazität der MVA - eigene Berechnungen

Eine interessante potenzielle Sekundärrohstoffquelle ist Altbatteriesäure, die bei der Aufbereitung von Bleisäurebatterien anfällt. Bleisäurebatterien enthalten verdünnte Schwefelsäure, die als Ausgangsbasis für die Synthese von Gips genutzt werden kann. Beispielsweise kann die Schwefelsäure mit Calciumcarbonat gefällt werden. Gleichung 2.1 zeigt die Edukte und Produkte der zugehörigen Reaktionsgleichung.

$$\boldsymbol{H_2SO_4 + CaCO_3 + H_2O \rightarrow CaSO_4\ x\ 2H_2O + CO_2} \qquad \text{Gleichung 2.1}$$

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland ~200.000 t an Bleisäurebatterien gesammelt. Auf europäischer Ebene (EU-27) waren es rund 1,3 Mio. t. [2.13] Aus der Auswertung verschiedener Datenblätter zu Bleisäurebatterien konnten folgende Kennzahlen ermittelt werden:

- Anteil Batteriesäure in Bleisäurebatterien: ~31,5 Gew.-% (Range: 20-44%)
- Anteil Schwefelsäure an Batteriesäure: ~37 Gew.-% (Range: 30-40%)

Aus einer überschlägigen Berechnung kann das Gipspotential aus Altbatteriesäure mit knapp 50.000 t/a für Deutschland abgeschätzt werden. Auf europäischer Ebene sind es rund 250.000 t/a. Abbildung 10 zeigt die entsprechende Auswertung. Derzeit werden in der EU bisher nur 25.000 t/a an Dihydrat von einem Produzenten im Vereinigten Königreich aus Altbatteriesäure erzeugt. Dieser Gips wird in der Zuckerrübenproduktion, als Bodenverbesserer und bei der Kompostierung eingesetzt [2.14]

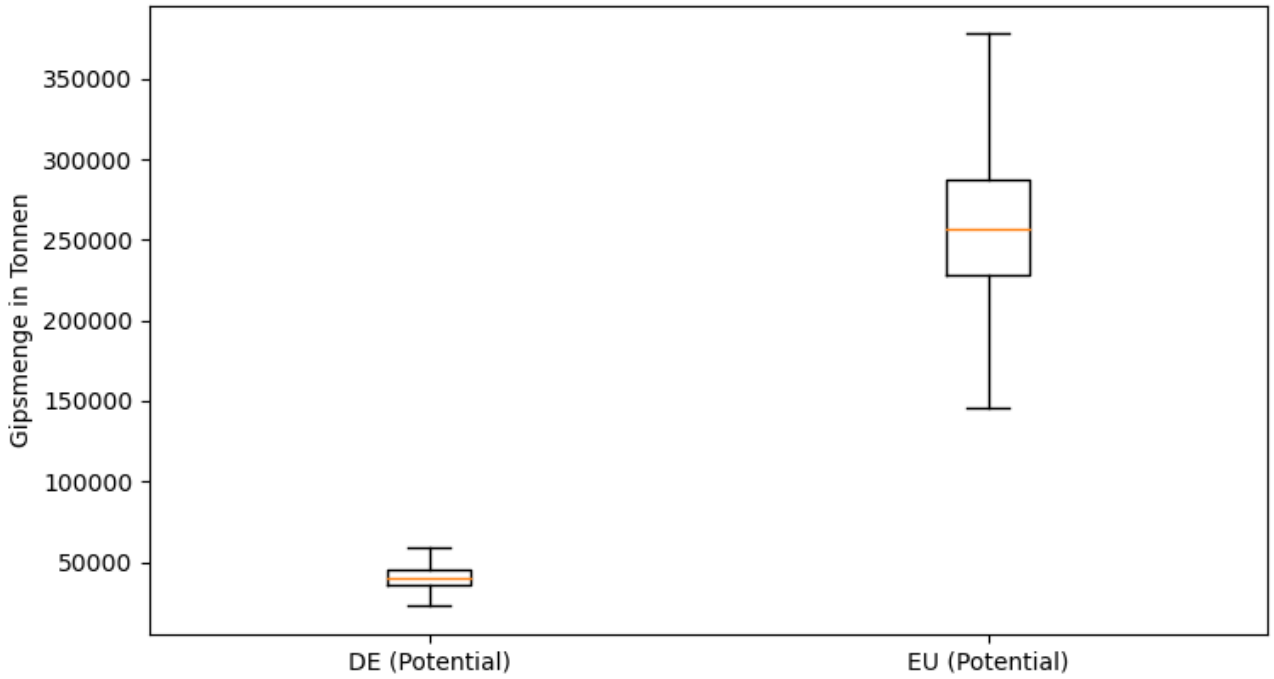


Abbildung 10 Potentiale und Ist-Werte bei der Verwertung von Bleisäurebatterien zu Gips - eigene Berechnungen.

Im Rahmen dieses Projektes wurden Versuche zur Fällung von Gips aus Altbatteriesäure mittels calciumhaltiger Basen durchgeführt. Eine genauere Beschreibung dieser Versuche und der Ergebnisse findet sich in Kapitel 3.2.

3 Technische Untersuchungen und Bewertungen von RC-Gips Quellen

3.1 Gipsfaserplatten

3.1.1 Eigenschaften und potenzielle Einsatzgebiete

Übersicht

Gipsfaserplatten sind gemäß Europäischer Norm EN 15238-2 (Faserverstärkte Gipsplatten) stabile, belastbare Bauplatten aus Stuckgips, armierenden Cellulosefasern und Zusätzen. Diese Rohstoffe Gips- und Zellulosefasern werden vermischt und nach Zugabe von Wasser (keine weiteren Bindemittel) unter hohem Druck zu Plattenplatten verpresst. Nach dem Trocknen werden die Platten mit einem hydrophoben Mittel imprägniert und in die gewünschten Größen geschnitten. Den Unterschied zu Gipskartonplatten illustriert ***Abbildung 11***:

Abbildung 11 Unterschiede zwischen Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten [1.58]

Gipsfaserplatten sind neben Gipskartonplatten die gebräuchlichsten Ausbauplatten im Innenbereich [1.57]. Sie haben im Gegensatz zu diesen keine Ummantelung, die Anwendungsbereiche sind grundsätzlich gleich. Die Platten werden ohne Zugabe von Leim hergestellt, enthalten keine gesundheitsschädlichen Stoffe und sind geruchsneutral. Gipsfaserplatten sind etwas schwerer und härter als kartonummantelte Gipsplatten und werden mit allseitig gefrästen oder längsseitig abgeflachten Kanten geliefert [1.9, 1.57].

Die festen Kerne von Gipsfaserplatten besitzen eine glatte und relativ harte Oberfläche. Sie benötigen aufgrund ihrer eigenen Stabilität keine Ummantelung aus Karton. Gipskarton- und Gipsfaserplatten sind daher optisch leicht voneinander unterscheidbar. Das Fehlen der Ummantelung macht Gipsfaserplatten unempfindlicher gegenüber Feuchtigkeit und reduziert die Gefahr, dass Schimmel entsteht, denn Karton nimmt Feuchtigkeit auf. Ein möglicher Nachteil von Gipsfaserplatten kann das im Vergleich mit Gipskartonplatten etwas höhere Gewicht sein [1.58]. Durch die Armierung aus rezyklierten Papierfasern haben Gipsfaserplatten sehr gute Festigkeitseigenschaften und weisen außerdem sehr gute feuerhemmende Eigenschaften auf [1.9, 1.57].

Abbildung 12 Unterschiede zwischen Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten [1.58]

Zusammensetzung und Eigenschaften

Gipsfaserplatten werden aus dem Naturprodukt Gips und aus Recyclingpapier hergestellt. Die typische Zusammensetzung ist 80 bis 85% Stuckgips und 15 bis 20% Cellulosefasern aus Altpapier [1.9, 1.57, aktualisiert mit Ergebnissen aus den Fragebögen]. Der Wassergehalt beträgt <2%. Die Platten sind typischerweise in Beigetönen, Brauntönen und Grautönen verfügbar.

Gipsfaserplatten bieten im Hinblick auf die vergleichsweise geringe Plattenstärke einen hervorragenden Feuerschutz [1.9, 1.57]. Die vom Gips durchtränkten Cellulosefasern sind nicht brennbar.

Der Gips enthält 15-20% gebundenes Kristallwasser, das bei Brandeinwirkung verdampft, womit die Platten aktiv zur Brandbekämpfung beitragen. Gipsfaserplatten werden daher als A2-s1, d0 klassifiziert [1.9, 1.57] (A2= nicht brennbar, s1= kein Rauch, d0= kein brennendes Abfallen).

Gips ist in trockenen Innenräumen beständig, jedoch nicht für Nasszellen oder im Außenbereich mit hoher Feuchtigkeitsbelastung geeignet [1.9, 1.57]. Gipshaltige Platten sollen nicht langfristig Temperaturen von über 45 °C ausgesetzt werden. Bei dieser Temperatur beginnt das Dihydrat des abgebundenen Gipses langsam zu Halbhydrat zu dehydrieren. Die Platten können dadurch an Festigkeit verlieren [1.57]. Auch bei Dauerfeuchte verliert Gips an Festigkeit und wird schimmelpilzanfällig [1.9, 1.57]. Der pH-Wert der Platten wird mit 7 bis 8 angegeben, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl mit 13 bis 20 [1.60]. Weitere Materialkennwerte für Gipsfaserplatten sind [1.9, 1.59, 1.60]:

Spezifische Wärmekapazität:	11,1 KJ/Kg*K
Dichte:	1,1 – 1,25 g/cm³ [62]
Brinellhärte:	300 N/mm²
Wärmeleitfähigkeit/-zahl:	0,2 – 0,32 W/mK
Löslichkeit in / Mischbarkeit mit Wasser:	<2 g/l ($CaSO_4$ * 2 H_2O) [1.62]

Wassergefährdungsklasse: 1 - schwach wassergefährdend (Selbsteinstufung des Herstellers) [1.62]

Verwendung und Einsatzzwecke

Mit Ausnahme von Außenanwendungen können Gipsfaserplatten in allen Bereichen des Trockenbaus und des Holzbaus als Verkleidung und Verkleidung von Wänden, Decken, Gewölbedecken und Böden eingesetzt werden. Zu den Hauptanwendungen von Gipsfaserplatten gehören Decken, Trennwände, Schalungsplatten, akustische Wandverkleidungen, Fußböden und Fliesenträgerplatten. Mittlerweile existieren auch Faserplattenversionen mit Glasfasern [1.19] oder textilen Naturfasern wie beispielsweise Schafwolle oder Pflanzenfasern [1.23]. Die Versuche wurden ausschließlich mit klassischen Gipsfaserplatten bestehend aus Gips- und Zellulosefasern durchgeführt. Gipsfaserplatten werden als Beplankung von Wänden und Decken eingesetzt [1.57]. Im Holz- und Metallbau dienen sie sehr oft als Brandschutzverkleidungen. Im modernen Holzelementbau werden die Gipsfaserplatten unter anderem als aussteifende Beplankung von statisch belasteten Bauteilen verwendet. Für Anwendungen bei Dauerfeuchte oder Nässe sind Gipsfaserplatten nicht geeignet [1.57].

Klassifikation und Lieferformen

Gipsfaserplatten werden in Dicken von 10-22 mm und Formaten bis 1250 mm Breite und 3000 mm Länge angeboten. Es gibt sie mit Vollkanten oder abgeflachten Kanten. Die Oberflächen sind in der Regel imprägniert oder silikonisiert [1.57].

Kurzzeichen für Gipsfaserplatten nach EN 15238-2:

GF: Gipsfaserplatten

GF-H: GF mit verringerter Wasseraufnahmefähigkeit

GF-W1, GF-W2: GF mit verringerter Wasseraufnahme der Plattenoberfläche

GF-D: GF mit erhöhter Dichte

GF-I: GF mit erhöhter Oberflächenhärte

GF-R1, GF-R2: GF mit erhöhter Festigkeit

Neben den homogenen Gipsfaserplatten werden auch solche mit einer durch Zuschlagstoffe leichteren Mittelschicht angeboten.

Ökologische Eigenschaften und Kreislauffähigkeit

Gipsfaserplatten werden aus dem Naturprodukt Gips und aus Recyclingpapier hergestellt. Sie enthalten keinerlei Leime oder andere gesundheitsgefährdende Stoffe und sind ökologisch und baubiologisch unbedenklich [1.57, 1.59]. Wie organische Werkstoffe dürfen Gipsabfälle nicht auf Inertstoffdeponien entsorgt werden, sondern müssen in geschlossenen Deponien abgelagert werden, denn Wasser kann aus dem Gips Sulfate herauslösen, die bei fehlender Abdichtung das Grundwasser belasten [1.57, 1.59].

Reiner Gips kann grundsätzlich beliebig oft rezykliert werden, und zwar ohne Beeinträchtigung der Materialeigenschaften und der Qualität. Die Schwierigkeit besteht im Auftrennen der Gipsprodukte in reinen Gips und Begleitstoffe [1.57, 1.59]. Gips-Trockenbausysteme erfüllen in Produktion und Verwendung viele Anforderungen des nachhaltigen Bauens [1.59].

Arbeitsschutz beim Umgang mit Gipsfaserplatten [1.62]

Potenziell gesundheitsgefährdender Stoff: Calciumsulfat-Faserstaub, MAK-Grenzwert: 6 mg/m³ gemessen als alveolengängiger Aerosolanteil (TRGS 900; Luftgrenzwerte am Arbeitsplatz) [1.62]

- Atemschutz: Beim Umgang mit getrocknetem Gips wird bei hoher Staubentwicklung eine Atemschutzmaske P1 oder FFP1 empfohlen.
- Augenschutz, Handschutz, Körperschutz sind nicht erforderlich.
- Nach Verschlucken reichlich Wasser in kleinen Schlucken trinken. Nach Augenkontakt mit Wasser spülen.

Die Staubthematik ist auch bei der Erarbeitung des Gipsrecyclingverfahrens zu beachten.

Massenströme

Die Nachfrage aus der gipsverarbeitenden Industrie wird im Wesentlichen durch natürlichen Gips und REA-Gips (aus den Rauchgasentschwefelungsanlagen der Kohlekraftwerke) gedeckt. Der Anteil von REA-Gips lag dabei 2019 mit ca. 4 Mill.t bei 44 %, der von Naturgips mit 4,9 Mill.t bei 54 % (siehe auch Pkt. 2.2.2) [1.62]. Nach Erhebungen des Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. lag die Produktion von Naturgips und -anhydrit in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2014 bei 4,5 Mio. t, im Jahr 2015 bei 4,2 Mio. t, im Jahr 2016 bei 4,7 Mio. t, im Jahr 2017 bei 4,45 Mio. t und im Jahr 2018 bei 4,55 Mio. t [1.5]. Gipsfaserplatten stellen neben Gipskartonplatten eine potenziell interessanteste Quelle für Recyclinggips dar, da diese aufgrund der technischen Eigenschaften und aufgrund der Tatsache, dass von den erwähnten rund 9 Mio. t Gips jährlich rund 0,3 Mio. t jährlich für Gipsfaserplatten benötigt werden [1.7]. Bis vor wenigen Jahren deckte Deutschland, der größte Gipsproduzent und -verbraucher in der EU, mehr als 60 % seines Bedarfs mit REA-Gips. Der Rückgang des REA-Gipses auf die genannten 44 % ist ein Trend, der sich aufgrund des deutschen Kohleausstiegsgesetzes und der damit verbundenen Stilllegung von Kohlekraftwerken fortsetzen wird. Folglich wird die Suche nach alternativen Quellen für Sekundärgips immer wichtiger.

Aufgrund der umfangreichen Verwendung von Gipsplatten im Bauwesen in den letzten Jahrzehnten ist zu erwarten, dass Gipsabfälle in Bau- und Abbruchabfällen in den kommenden Jahren zunehmen werden. Wenn die hohen Qualitätsanforderungen an Recyclinggips – insbesondere hinsichtlich der Sortiergenauigkeit – erfüllt sind, kann Abfallgips aus Abbruchmaterialien der Gipsproduktion zugeführt werden. Gipskartonplatten werden bereits seit einigen Jahren erfolgreich im industriellen Maßstab recycelt [1.64].

Angesichts der zu ersetzenden Gipsmengen ist es jedoch unerlässlich, zusätzliche Quellen für Sekundärgips zu erschließen. Hierfür eignen sich einerseits Kunstgipse besonders gut. Andererseits können neben Gipskartonplatten auch Altgipsplatten zu Substitutionsbemühungen beitragen.

3.1.2 Durchführung und Auswertung der Experteninterviews

3.1.2.1 Zielstellung und methodische Vorgehensweise

Bestandteil des Projektes war auch die Anwendung qualitativer Untersuchungsverfahren zur Untersetzung der quantitativ-technischen Untersuchungen. Konkret wurden dabei angelehnt an Gläser & Laudel (2010) [1.65] und Mayring (2008) [1.66] insgesamt vier Experteninterviews geführt und über eine qualitative Inhaltsanalyse ausgewertet. Des Weiteren wurden zwei Fragebogenaktionen bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) durchgeführt. Ziel des Fragebogens war es, Basisdaten zu Aufkommen, Zusammensetzung und chemisch/ physikalischer Charakteristik von Synthesegipsen und/ oder Gipsfaserplatten in Deutschland zu ermitteln. Weiterhin sollten die Sekundärrohstoffpotenziale ausgeweitet und darauf basierend ein technisches Verfahren für die RC-Gips Herstellung vorbereitet werden.

Ziel von Experteninterviews ist es, von Interviewpartnern, die über spezifisches Wissen verfügen, systematisch relevante Informationen zu gewinnen. Als Experten sind dabei nicht unbedingt Wissenschaftler, sondern vielmehr Personen, die in einem bestimmten sozialen Kontext über Spezialwissen verfügen, zu sehen [1.65]. Als Erhebungsmethode wurden Leitfadeninterviews mit einzelnen Expertinnen bzw. Experten gewählt, d.h. die Fragen wurden bereits vor der Durchführung der Interviews formuliert und allen Interviewpartnern in derselben Form gestellt. Wichtig war hierbei die besondere Form der Kommunikation in einem Interview zu berücksichtigen: zwar ähnelt sie einem Gespräch, unterscheidet sich jedoch deutlich durch festgelegte Kommunikationsstrukturen, fixierte Rollenverteilungen und gerichtete dialogische Strukturen. Umso wichtiger war es, die Fragen neutral und klar zu formulieren und inhaltlich so zu stellen, dass der jeweilige Interviewpartner deutliche Aussagen treffen konnte. Um aus den Ergebnissen überindividuell-gemeinsame Aussagen sowie Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Einschätzungen herausarbeiten zu können, erfolgte im Anschluss an die Durchführung eine qualitative Inhaltsanalyse der protokollierten Interviews.

Interviewpartner Herr Hübner, Geschäftsführer der Firma CASEA GmbH (Interview am 25.08.2021)

Die Firma CASEA bündelt die Gipsaktivitäten der REMONDIS-Gruppe in einem auf nachhaltige Rohstoffnutzung ausgerichteten Unternehmen, das auf eine 150-jährigen Erfahrung im Gipsabbau und in der Produktion von gipsbasierten Produkten zurückblicken kann. Die Firma bietet ein qualitativ differenziertes Produktprogramm auf Basis von Calciumsulfaten an. Dazu zählen Naturgips und REA-Gips, aber auch Naturanhydrit sowie thermischer und synthetischer Anhydrit. Folgende Fragen wurden erörtert:

1. Welche Arten von Gipsfaserplatten (Bauarten, Zusammensetzungen etc.) gibt es?
2. Welche Menge fällt in der Produktion der Platten als Abfall an und welcher Anteil davon wird wiederverwendet?
3. Welche Nutzungsdauer haben die Platten und welche Menge wird produziert?
4. Ist eine Verarbeitung faserhaltiger Gipse in der Gipsindustrie möglich? Z.B. als Anhydrit nach Kalzinierung mit hohen Temperaturen
5. Wie hoch kann der Fasergehalt im RC-Gips für eine entsprechende Kalzinierung sein?
6. Welche Einschränkungen für den RC-Gips gibt es bezüglich einer möglichen Verfärbung und welchen Einfluss hat diese?
7. Gibt es Analysen / Proben / Dokumente zu Gipsfaserplatten, die wir verwenden können?
8. Welche Hydratationsformen des Gipses gibt es und welche unterschiedlichen Eigenschaften und Einsatzgebiete weisen diese auf?
9. Welche Typen von Synthesegipsen sind Ihnen bekannt?
10. Welcher Synthesegips ist aus Ihrer Sicht der vielversprechendste?
11. Welche Typen von Synthesegipsen kommen in welcher Hydratationsform vor?
12. Welche Mengen von diesen Abfällen fallen jährlich in Deutschland an?
13. Welche typischen Schad-/Störstoffe oder Eigenschaften sind für die Wiederverwendung der jeweiligen Synthesegipse problematisch?
14. Was müsste verändert werden, um derzeit als problematisch angesehene Gipse wieder verwendbar zu machen?
15. Werden derzeit sämtliche Fluorogipse verwertet oder gibt es auch kontaminierte Chargen, die nicht recycelbar sind?
16. Gibt es Analysen / Dokumente / Proben zu Synthesegipsen?
17. Wurden im Rahmen des Projektes aus Ihrer Sicht relevante Themen noch nicht betrachtet?

Interviewpartner Dr. André Blasig, Leiter Produktentwicklung Gips der Firma James Hardie Europe GmbH (Fermacell) (Interview am 25.08.2021)

Entstanden durch die Übernahme der ehemaligen Fermacell GmbH im Jahre 2018, bietet die James Hardie Europe GmbH heute ein breites Produktprogramm: Neben den Hardie® Plank und Hardie® Panel Fassadenverkleidungen aus Faserzement finden Sie bei uns auch fermacell® Gipsfaser-Platten und fermacell® Estrich-Elemente für den hochwertigen Trockenbau und Holzbau. Dazu ist die James Hardie Europe GmbH ein Tochterunternehmen der weltweit operierenden James Hardie Industries plc (JHIplc). Die James Hardie Industries plc zählt zu den weltweit führenden Baustoffherstellern. Gemeinsam mit seiner europäischen Tochter, der James Hardie Europe GmbH, will der Konzern sein Europa-Geschäft mit high performance building boards für Innenanwendungen und Fassaden ausbauen und mit den Marken James Hardie, fermacell® und Aestuver® nachhaltig im europäischen Markt wachsen. Folgende Fragen wurden erörtert:

1. Welche Arten von Gipsfaserplatten (Bauarten, Zusammensetzung) produzieren Sie?
2. Können Sie Angaben zu Inhaltsstoffen machen?
3. Welche Mengen produzieren Sie bundesweit pro Gipsfaserplattentyp?
4. Können Sie Aussagen zur Nutzungsdauer der jeweiligen Gipsfaserplatte machen?
5. Wie wird in Ihrem Unternehmen mit Verschnitt verfahren?
6. Welche Menge an Verschnitt bzw. an Gipsfaserplatten als Abfall fällt bei Ihnen an?

Interviewpartner Herr Dr. Hans-Jörg Kersten, Leiter Referat Umwelt beim Bundesverband der Gipsindustrie e. V. (erstes Interview am 04.03.2021, zweites Interview am 07.07.2021).

Der Bundesverband der Gipsindustrie e.V. vertritt die Interessen der gipsabbauenden und gipsherstellenden Unternehmen in Deutschland. Er ist aus dem 1899 gegründeten Deutschen Gipsverein hervorgegangen und repräsentiert heute eine sowohl von mittelständischen als auch von großen Unternehmen geprägte Branche mit ca. 6.000 Mitarbeitern. Zu den Aufgaben des Verbands gehört die Darstellung der Vorteile des Baustoffs Gips sowie der modernen Trocken- und Leichtbauweisen mit Gips in der Fachwelt ebenso wie in der breiten Öffentlichkeit. Die Forschung und Entwicklung für neue Anwendungsmöglichkeiten des Materials, für nachhaltige, ressourcenschonende Herstellungs- und Veredelungstechniken sowie für den bauphysikalisch und technisch optimalen Einsatz in Gebäuden wird begleitet, koordiniert und mit ihren Ergebnissen kommuniziert. Der Bundesverband der Gipsindustrie e.V. engagiert sich in der nationalen sowie europäischen Normung.

Er positioniert sich darüber hinaus in den Diskussionen zu den gesetzlichen Rahmenbedingungen der Bauwirtschaft, der Rohstoffgewinnung sowie dem Umwelt- und Naturschutz.

Nachstehende Fragen wurden erörtert.

1. Gipsprodukte: Statistiken zu Abfall- und Produktionsmengen
2. Was wird wo verbaut?
3. Welche Abfallmengen fallen an welchen Stellen an und wie werden diese entsorgt?
4. Lebensdauer und Typen eingebauter Gipsfaserplatten
5. Welche Typen von Synthesegipsen sind dem Gipsverband bekannt?
6. Welche Nutzungsdauer haben die Platten und welche Menge wird produziert?

Interviewpartner Herr Dr. Jörg Demmich, ehem. Bereichsleiter Synthetische Gipse der Firma Knauf Gips KG (Interview am 07.07.2021).

Das im Jahr 1932 gegründete Unternehmen Knauf aus dem fränkischen Iphofen ist einer der global führenden Hersteller von Baustoffen für den Innenausbau und die Dämmung von Gebäuden sowie der Ausstattung von Raumdecken. Die Knauf Werke produzieren weltweit moderne Trockenbausysteme, Putze und Zubehör, Dämmstoffe sowie Wärmedämm-Verbundsysteme. Darüber hinaus gehören Farben, Fließestriche und Bodensysteme sowie Maschinen und Werkzeuge für die Anwendung dieser Produkte zum Portfolio. Herr Demmich war dabei über viele Jahre als anerkannter Experte in der Gipsindustrie tätig. Folgende Fragen wurden erörtert:

1. Welche Arten von Gipsbauplatten produzieren/nutzen Sie?
2. Welche Typen von Synthesegipsen sind Ihnen bekannt?
3. Wie reagieren Sie auf die zukünftigen Gipsbedarfe?

3.1.2.2 Ergebnisse der qualitativen Untersuchung – Auswertung der Experteninterviews

Wichtigste Ergebnisse des Interviews mit Herrn Hübner von der Firma CASEA GmbH:

Es wird bei den Gipsfaserplatten (GFP) hauptsächlich in der Dichte und der Plattendicke unterschieden. Je nach Einsatzgebiet variieren diese Parameter meist. Beispielsweise sind GFP für die Verwendung als Wandbauplatte wesentlich dünner als die Bodenbauplatten. Generell wird eine höhere Menge an Wandbauplatten hergestellt und fällt damit auch als Abfall in einer wesentlich höheren Menge an als die Bodenbauplatten.

Die CASEA betreibt ca. 16 verschiedene Kalzinierungsanlagen mit unterschiedlichen Einstellungen. Zur Herstellung von Stuckgips werden beispielsweise relativ geringe Temperaturen eingesetzt, sodass in diesem Fall die Papierfasern im Gips verbleiben würden. In keinem anderen Gipsprodukt als

den GFP sind Papierfasern zu finden. Eine signifikante Einschränkung der Eigenschaften sollte durch die Fasern nicht zu erwarten sein. Daher ist das größte Problem hier die Akzeptanz der Hersteller gegenüber Faserrückständen in ihren Produkten. Aus Sicht von Herrn Hübner ist der Wiedereinsatz von diesem Gips bei der Herstellung von neuen GFP am naheliegendsten. Weiterhin wird **in** den Gipsfaserplatten anderes Papier eingesetzt als bei Gipskartonplatten. In den Anlagen von CASEA wurden bislang jedoch ausschließlich Faserrückstände von Gipskartonplatten auf ihr Verhalten im Kalzinierofen untersucht. Daher hat man keine Grundlage zur Beschreibung des Brennverhaltens von Faserrückständen aus der Aufbereitung von GFP. Nach Einschätzung von Herrn Hübner ist eine Kalzinierung bei höheren Temperaturen möglich, um die Papierfasern herauszubrennen. Probleme könnten hier für die Betreiber der Kalzinieranlagen bei den Emissionen oder bei den Verbrennungsrückständen (Asche, Verfärbung) bestehen.

Frau Weimann gab zu bedenken, dass sich nach einer Aufbereitung der GFP die enthaltenen Papierfasern sich verkürzen können und dadurch Einschränkungen in den Eigenschaften der neuen GFP verursachen können. Hierzu meint Herr Hübner, dass in diesem Falle sicherlich immer ein gewisser Anteil an Altfasern und ein gewisser Zusatz an Frischfasern notwendig sein wird.

Die Anforderungen an den RC-Gips werden immer abhängig vom entsprechenden Abnehmer und den herzustellenden Produkten sein. Neben den Fasern kann in der Kalzinierung auch der Einsatz von hydrophobierten Gipsen störend sein, da die jeweiligen Hydrophobierungsmittel nicht verbrennen. Problematisch ist, dass alle GFP hydrophobiert sind. Bei der Kalzinierung werden üblicherweise ca. 15 Ma.-% als Kristallwasser aus dem Gips herausgebrannt. Bei der Kalzinierung von faserhaltigem Gips können die Papierfasern den Staubfilter der Abgasreinigung schneller zusetzen. In entsprechenden Untersuchungen wurden maximal 20 Ma-% Papierfasern durchgesetzt, wobei schon entsprechende Probleme auftraten.

Verfärbungen spielen nur in den Bereichen eine Rolle, in denen der Kunde einen weißen Gips erwartet. (z.B. Dentalgipse, Putze, etc.) Diese können beispielsweise bei Rückständen aus der Feuerung entstehen (Aschen). Die Verfärbungen sind vermutlich auch bei der Herstellung von Gipskartonplatten nicht relevant, da die Kartonarmierung den Gips kaschiert.

Zur Verfügbarkeit von Synthesegipsen:

<u>Fluorogips:</u> fällt als Anhydrit an, gute Qualität, wird derzeit zu 100 % wiederverwendet, Verwendung in Estrich und Porenbeton

Zitronensäuregips: Anhydrit aus der Neutralisation von Schwefelsäure, Hersteller von Zitronensäure in Belgien (DSM) und Österreich (Jungbunzlauer), wird zu 100 % wiederverwendet, eine zweite Fraktion fällt als Blauschlamm an, der mit Cyanit verunreinigt ist, wird bei ca. 900°C gebrannt --> Verwendung in Porenbeton

Milchsäuregips: ein Hersteller in Holland bekannt, Verunreinigung mit Milchsäure --> Geruchsbelastung, Verwendung in Pilzsubstrat

Ameisensäuregips: relativ rein, geringe Verunreinigungen, kann näher untersucht werden, wird bereits verwendet, zwei Hersteller bekannt mit ca. 3.000 t/a

Titanogips: Herstellung des Pigmentes TiO_2, Anfall bei der Neutralisation der Dünnsäure, in Deutschland kein Hersteller mit diesem Verfahren, Veolia in Frankreich (Nähe Straßburg), geringe Reinheit (60-70 %) und hohe Verunreinigung, teils sehr feucht (bis zu 30 % Feuchte), muss aufbereitet werden (wird derzeit deponiert), ca. 150.000 t

Weinsäuregips: keine weitere Betrachtung, da zu geringe Menge

Kodak: insg. Ca. 8.000 – 10.000 t/a in Deutschland, hohe Feuchtigkeit und Verunreinigungen, evtl. Aufbereitung erforderlich

Phosphogips: weltweit größte Menge (nicht in Deutschland) ca. 180 Mio. t/a, Problem: radioaktive Belastung, Schwermetalle, Phosphatrückstände, eventuell Anwendung in Zementherstellung möglich, Transportkosten zu hoch, um es hier sinnvoll zu vermarkten, Da nach Einschätzung von Hr. Hübner zukünftig die Importmengen an Naturgips steigen werden (Wegfall REA-Gips aus Kohlekraftwerken) könnte es interessanter werden.

Tetraphos: Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. Klärschlammasche (REMONDIS in Hamburg), ca. 10.000 t Anfall von Gips mit hoher Reinheit, Problem: Phosphatrückstände, Feuchtigkeit (sollte <10% sein), Verfahren noch ziemlich neu, Möglichkeit eines wachsenden Marktes – Mengenpotential.

Müllverbrennungsanlage: REA-Gips, zählt als gefährlicher Abfall, Zusammensetzung nach Einschätzung Hr. Hübner aber meist gut (teilweise Schwermetallbelastung), werden derzeit teilweise wiederverwendet.

Wichtigste Ergebnisse des Interviews mit Herrn Dr. Blasig von der Firma James Hardie Europe GmbH:

James Hardie Europe GmbH stellt Fermacell Gipsfaserplatten (GFP) her, zu durchschnittlich aus 80% Gips und 20%Papier bestehen und <2% Wasser enthalten. Außerdem beinhalten die Platten eine Oberflächenhydrophobierung von 0,1%. Die Produktionskapazität beträgt 500.000 t/a, die Nutzungsdauer der GFP ca. 50 Jahre. Verschnitt wird zu 100% wiederaufbereitet und in die Produktion zurückgeführt. Seitens James Hardy als Hersteller besteht großes Interesse an einer Entwicklung zum Recycling von Gipsfaserplatten, da bei diesem Material noch keine Lösungen existieren.

Wichtigste Ergebnisse des 1. Interviews mit Dr. Hans-Jörg Kersten vom Bundesverband der Gipsindustrie e. V. am 04.03.2021:

Für die Produktion von Gipsfaserplatten existieren Daten des Statistischen Bundesamtes bis 2018, danach wurden diese mit der Produktion von Gipskartonplatten zusammengefasst. Für die Berechnung ab 2019 schlägt die BVG die Fortschreibung des Verhältnisses von 2018 vor (rund 10%).

Tabelle 7 Durch den BVG bereit gestellte Produktionszahlen von Gipsplatten

Erzeugnisse	Einheit	2013	2014	2015
Gipskarton-platten	Mio. m²	214.292	218.075	224.390
Gipsfaser-platten	Mio. m²	28.312	27.837	28.013

2016	2017	2018	2019	2020 (Jan. –Jul.)
226.611	231.455	232.763	260.653	156.823
26.534	26.316	27.542		

GFP können grundsätzlich sowohl als Wand- und Deckenbekleidung oder aussteifende Elemente im Holzrahmenbau eingesetzt werden, wie auch als Trockenestrich im Bodenbereich zum Einsatz kommen. Entsprechend den Anforderungen können auch mehrfache Beplankungen auf-treten.

Hinsichtlich der Verschnittreste kann man, wie bei anderen Platten auch, von rund 4 – 5 % der in den Markt gebrachten Menge ausgehen. Über den Rückbau liegen keine anteiligen Abschätzungen vor. Gipsfaserplatten stellen eine Teilmenge des AS 17 08 02 (0,6 Mio. t in 2018, siehe https://kreislaufwirtschaft-bau.de/) dar, vermutlich höchstens in der gleichen Größenordnung, wie bei der

Produktion. Die Entsorgungswege für den gesamten Abfallschlüssel enthält der Monitoringbericht 2018 auf Seite 9 (4,7% Recycling, 44,9% Verwertung, 50,4% Beseitigung). Produktionsreste unterliegen nicht dem Abfallschlüssel 170802 und werden betriebsintern verwertet. Nach der Tabelle "Nutzungsdauer von Bauteilen nachdem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) des BBSR, Code 352.112 "Trockenestriche (Systeme):...Gipskartonplatten." beträgt die Nutzungsdauer > 50 Jahre, gleiches gilt für Code-Nummer 342.411 „Nichttragende Innenwände – Ständersysteme“.

Bzgl. der Synthesegipse sind entsprechende Berechnungen und Quellen anhand der von der EU-Kommission erstellten BREF-Dokumente bekannt. [2.15] https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference. LVIC-AAF (Phosphorgips, Fluoroanhydrit), LVIC-S (Titano-gips), LVOC (organische Säuren wie Citronensäure), WI (Gipse aus Müllverbrennung). „Fluorogips“ existiert nicht, hierbei handelt es sich um Fluoroanhydrit (auch HF-Anhydrit genannt). Fluoroanhydrit hat in Deutschland mit rund 350.000 t/a eine gewisse Bedeutung, alle anderen Gipse nicht oder nur sehr untergeordnet. Neben den genannten Produkten gibt es noch kleinere Mengen Gips aus Neutralisationsvorgängen bei der Produktion organischer Säuren, deren Aufkommen jedoch nicht für Massenbaustoffe geeignet ist (Verwendung im Bereich Spezialgipse, z.B. Dentalgips, Chemie, ...; Menge nicht bekannt).

Ferner gibt es (REA-Gips vergleichbare) Gipsqualitäten aus einzelnen Müllverbrennungsanlagen in einer Größenordnung von geschätzt rund 20.000 t/a mit abnehmender Tendenz (Bevorzugung quasitrockener und trockener Entschwefelung).

Wichtigste Ergebnisse des 2. Interviews mit Dr. Hans-Jörg Kersten vom Bundesverband der Gipsindustrie e. V. am 07.07.2021:

Bei diesen Informationen handelt es sich hauptsächlich um weiterführende Informationen des ersten Interviews. Herr Dr. Kersten meinte, dass mit einem durchschnittlichen Wert zur flächenbezogenen Masse der meistverwendeten Platten eine Abschätzung durch Umrechnung der Angaben in Tonnen gemacht werden kann. Folgende Werte sollten dabei zur Anwendung kommen: Flächenbezogene Masse: ca. 15 kg/m². Die Umrechnung erzielt nachfolgendes Ergebnis.

Tabelle 8 Durch den BVG aktualisierte Produktionszahlen von Gipsplatten

Erzeugnisse	Einheit	2013	2014	2015
Gipskarton-platten	t	3.214.380	3.271.125	3.365.850
Gipsfaser-platten	t	424.680	417.555	420.195

2016	2017	2018	2019	2020 (Jan. –Jul.)
3.399.165	3.471.825	3.491.445	3.909.795	2.352.345
398.010	394.740	413.130		

Weiterhin wies Herr Dr. Kersten auf eine Veröffentlichung des Statistischen Bundesamtes hin, welche eine separate Ausweisung der produzierten Mengen von Gipsfaserplatten und Gipskartonplatten ermöglicht mit folgenden Informationen:

Tabelle 9 Durch den BVG aktualisierte Produktionszahlen von Gipsplatten 2019/2020

Erzeugnis	Aufkommen 2019 [t]	Aufkommen Jan.- Jul. 2020 [t]
Gipskartonplatte	3.457.850,46	2.107.597,74
Gipsfaserplatte	451.944,54	244.747,26

Gipse aus der Neutralisation organischer Säuren sind für den Einsatz in Massenbaustoffen geeignet, werden hier jedoch nicht eingesetzt. Grund dafür ist, dass die Eigenschaften dieser Gipse eine Verwendung im Bereich der Spezialgipse zulassen. Daher ist es schwer, Stoffe dieser Art für den Einsatz in Gipsbauplatten zu gewinnen.

Wichtigste Ergebnisse des Interviews mit Dr. Jörg Demmich von der Firma Knauf Gips KG am 07.07.2021:

Die MUEG hat aufgrund vergangener Aussagen gefragt, ob es richtig ist, dass Rigips für Ihre Rigidur-Platten ein anderes Rezept bzw. andere Inhaltsstoffe verwenden, die Probleme bei den anderen Herstellern hervorrufen würden. Hr. Dr. Demmich kann wegen Geschäftsgeheimnissen keine Angaben zu den Rezepturen der Gipsbauplatten machen. Er empfiehlt einen Aufschluss der GFP und eine Rückführung des übrigen Gemisches ins Werk für die Herstellung neuer GFP. Hierbei wird es jedoch zu einer mengenmäßigen Begrenzung der Annahme kommen, da dieses Gemisch nur als Füllstoff für die neuen Platten verwendet werden kann. Weiterhin wird für den RC-Gips eine separate Kalzinierstrecke erforderlich sein.

Es ist also von Interesse, zunächst möglichst viel Gips von dem Gemisch abzutrennen und das übrige Papier-Gips-Gemisch für die Verwendung als Füllstoff zu untersuchen. Als weitere Möglichkeit wird von Hr. Dr. Demmich ein Verfahren genannt, welches ein solches Gemisch zum Anhydrit kalzinieren soll. Bei den dafür erforderlichen ca. 850°C werden die Papierfasern verbrannt und spielen im Weiteren keine große Rolle mehr. Dieses Verfahren ist jedoch noch in der Entwicklung und wird noch nicht umgesetzt.

Ein weiteres Thema war die Gipsrecyclinganlage in Puhlheim, da hier die Annahme von GFP nicht ausgeschlossen wird. Ihm ist bekannt, dass GFP dort angenommen werden, jedoch ist die Menge und der Verbleib nicht bekannt. Allgemein werden von dieser Anlage nur wenige Informationen zur Verfügung gestellt. Die Angabe, dass die Entsorgung von gipshaltigen Abfällen in Uranschlammteichen im tschechischen Mydlovary eingestellt wird, konnte auf Nachfrage nicht bestätigt werden. Nach Rücksprache hat sich gezeigt, dass die Verbringung der gipshaltigen Abfälle von Deutschland aus notifizierungspflichtig wäre, da nur sortenreine Gipsabfälle auf der Grünen Liste gehandelt werden können. Aus dem Rückbau können jedoch Störstoffe in den Abfällen nicht ausgeschlossen werden.

Aufgrund des geplanten Kohleausstiegs und der unregelmäßigen Auslastung der regenerativen Energiesysteme, sind die zu erwartenden REA-Gipsmengen aus den Kohlekraftwerken nicht mehr verlässlich prognostizierbar. In Bezug auf die Phosphorgipse aus der Phosphatproduktion ist bekannt, dass hier ein großes Potential aufgrund der weltweit vorhandenen Mengen besteht, aber auch große Probleme bei den Qualitäten der Gipse existieren.

Dazu muss man zum einen zwischen dem bereits aufgehaldeten Gips und dem frisch produzierten Phosphorgips unterscheiden. Der Haldengips ist seit mehreren Jahren der Phosphatherstellung kontinuierlich abgelagert worden. Im Verlaufe dieser Zeit kann sich das Herstellungsverfahren oder das eingesetzte Mineral verbessert bzw. geändert haben. Dies führt zu einer sehr inhomogenen Zusammensetzung der Halden. Neuere Verfahren zielen auch auf die Ausbeute an Phosphat ab, sodass in den alten Halden auch mit einem höheren Restphosphatgehalt zu rechnen ist, der Probleme bei der späteren Abbindung des Gipses verursacht. Weiterhin spielen auch die Ausgangserze zur Phosphatherstellung bei den Qualitäten der sich ergebenden Gipse eine Rolle. Hier wird unterschieden zwischen sedimentären Erzen und Magmatiten. Erstere haben aus geologischen Gründen ein größeres Potential an erhöhten Radioaktivitätswerten vorzuweisen.

Ein weiterer Punkt bei der Verwendung von Synthesegipsen ist die Kristallform des $CaSO_4$-Gefüges. Bei REA-Gipsen liegt eine für die Gipsindustrie günstige, eher kugelförmige Kristallstruktur vor, wobei die der Phosphorgipse eher nadelförmig ausgebildet ist. Dies führt zu Problemen bei der Restfeuchte des hergestellten Gipses und damit zu einem höheren Trocknungsaufwand. Diese Struktur ist bedingt durch das Fällungsverfahren bei der Neutralisation der Aufschlusssäure. Um die Kristallstruktur zu beeinflussen, muss also relativ frühzeitig in das Verfahren der Phosphatherstellung eingegriffen werden, was sich als wirtschaftlich schwierig erweisen wird. Bei anderen Synthesegipsen sieht Hr. Dr. Demmich kein großes Potential, da diese in geringen Mengen auftreten. Knauf verwendet bereits Fluorogipse als Anhydrit, Zitronensäuregipse (ca. 20.000 t/a) und Titanogipse (ca. 25.000 t/a). Die letzten beiden Vertreter werden in Deutschland jedoch kaum bis gar nicht hergestellt.

Der Gips ist im Rahmen der REACH-Verordnung als $CaSO_4$ mit einem Anteil von mindestens 80 % angemeldet. Sollte ein Recyclat oder ein Gipsrohstoff eingesetzt werden, der einen geringeren $CaSO_4$ -Anteil aufweist, müsste dieser mit einem hohen Aufwand neu angemeldet werden. Bezogen auf die herzustellenden Baustoffe wurde auf die vielen bisherigen Bemühungen seitens Knauf verwiesen, die benötigten Gipsmengen zu verringern. Beispielsweise werden Gipsbaustoffe mit Schaummitteln als Additiv versetzt, um Poren im Produkt zu erzeugen und somit weniger Gips zu verbrauchen.

3.1.3 Versuche zur mechanischen Aufbereitung und verwendete Aggregate

3.1.3.1 Generelle methodische Vorgehensweise

Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Verarbeitungsroute für das Recycling von GFP. Eine Möglichkeit hierfür ist, die Faserplatte lediglich aufzuschließen, sodass ein Gemisch aus pulverisiertem Gips und den Papierfasern vorliegt. Dieses Gemisch kann direkt wieder in den Produktionsprozess der Gipsfaserplatte zurückgeführt werden. In dieser Form werden derzeit bereits Produktionsverschnitte bei den Herstellern wiederverwendet. Jedoch ist die Einsatzmenge stark limitiert. Diese mengenmäßige Begrenzung ist durch die fehlende Kalzinierung des enthaltenen Gipses begründet. Die Zugabe dieses zum Produktionsprozess erfolgt derzeitig generell als s.g. Füllstoff. Eine Kalzinierung dieses Gips-/Fasergemisches ist aus technologischer Sicht problematisch. Darum besteht das Ziel, die GFP-Materialien so aufzuschließen, dass sowohl eine kalzinierbare Gipsqualität als auch eine wiederverwendbare Papierfaser entsteht, um diese dem jeweiligen Produktionsprozess wieder als Rohstoff zuführen zu können. Um die Effizienz der Verarbeitungswege für das GFP-Recycling zu bewerten, ist es wichtig, die Zusammensetzung der GFP zu bestimmen. Daher wurden zwei verschiedene GFP-Produkte aus Herstellungs- und Abbruchmaterial untersucht. Im Fokus der Analyse standen der Gipsanteil in der Gips-, Faser- und Zusatzstofffraktion sowie deren chemische Zusammensetzung. Die Ergebnisse zeigten, dass die GFP-Mischung zu etwa 80 % aus Gips und zu etwa 20 % aus Fasern und Zusatzstoffen besteht.

Anhand der vorliegenden Daten zu den Eigenschaften und den Anforderungen der eingesetzten Abfälle, wird eine Technologie im Sinne der mechanischen Aufbereitung von GFP zur Erprobung im Rahmen von technischen Versuchen entwickelt. Für die Aufbereitung der GFP wurde eine spezielle Zerkleinerungs- und Siebtechnologie konzipiert, die einen verbesserten Aufschluss des Gips-Papier-Verbundes gewährleisten soll. Der Verarbeitungsweg besteht somit aus zwei elementaren Schritten, dem **Zerkleinern** und dem **Klassieren.**

Zur Identifizierung der optimalen Zerkleinerungs- und der optimalen Klassierungstechnologie wurden verschiedene Versuche durchgeführt sowie mehrere Zerkleinerungsaggregate getestet. Entsprechende Ergebnisse werden in den nachfolgenden Punkten beschrieben.

Auch für die Identifizierung der optimalen Klassierungstechnologie wurden verschiedene Techniken getestet. Hierbei wurde Hauptaugenmerk auf eine möglichst genaue Trennung der Hauptkomponenten der GFP gelegt, mit dem Ziel der Gewinnung hochreinen Gipses sowie einer stofflich wiederverwertbaren Papierfaser.

Im Idealfall kann die ermittelte Technologie der GFP-Aufbereitung als parallellaufende, zweite Linie zu bestehenden Gipsrecyclinganlagen betrieben werden. Hintergrund ist, dass die anfallenden Mengen aufzubereitender GFP geringer sind (ca. 15 Ma% der anfallenden Menge an Gipskartonplatten), was die Auslastung einer separaten Anlage erschwert (siehe auch Pkt. 4 und Pkt. 7).

Tabelle 10 Konzeptioneller Ansatz zu Verfahrensschritten für die GFP-Aufbereitung im Versuch

Verfahrensschritt	Nutzen	Zugehörige Apparate	Hintergrund
Vorsortierung und Vorzerkleinerung	Entfernung grober Störstoffe, die Apparate beschädigen können sowie manuelle Vorzerkleinerung	manuell	Eine erste Aussortierung von Metallen, Steinen oder anderen groben Störstoffen, die Beschädigungen an den nachfolgenden Apparaten verursachen können, ist mit der vorliegenden Apparatetechnik nicht möglich.
Zerkleinerung	Aufschluss des Gips-Papier-Verbundes	Stachelwalzenbrecher Jehmlich	Durch die Stacheln sollen die Platten selektiv zerkleinert und somit aufgeschlossen werden.
Siebung	Abtrennung der beiden RC-Fraktionen und Trennung übriger Störstoffe	Linearschwingsieb IFE	Die Nasenlochbleche trennen nach Korngröße und –form. So sollen die länglichen Papierfasern vom kugelförmigen Gips separiert werden.

Die Versuchsdurchführungen erfolgten entweder in entsprechenden Technika von Anlagenherstellern oder geeignete Technik wurde ausgeliehen und für den Versuchszeitraum bei der Firma MUEG installiert. Übergeordnetes Ziel war es, mit Hilfe der Teilverfahrensschritte die optimale Technologie zu identifizieren, mittels skalierbarer Pilotversuche zu testen und zu verifizieren und im Fall der Eignung zu einer Gesamttechnologie zusammenzusetzen.

Außerdem wurde in einem parallelen Ansatz, ein Versuch zur Nassaufbereitung der GFP durchgeführt. Hierfür kam die Perkolationstechnologie zur Anwendung.

3.1.3.2 Manuelle Vorsortierung

Das bei der Versuchsdurchführung verwendete GFP-Material bestand sowohl aus dem Produktionsmaterial und -abfällen sowie aus Rückbaumaterial aus der Andienung. Es war mit einem geringen Anteil an Störstoffen durchsetzt. Folien, Holz, mineralische Bestandteile, Metalle u.a. >ca. 100mm wurden durch eine manuelle Störstoffsortierung entfernt.

3.1.3.3 Manuelle Vorzerkleinerung

GFP-Materialien aus dem Rückbau haben auf Grund ihrer Herkunft sowie der Rückbautechnologie die unterschiedlichsten Korngrößen. Um diese GFP-Materialien einem Aufschluss im Hauptzerkleinerer zuführen zu können, ist eine Vorzerkleinerung zwingend notwendig. Diese Vorzerkleinerung wurde im Rahmen der Versuchsdurchführung auf Grund der überschaubaren Menge manuell vorgenommen. Hierbei wurde das GFP-Material auf eine Korngröße von ca. 200 bis 500 mm vorzerkleinert und somit ein entsprechendes, homogenes Inputmaterial erzeugt.

Darüber hinaus wurde zur Vorzerkleinerung erfolgreich ein vorhandener Zweiwellenshredder getestet. Hier konnte eine Korngröße von 0 bis 150 mm erzielt werden. In diesem Bereich liegen auch entsprechende Erfahrungen zum Einsatz von Maschinentechnik beim Vorzerkleinern von Gipskartonplatten vor, so dass dieser Verfahrensschritt kein Schwerpunkt der Untersuchungen darstellte.

3.1.3.4 Hauptzerkleinerung - Versuche mittels Stachelwalzenbrecher und Hammermühle

Im Vorfeld der Untersuchungen wurde auf Grund der Materialeigenschaft von GFP davon ausgegangen, dass eine Hauptzerkleinerung mittels Stachelwalzenbrecher durchgeführt werden kann. Diesbezüglich sollten unterschiedliche Formen und Größen der Stachelwalzen getestet werden. Hierzu fanden entsprechende Vorversuche am 16.11.2021 im Technikum der Firma Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen- und Maschinenbau in Nossen statt. Der Walzenbrecher RC300 mit Stachelwalzen kam zur Anwendung.

Das Aufgabematerial waren folgende Fraktionen:

- AG1: **GFP**, ganz (Fermacell – Werk Seesen);
  für Versuche **auf ca. 20 x 20 cm vorzerkleinert**
- AG2: **GFP**; Produktionsabfälle (Fermacell – Werk Seesen)

Abbildung 13 zeigt die Ausgangmaterialien für die Versuche. Die Versuchsrandbedingungen der Vorversuche im Jehmlich-Technikum sind in Tabelle **11** dargestellt.

Abbildung 13 Ausgangmaterialien für die Versuche, links Produktionsrückstände Fermacell Seesen rechts Faserplatten aus Fertigung von Fermacell Seesen.

Tabelle 11 Versuchsrandbedingungen der Vorversuche im Jehmlich-Technikum

JEHMLICH	Zusammenfassung Mahlversuche									Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
	Mahlgut:		Gipsfaserplatten			Auslegungsversuch	kein Sicherheitsdatenblatt			
	anorganisch	Fasern	Mohs 1 bis 3	0,1...5 % SiO2	k. - Ex Gefahr	ungiftig	leicht hygroskopisch			
	Auftraggeber:		MUEG				Baustoffe			
Werkauftragsnummer:	W050709		Versuchsziel:	Aufschluss Gipsfaserplatten			Modus Versuch:	diskontinuierlich		
Protokollnummer:	80_21		Versuchsort:	JEHMLICH Technikum			Bearbeiter:	Sperberg		
Versuchsnummer:		AG1	AG2	V01	V02	V03	V04	V05	V06	V07
Datum	[dd.mm.jj]	16.11.2021	16.11.2021	16.11.2021	16.11.2021	16.11.2021	16.11.2021	16.11.2021	16.11.2021	16.11.2021
Temperatur Technikum	[° C]	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Luftfeuchte Technikum	[%]	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Aufgabegut:	[-]	AG1	AG2	AG1	AG1	AG2	AG2	AG1	V02 grob	V02 fein
Temperatur Schüttgut	[° C]	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Feuchte Schüttgut	[%]	3,95	4,13	3,95	3,95	4,13	4,13	3,95	3,95	3,95
Schüttdichte	[g/cm³]	n.a.	0,484	n.a.	0,271	0,464	0,403	0,261	n.a.	n.a.
Dosierung:	[-]			Hand	Hand	Hand	Hand	Hand	Hand	Hand
Mühle:	[-]			RC_S30	RC_S30	RC_S30	RC_S30	HMNS_1	RC_S50	RC_S50
Mahlelement Rotor:	[-]									
Mahlelement Stator:	[-]									
Sieb:	[-]			Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
Siebform:	[-]							Stab		
Siebweite	[mm]			3	6	6	3	4	3	3
Frequenz	[Hz]			80 / 60	80 / 60	80 / 60	80 / 60	60	80 / 60	80 / 60
Beanspruchungsgewindigkeit	[m/s]									
Durchsatz	[t/h]			n.a.	n.a.	0,900	0,270	n.a.	n.a.	n.a.
Spez. Zerkl.Energie MW	[kWh/t]									
Spez. Zerkl.Energie MAX	[kWh/t]									
Leerlaufleistung MW	[kW]									
Sm	[m²/cm³]									
x50 Produkt	[mm]			n.a.	n.a.	9,0	n.a.	n.a.	9,0	7,0
x90 Produkt	[mm]			n.a.	n.a.	20,0	n.a.	n.a.	16,0	13,0
Probleme	[-]									

Es erfolgte eine manuelle Vorzerkleinerung der GFP(AG1). Die Zerkleinerungsversuche wurden mit 20 mm und 10 mm Pyramiden auf den Stachelwalzen durchgeführt. Zusätzliche wurde eine schrittweise Anpassung der Spaltbreite zwischen den Walzen vorgenommen.

Stachelwalzenversuche - Versuchsreihe vom 16.11.2021

- V01: RC300-S30; engster Spalt; Platten ziehen nicht ein; auch nach mehrmaliger Reversierung nicht→ Spalt vergrößert in V02
- V02: RC300-S30; mittlerer Spalt; einzelne Platten ziehen ein; bei Aufgabe von mehreren Platten kein Einzug; Produkt: Streifen und Agglomerate (noch kein hinreichender Aufschluss); Lastspitzen am Antrieb bis 15 kW
- V03: RC300-S30; mittlerer Spalt; kaum Zerkleinerungswirkung → Spalt verringert in V04; Lastspitzen bis 11 kW
- V04: RC300-S30; engster Spalt; etwas mehr Zerkleinerungswirkung; → kein stabiler Prozess möglich; Lastspitzen bis 8,8 kW bei Zuführung großer Stücke.
- V06 Versuch mit vorzerkleinertem Material (grob) aus V02 (Zusetzen der Walzen)
- V07 Versuch mit vorzerkleinertem Material (fein) aus V02 (Zusetzen der Walzen)

Abbildung 14 Versuche Stachelwalzenbrecher (20mm / 10mm Pyramiden), Zerkleinerungseffekt unzureichend, Stachelwalzen setzen sich zu

Die Zerkleinerungsversuche mit dem Stachelwalzenbrecher führten zu unzureichenden Ergebnissen. Die vorhandene Restfeuchte im Material in Verbindung mit den Faseranteilen führte umgehend zu Materialverpressungen zwischen den Pyramiden der Walzen. Das Material baute sich immer weiter auf den Walzen auf. Eine Zerkleinerungswirkung war bereits nach kurzer Versuchszeit nicht mehr vorhanden. Die erforderliche Motorleistung stieg bis in den Grenzbereich des Antriebsaggregates. Die Anpassung der Pyramidengröße, der Einsatz von bereits mechanisch vorzerkleinertem Material unterschiedlicher Korngröße oder Differenzen bei der Feuchte des Testmaterials führten zu keiner signifikanten Änderung der Testergebnisse. Damit konnte mit dieser Versuchsreihe belegt werden, dass der geplante Stachelwalzenbrecher für den Aufschluss von GFP nicht geeignet ist.

Eine Anpassung der Zerkleinerungstechnologie war damit zwingend erforderlich. Im Zuge der Versuchsdurchführung am 16.11.2021 wurde deshalb entschieden, die Tests mit dem Stachelwalzenbrecher abzubrechen. Gleichzeitig wurde ein erster Test mit einer Hammermühle HM 341 durchgeführt (Tabelle **11** - V05).

Hammermühlenversuch im Rahmen der Versuchsreihe vom 16.11.2023

Abbildung 15 Versuch mit der Hammermühle: links zerkleinertes Material, rechts Papierfaserreste im Siebkorb

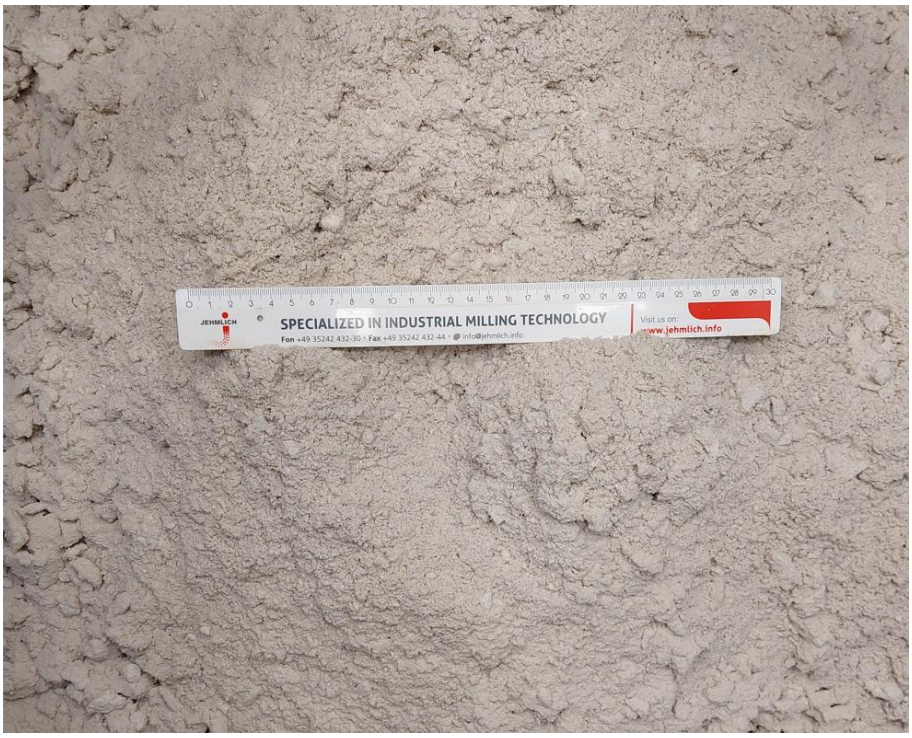


Abbildung 16 Vorversuche mit der Hammermühle bei der Firma Jehmlich (V05), Aufbereitungsprodukt

Versuchsauswertung der Zerkleinerungsversuche vom 16.11.2021

Die Untersuchungsergebnisse der ersten Vorversuche im Technikum Jehmlich lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Es zeigte sich eindeutig, dass die Stachelwalze zur GFP-Aufbereitung nicht geeignet ist, weil das aufgegebene Material zum Verkleben der Stacheln und somit letztendlich zum Stillstand der Walze führt. Anpassungen der Versuchsparameter führten zu keiner signifikanten Verbesserung der Ergebnisse. Die Feuchte des Inputs lag bei ca. 4 %, was einen realistischen Wert für Material aus dem Rückbau darstellt. Der Einzelversuch mit der Hammermühle funktionierte deutlich besser. Beispielhaft sind die Ergebnisse der Siebanalyse zu den Versuchen V03 (Stachelwalzenbrecher) und V05 (Hammermühle) in Abbildung 17 und Abbildung ***18*** dargestellt. Hier zeigt sich auch zusätzlich zur Funktionalität ein besseres Zerkleinerungsbild (engeres Kornband) bei der Hammermühle.

Im Ergebnis dessen wurde die Technologie zur Zerkleinerung der Gipsfaserplatten auf eine Hammermühle umgestellt. Zur Validierung des beschriebenen ersten Tests jedoch waren jedoch weiterführende Versuche erforderlich.

Deshalb wurde am 11.01.2022 eine weitere Versuchsreihe mit der Hammermühle unter Einsatz des bereits vorhandenen Versuchsmaterials AG 1 (Fermacell-Platten) mit 2 unterschiedlichen Feuchtegehalten durchgeführt.

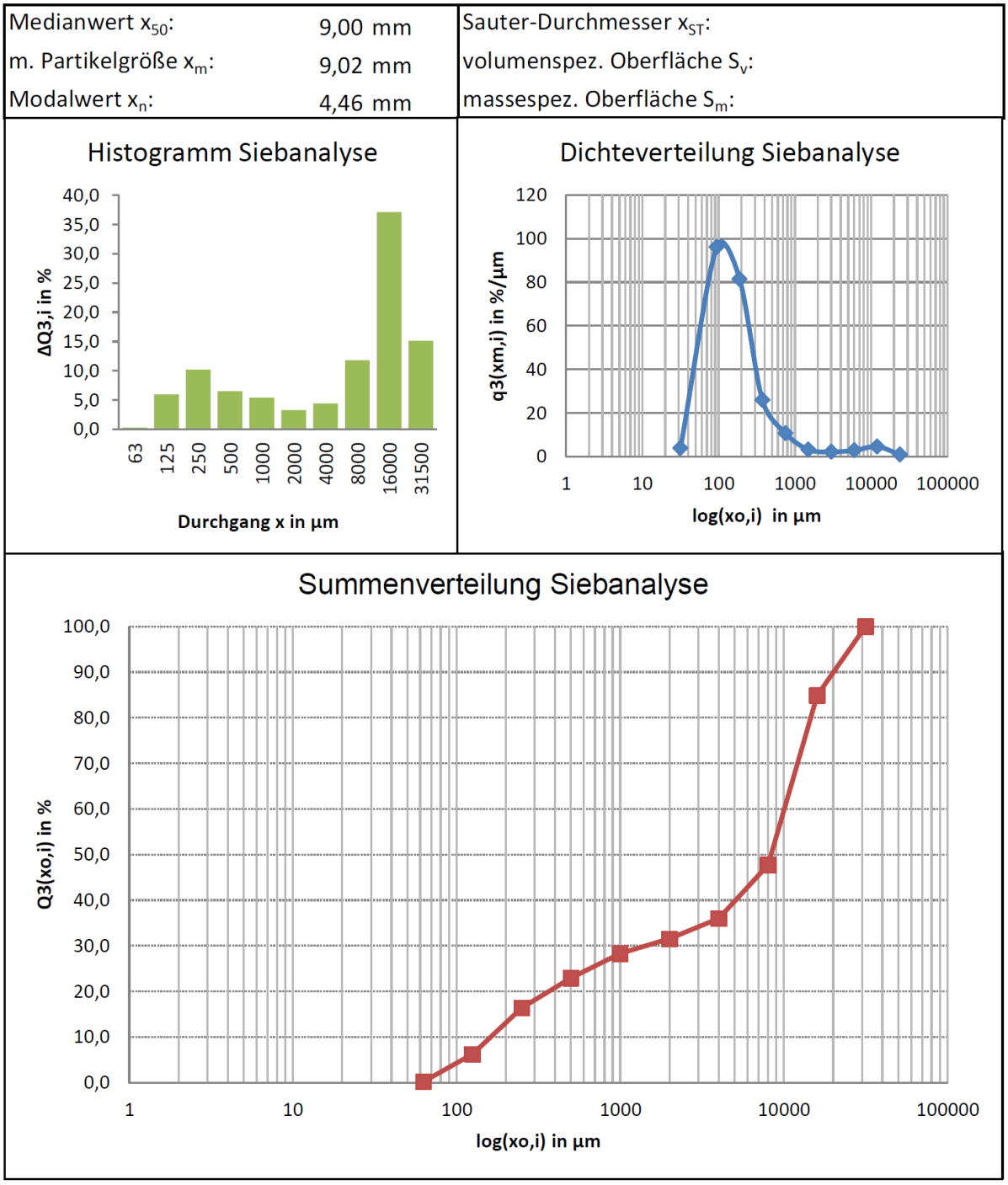
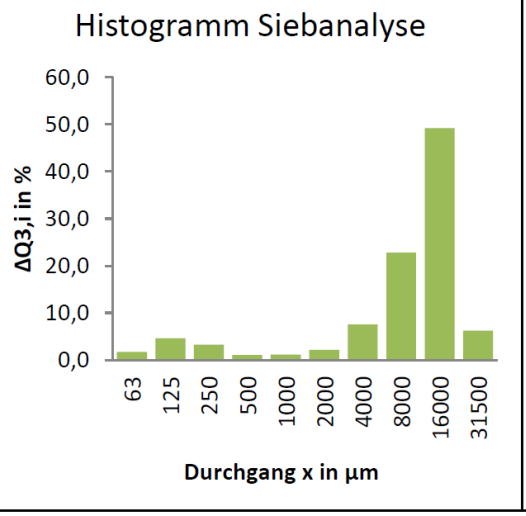
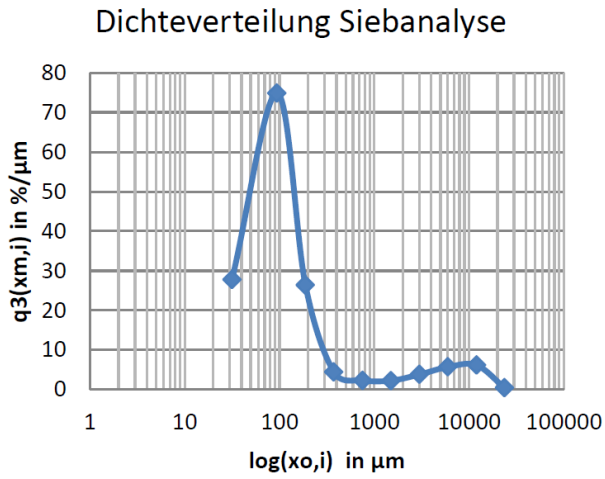


Abbildung 17 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V03 (Stachelwalze, RC300-S30; mittlerer Spalt; kaum Zerkleinerungswirkung)

Medianwert x_{50}:	9,00 mm	Sauter-Durchmesser x_{ST}:	
m. Partikelgröße x_m:	9,04 mm	volumenspez. Oberfläche S_v:	
Modalwert x_n:	5,91 mm	massespez. Oberfläche S_m:	





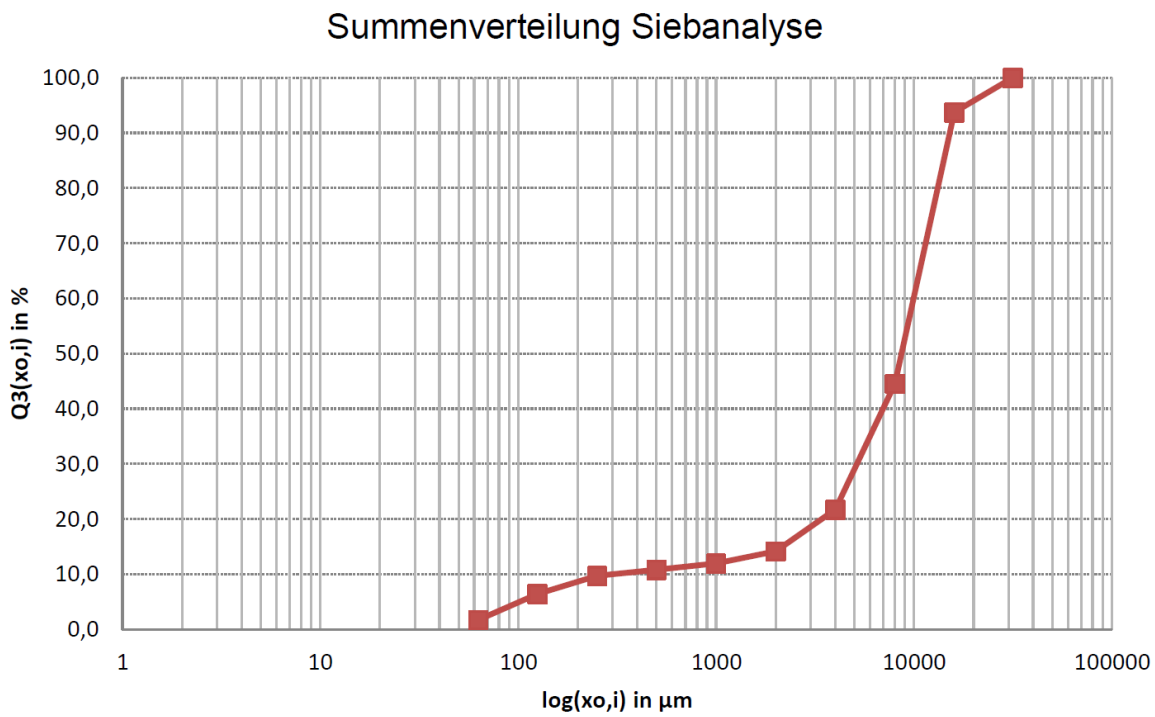


Abbildung 18 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V06 (Hammermühle, 4mm Siebkorb)

Hammermühlenversuche - Versuchsreihe vom 11.01.2022

Bei der Versuchsreihe wurden die Parameter Siebweite (Abstand der Siebkorbstäbe in mm) sowie die Drehzahl der Hammermühle variiert, um den Einfluss dieser Randparameter auf den Zerkleinerungsprozess zu prüfen. Weiterhin wurde in einer Versuchsreihe sehr feuchtes Material eingesetzt (Feuchte ca. 22 Ma%), um auch den Einfluss dieses Parameters zu untersuchen. Im Anschluss an die Zerkleinerungsversuch erfolgte im Technikum eine erste Siebung des Zerkleinerungsproduktes auf einem Kreisschwingsieb der Fa. Russel

- V01 – V06: Versuche Hammermühle HMNS 1 unter Variation von Siebeinsatz und Drehzahl (50 Hz =1500 U/min; 60 Hz = 1800 U/min)
- V07: Versuch Hammermühle HMNS 1 mit feuchtem Material – kein stabiler Prozess – Siebkorb setzt sich zu
- V08-09: Siebung Zerkleinerungsprodukt V01 und V03 mit Siebmaschine FS40 Russell Finex

Tabelle 12 Versuchsrandbedingungen der Zerkleinerung V01 – V07 mit Hammermühle Jehmlich-Technikum.

JEHMLICH	Zusammenfassung Mahlversuche									Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info
	Mahlgut:		Gipsfaserplatten			Tastversuch	kein Sicherheitsdatenblatt			
	anorganisch	Agglomerate	Mohs 1 bis 3	0,1...5 % SiO2	k. - Ex Gefahr	ungiftig	nicht hygroskopisch			
	Auftraggeber:		MUEG				Baustoffe			
Werkauftragsnummer:		W05368	Versuchsziel:		Aufschluss		Modus Versuch:		diskontinuierlich	
Protokollnummer:		08_22	Versuchsort:		JEHMLICH Technikum		Bearbeiter:		Sperberg	
Versuchsnummer:		AG1	AG2	V01	V02	V03	V04	V05	V06	V07
Datum	[dd.mm.jj]	11.01.2022	11.01.2022	11.01.2022	11.01.2022	11.01.2022	11.01.2022	11.01.2022	11.01.2022	11.01.2022
Temperatur Technikum	[° C]	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6
Luftfeuchte Technikum	[%]	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Aufgabegut:	[-]	Gipsfaserplatten		AG1	AG1	AG1	AG1	AG1	AG1	feuchte Platten
Temperatur Schüttgut	[° C]	19,5		19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
Feuchte Schüttgut	[%]	4,77		4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	21,87
Schüttdichte	[g/cm³]	n.a.		0,239	0,221	0,210	0,240	0,222	0,221	n.a.
Dosierung:	[-]			Förderband	Förderband	Förderband	Förderband	Förderband	Förderband	Förderband
Mühle:	[-]			HMNS_1	HMNS_1	HMNS_1	HMNS_1	HMNS_1	HMNS_1	HMNS_1
Mahlelement Rotor:	[-]									
Mahlelement Stator:	[-]									
Sieb:	[-]			Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Siebform:	[-]			Stab	Stab	Stab	Stab	Stab	Stab	Stab
Siebweite	[mm]			4	4	8	8	6	6	6
Frequenz	[Hz]			60	50	60	50	60	50	50
Beanspruchungsgewindigkeit	[m/s]									
Durchsatz	[t/h]			0,360	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	n.a.
Spez. Zerkl.Energie MW	[kWh/t]			4,25	3,82	3,63	4,26	2,65	4,62	
Spez. Zerkl.Energie MAX	[kWh/t]			29,07	22,53	22,26	13,49	19,68	37,92	
Leerlaufleistung MW	[kW]			0,72	0,74	0,76	0,80	0,70	0,86	
Sm	[m²/cm³]									
x50 Produkt	[µm]		7000	250	500	2500	3000	2100	2500	n.a.
x90 Produkt	[µm]		25000	2600	3500	7000	7000	5000	6000	
Probleme	[-]									

Tabelle 13 Versuchsrandbedingungen der Siebung V08 – V09 mit Siebmaschine FS 40 Russell Finex im Jehmlich-Technikum.

JEHMLICH	Zusammenfassung Mahlversuche								Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info	
	Mahlgut:		Gipsfaserplatten			Tastversuch	kein Sicherheitsdatenblatt			
	anorganisch	Agglomerate	Mohs 1 bis 3	0,1...5 % SiO2	k. - Ex Gefahr	ungiftig	nicht hygroskopisch			
	Auftraggeber:		MUEG				Baustoffe			
Werkauftragsnummer:	W05368		Versuchsziel:	Aufschluss			Modus Versuch:		diskontinuierlich	
Protokollnummer:	08_22		Versuchsort:	JEHMLICH Technikum			Bearbeiter:		Sperberg	
Versuchsnummer:		V08	V09	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16
Datum	[dd.mm.jj]	11.01.2022	11.01.2022							
Temperatur Technikum	[° C]	17,6	17,6							
Luftfeuchte Technikum	[%]	45	45							
Aufgabegut:	[-]	V01	V03							
Temperatur Schüttgut	[° C]	19,5	19,5							
Feuchte Schüttgut	[%]	4,77	4,77							
Schüttdichte	[g/cm³]	0,239	0,239							
Dosierung:	[-]	Hand	Hand							
Mühle:	[-]	FS40	FS40							
Mahlelement Rotor:	[-]									
Mahlelement Stator:	[-]									
Sieb:	[-]	Ja	Ja							
Siebform:	[-]	Rundloch	Rundloch							
Siebweite	[mm]	0,125	0,125							
Frequenz	[Hz]									
Beanspruchungsgewindigkei	[m/s]									
Durchsatz	[t/h]									
Spez. Zerkl.Energie MW	[kWh/t]									
Spez. Zerkl.Energie MAX	[kWh/t]									
Leerlaufleistung MW	[kW]									
Sm	[m²/cm³]									
x50 Produkt	[µm]									
x90 Produkt	[µm]									
Probleme	[-]									

Abbildung 19 Zerkleinerungsprodukt V 01 und V 03

Abbildung 20 Zerkleinerungsprodukt V05 und V07

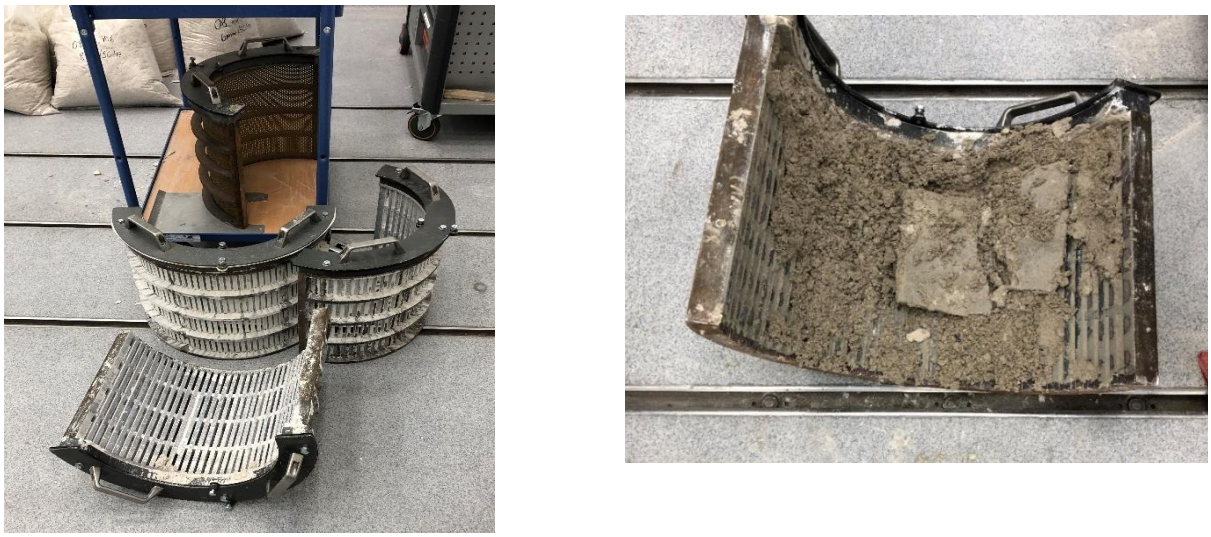
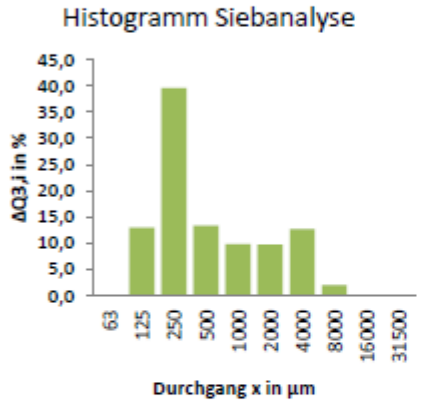


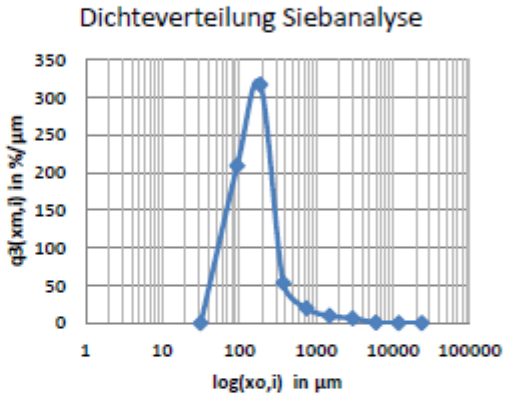
Abbildung 21 Siebkörbe Hammermühle V01 – V06 und Siebkorb 8mm aus V07 (feuchtes Material)

JEHMLICH	**Siebanalyse V1** **Auswertung**	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info

Auftrag Nr.:	**Auftraggeber:**	**Probebezeichnung:**
08_22_V1	MUEG	Gipsfaserplatten

Medianwert x_{50}:	0,25 mm	Sauter-Durchmesser x_{ST}:	
m. Partikelgröße x_m:	0,84 mm	volumenspez. Oberfläche S_v:	
Modalwert x_n:	0,38 mm	massespez. Oberfläche S_m:	





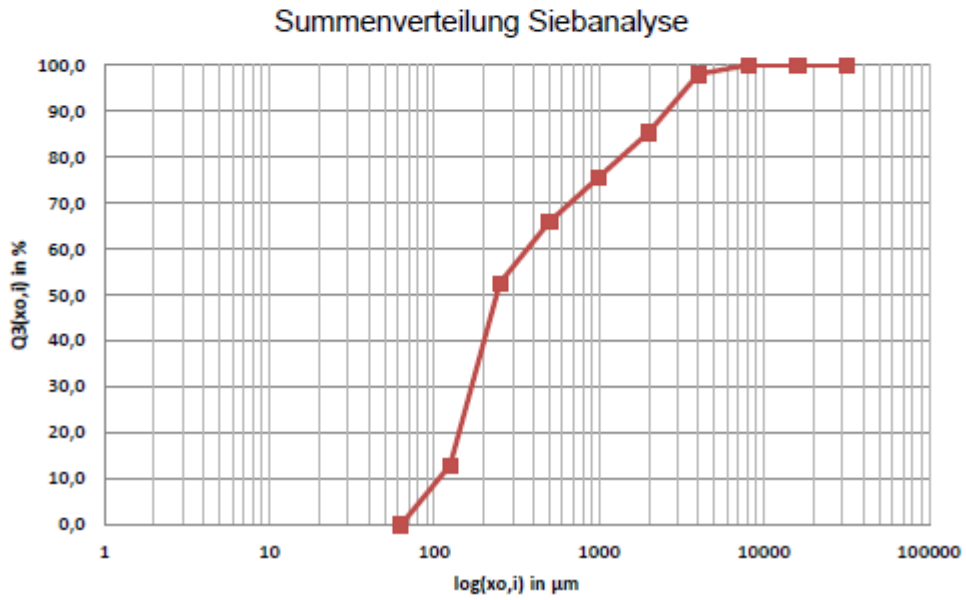
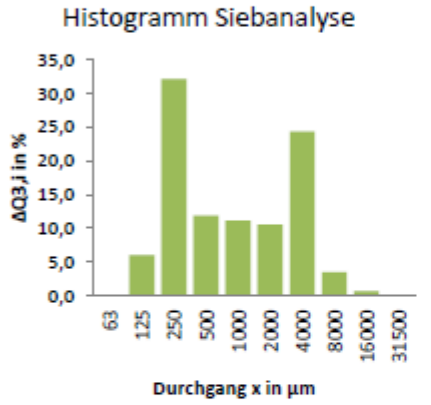


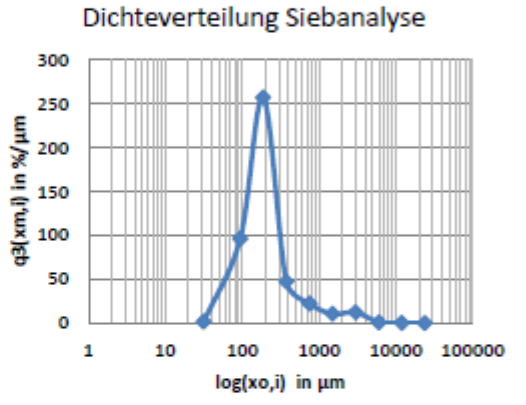
Abbildung 22 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V01 (Hammermühle, Siebkorb 4 mm, 60 Hz)

JEHMLICH	**Siebanalyse V2** **Auswertung**	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info

Auftrag Nr.:	**Auftraggeber:**	**Probebezeichnung:**
08_22_V2	MUEG	Gipsfaserplatten

Medianwert x_{50}:	mm	Sauter-Durchmesser x_{ST}:	
m. Partikelgröße x_m:	1,36 mm	volumenspez. Oberfläche S_v:	
Modalwert x_n:	0,73 mm	massespez. Oberfläche S_m:	





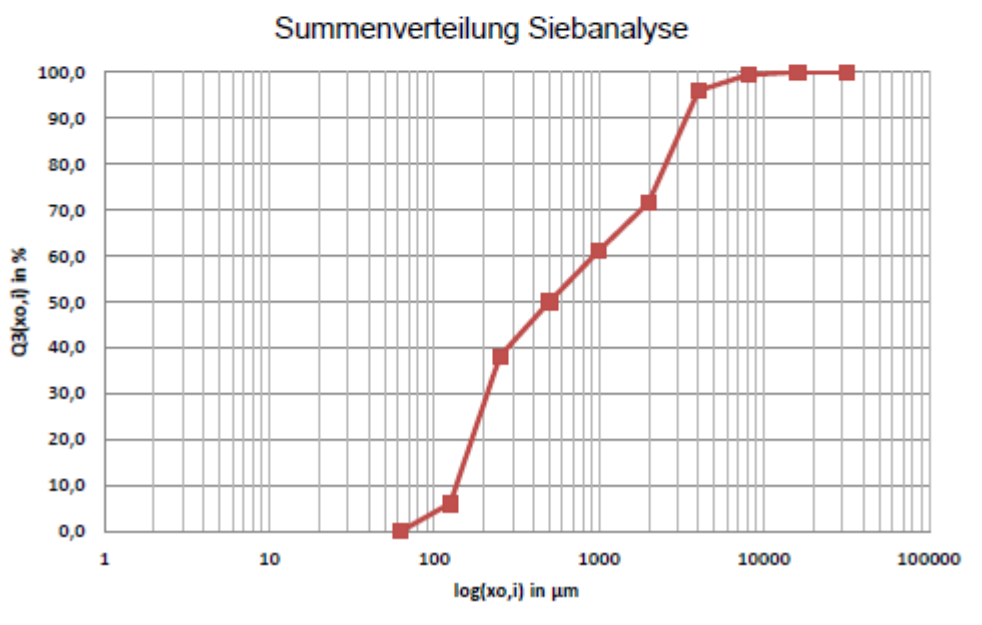
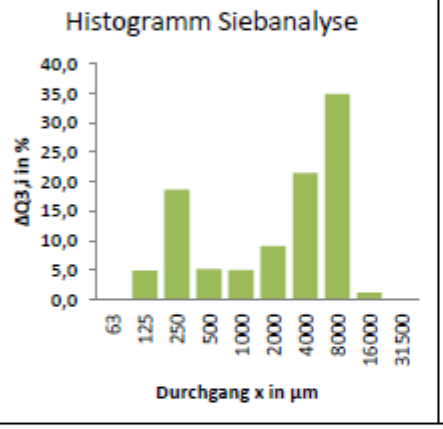


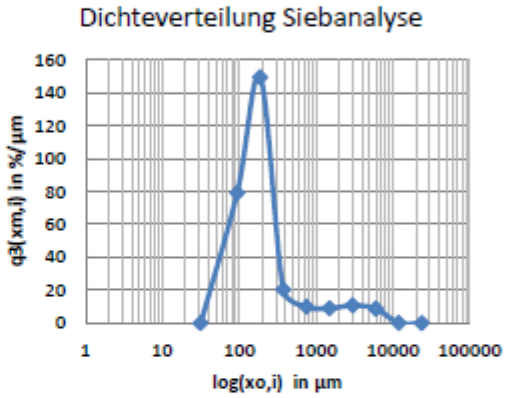
Abbildung 23 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V02 (Hammermühle, Siebkorb 4 mm, 50 Hz)

JEHMLICH	**Siebanalyse V3** **Auswertung**	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info

Auftrag Nr.:	**Auftraggeber:**	**Probebezeichnung:**
08_22_V3	MUEG	Gipsfaserplatten

Medianwert x_{50}:	mm	Sauter-Durchmesser x_{ST}:	
m. Partikelgröße x_m:	3,10 mm	volumenspez. Oberfläche S_v:	
Modalwert x_n:	2,09 mm	massespez. Oberfläche S_m:	





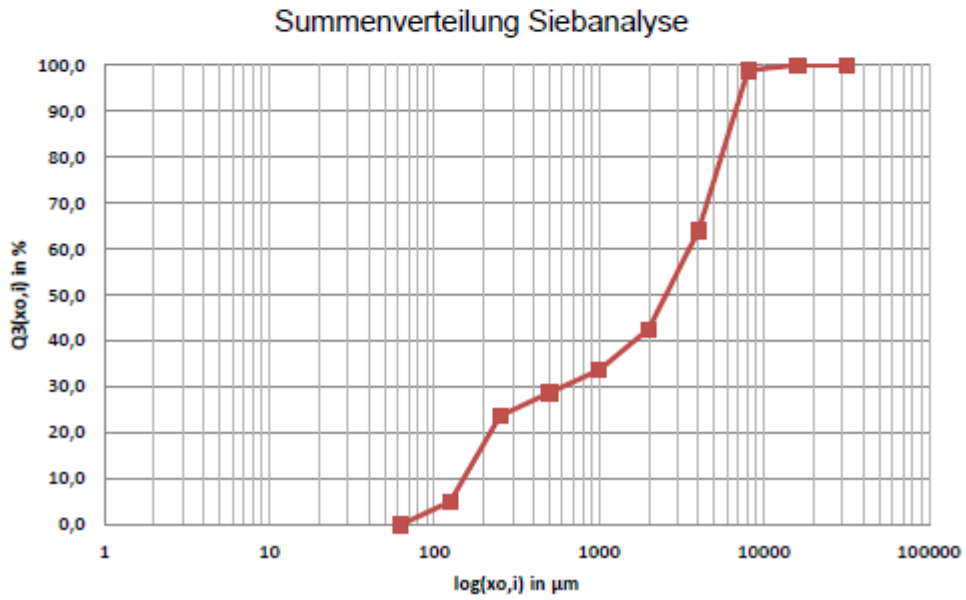
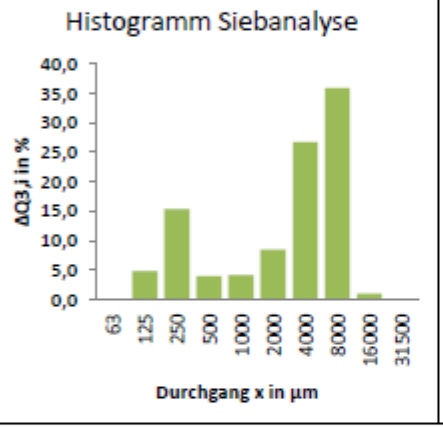


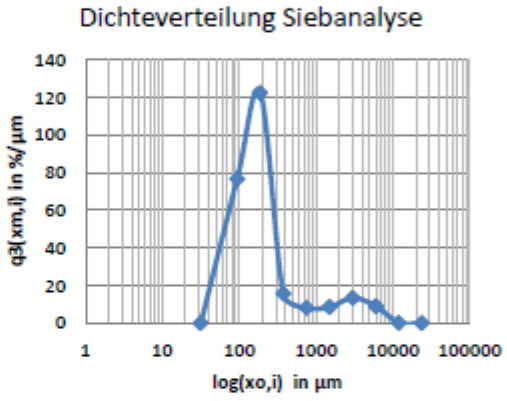
Abbildung 24 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V03 (Hammermühle, Siebkorb 8 mm, 60 Hz)

JEHMLICH	**Siebanalyse V4** **Auswertung**	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info

Auftrag Nr.:	**Auftraggeber:**	**Probebezeichnung:**
08_22_V4	MUEG	Gipsfaserplatten

Medianwert x_{50}:	mm	Sauter-Durchmesser x_{ST}:	
m. Partikelgröße x_m:	3,27 mm	volumenspez. Oberfläche S_v:	
Modalwert x_n:	2,15 mm	massespez. Oberfläche S_m:	





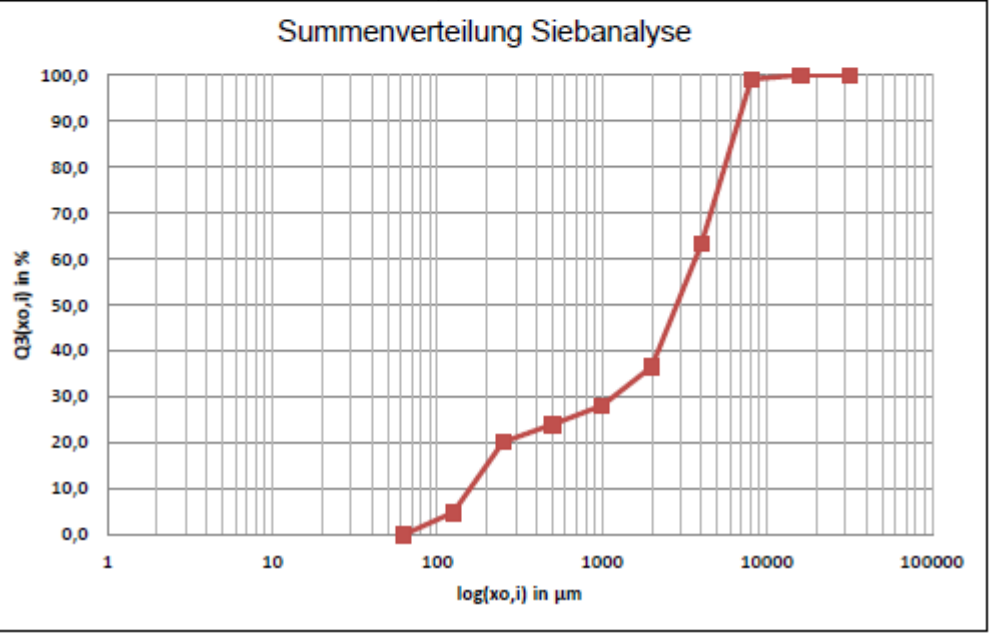
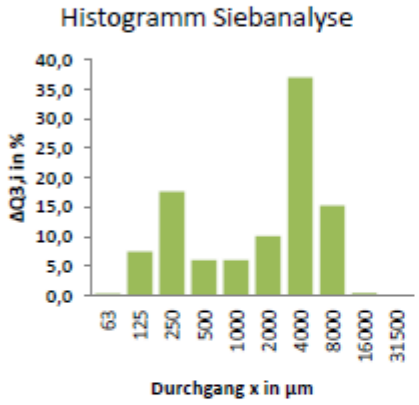


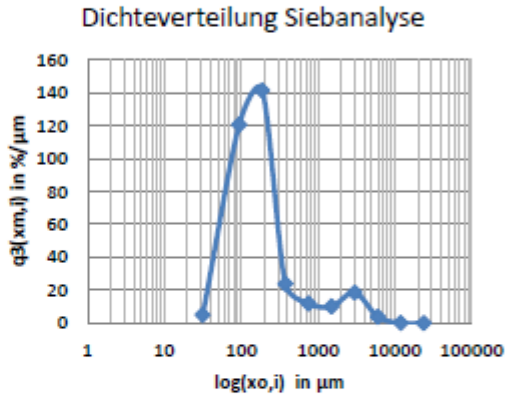
Abbildung 25 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V04 (Hammermühle, Siebkorb 8 mm, 50 Hz)

JEHMLICH	**Siebanalyse V5** **Auswertung**	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info

Auftrag Nr.:	**Auftraggeber:**	**Probebezeichnung:**
08_22_V5	MUEG	Gipsfaserplatten

Medianwert x_{50}:	mm	Sauter-Durchmesser x_{ST}:	
m. Partikelgröße x_m:	2,32 mm	volumenspez. Oberfläche S_v:	
Modalwert x_n:	1,11 mm	massespez. Oberfläche S_m:	





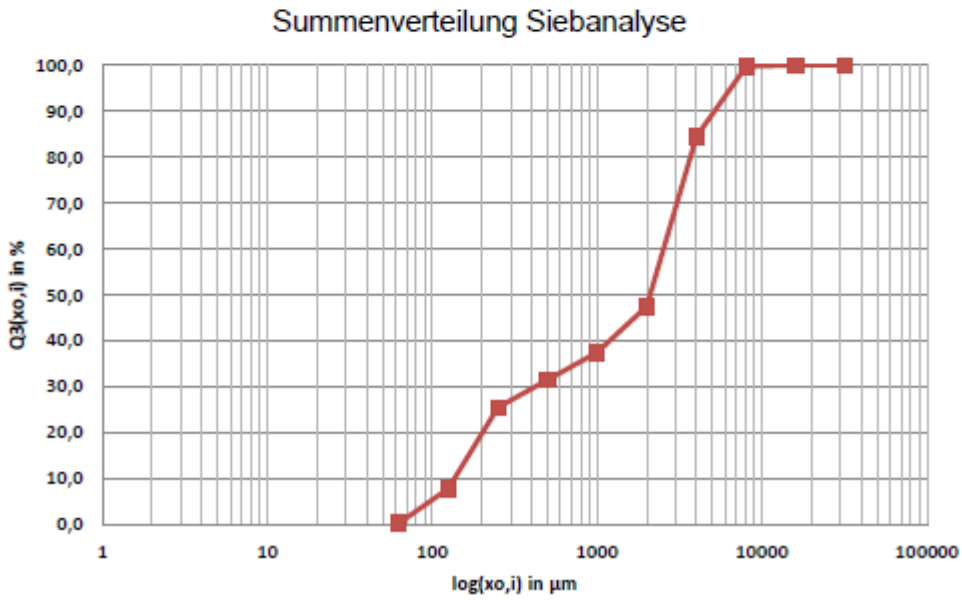
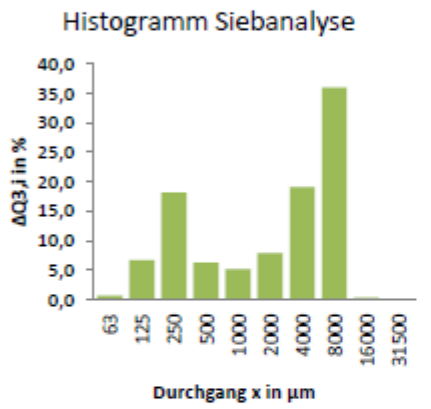


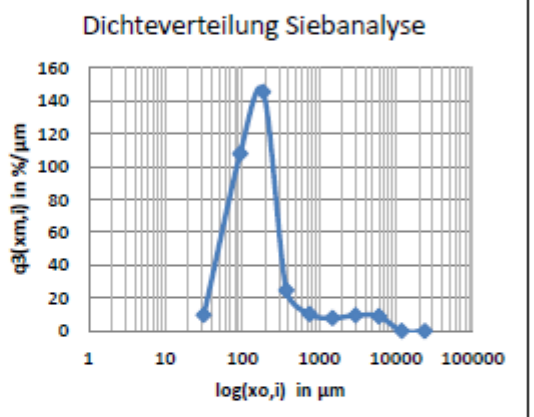
Abbildung 26 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V05 (Hammermühle, Siebkorb 6 mm, 60 Hz)

JEHMLICH	**Siebanalyse V6** **Auswertung**	Gebrüder Jehmlich GmbH Mühlen-und Maschinenbau Waldheimer Strasse 210 D-01683 Nossen www.jehmlich.info

Auftrag Nr.:	**Auftraggeber:**	**Probebezeichnung:**
08_22_V6	MUEG	Gipsfaserplatten

Medianwert x_{50}:	mm	Sauter-Durchmesser x_{ST}:	
m. Partikelgröße x_m:	2,98 mm	volumenspez. Oberfläche S_v:	
Modalwert x_n:	2,16 mm	massespez. Oberfläche S_m:	





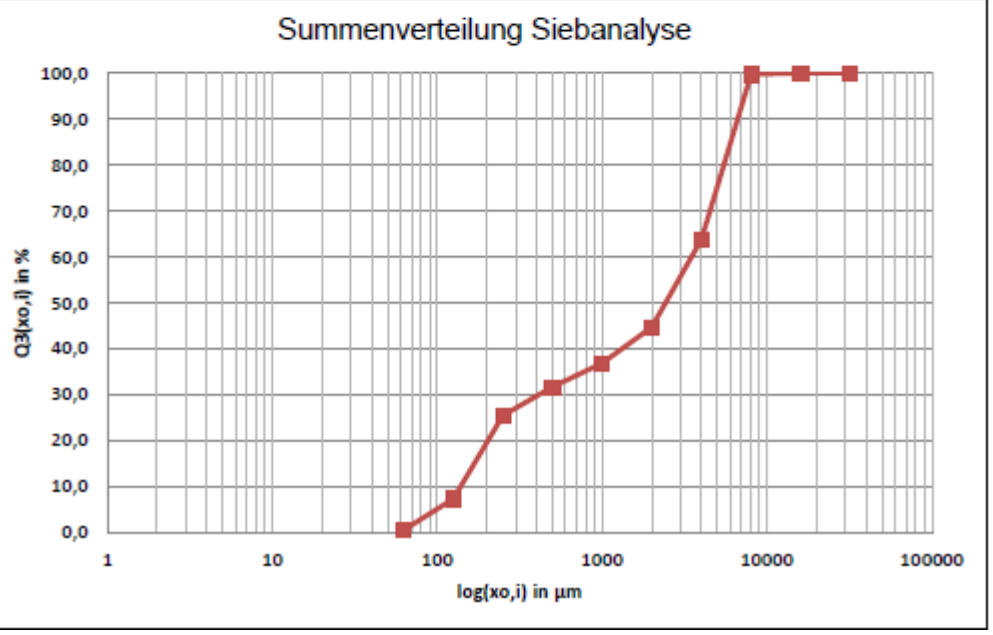


Abbildung 27 Ergebnisse der Siebanalyse des Versuchs V06 (Hammermühle, Siebkorb 6 mm, 50 Hz)

Versuchsauswertung der Vorversuche vom 11.01.2022 im Jehmlich-Technikum

Die Zerkleinerungsergebnisse der Hammermühle beim trockenen Material waren insgesamt sehr gut. Der Materialverbund aus Fasern und Gips wurde durch den hohen Eintrag an kinetischer Energie sehr gut aufgeschlossen. Die Sieblinien zeigen bei den Versuchen V01 bis V06 sehr ähnliche Verläufe. Durch die typische, gewölleartige Struktur (siehe auch Abbildung 19 und Abbildung ***20***) finden sich im oberen Korngrößenbereich die längeren Fasern mit z.T. noch anhaftenden Gipskörnern.

Eine Erhöhung der Drehzahl über 1500 U/min führte zu keiner signifikanten Verbesserung des Zerkleinerungsproduktes. Der Größe des Siebkorbes hat dagegen einen Einfluss auf den Prozess. Die oben genannten Größenangaben beziehen sich dabei auf den Abstand zwischen den Quadratstäben des Korbes und sind damit der entscheidende Parameter für den Mahlgrad. Weiterhin wird aber auch die durchschnittliche Verweildauer des Mahlgutes durch die Größe des Siebkorbes beeinflusst. Bei kleinerem Stababstand werden sowohl Gips als auch Fasern länger im Mahlraum beansprucht und damit stärker zerkleinert. Das Zerkleinerungsprodukt ist dann feiner und der Aufschluss von Gips- und Faserpartikeln besser, allerdings lassen sich die Fasern über die nachfolgende Klassierung schlechter abtrennen. Zudem waren beim trockenen Material (Feuchte ca. 5 %) beim 4mm-Siebkorb erste Materialanbackungen zu erkennen, so dass der Einsatz kleinerer Siebkörbe nicht zielführend ist. Die Verwendung größerer Körbe (>8mm) ist aufgrund eines schlechteren Aufschlusses und zu großer Partikel ebenfalls auszuschließen. Der Versuch mit dem feuchten Material (V07) musste abgebrochen werden, da der Siebkorb sehr schnell zugesetzt und damit kein stabiler Prozess möglich war (siehe Abbildung 21).

Für die weiterführenden Versuche wurde deshalb die Siebkorbgrößen 4mm und 8mm verwendet.

Die nachgeschalten ersten Siebversuche (V08 und V09) wurden mit zunächst mit einer 125µm-Drahtmasche durchgeführt. Eine Abtrennung war damit möglich, die Ausbeute beim Unterkorn (Gipsfraktion) lag bei 20,5% bzw. 16,2%, was der ermittelten Kornverteilung etwa entspricht. Es wurden nachfolgend weitere Versuche zur Klassierung durchgeführt.

3.1.3.5 Versuchsreihe Zerkleinerung und Klassierung am Standort GRA MUEG

Versuchsvorbereitung

Die weitergehenden Versuche wurden am Standort der Gipsrecyclinganlage (GRA) der MUEG in Großpösna durchgeführt. Hierbei sollten die bisherigen Technikumsversuche validiert und im Bereich der Klassierung von Gips und Papierfasern mittels Siebung erweitert werden.

Die Vorbereitung für diese Versuche begann am 08.06.2022 mit der Installation der Hammermühle, Typ HM 342, Fa. Jehmlich GmbH sowie dem der Einrichtung des Versuchsaufbaus. Die Vorbereitungsschritte umfassten die Einstellung der Hammermühle für die Versuchsdurchführung (u.a. durch Installation des Siebkorbs 8 mm) sowie die Installation der Absaugeinrichtung an der Hammermühle. Während die Versuchsablaufes kam auch der 4mm-Siebkorb zum Einsatz. Die Versuchsmaterialien wurden manuell aus der Andienung bei der MUEG sortiert und sind damit als repräsentativ für Rückbaumaterialien sowie Installationsverschnitte anzusehen. Bei der manuellen Sortierung konnten aufgrund Kennzeichnung und Farbe zwei große Hersteller (Rigips, Fermacell) identifiziert und separiert werden. Ein visueller Eindruck der angelieferten Materialen (GFP) ist nachfolgenden Abbildungen zu entnehmen.

Abbildung 28 Angelieferte Gipsplattenabfälle Gipsrecyclinganlage MUEG/ Größpösna

Nach der Vorsortierung waren nur geringe Störstoffmengen (vereinzelt Holz- bzw. Kunststoffreste) in den GFP vorhanden. Grundsätzlich wurden 3 Inputfraktionen aufgrund der genannten unterschiedlichen Materialeigenschaften unterschieden

- Fermacell 1 (neuwertige Installationsverschnitte)
- Fermacell 2 (Rückbaumaterial)
- Rigips (Rückbaumaterial)

Zerkleinerung

Für die Zerkleinerung der GFP als erster Prozessschritt im Rahmen der Aufbereitungsversuche wurde eine Hammermühle Typ HM 342 der Fa. Jehmlich GmbH mit unterschiedlichen Siebeinsätzen (4 mm, 8 mm) verwendet. Die Technik zur Durchführung der Zerkleinerungsversuche mittels Hammermühle ist in Abbildung 29 dargestellt.

Abbildung 29 Hammermühle HM 342 Fa. Jehmlich

Ziel des Einsatzes der Hammermühle war das Erreichen eines optimalen Aufschlusses des Gips-Papier-Verbundes der herstellerspezifisch unterschiedlichen GFP für den folgenden Prozessschritt „Trennung der GFP-Hauptkomponenten Gips und Papier“ durch nachfolgende Siebung analog zu den durchgeführten Technikumsversuchen.

In diesem Zerkleinerungsschritt wurden insgesamt ca. 2 Tonnen Inputmaterial der Hersteller Fermacell und Rigips (gemäß genannter Einteilung) mechanisch aufgeschlossen und entsprechend der Anlagenkonfiguration (unterschiedliche Siebeinsätze) und Hersteller in verschiedene Big Bags abgefüllt.

Am 10.06.2022 wurde mit der Zerkleinerung der GFP begonnen. Am 14.06.2022 wurde der Siebeinsatz der Hammermühle von 8 auf 4 mm umgebaut. Die Zerkleinerungsversuche wurden am 16.06.2022 abgeschlossen und die Hammermühle für den Rückversand vorbereitet. Für die nachfolgenden Siebversuche standen damit 6 Versuchsmaterialien (3 Fabrikate aufbereitet mit 2 Siebkörben) zur Verfügung.

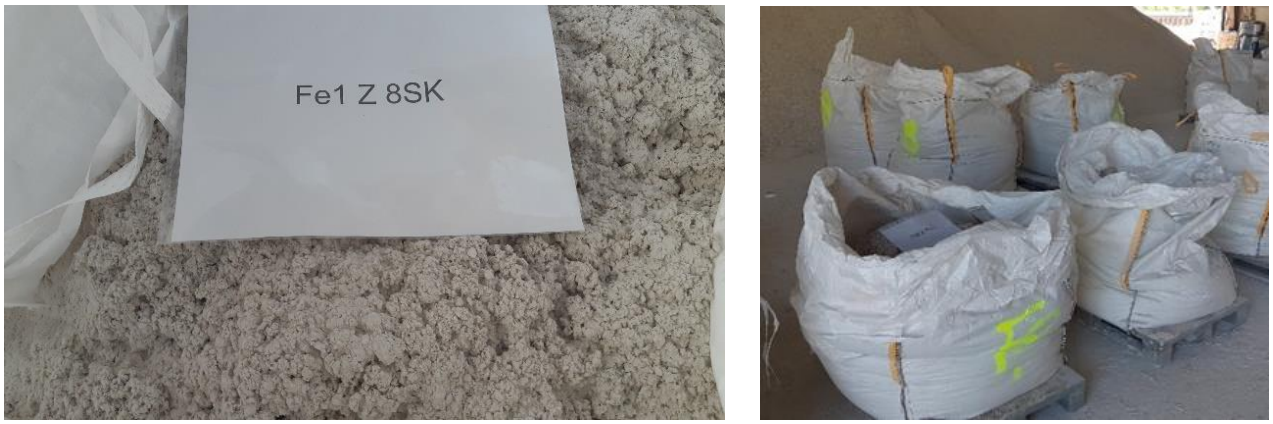


Abbildung 30 Zerkleinertes Material für Siebversuche

Klassierung - Siebung

Im zweiten Prozessschritt „Siebung“ wurde zunächst eine Siebmaschine der Fa. RUSSEL vom Typ „FINEX SEPARATOR 30" eingesetzt. Als Maschinenweite wurde, auch in Absprache mit dem Hersteller, 125 µm und 400 µm festgelegt. Damit ergaben sich in Summe 12 Versuchsdurchläufe (Siebung von 6 Input-Materialien aus der Zerkleinerung auf 2 verschiedenen Siebbelegen) gemäß der nachfolgenden Übersicht.

Tabelle 14 Versuchsreihen Klassierung

Versuch	Probenbezeichnung	Erläuterung
1	Fe1 z 4Sk 400	Fermacell Installationsmaterial zerkleinert mit 4mm Siebkorb, 400µm Sieb
2	Fe1 z 8Sk 400	Fermacell Installationsmaterial zerkleinert mit 8mm Siebkorb, 400µm Sieb
3	Fe2 z 4Sk 400	Fermacell Rückbaumaterial zerkleinert mit 4mm Siebkorb, 400µm Sieb
4	Fe2 z 8Sk 400	Fermacell Rückbaumaterial zerkleinert mit 8mm Siebkorb, 400µm Sieb
5	Ri z 4Sk 400	Rigips Rückbaumaterial zerkleinert mit 4mm Siebkorb, 400µm Sieb
6	Ri z 8Sk 400	Rigips Rückbaumaterial zerkleinert mit 8mm Siebkorb, 400µm Sieb
7	Fe1 z 4Sk 125	Fermacell Installationsmaterial zerkleinert mit 4mm Siebkorb, 125µm Sieb
8	Fe1 z 8Sk 125	Fermacell Installationsmaterial zerkleinert mit 8mm Siebkorb, 125µm Sieb
9	Fe2 z 4Sk 125	Fermacell Rückbaumaterial zerkleinert mit 4mm Siebkorb, 125µm Sieb
10	Fe2 z 8Sk 125	Fermacell Rückbaumaterial zerkleinert mit 8mm Siebkorb, 125µm Sieb
11	Ri z 4Sk 125	Rigips Rückbaumaterial zerkleinert mit 4mm Siebkorb, 125µm Sieb
12	Ri z 8Sk 125	Rigips Rückbaumaterial zerkleinert mit 8mm Siebkorb, 125µm Sieb

Abbildung 31 Installation RUSSELL Sieb

Die Versuchsdurchführung wurde mit Tastversuchen zur Verweilzeitdauer des Materials auf dem Siebdeck begonnen, d.h. es wurden Versuche durchgeführt, um sich an das Optimum zwischen Siebzeit und Siebergebnis „heranzutasten“. Die Beschickung der Anlage erfolgte manuell. Die Abfälle wurden per Hand bzw. mit Schaufel in den Trichter der entsprechenden Maschine aufgegeben.

Abbildung 32 Illustration der Ergebnisse der Siebversuche mit dem FINEX SEPARATOR 30 (Russell-Sieb).

Am 20.06.2022 begannen die Tastversuche zur Verweilzeitdauer während des Siebversuchs (Siebboden 125 µm). Die Siebung zerkleinerter GFP wurde fortgesetzt und mittels Probenahme begleitet.

Vom 20.06. bis 22.06.2022 wurden die Tastversuche zur Verweilzeitdauer durchgeführt. Dabei wurde der Siebdurchgang in Ma% in Abhängigkeit von der Siebdauer gemessen. Es wurde insgesamt 6 Tastversuche mit unterschiedlichen Parametern (Material und Siebgröße) durchgeführt. Die Abbildung 33 zeigt Zunahme der Menge an Unterkorn in Abhängigkeit von der Siebdauer für die 6 Tastversuche.

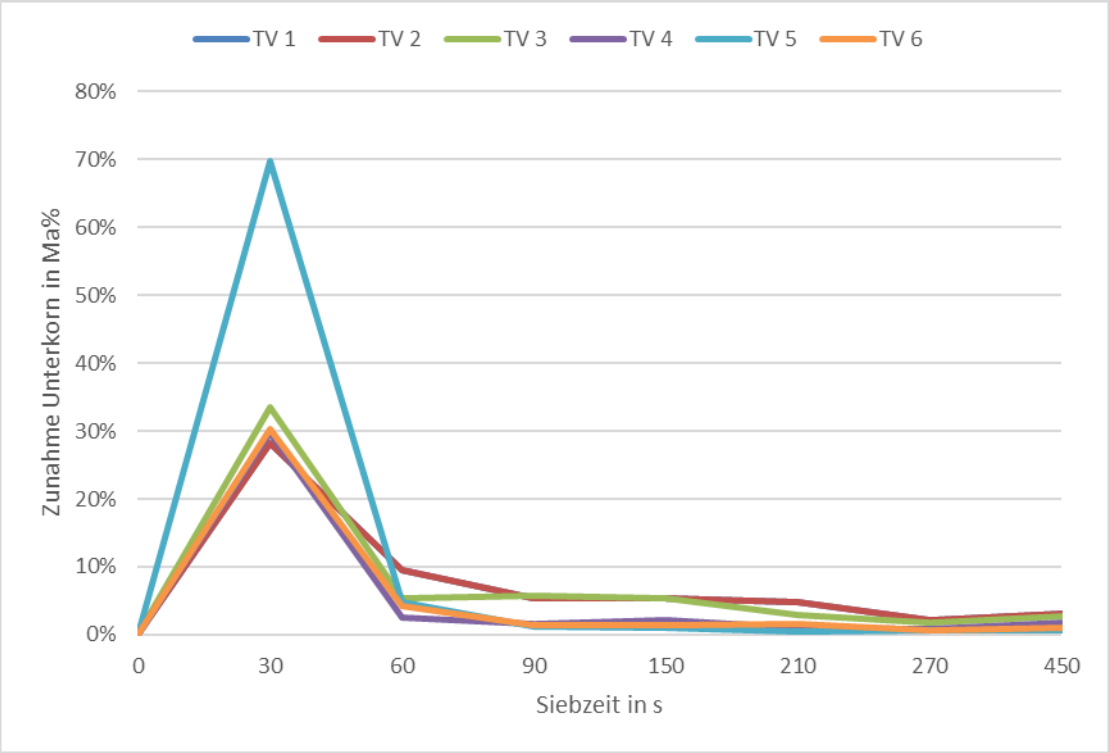


Abbildung 33 Änderung der Ausbeute an Unterkorn in Abhängigkeit von der Siebdauer

Das Diagramm zeigt, dass nach 60 Sekunden nur noch eine geringe Abtrennung aus dem Aufgabematerial erfolgt. Zudem stellte sich heraus sich, dass der TOC-Wert im Unterkorn (Gipsfraktion) mit fortschreitender Siebdauer anstieg. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch längeres Sieben anteilig mehr Papierfasern den Weg durch die Siebmasche finden und damit die Qualität der Gipsfraktion verschlechtern. Somit wurde die Dauer der Siebung je Versuch auf 60 Sekunden festgelegt. Nach Ablauf dieser Zeitspanne wurde im Versuch der Abzugskanal des Russell-Siebes für das Überkorn (Papierfraktion) geöffnet und das Überkorn über einen definierten Zeitraum von 16 sec. abgeführt.

Abbildung 34 Illustration der Ergebnisse der Tastversuche

Das Inputmaterial für die Siebversuche wurde manuell mittels PE-Eimer in der Mitte der kreisförmigen Siebfläche aufgegeben. Siebüber- und Siebunterlauf wurden ebenfalls in PE-Eimer gesammelt und anschließend verwogen. Siebdauer und Nachlauf zur Siebentleerung blieben bei allen Versuchsreihen konstant, da hier im Rahmen der Tastversuche bereits ein Optimum ermittelt wurde. Jede Versuchsreihe wurde zweimal durchgeführt und ein Mittelwert gebildet. Die Versuche gleicher Versuchsreihen zeigten dabei in keinem Fall signifikante Abweichungen.

Versuchsprotokoll
Siebversuch 1

Datum:	**22.06.2022**	**Ort:**	**MUEG/ VEZ I**	**Name:**	**F. Pfaff / J. Dubiel**
Sieb	**Russel SM Typ Fines Separator 40"**		Siebgröße	400 µm	
			Einstellung	Amplitudeneinstellung C	
Material	**Gipsfaserplatte Fermacell 1 zerkleinert mit Jehmlich HM Siebkorbgröße 4 (Fe1 z 4Sk)**				

Einwaage	**Tara**	**Brutto**	**Netto**	
PE-Eimer 10 l	256,9 g	456,7 g	**199,8 g**	(Versuch 1)
		456,5 g	**199,6 g**	(Versuch 2)

Siebdauer	**60 sec**
Nachlauf zur Siebentleerung	**16 sec**

Siebzeit	**Versuch 1** Messung	Netto	Ma%	**Versuch 2** Messung	Netto	Ma%	**Mittelwert** Netto	Ma%
Menge Einwaage		**199,8 g**			**199,6 g**		**199,7 g**	
Gipsfraktion	392,7 g	135,8 g	68,0%	395,1 g	138,2 g	69,2%	137,0 g	70,7%
Gipsfraktion inkl. Nachlauf	401,0 g	144,1 g	72,1%	402,3 g	145,4 g	72,8%	144,8 g	74,65%
Papierfraktion	304,9 g	48,0 g	24,0%	307,2 g	50,3 g	25,2%	49,2 g	25,35%
Σ Fraktionen		192,1 g	96,1%		195,7 g	98,0%	193,9 g	100,0%
Siebverlust		7,7 g	3,9%		3,9 g	2,0%	0,0 g	0,0%
			100,0%			100,0%		100,0%

Differenz zum Soll	Soll*	Diff.
Gipsfraktion	80%	-5,3%
Papierfraktion	20%	5,3%

Bemerkungen * Zusammensetzung lt. Herstellerangabe

Unterschrift

Abbildung 35 Darstellung Versuchsprotokoll

Abbildung 1 zeigt beispielhaft das Versuchsprotokoll zum Siebversuch 1 mit Fermacell-Material aus der Installation zerkleinert mit dem 4mm Siebkorb und abgesiebt mit der 400µm-Siebmasche. Analog dazu wurde alle 12 Siebversuchsreihen erfasst.

Versuchsauswertung

Tabelle 15 zeigt eine Auswertung der erzielten Mengenbilanz der beiden Fraktionen Gips (Siebunterlauf) und Papier (Siebüberlauf) für die durchgeführten Versuche.

Tabelle 15 Zusammenfassung Untersuchungsergebnisse nach Absiebung

Versuch	Fabrikat	Siebkorb HM	Sieb-masche	Proben-bezeichnung	% Gips-fraktion	% Papierfraktion	Gipsanteil in GF bez. auf 100 % Gips im Input	Gipsanteil in PF bez. auf 100 % Gips im Input
1.	Fermacell 1	4	400	Fe1 z 4Sk 400	74,65%	25,35%	63,68%	19,24%
2.	Fermacell 1	8	400	Fe1 z 8Sk 400	34,79%	65,21%	30,45%	52,10%
3.	Fermacell 2	4	400	Fe2 z 4Sk 400	73,71%	26,29%	62,29%	19,64%
4.	Fermacell 2	8	400	Fe2 z 8Sk 400	27,20%	72,80%	21,92%	56,27%
5.	Rigips	4	400	Ri z 4Sk 400	62,07%	37,93%	49,10%	29,17%
6.	Rigips	8	400	Ri z 8Sk 400	27,80%	72,20%	21,85%	53,86%
7.	Fermacell 1	4	125	Fe1 z 4Sk 125	58,66%	41,34%	51,50%	32,99%
8.	Fermacell 1	8	125	Fe1 z 8Sk 125	29,27%	70,73%	26,08%	55,31%
9.	Fermacell 2	4	125	Fe2 z 4Sk 125	52,54%	47,46%	46,08%	36,87%
10.	Fermacell 2	8	125	Fe2 z 8Sk 125	22,27%	77,73%	18,49%	64,83%
11.	Rigips	4	125	Ri z 4Sk 125	39,45%	60,55%	31,91%	49,65%
12.	Rigips	8	125	Ri z 8Sk 125	20,10%	79,90%	15,86%	68,63%

Die bezogenen Gipsanteile der letzten beiden Spalten ermitteln sich aus den gemessenen Ma% nach dem Siebvorgang multipliziert mit dem nasschemisch ermittelten Dihydratanteil (Tabelle 16) in der jeweiligen Fraktion.

Weiterhin erfolgte die Analyse stofflicher Parameter, die für die Charakterisierung der Teilfraktion und damit für die Rückführung in den Stoffkreislauf von Bedeutung sind.

Beim der Papierfraktion wurden Feuchte, Dihydrat- und Aschegehalt bestimmt. Bei der Gipsfraktion Feuchte, TOC und Dihydratgehalt (trockenchemisch über Kristallwasserbestimmung/KW und nasschemisch.

Tabelle 16 Chemische Untersuchungsergebnisse nach Absiebung

			Papierfraktion			Gipsfraktion					
						trockenchemisch				nasschemisch	
Sieb-versuch	Fabrikat	Proben-bezeichnung	Feuchte	CaSO4+2H2O*	Aschegehalt (525°C)	Feuchte	KW (360°C)	$CaSO_4$ +2H_2 O**	TOC	Feuchte	$CaSO_4$ +2H_2 O**
1	Fermacell 1	Fe1 z 4Sk 400	0,25%	75,90%	61,29%	1,1%	28%	104%	6,27%	0,71%	85,30%
2	Fermacell 1	Fe1 z 8Sk 400	0,13%	79,90%	66,98%	0,9%	27%	124%	5,79%	0,56%	87,50%
3	Fermacell 2	Fe2 z 4Sk 400	0,55%	74,70%	60,92%	1,1%	27%	124%	4,06%	0,58%	84,50%
4	Fermacell 2	Fe2 z 8Sk 400	0,51%	77,30%	67,83%	0,5%	14%	64%	6,14%	0,64%	80,60%
5	Rigips	Ri z 4Sk 400	0,33%	76,90%	65,79%	1,0%	23%	106%	6,26%	0,59%	79,10%
6	Rigips	Ri z 8Sk 400	0,54%	74,60%	66,31%	0,6%	12%	55%	6,18%	0,72%	78,60%
7	Fermacell 1	Fe1 z 4Sk 125	0,48%	79,80%	62,42%	0,8%	23%	107%	3,75%	0,43%	87,80%
8	Fermacell 1	Fe1 z 8Sk 125	0,51%	78,20%	67,07%	0,8%	24%	113%	3,66%	0,32%	89,10%
9	Fermacell 2	Fe2 z 4Sk 125	0,86%	77,70%	60,18%	0,6%	13%	62%	3,78%	0,45%	87,70%
10	Fermacell 2	Fe2 z 8Sk 125	0,52%	83,40%	67,46%	1,4%	21%	98%	3,51%	0,42%	83,00%
11	Rigips	Ri z 4Sk 125	0,49%	82,00%	67,77%	0,7%	21%	100%	3,41%	0,45%	80,90%
12	Rigips	Ri z 8Sk 125	0,23%	85,90%	65,52%	0,6%	20%	96%	4,08%	0,42%	78,90%

*Gravimetrisch über Sulfatbestimmun **Gravimetrisch über Kristallwasser (KW)

Anm.: Bei der gravimetrischen Bestimmung des Dihydratgehaltes über die Kristallwasserbestimmung können bei noch vorhanden freien H2O Werte über 100% ermittelt werden. Um für diesen Parameter exaktere Werte zu erhalten, erfolgte zusätzliche eine nasschemische Bestimmung

Die Untersuchungserbnisse der TOC-Gehalte in der Gipsfraktion zeigen eine Spannbreite von 3,41 bis 6,27%. Die nasschemische Ermittlung der $CaSO_4$+2H_2O-Gehalte in der Gipsfraktion erbrachte für die Fermacell-GFP einen mittleren Anteil an Recyclinggips von 82,22 Ma-%, und für Rigips-GFP einen mittleren Anteil an Recyclinggips von 80,1 Ma-%.

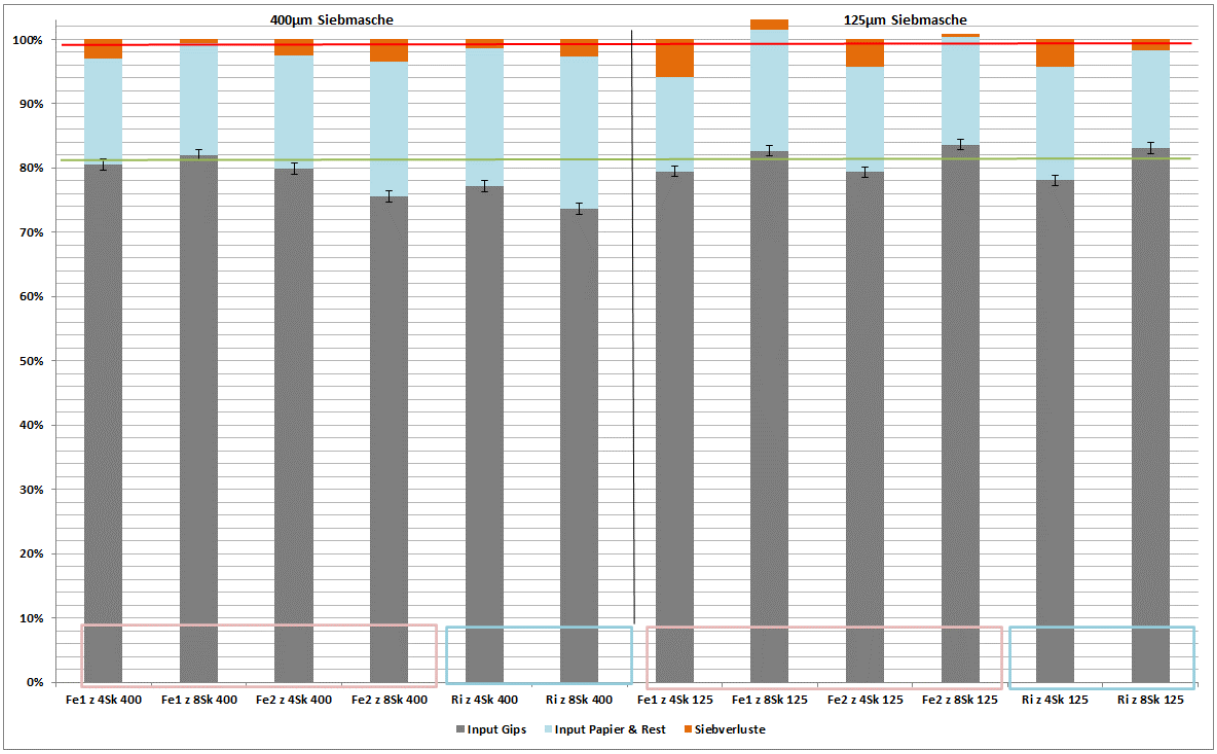


Abbildung 36 Grafische Darstellung des Gipsanteils im Siebunterlauf

Die Ergebnisse zeigen, dass mittels der im Großversuch angewandten Aufbereitungstechnik ein guter Aufschluss der GFP erreicht wird. Auch eine Trennung der beiden Fraktionen ist zumindest bis zu einem bestimmten Grad gelungen.

Die Gipsfraktion wies mit TOC-Gehalten zwischen 3,41 und 6,27 Ma-% eine gute Reinheit auf. Bei der feineren Siebauflagen (125 µm) waren die TOC-Werte etwas niedriger, hier gelangten weniger Papierfasern ins Unterkorn. Zwar werden die Vorgaben des Gipsverbandes in Bezug auf den TOC – Gehalt nicht erreicht (max. 1,5 Ma-%), jedoch ist dies durch entsprechende Optimierungen der Trenntechnik bzw. weitere Behandlungsstufen in die Prozesskette als durchaus erreichbar einzuschätzen. Die Dihydratwerte lagen zwischen 79%und 89%, was für den Wiedereinsatz in der Gipsindustrie ausreichend ist. Die Anteile beim Fabrikat Fermacell lagen hier etwas höher, was auf die Produktionsrezeptur zurückzuführen sein könnte. Die Ausbeute der Gipsfraktion nach Siebung lag beim Inputmaterial mit der stärkeren Zerkleinerung (4mm Siebkorb) höher. Insgesamt war die Gipsfraktion in der überwiegenden Zahl der Versuchsreihen als qualitativ und quantitativ gut zu bezeichnen.

Bei der Papierfraktion wurde u.a. der Aschegehalt als Indikator für mineralische Bestandteile (Gips und Füller) ermittelt. Es zeigt sich ein deutlich zu hoher Gipsanteil in dieser Fraktion, der eine Verwertung erschwert. Zudem geht der hier noch enthaltene Gips dem Stoffkreislauf verloren. Es sind keine eindeutigen Hinweise aus der Variation der Versuchsparameter in Richtung einer besseren Klassierung erkennbar. Damit sind die Versuchsergebnisse für die Papierfraktion als nicht zufriedenstellend einzustufen. Deshalb wurden im Rahmen des Projektes weitere Versuche mit einem Hochleistungssieb (10G-Linearschwingsieb) der Fa. DSS durchgeführt, die im folgenden Abschnitt dargestellt werden.

3.1.3.6 Versuche mit dem 10G-Linearschwingsieb (Flachdecksieb)

Zur Verbesserung der Trennschärfe insbesondere in Hinblick auf die Papierfraktion wurde eine zweite Siebanlage (10G-Sieb [10-fache Erdbeschleunigung] DSS, Irland) zur Trennung der Fraktionen der aufgeschlossenen GFP als Alternative zum RUSSELL-Sieb getestet. Linearschwingsiebe sind vielseitige Siebmaschinen, bei denen das gesamte Siebaggregat zu einer Linearschwingung angeregt wird: Wichtige Parameter für die Qualität der Absiebung sind: Siebneigung, Schwing-Frequenz und -Amplitude sowie der Winkel der Linearschwingung zum Siebgewebe.

Die Technik zur Durchführung der Versuche ist in Abbildung 37dargestellt.

Abbildung 37 10G-Linearschwingsieb Fa. DSS

Bedingt durch den hohen Eintrag an mechanischer Energie war hier ein noch besserer Trennerfolg der Gipsfraktion von der Papierfraktion zu erwarten. Für die Realisierung weiterer Siebtests im Großversuch wurden die mittels Hammermühle zerkleinerten GFP–Fraktionen zur Test-Facility der Firma DYNAMIC SCREENING SYSTEMS (DSS) nach Tullow in Irland versandt (insgesamt 9 Big Bags mit einem Gesamtgewicht von 1,96 t). Da die Test-Facility aus Auslastungsgründen erst in 2023 zur Verfügung stand, fand die Durchführung des Großversuches mit dem 10G-Sieb der DSS am 07.12.2023 statt. Tabelle **17** gibt eine Übersicht der angelieferten Proben. Tabelle **18** zeigt die Ergebnisse der Siebversuche.

Tabelle 17 Übersicht des versandten Probematerials

Lfd.-Nr.	Bezeichnung	Gewicht brutto
1	R z 8Sk	250 kg
2	R z 8Sk	265 kg
3	R z 4Sk	250 kg
4	R z 4 Sk	200 kg
5	F1 z 8 Sk	265 kg
6	F1 z 8 Sk	240 kg
7	F2 z 8 Sk	205 kg
8	F1 z 4 Sk	105 kg
9	F2 z 4 Sk	180 kg
		1.960 kg

Abbildung 38 Illustration Ergebnisse Linearschwingsieb DSS

Tabelle 18 Mengenbilanz Siebversuche

Lfd.-Nr.	Papierfraktion	Bezeichnung	Gewicht brutto
1	V1	F1 z 8 Sk	157,40
2	V2	F1 z 8 Sk	160,60
3	V3	R z 8Sk	213,00
4	V4	R z 8Sk	199,80
5	V5	R z 4 Sk	100,80
6	V6	V1	25,40
7	V7	F1&2 z 4 Sk	100,40
8	V8	F2 z 8 Sk	160,40
9	V9	R z 4 Sk	129,80
			1.248 kg
Lfd.-Nr.	Gipsfraktion	Bezeichnung	Gewicht brutto
10	Fermacell	kollektiv	262,40
11	Rigips	kollektiv	267,60
			530 kg
		Insgesamt	**1.778 kg**

Auswertung der Versuche im DSS-Technikum

Die Untersuchungsergebnisse der Versuche im DSS-Technikum mit dem 10G-Linearschwingsieb sind in Tabelle **19** dargestellt, die grafische Darstellung ist der Abbildung 39 zu entnehmen.

Tabelle 19 Untersuchungsergebnisse der Versuche bei DSS mit dem 10G-Linearschwingsieb.

Proben bez.	Partition	Fabrikat	Sieb-korb HM	Sieb-masche [µm]	Input [kg]	Output [kg]	Verweilzeit [s]	CaSO4 x 2H2O [%]	TOC [%]
V1	P1	Fe1 z 8	8	308	265	262,4*	600	85,80	3,33
	P2	Fe1 z 8	8	308				85,80	3,52
	P3	Fe1 z 8	8	348				83,30	4,17
	P4	Fe1 z 8	8	1364				61,60	5,26
V2	P1	Fe1 z 8	8	308	240		8,3	85,70	3,32
	P2	Fe1 z 8	8	308				83,80	3,77
	P3	Fe1 z 8	8	348				85,20	3,90
	P4	Fe1 z 8	8	150 - 450				84,00	3,79
V3	P1	Ri z 8	8	308	265	267,6*	630	80,60	2,53
	P2	Ri z 8	8	308				79,20	3,32
	P3	Ri z 8	8	348				80,60	2,84
	P4	Ri z 8	8	150 - 450				75,90	4,00
V4	P1	Ri z 8	8	308	250		330	80,30	2,33
	P2	Ri z 8	8	308				81,60	3,09
	P3	Ri z 8	8	348				81,00	2,79
	P4	Ri z 8	8	150 - 450				76,50	4,12
V5	P1	Ri z 4	4	308	200		215	80,50	3,04
	P2	Ri z 4	4	308				81,10	3,28
	P3	Ri z 4	4	348				80,40	3,21
	P4	Ri z 4	4	150 - 450				77,90	3,69
V6	P1	Fe1 z 8	8	308	WH V1		X	88,40	3,17
	P2	Fe1 z 8	8	308				87,10	3,35
	P3	Fe1 z 8	8	348				85,70	3,70
	P4	Fe1 z 8	8	150 - 450				87,50	3,60
V7	P1	Fe1&2 z 4	4	308	285		675	87,00	3,45
	P2	Fe1&2 z 4	4	308				86,70	3,68
	P3	Fe1&2 z 4	4	348				85,70	4,21
	P4	Fe1&2 z 4	4	150 - 450				86,90	3,84
V8	P1	Fe2 z 8	8	308	205		345	83,30	2,43
	P2	Fe2 z 8	8	308				81,50	3,45
	P3	Fe2 z 8	8	348				82,40	2,69
	P4	Fe2 z 8	8	150 - 450				78,40	4,28
V9	P1	Ri z 4	4	308	250		600	80,30	3,20
	P2	Ri z 4	4	308				81,30	3,43
	P3	Ri z 4	4	348				80,50	3,45
	P4	Ri z 4	4	150 - 450				76,10	4,59

**Vermengt aus allen Gipsen desselben Produzenten*

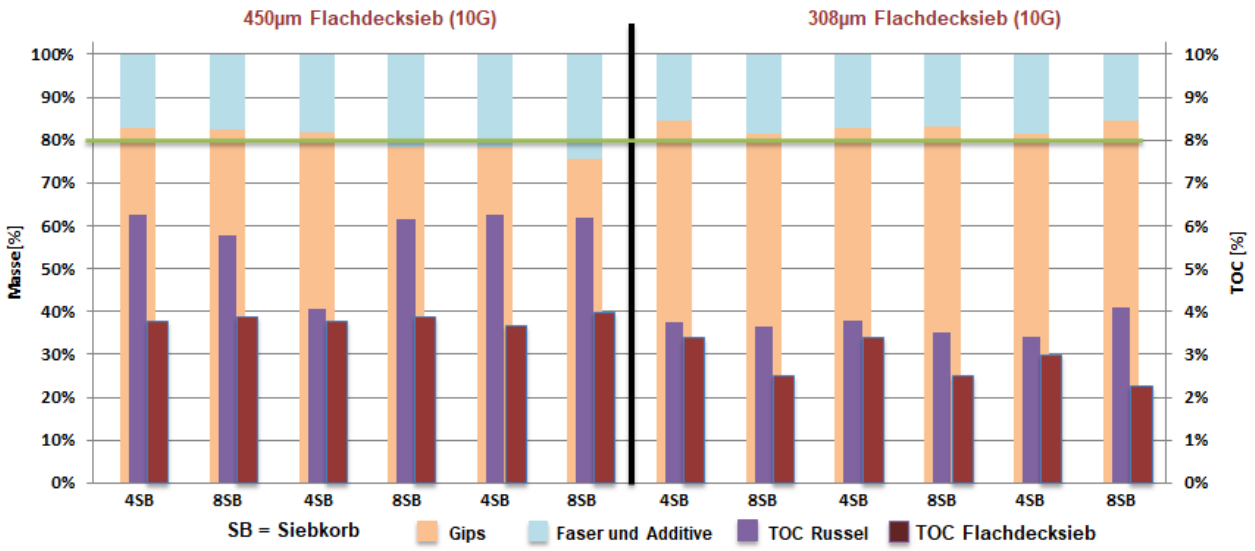


Abbildung 39 Mechanische und chemische Untersuchungsergebnisse der Versuche mit dem 10G-Linearschwingsieb

Die Ergebnisse zeigten bessere Separationsergebnisse mit dem 10G-Linearschwingsieb als mit dem Russell-Sieb. Außerdem wurden die besten Ergebnisse mit der 308 µm Siebmasche erreicht, mit der nahezu durchgängig ein Separationsergebnis von >80 Ma-% im Recyclinggips erreicht wurde, und zwar unabhängig von der Marke. In der Gesamtschau erbrachten die Fermacell-GFP noch etwas günstigere Ergebnisse als die von Rigips. Auch die Ergebnisse für den TOC-Gehalt fielen bei den Versuchen mit dem 10G-Linearschwingsieb besser aus. So konnte ein Minimal-TOC-Werte von 2,33 Ma% erreicht werden, welche dem Ziel von 1,5 Ma% von schon sehr nahe sind. Daher ist das Linearschwingsieb als die optimalere Klassiereinrichtung zu bezeichnen, um die Gips- und die Papierfraktion zu trennen. Es wird davon ausgegangen, dass bei weiteren anlagentechnischen Konfigurationen die Qualität der Abtrennung der Gipsfraktion vom Papier noch weiter verbessert werden kann. Darüber hinaus wurden bereits erste Gespräche mit dem Bundesverband der deutschen Gipsindustrie geführt, inwieweit RC-Gips mit einem TOC-Gehalt von ca. 2,5 Ma% eingesetzt werden können. Dieses wurde als realisierbar eingeschätzt, ist jedoch mit dem jeweiligen Produzenten auf Grund unterschiedlicher Verarbeitungstechnologien im Einzelnen zu klären.

Hingegen war der Gipsgehalt in der Papierfraktion nach wie vor hoch. Zur weiteren Abreinigung der Papierfraktion wurden somit weiterführende Aufbereitungsschritte im Rahmen dieses Projektes durchgeführt.

3.1.3.7 Versuche zur Abreinigung der Papierfraktion im Technikum der Firma TRENNSO

Zur Verbesserung der Papierfraktion im Sinne einer möglichst hochwertigen, stofflichen Verwertung des Papiers sowie einer Erhöhung der Gipsausbeute wurden weitere Trennversuche mit speziellen Techniken vorgenommen. Diese Untersuchungen fanden im Technikum der Firma TRENNSO-Technik GmbH am 19.04.2024, 25.04.2024 und 30.04.2024 in Weißenhorn statt. Ziel war es, durch die hier vorhandenen, unterschiedlichen Trenn- und Zerkleinerungstechniken weitere Gipsanteile aus der Papierfraktion zu entfernen.

Abbildung 40 Technikum Fa. TRENNSO Turbomühle ARES 500

Der Schwerpunkt lag bei den Technikumsversuchen der Firma TRENNSO-Technik GmbH auf den unterschiedlichen Aufbereitungstechniken und deren möglicher Kombinationen. Aus diesem Grund wurde sich auf ein Inputmaterial beschränkt. Der Einfluss des Fabrikates bzw. der gewählten Zerkleinerung wurde bereits in den bisherigen Versuchen dargestellt. Gewählt wurde als Inputmaterial die Papierfraktion, Output 10-Linearschwingsieb, aus dem Versuch 1 (siehe Tabelle **19**). Durch den Einsatz des 8 mm-Siebkorbes bei der Hammermühle sind die Fasern bei dieser Fraktion weniger stark zerkleinert. Es war also davon auszugehen, dass damit eine dem ersten Siebvorgang nachgeschaltete Trennungsstufe der Papierfraktion bessere Ergebnisse liefert.

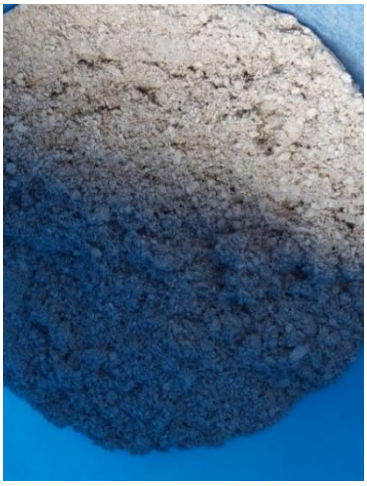


Abbildung 41 Papierfraktion Versuch 1 DSS Irland Inputmaterial Versuche TRENNSO

Im Rahmen der Versuche wurden sowohl Sichtertechnik (Trenntisch, Zick-Zack-Sichter) sowie Siebtechnik (Trommelsieb, Kreisschwingsieb, Vibrations-Taumelsieb) eingesetzt. Nachdem mit den ersten Versuchen nur ein geringer zusätzlicher Abtrenneffekt erzielt werden konnte, wurde das Input-Material über eine Turbomühle ARES 500 gefahren. Es handelt sich hierbei um eine Prallmühle, die mit einem 4,0 mm Spalt eingestellt war. Somit wurden die noch vorhandenen Gipspartikel einer weiteren Prallbeanspruchung ausgesetzt, während die Fasern durch die Größe des Schlagspaltes kaum mechanisch beansprucht waren. Dies sollte eine Verbesserung der Abtrennung über die Korngröße ermöglichen und Gipsanhaftungen an den vorhandenen Fasern lösen.

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht der am 19.04.2024, 25.04.2024 und am 30.04.2024 gefahrenen Testversuche. Die grün markierten Zeilen zeigen die Testversuche, die zu einem verbesserten Trennerfolg geführt haben.

Tabelle 20 Zusammenfassung Versuchsergebnisse Technikum Fa. TRENNSO

Versuch	Versuchsaggregat/ -schritt	Bezeichnung	Aufgabe-material	Abgabefraktionen
V1	Trenntisch	TTS 300/ 1000	F1 z 8Sk / PF DSS-Sieb	96 % Schwerfraktion 0,3% Leichtfraktion 3,6% Filterfraktion
V2	Trommelsiebmaschine	TSM 4 mm	F1 z 8Sk / PF DSS-Sieb	11,7 % Unterkorn 88,3 % Oberkorn
V3	Zick – Zack - Sichter	ZZS 180/400	Überkorn aus V2	79,7% Schwerfraktion 20,3 % Leichtfraktion
V4	Turbomühle	ARES 500	1	
V5	Trommelsiebmaschine	TSM 4 mm	Output V4	75 % Unterkorn 25 % Oberkorn
V6	Turbomühle + Kreisschwing-sieb	ARES 500 + SIK 500/ 1200 - 2	F1 z 8Sk / PF DSS-Sieb	85,2 % Unterkorn 14,8 % Überkorn
V7	Turbomühle + Trommelsiebma-schine	ARES 500 + TSM	F1 z 8Sk / PF DSS-Sieb	70,5 % Unterkorn 29,5 % Überkorn
V8	Turbomühle + Kreisschwing-sieb	ARES 500 + SIK 500/ 1200 - 2	F1 z 8Sk / PF DSS-Sieb	83 % Unterkorn 17 % Überkorn
V9	Vibrationssieb (Taumelsiebma-schine)	SRV 1000	Output V8 Überkorn	3,6 % 0 – 0,5 mm 1,8 % 0,5 – 1,0 mm 94,6 % >1,0 mm
V10	Vibrationssieb (Taumelsiebma-schine)	SRV 1000	Output V8 Unterkorn	84,2 % 0 – 0,5 mm 3,5 % 0,5 – 1,0 mm 12,3 %>1,0 mm

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse kurz zusammengefasst:

Versuch V1:

Auf dem Trenntisch konnte auf Grund der zu geringen Dichteunterschiede keine signifikante, stoffliche Trennung erfolgen. Das Aufgabegut ging mit 96 Ma-% nahezu vollständig in die Schwerfraktion.

Die direkte Trennung des Aufgabegutes auf dem Trenntisch erbrachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse und wurde nicht weiterverfolgt.

Versuch V2:

Die Trommelsiebmaschine mit Rundlochsieb 4,0 mm erzeugte einen stark überkornlastigen Output. Ein Großteil des Gipses verblieb in der Papierfraktion. Die direkte Trennung des Aufgabegutes mit der Trommelsiebmaschine erbrachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse und wurde nicht weiterverfolgt.

Versuch V03:

Der Zick-Zack-Sichter erzeugte ebenfalls eine stark Oberkorn-lastige Abgabefraktion. Ein Großteil des Gipses verblieb in der Papierfraktion. Die direkte Trennung des Aufgabegutes mit dem Zick-Zack-Sichter erbrachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse und wurde nicht weiterverfolgt.

Versuch V04:

Mit der Turbomühle wurde ein anderer verfahrenstechnischer Ansatz getestet. Hierbei wurde das Aufgabegut einer zusätzlichen, schonenden und selektiven Zerkleinerung in der Prallmühle unterzogen. Der Prallspalt, d.h. der Abstand zwischen Schlagleisten und Mühlengehäusewand wurde auf einen Wert von 4,0 mm eingestellt. So kann der sprödbrechende Gips durch Prallbeanspruchung weiter zerkleinert werden. Die elastischeren Papierfasern passieren ohne nennenswerte Beanspruchung die Turbomühle. Im Anschluss kann dann die Klassierung der feinen Gips- und verfilzten Papierfraktion mit dem Ziel der besseren stofflichen Trennung erfolgen.

Versuch V05:

Die Siebung des Zerkleinerungsproduktes aus V04 mit der gleichen Trommelsiebmaschine (Rundlochsieb, 4,0 mm Siebweite) wie in V02 zeigte ein deutlich besseres Mengenverhältnis in der stofflichen Trennung. Es war deutlich mehr Gipsprodukt in der Unterkornfraktion zu finden.

Versuch V06:

Um die Ausbeute der Trennung weiter zu erhöhen, wurde das Zerkleinerungsprodukt aus V04 mit einem intensiveren Kreisschwingsieb mit Sieblochweite 4,0 mm abgesiebt.

Der Anteil des Unterkorns konnte so um ca. 10 % erhöht werden. Die nachgelagerte $CaSO_4$ – und TOC-Analyse zeigte jedoch, dass im Vergleich zu V05 der $CaSO_4$-Gehalt im Unterkorn sinkt und der TOC-Gehalt steigt. Es ist somit zu vermuten, dass durch die Intensivere Siebung mehr Papier in den Unterkornbereich abgegeben wird.

Versuch V07:

In Versuch V07 wurde der Versuch V04 auf der Trommelsiebmaschine mit einer größeren Produktmenge wiederholt, um statistische Sicherheit zu erlangen. Die Gipsausbeute in der Unterkornfraktion war ca. 5% schlechter als in V04. Ebenso verschlechterten sich die Werte für die Gips- und TOC-Gehalte im Unterkorn.

Versuch V08:

In Versuch V08 wurde der Versuch V06 auf der Kreisschwingsiebmaschine mit einer größeren Produktmenge wiederholt, um statistische Sicherheit zu erlangen. Die Gipsausbeute in der Unterkornfraktion war vergleichbar mit denen aus Versuch V06. Die Werte für die Gips- und TOC-Gehalte im Unterkorn waren ebenso vergleichbar. Damit war die Papierfraktion, nach Aufbereitung des Zerkleinerungsproduktes mit dem Kreisschwingsieb, deutlich besser, enthielt aber mit > 50% noch zu viel Gips im Überkorn.

Versuch V09:

In Versuch V09 wurde das Überkorn aus Versuch V08 mit einem Linear-Schwingsieb nachgereinigt. Somit konnte in der Papierfraktion ein Restgipsgehalt von 47,6 % erreicht werden. Der entwickelte Prozess wird zusammen mit den Analyseergebnissen in der folgenden Abbildung gezeigt.

Versuch V10:

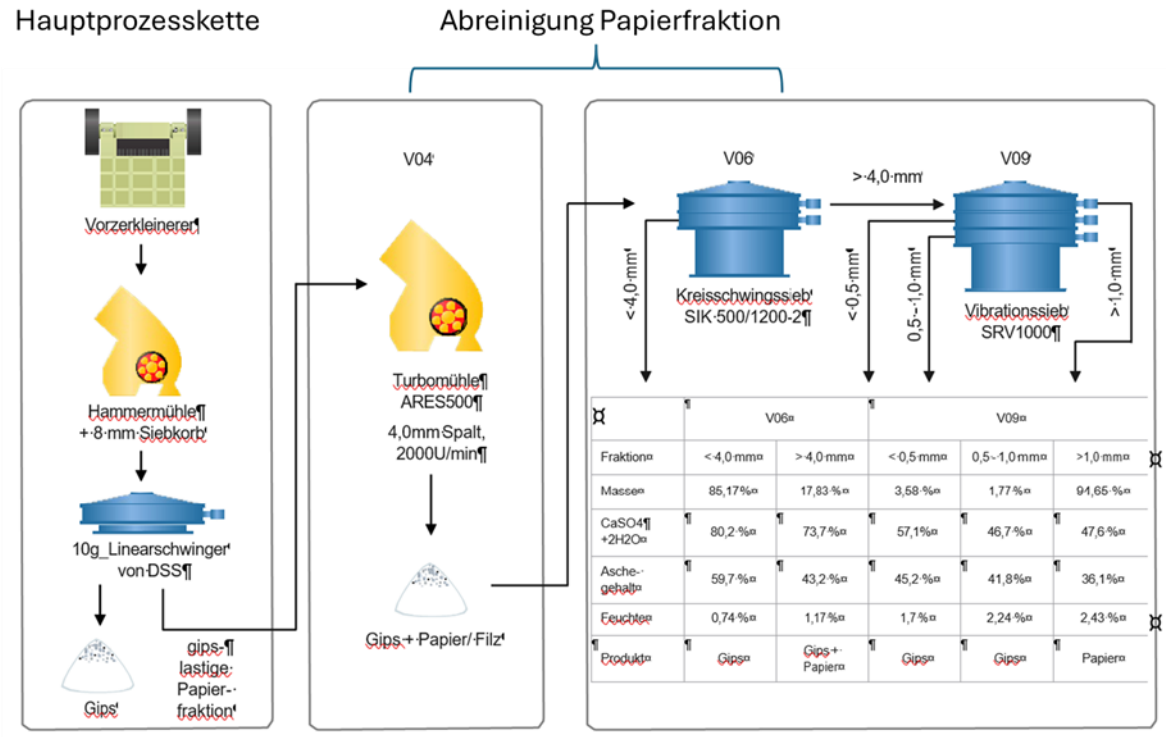
In Versuch V10 wurde das Unterkorn aus Versuch V08 mit einem Linear-Schwingsieb nachgereinigt. Es konnte kein signifikanter Effekt auf die Papierabtrennung beobachtet werden.

Zusammenfassung

Mit der untersuchten Verfahrensweise kann der Gipsgehalt in der Papierfraktion auf rein mechanischem Weg auf < 50 % abgesenkt werden (siehe V09). Eine weitere Absenkung des Gipsgehaltes mit mechanischen Verfahrensstufen ist theoretisch möglich, wurde jedoch zum derzeitigen Zeitpunkt auf Grund der erforderlichen zusätzlichen Aufbereitungsschritte wirtschaftlich kritisch gesehen.

3.1.4 Ableitung einer Prozesskette für die großtechnische Realisierung

Aus den unter Pkt. 3.1.3 beschrieben Versuchen zur mechanischen Aufbereitung von GFP lässt sich eine Prozesskette ableiten, auf deren Basis eine Umsetzung in einer Pilotanlage erfolgen könnte.



	V06		V09		
Fraktion	< 4,0 mm	> 4,0 mm	< 0,5 mm	0,5 - 1,0 mm	> 1,0 mm
Masse	85,17 %	17,83 %	3,58 %	1,77 %	94,65 %
CaSO4 +2H2O	80,2 %	73,7 %	57,1%	46,7 %	47,6 %
Asche-gehalt	59,7 %	43,2 %	45,2 %	41,8%	36,1%
Feuchte	0,74 %	1,17 %	1,7 %	2,24 %	2,43 %
Produkt	Gips	Gips + Papier	Gips	Gips	Papier

Abbildung 42 Prozesskette zur Aufbereitung von GFP

Der Aufarbeitungsprozess des Gips-Papier-Verbundes beginnt mit der Zerkleinerung bestehend aus Vor- und Hauptzerkleinerung. Der Einsatz einer Vorzerkleinerung ist essenziell, da die GFP auch in sehr großen Formaten angeliefert werden und in diesen Zuständen den Prozess nicht durchlaufen können. Bei der Vorzerkleinerung erfolgt noch keine Trennung in die einzelnen Bestandteile, sondern lediglich eine Zerkleinerung in die weiter verarbeitbaren Größen. In der Bestandsanlage der MUEG mbH erfolgt dieser Prozessschritt mit einem Zweiwellenzerkleinerer (z.B. Fabrikat Eurek).

Der Aufschluss des Gips-Papier-Verbundes der GFP erfolgt danach in der Hammermühle. Wie in Absatz 3.1.3.4 ausführlich erläutert, hat sich in den Technikumsversuchen die Hammermühle vom Typ HM 342, der Fa. Jehmlich GmbH als effizient gezeigt. In diesem Prozessschritt wird das vorzerkleinerte Material in die einzelnen Bestandteile aufgebrochen und weiter zerkleinert, um im Anschluss über einen Siebungsprozess in die einzelnen Komponenten getrennt werden zu können.

Die optimale Trennung der GFP-Hauptkomponenten Gips und Papier wurde in Technikumsversuchen durch eine Siebung mit dem 10G-Linearschwingsieb der Fa. DSS erreicht, wie in Absatz 3.1.3.6 beschrieben. Der dargelegte Prozess kann an diesem Punkt als beendet angesehen werden, da nun die zwei gewünschten Fraktionen vorliegen, 80% verwertbarer Gips und 20% Papier.

Jedoch bestehen noch Optimierungschancen, in Bezug auf die Siebbelegung und die Verweilzeiten des Materials auf dem 10G-Linearschwingsieb.

Die separierte Gipsfraktion ist qualitativ hochwertig und kann voraussichtlich in diesem Zustand, mit einem erreichten Minimalwert des TOC-Gehaltes von 2,33 Ma%, als RC-Material in der Gipsindustrie eingesetzt werden.

Durch die hohe Verunreinigung der Papierfraktion durch verbliebene Gipsrückstände, sind zusätzliche Verfahrensschritte erforderlich. In ersten Versuchsreihen wurde dies im Rahmen dieses Forschungsprojektes bereits getestet (Punkt 3.1.3.7). Dabei konnten noch keine zufriedenstellenden Ergebnisse dahingehend erzielt werden, dass keine hochreine Papierfraktion erzeugt wurde. Die Versuche haben jedoch gezeigt, dass eine Abreinigung der Papierfraktion auf dem mechanischen Wege möglich ist. Um diesbezüglich eine stofflich verwertbare Papierfraktion zu erhalten, ist weiterer Forschungsbedarf unabdingbar. In dem derzeitigen Zustand kann dies z.B. als Füllstoff in der GFP-Industrie eingesetzt werden. Zum jetzigen Zeitpunkt stellt sich eine nachgeschaltete Aufbereitung der Papierfraktion wirtschaftlich kritisch dar.

3.1.5 Versuche zur Nassaufbereitung

Die Nassaufbereitung wurde als eine Alternativvariante zu den rein mechanischen Verfahren zur Aufbereitung von GFP ebenfalls betrachtet und mit entsprechenden Versuchen untersetzt.

Die Versuche zur Nassaufbereitung von vorsortierten, vorzerkleinerten GFP wurden bei der Firma Repa Boltersdorf GmbH in Zusammenarbeit mit der RIG – rve Industrie GmbH am 16.11.2021 durchgeführt. Beim Versuch kam die s.g. Codukte®-Technologie für Aufbereitung zum Einsatz. Die Codukte®-Technologie dient der Aufbereitung schwer aufschließbarer Faserstoffe mittels intensivem Wasch- und Separationsvorgang. Ziel der Untersuchungen war es, einen möglichst geschlossenen Kreislauf zu erarbeiten, bei dem zuerst die Gipsfaserplatte in alle ihre Bestandteile zerlegt wird und im nächsten Schritt alle Bestandteile dem Recycling oder der Wiederverwendung zugeführt werden.

Der Codukte® Perkolator ist das einzige Gerät, das dynamisch perkoliert (das statische Perkolieren ist auch aus dem Bereich der Vergärung bekannt). In beiden Fällen handelt es sich um ein spezielles Extrahieren, was auf dem Grundprinzip eines intensiven Waschvorgangs basiert.

Das Oberkorn eines Pulpers wird über eine Grobstoffpumpe der Mischkammer zugeführt und von dort in den Reaktor gefördert. Hier erfährt es eine intensive Entstoffung. Durch Umwälzung wird das Oberkorn schonend einer extrem starken Friktion ausgesetzt. Die Freifaserstoffe werden kontinuierlich ausgetragen. Die Begleitstoffe werden ebenfalls kontinuierlich ausgeschleust. Am Ende der Waschzyklen wird der Codukte®-Aufbereiter fast vollständig geleert. Die Begleitstoffe können ohne weiteren Entwässerungsbedarf kompaktiert werden.

Versuchsdurchführung

Es wurde ein Aufbereitungsansatz entwickelt für Gipsfaserplatten unter Einbeziehung einer Codukte® Komponente, dem Codukte® Perkolator, sowie diverser Standardkomponenten nachfolgendem Prinzip:

1. Materialzufuhr
2. Perkolation mit Faserstoffabzug und Gipsaustrag
3. Entlüftung
4. Gipsabscheidung unter Zuhilfenahme von Flockungsmittel I
5. Prozesswasserreinigung unter Einbindung eines 2. Flockungsmittels, plus Rückführung des gereinigten Prozesswassers
6. Schlammeindickung

Die Versuche wurden in analoger Vorgehensweise durchgeführt unter Nutzung eines 20L Perkolators. Das Material wurde nach Vorbefeuchtung über das Eintragssystem (Aufgabeband und Aufgabetrog) dem Perkolator zugeführt und anschließend perkoliert. Am Unterlauf wurde der Gips in den Auffangbehälter abgezogen. Anschließend wurde das Oberkorn (Faserstoff) ausgetragen.

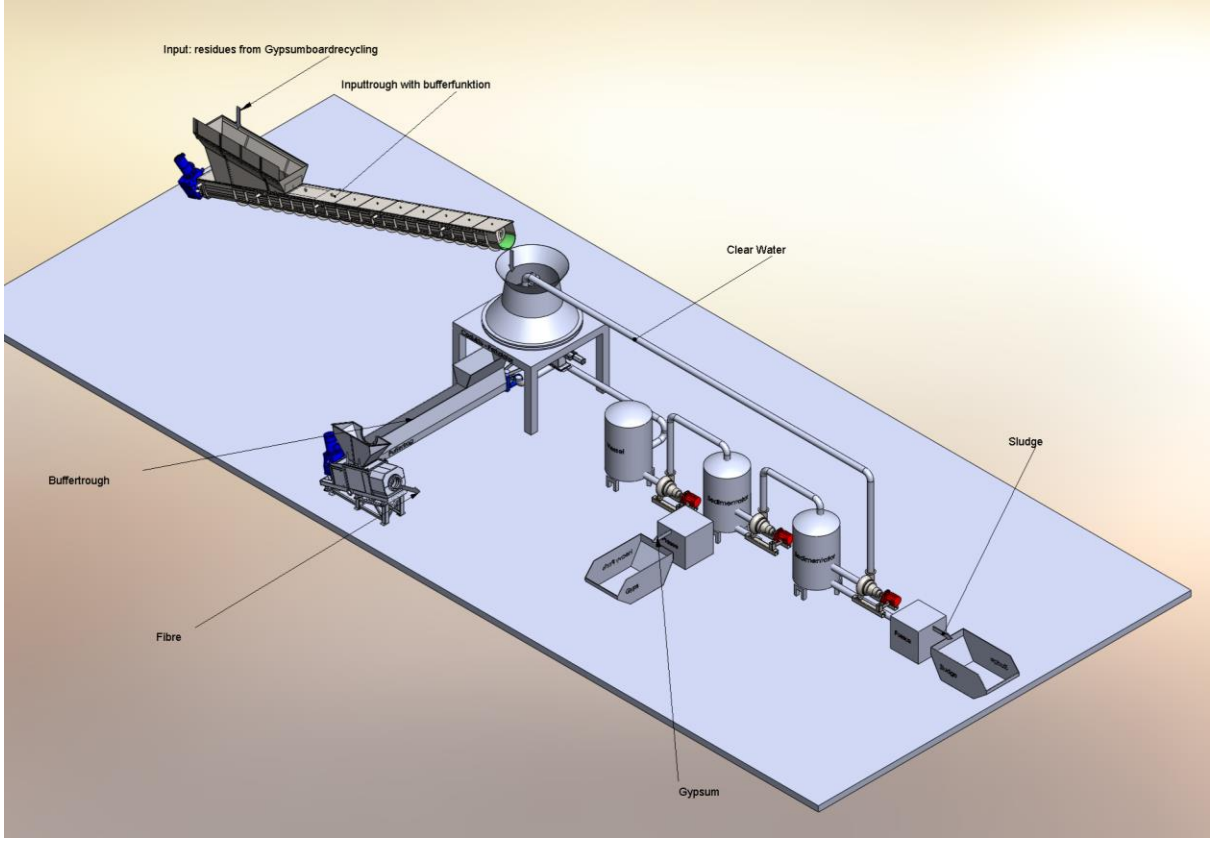


Abbildung 43 Technische Versuchsanordnung Perkolationsversuch

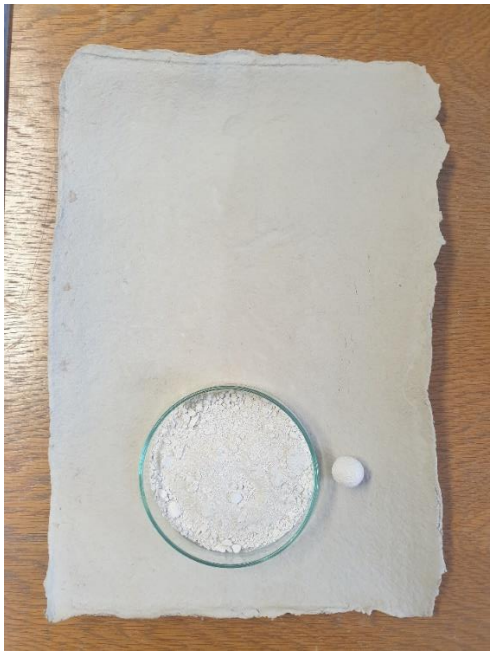


Abbildung 44 Gipsschlamm getrocknet (links), Faserstoff gereinigt (rechts)

Abbildung 45 Perkolat A und B im Imhofftrichter

Abbildung 46 : Perkolat ungerührt und abgesetzt (links), Perkolat gerührt (rechts)

Abbildung 47 Perkolierter Faserstoff aus Grobfraktion mit Begleitstoffen

Beide Fraktionen wurden der Analytik zugeführt. Folgende Parameter wurden an drei Proben untersucht

- Trockenrückstand (DIN EN 14346 (2007-3))
- Eluierbarkeit (DIN EN 12457-4 (2003-01))
- Sulfat (DIN EN ISO 10304-1 (2009-07))

Es wurden mehrere Versuche durchgeführt, in denen sich interativ an eine optimierte Vorgehensweise der Nassaufbereitung angenähert wurde.

Die Versuche umfassten Untersuchungen mit „pre consumer“ und „post consumer“ Gipsfaser-platten. Pre-Consumer-Recycling verwertet Abfälle, die bei der industriellen Verarbeitung von Neumaterial anfallen. Das überschüssige, aber nach wie vor fabrikneue Material wurde gesammelt, mit anderem Neumaterial vermengt und für den nächsten Produktionsgang genutzt. Das genaue Gegenteil passiert beim Post-Consumer-Recycling. Es verarbeitet Abfälle, die vom Endverbraucher genutzt wurden und anschließend in den Recycling-Kreislauf gelangen.

Durchgeführte Versuche

Versuch mit Gipsfaserplatten „pre consumer“ am 15.2.2022 mit 20L Perkolator

Input: 4,13 Kg Gipsfaserplatten, gestückelt, pre consumer TG (angenommen: 84%) = 3,470 Kg otro

Versuchsablauf: Der Perkolator wurde bis zum Flansch mit Wasser gefüllt und das Material (4,13 Kg Gipsfaserplatten, „pre consumer“) eingetragen. Danach wurde der Perkolatorunterlauf geöffnet, der Wasserzulauf geöffnet und auf 80 l/h eingestellt. Um 8:55h wurde der Wasserzulauf auf 120 l /h erhöht, um den Gips besser auszuwaschen. Um 9:00h wurde der Versuch beendet, weil der Unterlauf klar wurde und somit kein Gipsaustrag mehr stattfand.

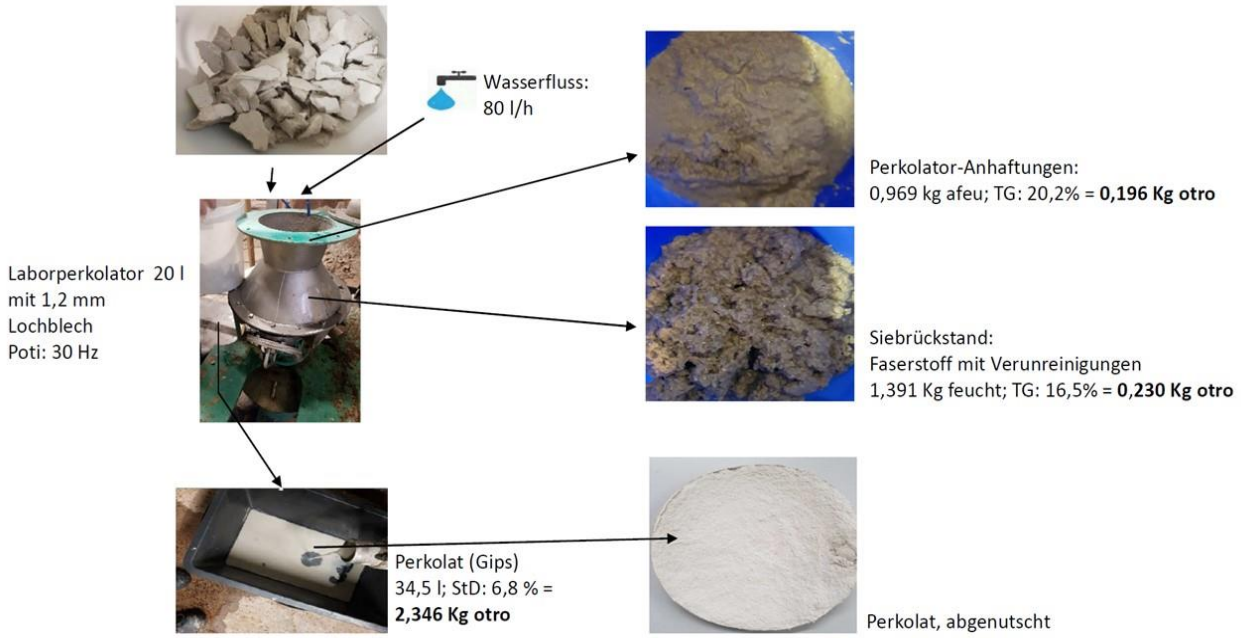


Abbildung 48 Eckdaten des Perkolator-Versuchs mit „pre consumer“ GFP

Versuch mit Gipsfaserplatten „post consumer“ am 17.3.2022 mit 20L Perkolator

Input: 5,337 kg GFK, gestückelt, „post consumer“ TG (angenommen: 84 %) = 4,483 kg otro

Versuchsablauf: Es wurde eine vergleichbare Versuchsanordnung gewählt, allerdings mit einer geringeren Drehzahl. Der Perkolator wurde bis zum Flansch mit Wasser gefüllt und das Material (5,337 Kg Gipsfaserplatten, „post consumer“) eingetragen. Danach wurde der Perkolatorunterlauf geöffnet, der Wasserzulauf geöffnet und auf 80 l/h eingestellt. Die Gipsfaserplatten wurden bis 9:41h eingetragen. Um 10:00h wurde der Versuch beendet, weil nur noch Fasern im Unterlauf ausgetragen wurden.

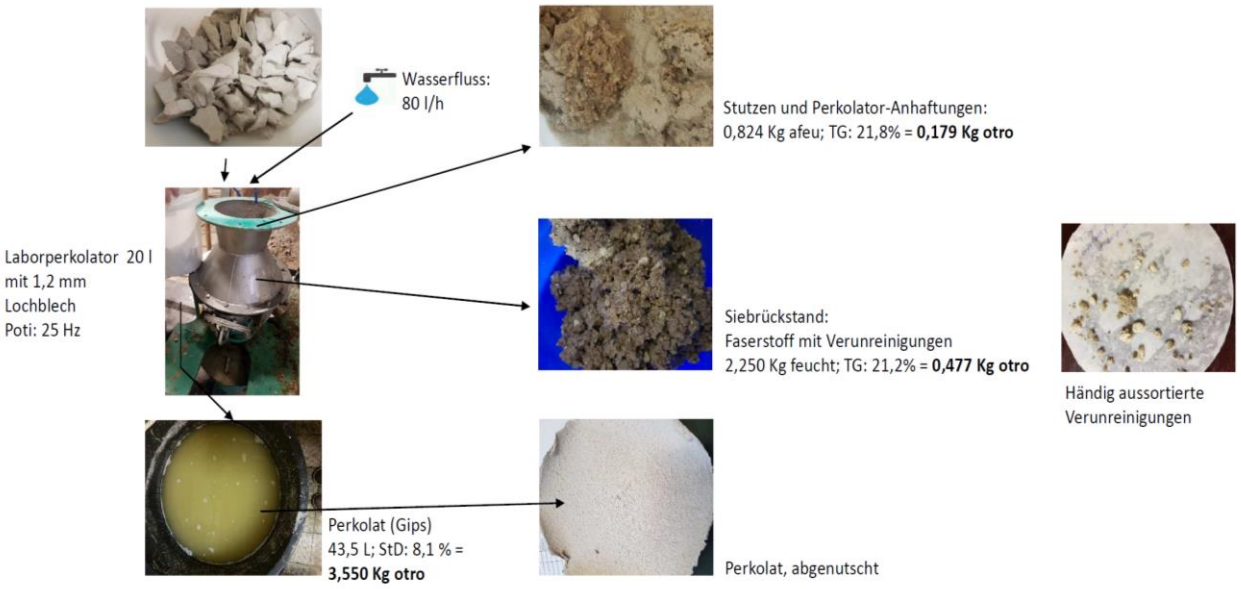


Abbildung 49 Eckdaten des Perkolator-Versuchs mit „post consumer“ GFP

Ergebnisse der Vorversuche zur Nassaufbereitung

Versuch mit Gipsfaserplatten „pre consumer“ am 15.2.2022 mit 20L Perkolator

Input: 4,13 kg GFK, gestückelt, pre consumer TG (angenommen: 84%) = 3,470 kg otro

Faserseparierung mit Haindl Fraktionator und Bauer Mc Nett Zelle 200er Sieb

Tabelle 21 Perkolatrückstand (Sieb)

	Versuch 1	Versuch 2		⌀ in g	⌀ in %	
R 0,15	5,452 g	5,687 g		5,570 g	54,2 %	
R 200	4,871 g	4,546 g		4,709 g	45,8 %	Fasern
∑	10,323 g	10,233 g		10,279 g		
D 200	0	0		0		

Die Fraktion „R 0,15“ besteht aus kleinen Kunststoffteilchen, Gummiteilchen, Gipsstücken und Papierlangfasern und gegebenenfalls auch Textilfasern (Synthesefasern).

- *Faserseparierung mit Haindl Fraktionator und Bauer Mc Nett Zelle 200er Sieb.*

Die Anhaftungen (Perkolatorrand) wurden abweichend von der DIN 20 g otro genommen.

Tabelle 22 Ergebnisse der Separationsversuche 1

	Versuch 1	Versuch 2		⌀ in g	⌀ in %	
R 0,15	3,585 g	3,053 g		3,319 g	16,60 %	
R 200	4,314 g	3,525 g		3,920 %	19,60 %	Fasern
∑	7,909 g	6,578 g		7,239 %		
D 200	12,001 g	13,422 g		12,761 %	63,80 %	Gips

Der mittels Perkolationsversuch extrahierte Gipsanteil lag bei diesem Versuch deutlich unterhalb des Recyclingziels von 80 Ma-%.

- *Faserseparierung mit Haindl Fraktionator und Bauer Mc Nett Zelle 200er Sieb*

Perkolat: Von 34,6 l Perkolat ca. 20 l Wasser abgeschöpft (dekantieren). Es blieben 15 l Perkolat über. Davon wurden 100 ml fraktioniert, abweichend von der DIN 15,64 g otro genommen.

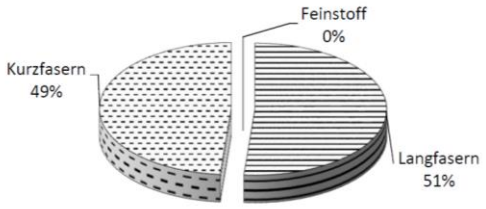
Tabelle 23 Ergebnisse der Separationsversuche 2

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 2	⌀ in g	⌀ in %	
R 0,15	1,485 g	1,357 g	1,474 g	1,439 g	9,2 %	
R 200	3,654 g	3,725 g	2,844 g	3,408 g	21,8 %	Fasern
∑	5,139 g	5,082 g	4,318 g	4,847 g		
D 200	10,501 g	10,558 g	11,322 g	10,793 g	69 %	Gips

Der mittels Perkolationsversuch extrahierte Gipsanteil lag bei diesem Versuch deutlich unterhalb des Recyclingziels von 80 Ma-%.

Faserqualität – nur Fasern ohne Feinstoff, mit Haindl Fraktionator und Bauer Mc Nett Zellen. Perkolatrückstand (Sieb), Abweichend von der DIN die gesamte R200 Fraktion von der vorhergehenden Faserseparierung genommen

	Versuch 1		
R 0,15	0 g		
R 16	1,686 g	}	51,4 % Langfasern
R 30	3,668 g		
R 50	3,537 g	}	48,6 % Kurzfasern
R 200	1,539 g		
∑	10,430 g		
D 200	0		



Faserqualität
Perkolat

	Versuch 1		
R 0,15	0 g		
R 16	0,369 g	}	9,3 % Langfasern
R 30	0,061 g		
R 50	2,497 g	}	90,7 % Kurzfasern
R 200	1,659 g		
∑	4,586 g		
D 200	0		

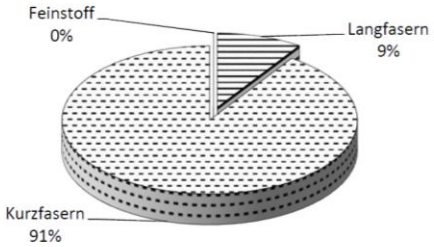


Abbildung 50 Ergebnisse der Untersuchungen zur Faserqualität

Für die Faserqualitätsbestimmung wurde nur die bei der zuvor durchgeführten FFR gewonnene R 200 Fraktion genommen. Daher fand sich kein Feinstoff und keine R 0,15 Fraktion mehr. Auf die DIN Norm (10 g otro) wurde verzichtet.

Im letzten Schritt wurden Veraschungsversuche bei 550° mit getrocknetem Siebrückstand, getrockneten Anhaftungen, getrocknetem Perkolat und Referenzmaterialien (Modellgips, Papier) durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

- *Veraschung von getrocknetem Siebrückstand bei 550°*

Tabelle 24 Ergebnisse der Veraschungsversuche Siebrückstand

Versuch 1	30 Minuten		T [g]:	12,16	A1 [g]:	12,67	A [g]:	0,51	AG [%]	51
Versuch 2	30 Minuten		T[g]:	23,04	A1 [g]:	23,59	A [g]:	0,55	AG [%]	55
Versuch 3	30 Minuten		T [g]:	15,02	A1 [g]:	15,55	A [g]:	0,53	AG [%]	53
									Mittelwert	53
Der Aschegehalt beträgt 53 %										

- *Veraschung von getrockneten Anhaftungen bei 550°*

Tabelle 25 Ergebnisse der Veraschungsversuche Anhaftungen

Versuch 1	30 Minuten		T [g]:	12,16	A1 [g]:	12,92	A [g]:	0,76	AG [%]	76
Versuch 2	30 Minuten		T[g]:	23,04	A1 [g]:	23,83	A [g]:	0,79	AG [%]	79
Versuch 3	30 Minuten		T [g]:	15,02	A1 [g]:	15,78	A [g]:	0,76	AG [%]	76
									Mittelwert	77
Der Aschegehalt beträgt 77 %										

- *Veraschung von getrocknetem Perkolat bei 550°*

Tabelle 26 Ergebnisse der Veraschungsversuche getrocknetes Perkolat

Versuch 1	30 Minuten		T [g]:	12,16	A1 [g]:	12,95	A [g]:	0,79	AG [%]	79
Versuch 2	30 Minuten		T[g]:	23,04	A1 [g]:	23,84	A [g]:	0,8	AG [%]	80
Versuch 3	30 Minuten		T [g]:	15,02	A1 [g]:	15,8	A [g]:	0,78	AG [%]	78
									Mittelwert	79
Der Aschegehalt beträgt 79 %										

- *Als Referenz: Veraschung von Modellgips von Krone*

Tabelle 27 Vergleichswerte aus der Literatur 1

Versuch 1	30 Minuten	T [g]:	12,16	A1 [g]:	13,09	A [g]:	0,93	AG [%]	93
Versuch 2	30 Minuten	T[g]:	23,04	A1 [g]:	23,97	A [g]:	0,93	AG [%]	93
Versuch 3	30 Minuten	T [g]:	15,02	A1 [g]:	15,95	A [g]:	0,93	AG [%]	93
							Mittelwert		93
Der Aschegehalt beträgt 93 %									

- Als Referenz: Veraschung von Papier (Zeitschrift VDI Nachrichten)

Tabelle 28 Vergleichswerte aus der Literatur 2

Versuch 1	30 Minuten	T [g]:	28,29	A1 [g]:	28,33	A [g]:	0,034	AG [%]	3,4
							Mittelwert		3,4
Der Aschegehalt beträgt 3,4 %									

Die Ergebnisse der Veraschungsversuche zeigten, dass für alle untersuchten Materialien im Vergleich zum Referenzmaterial Modellgips ein deutlich geringerer Aschegehalt erzeugt wird. Naturgemäß entsteht bei der Veraschung des Papiers der geringste Ascheanteil, der mit dem geringeren Ascheanteil im Siebrückstand korreliert.

Versuchsauswertung

Stoffdichteermittlung Perkolat (34,5 l):

StD1: 6,2 %, StD2: 8,0 %, StD3: 6,1 %, ⌀ 6,8 %

Trockengehalt Perkolatorrückstand:

TG1: 16,8 %, TG2: 15,7 %, TG3: 16,9 %, ⌀ 16,5 %

Trockengehalt Anhaftungen:

TG1: 20,1 %, TG2: 22,3 %, TG3: 18,1 %, ⌀ 20,2 %

Bei diesem Versuch wurde eine zu hohe Drehzahl gewählt, dadurch entstand eine zu geringe Eintragsmenge in den Perkolator. Dadurch kam es zum Spritzen und am Rand des Perkolators zu Ablagerungen, die gesondert als „Anhaftungen“ gesammelt wurden. Zu den Randanhaftungen wurde auch die Fraktion aus dem abgesperrten Stutzen gegeben.

Perkolat (Gips) 34,5 l; StD: 6,8 % = **2,346 Kg otro**

Faseranteil: 9,2 % = 511 g
Schmutzanteil: 21,8 % = 216 g
Gipsanteil: 69 % = 1619 g
∑: 2346 g

Siebrückstand:
Faserstoff mit Verunreinigungen
1,391 Kg feucht; TG: 16,5% = **0,230 Kg otro**

Faseranteil: 45,8 % = 105 g
Schmutzanteil: 54,2 % = 125 g
Gipsanteil: 0
∑: 230 g

Perkolatoranhaftungen:
0,969 Kg afeu; TG: 20,2% = **0,196 Kg otro**

Faseranteil: 16,9 % = 33 g
Schmutzanteil: 19,6 % = 38 g
Gipsanteil: 63,5 % = 125 g
∑: 196 g

Faseranteil: 23,4 % = 649 g
Schmutzanteil, Sortierreste: 13,7 % = 379 g
Gipsanteil: 62,9 % = 1744 g
∑: = 2772 g

Abbildung 51 Versuchungsauswertung Versuch „pre-costumer“

Der ermittelte Trockenrückstand lag zwischen 23 und 50 Ma.-% OS. Der Sulfatgehalt wurde einheitlich mit 1560 mg/l im Eluat ermittelt und zeigte bereits hier eine der großen Herausforderungen der Gipsaufbereitung an, die hohen Sulfatkonzentrationen. Der Mahlgrad der Fasern lag bei 18/19, d.h. ein hohes Festigkeitspotential ist für die Fasern gegeben. Im Übrigen ergaben die Laboruntersuchungen keine belastbaren Ergebnisse, die eine großtechnologische Anwendung ermöglichen würden.

Während des Versuchs wurden 1744 g Gipsanteil-Austrag im Perkolat erzielt, d.h. 62,9%. Der Anteil des Austrags von Fasern betrug 23,4 %, bei 13,7% Schmutzanteil. Im Vergleich zum Gesamtinput 4130 g betrug der Anteil des zurückgewonnenen Gipses 42,2%. Außerdem ist eine weitere Aufbereitung des Gipsschlamms nötig, z.B. durch Eindickung und ggf. Bearbeitung mit einer Filterpresse, was aber zusätzlichen Energieaufwand erfordert. Insgesamt stellt die Schwefelkonzentration allerdings bei diesem Prozess eine Herausforderung dar. Das ermittelte technologische Setting der Nassaufbereitung setzt somit den Betrieb einer Abwasserbehandlungsanlage voraus. Die MUEG hat zwar eine solche Anlage in 3 km Entfernung von der Gipsrecyclinganlage, diese arbeitet aber mit Flockungsmitteln, d.h. basiert auf einer chemischen Aufbereitung. Ob der Schwefelgehalt im Faserstoff für eine Papierfabrik akzeptabel ist, oder ob er stärker abgetrennt werden müsste, z.B. entweder durch längeres Perkolieren oder durch eine externe Wäsche (z. B Taumelsieb), muss in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

Versuch mit Gipsfaserplatten „post consumer“ am 17.3.2022 mit 20L Perkolator

Input: 5,337 kg GFK, gestückelt, „post consumer“ TG (angenommen: 84 %) = 4,483 kg otro Faserstoffseparierung mit Somerville Fraktionator und Bauer Mc Nett Zelle 200er Sieb

- Perkolatorrückstand (Sieb)

Tabelle 29 Ergebnisse der Separationsversuche Perkolatorrückstand (Sieb)

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	⌀ in g	⌀	
R 0,15	3,045 g	3,985 g	4,717 g	3,915 g	15,7 %	
R 200	3,871 g	4,391 g	4,394 g	4,218 g	16,9 %	Fasern
∑	6,916 g	8,376 g	9,111 g			
D 200	18,084 g	16,624 g	15,889 g	16,865 g	67,4 %	

Faserstoffseparierung mit Somerville Fraktionator und Bauer Mc Nett Zelle 200er Sieb

- Anhaftungen (Perkolatorrand + Stutzen)

Tabelle 30 Ergebnisse der Separationsversuche Anhaftungen

	Versuch 1	Versuch 2		Versuch 3	⌀ in g	⌀ in %	
R 0,15	1,696 g	1,845 g		1,912 g	1,817 g	7,3 %	
R 200	2,127 g	2,277 g		2,194 g	2,199 g	8,8 %	Fasern
∑	3,823 g	4,122 g		4,106 g			
D 200	21,177 g	20,878 g		20,894 g	20,983 g	83,9 %	Gips

Faserstoffseparierung mit Somerville Fraktionator und Bauer Mc Nett Zelle 200er Sieb

- Perkolat

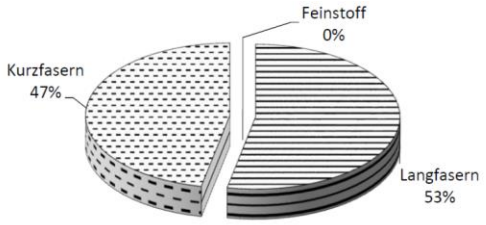
Tabelle 31 Ergebnisse der Separationsversuche Perkolat

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	⌀ in g	⌀ in %	
R 0,15	1,285 g	1,418 g	1,234 g	1,312 g	5,2 %	
R 200	2,26 g	2,332 g	2,321 g	2,304 g	9,2 %	Fasern
∑	3,545 g	3,750 g	3,555 g	3,616 g		
D 200	21,455 g	21,250 g	21,445 g	21,383 g	85,6 %	Gips

Faserqualität – nur Fasern ohne Feinstoff mit Haindl Fraktionator und Bauer Mc Nett Zellen

Perkolatrückstand (Sieb), Abweichend von der DIN die gesamte R200 Fraktion von der vorhergehenden Faserfraktionierung genommen

		[g]	[%]		[%]	
R 0,15mm		0,070	0,70			Reste
R 16		1,448	14,48	}	53,2	Langfasern
R30		4,517	45,17			
R50		3,680	36,80	}	46,8	Kurzfasern
R200		1,575	15,75			
S		11,290				
D200		0,000	0,00		0,0	Feinstoff



Faserqualität
Anhaftungen

		[g]	[%]		[%]	
R 0,15mm		0,050	0,50			Reste
R 16		0,857	8,57	}	40,0	Langfasern
R30		4,506	45,06			
R50		5,022	50,22	}	60,0	Kurzfasern
R200		3,022	30,22			
S		13,457				
D200		0,000	0,00		0,0	Feinstoff

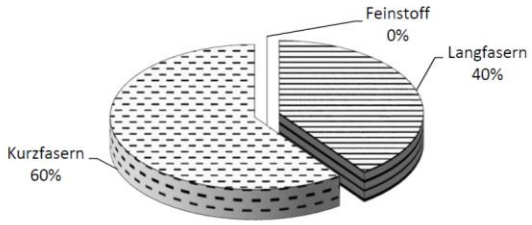


Abbildung 52 Ergebnisse der Untersuchungen zur Faserqualität 1

Für die Faserqualitätsbestimmung wurde nur die bei der zuvor durchgeführten FFR gewonnene R 200 Fraktion genommen, daher kein Feinstoff und keine R 0,15 Fraktion mehr. Auf die DIN (10 g otro) wurde verzichtet.

Faserqualität – nur Fasern ohne Feinstoff mit Haindl Fraktionator und Bauer Mc Nett Zellen, Perkolat, Abweichend von der DIN, wurde die gesamte R200 Fraktion von der vorhergehenden Faserfraktionierung genommen.

		[g]	[%]		[%]	
R 0,15mm		0,070	0,70			Reste
R 16		1,448	14,48	}	53,2	Langfasern
R30		4,517	45,17			
R50		3,680	36,80	}	46,8	Kurzfasern
R200		1,575	15,75			
S		11,290				
D200		0,000	0,00		0,0	Feinstoff

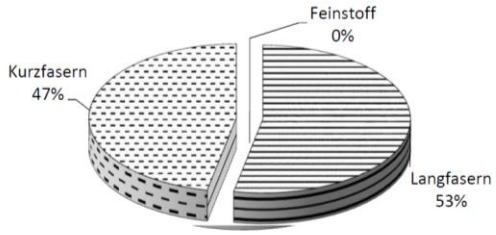


Abbildung 53 Ergebnisse zur Untersuchung der Faserqualität 2

- *Veraschung von getrocknetem Siebrückstand bei 550°*

Tabelle 32 Ergebnisse der Veraschungsversuche Siebrückstand

Versuch 1	30 Minuten		T [g]:	12,16	A1 [g]:	12,73	A [g]:	0,57	AG [%]	57
Versuch 2	30 Minuten		T [g]:	23,04	A1 [g]:	23,64	A [g]:	0,60	AG [%]	60
Versuch 3	30 Minuten		T [g]:	15,02	A1 [g]:	15,60	A [g]:	0,58	AG [%]	58
									Mittelwert	58
Der Aschegehalt beträgt 58 %										

- *Veraschung von getrockneten Anhaftungen bei 550°*

Tabelle 33 Ergebnisse der Veraschungsversuche Anhaftungen

Versuch 1	30 Minuten		T [g]:	12,16	A1 [g]:	12,85	A [g]:	0,69	AG [%]	69
Versuch 2	30 Minuten		T[g]:	23,04	A1 [g]:	23,72	A [g]:	0,68	AG [%]	68
Versuch 3	30 Minuten		T [g]:	15,02	A1 [g]:	15,71	A [g]:	0,69	AG [%]	69
									Mittelwert	68,5
Der Aschegehalt beträgt 68,5 %										

- *Veraschung von getrocknetem Perkolat bei 550°*

Tabelle 34 Ergebnisse der Veraschungsversuche Perkolat

Versuch 1	30 Minuten		T [g]:	12,16	A1 [g]:	12,93	A [g]:	0,77	AG [%]	77
Versuch 2	30 Minuten		T[g]:	23,04	A1 [g]:	23,82	A [g]:	0,8	AG [%]	78
Versuch 3	30 Minuten		T [g]:	15,02	A1 [g]:	15,79	A [g]:	0,77	AG [%]	77
									Mittelwert	77,3
Der Aschegehalt beträgt 77,3 %										

- Als Referenz: Veraschung von Modellgips von Krone

Tabelle 35 Vergleichswerte aus der Literatur Modellgips

Versuch 1	30 Minuten	T [g]:	12,16	A1 [g]:	13,09	A [g]:	0,93	AG [%]	93
Versuch 2	30 Minuten	T[g]:	23,04	A1 [g]:	23,97	A [g]:	0,93	AG [%]	93
Versuch 3	30 Minuten	T [g]:	15,02	A1 [g]:	15,95	A [g]:	0,93	AG [%]	93
							Mittelwert		93
Der Aschegehalt beträgt 93 %									

- Als Referenz: Veraschung von Papier (Zeitschrift VDI Nachrichten)

Tabelle 36 Vergleichswerte aus der Literatur Papier

Versuch 1	30 Minuten	T [g]:	28,29	A1 [g]:	28,33	A [g]:	0,034	AG [%]	3,4
							Mittelwert		3,4
Der Aschegehalt beträgt 3,4 %									

Die Ergebnisse der Veraschungsversuche zeigten, dass für alle untersuchten Materialien im Vergleich zum Referenzmaterial Modellgips ein deutlich geringerer Aschegehalt erzeugt wird. Naturgemäß entsteht bei der Veraschung des Papiers der geringste Ascheanteil, der mit dem geringeren Ascheanteil im Siebrückstand korreliert.

Versuchsauswertung:

Stoffdichteermittlung Perkolat (34,5 l):

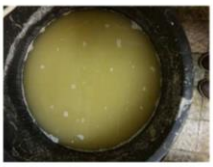
StD1: 8,1 %, StD2: 8,3 %, StD3: 7,9 %, ⌀ 8,16 %

Trockengehalt Perkolatorrückstand:

TG1: 21,2 %, TG2: 22,4 %, ⌀ 21,2

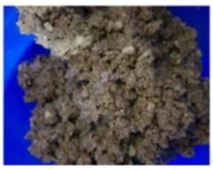
Trockengehalt Anhaftungen:

TG1: 21,5 %, TG2: 20,9 %, ⌀ 21,8 %



Perkolat (Gips) 43,5L StD: 8,1 % = **3,550 Kg otro**

Faseranteil: 9,2 % = 327 g
Schmutzanteil: 5,2 % = 185 g
Gipsanteil: 85,6 % = 3038 g
∑: 3550 g



Siebrückstand:
Faserstoff mit Verunreinigungen
2,250 Kg feucht; TG: 21,2 % = **0,477 Kg otro**

Faseranteil: 16,9 % = 81 g
Schmutzanteil: 15,7 % = 75 g
Gipsanteil: 67,4 % = 321g
∑: 477 g

Perkolator-Anhaftungen:
0,824 kg afeu; TG: 21,8% = **0,79 Kg otro**

Faseranteil: 8,8 % = 16 g
Schmutzanteil: 7,3 % = 13 g
Gipsanteil: 83,9 % = 151 g
∑: 180 g

Faseranteil: 10,1 % = 424 g
Schmutzanteil, Sortierreste: 6,5 % = 273 g
Gipsanteil: 83,4 % = 3510 g
∑: = 4207 g

Abbildung 54 Versuchsauswertung

Bestimmung von Berstfestigkeit (BF) bzw. Berstfaktor

Ziel der Untersuchung war es, die Laborblätter der Versuche am 15.02.22 und 17.03.22 mit pre-/post consumer Gipsfaserplatten auf Festigkeit prüfen. Die Laborblätter wurden aus dem gereinigten Oberkorn gefertigt). Die Berstfestigkeit ist definiert als der senkrecht auf die Oberfläche einer Probe einwirkende maximale gleichmäßig verteilte Druck, dem diese Probe unter Prüfbestimmungen widerstehen kann. Bei hoher Berstfestigkeit behält eine Verpackung auch bei großer senkrechter Belastung (z. B. Beispiel im Stapel) seine Form.

Die Berstdruckprüfung dient zur Feststellung der Festigkeit von Fasermaterialien und ist vor allem bei Packstücken ein wichtiges Kriterium für die Widerstandsfähigkeit der Verpackung bei Transportbeanspruchungen. Dieses Verfahren wird hauptsächlich zur Prüfung von Wellpappenrohstoffe und Linersorten angewendet. Die Berstfestigkeit wurde folgendermaßen ermittelt:

Berstfestigkeit nach Mullen in kPa

Anzeige in kp/cm² (Kilopond pro Quadratzentimeter)

- BF(rel) (Berstfaktor) bezogen auf 100 g/m²

$$\frac{kp/m^2 \times 100}{m_A \times 1{,}02} = \mathbf{kPa}$$

1. „post consumer“ Gipsfaserplatten: Blattgewicht 2,414 g; Flächenmasse (mA) 80,5 g/m²

BF Vorderseite Rückseite

BF		Vorderseite	Rückseite
∅		***97***	***100***
$BF_{(rel)}$	Vorderseite	***123*** **kPa**	
	Rückseite	***127*** **kPa**	

2. „pre consumer“ Gipsfaserplatten Blattgewicht 2,308 g Flächenmasse (m A) 76,9 g/m²

BF		Vorderseite	Rückseite
	∅	**53,3**	**51,7**
$BF_{(rel)}$	Vorderseite	***70,7 kPa***	
	Rückseite	***68,6 kPa***	

Erwartungsgemäß zeigten die „post consumer“ Gipsfaserplatten, die noch keinen Lebenszyklus durchlaufen und daher eine höhere Flächenmasse haben, auch eine höhere Berstfestigkeit.

Gesamtfazit des Vorversuchs zur Nassaufbereitung

Zur Untersuchung der Bestandteile der GFP wurde bei der Firma Repa Boltersdorf ein Perkolationsversuch an zwei verschiedenen GFP-Qualitäten durchgeführt, um die prozentuale Zusammensetzung der GFP-Gemische zu ermitteln. Die Ergebnisse zeigten Faseranteile zwischen 10,1 und 23,4 Ma-% und Gipsanteile zwischen 62,9 und 83,4 Ma-% bei Fremdbestandteilen/ Sortierresten zwischen 6,5 und 13,7 Ma-%. Somit war der erreichte Gipsreinheitsgrad bei diesem Versuchsansatz prinzipiell nicht hinreichend. Das Verfahren ist technisch möglich, wirtschaftlich allerdings nicht darstellbar. Grund hierfür ist, dass der Gips aus der Kammerfilterpresse immer noch hochgradig feucht ist (30% Wassergehalt in der Trockensubstanz), was eine gesonderte Trocknung erfordert, die energieintensiv ist. Zudem entsteht bei diesem Ansatz eine große Menge Abwasser, was eine gesonderte Abwasserbehandlung erfordert. Somit wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

3.1.6 Gesamtauswertung der Forschungsergebnisse Recycling GFP

Mit dem Ziel der Entwicklung einer Verarbeitungsroute für das Recycling von GFP, wurden eine Reihe von Versuchsdurchführungen unter Anwendung unterschiedlicher Techniken vorgenommen. So wurde eine Möglichkeit gefunden, Faserplatten im Trockenverfahren (Hammermühle) sowie Nassverfahren (Codukte®-Technologie) aufzuschließen. Eine Trennung des Gemisches aus Gips und den Papierfasern ist ebenfalls mittels beider Verfahren möglich, wobei jedoch das Nassverfahren auf Grund der erforderlichen Trocknungs- bzw. Abwasserbehandlungsmaßnahmen als wirtschaftlich kritisch zu sehen ist. Somit wurde die weiteren Untersuchungen im Rahmen der Trockenverfahren durchgeführt.

Das Papierfaser-Gips-Gemisch konnte nach dem Aufschluss in den durchgeführten großtechnischen Versuchen durch Klassierung (Siebung) gut voneinander getrennt werden. Die Ergebnisse zeigen bessere Separationsergebnisse mit dem 10G-Linearschwingsieb als mit dem Russell-Sieb. Außerdem wurden die besten Ergebnisse mit der 308 µm Siebmasche erreicht, mit der nahezu durchgängig ein Separationsergebnis von >80 Ma-% in der Gipsfraktion erreicht wurde, und zwar unabhängig vom Fabrikat der GFP. Insgesamt erbringen die Fermacell-GFP geringfügig bessere Ergebnisse gegenüber Rigips. Auch die Ergebnisse für den TOC-Gehalt fallen bei den Versuchen mit dem 10G-Linearschwingsieb besser aus. So konnte ein Minimal-TOC-Wert von 2,33 Ma% erreicht werden, welcher dem Ziel von 1,5 Ma% bereits sehr nahekommt. Daher ist das Linearschwingsieb als die optimalere Klassiereinrichtung zu bezeichnen, um die Gips- und die Papierfraktion zu trennen. Es wird davon ausgegangen, dass bei weiteren anlagentechnischen Optimierungen die Qualität der Abtrennung der Gipsfraktion vom Papier noch weiter verbessert werden kann.

Darüber hinaus wurden bereits erste Gespräche mit dem Bundesverband der deutschen Gipsindustrie geführt, inwieweit RC-Gips mit einem TOC-Gehalt von ca. 2,5 Ma% eingesetzt werden können. Dieses wurde als realisierbar eingeschätzt, ist jedoch mit dem jeweiligen Produzenten auf Grund unterschiedlicher Verarbeitungstechnologien im Einzelnen zu klären.

Im Ergebnis ist es somit gelungen, eine Technologie zu ermitteln, welche eine großtechnisch verwertbare RC-Gipsfraktion aus dem Recycling von GFP erzeugt. Darüber hinaus zeigen die betriebswirtschaftlichen Betrachtungen (Punkt 7) ebenso, dass die unter Punkt 3.1.4 beschriebene Prozesskette marktfähig ist.

Dem gegenüber ist der Gipsgehalt in der Papierfraktion nach wie vor hoch, was eine weitere Abreinigung der Papierfraktion erforderlich macht, um eine stoffliche Verwertung der Papierfaser zu ermöglichen. Im Rahmen der Versuche wurden sowohl Sichtertechnik (Trenntische, Zick-Zack-Sichter) sowie Siebtechnik (Trommelsieb, Kreisschwingsieb, Vibrations-Taumelsieb) eingesetzt. Nachdem mit den ersten Versuchen nur ein geringer zusätzlicher Abtrenneffekt erzielt werden konnte, wurde das Input-Material über eine Turbomühle (ARES 500) gefahren. Es handelt sich hierbei um eine Prallmühle, die mit einem 4 mm Spalt eingestellt war. Somit wurden die noch vorhandenen Gipspartikel einer weiteren Prallbeanspruchung ausgesetzt, während die Fasern durch die Größe des Schlagspaltes kaum mechanisch beansprucht waren. Dies sollte eine Verbesserung der Abtrennung über die Korngröße ermöglichen. Mit der untersuchten Verfahrensweise kann der Gipsgehalt in der Papierfraktion auf rein mechanischem Weg auf < 50 % abgesenkt werden. Eine weitere Absenkung des Gipsgehaltes mit mechanischen Verfahrensstufen ist theoretisch möglich, wird jedoch zum derzeitigen Zeitpunkt auf Grund der erforderlichen zusätzlichen Aufbereitungsschritte wirtschaftlich kritisch gesehen. Hierzu ist in jedem Fall weiterer Forschungsbedarf erforderlich.

Grundsätzlich kann unserer Meinung nach die erzeugte Papierfraktion als Füllstoff bei der Herstellung neuer GFP eingesetzt werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten wird unsererseits in nachfolgenden Einsatzgebieten gesehen.

Entwicklung als Dämmstoff

Neben den konventionellen Dämmstoffen aus Mineralwolle und Styropor, haben sich mittlerweile eine Reihe an ökologischen Alternativen aus Holzfasern, Zellulose, Hanf oder Schilf etabliert. Etwas unbekannter, aber nicht weniger ökologisch, ist die Schafwolldämmung. Um eine Eignung als alternativer Dämmstoff zu untersuchen, müsste eine separate Machbarkeitsstudie oder eigenständige Forschung durchgeführt werden.

Hierfür müssen in erster Linie die bauphysikalischen Eigenschaften des Materials untersucht werden, wie beispielsweise Selbstentzündungspunkt, Wärmedämmkoeffizient und Feuchtebeständigkeit. Die Sulfatgehalte sollten bei einer Nutzung als Dämmstoff nachrangig sein, da ohnehin alle mineralischen Baumaterialien sulfathaltig sind. Es gibt auch bereits Dämmstoffe aus Zellulose, welche aus mechanisch zerkleinertem Zeitungspapier hergestellt werden [1.71]. Das Papier wird zerfasert, getrocknet entstaubt und verpackt. Am häufigsten kommt dieser Dämmstoff als Einblasdämmung zum Einsatz, aber auch die Lieferformen Zellulosematten oder Pellets sind erhältlich.

Die Anforderungen an Zellulosedämmstoffe sind in den bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt sowie in der DIN EN 15101-1 Wärmedämmstoffe für Gebäude - An der Verwendungsstelle hergestellter Wärmedämmstoff aus Zellulosefüllstoff (LFCI) [1.71].

Kompostierung

Eine Kompostierung ist naturgemäß möglich, da es sich beim Papiergewölle um organisches Material handelt. Grundsätzlich ist Papier biologisch abbaubar und wird auch bei der Eigenkompostierung zersetzt. Papier hat oft einen hohen Kohlenstoffgehalt und weist kaum Stickstoff auf, was zu einem sehr hohen C:N-Verhältnis führt. Das Hinzufügen von Papier zum Kompost ohne die Bereitstellung von zusätzlichem Material zur Senkung des C:N-Verhältnisses kann den Abbau verlangsamen und die Kompostierungszeiten verlängern. Im Fall des Papiergewölles kommt allerdings noch ein hoher Sulfatgehalt hinzu.

Vergasung

In mehreren Studien wurde nachgewiesen, dass Papierrückstände vergast werden können [1.72, 1.73]. Quadi et al. [1.72] wiesen die Eignung von Papierrückständen aus der Papierindustrie unter Zusatz von Holzpellets nach. Elsaddik (2022) [1.73] untersuchte beispielweise Zellulosezellstoff Herstellung von wasserstoffreichem Synthesegas durch Dampfvergasung.

Verwertung als Kohlenstoffträger

Eine weitere Verwertungsoption wäre die als organischer Kohlenstoffträger für den Fall, dass die Sulfatkonzentrationen eine nachrangige Rolle spielen. Es gibt eine Reihe Anwendungsfelder für die Verwertung als Kohlenstoffträger. Ein Beispiel ist der Bedarf für die Herstellung eines Kohlestoffträgers auf Basis nachwachsender Ressourcen zum Einsatz in der Stahlindustrie [1.75].

Um eine Reduktion des Ausstoßes von CO2-Äquivalenten zu erreichen, darf der enthaltene Kohlenstoff nicht auf fossilen Rohstoffen basieren. Kunststoffabfälle, die auf Erdöl basieren, scheiden somit aus. Derzeit wird in der Stahlbranche das Feld der nativen Organik geprüft, da der enthaltene Kohlenstoff als nicht klimaschädlich betrachtet wird.

Eine weitere Möglichkeit wäre der Zusatz zu Dachgrünsubstraten aus Ersatzbaustoffen, die ohnehin sulfathaltig sind. Zu deren Entwicklung wurde kürzlich ein Forschungsvorhaben durchgeführt, in dem Baurestmassen wie Ziegelbruch und Porenbetonbruch hinsichtlich ihrer Eignung als Dachgrünsubstrat untersucht wurden. Die Nutzung führt anfänglich zu hohen Sulfatausträgen, die aber nach etwa zwei Monaten abgeklungen sind [1.76]. Diese Substrate benötigen einen organischen Anteil zur Verbesserung der Vegetationseigenschaften. Hier könnten Versuche durchgeführt werden, um die Eignung des Papiergewölles als Kohlenstoffträger zu prüfen.

Verwertung in der Papierindustrie

Bisherige Vorgespräche haben gezeigt, dass die Papierfraktion auf Grund des erhöhten Sulfatgehaltes nicht wirklich Anklang in der Papierindustrie findet. Das heißt, dass konventionelle Papierfabriken, die üblicherweise Altpapier verarbeiten, kein Interesse an der Papierfraktion haben.

Dies kann bei der Spezialpapierherstellung aber anders aussehen. Bei der Herstellung von Fotopapier wird Bariumsulfat als Füllstoff eingesetzt, um dessen Streichfähigkeit zu verbessern [74]. Das heißt, dass diese Papiere ohnehin unter dem Zusatz von Sulfatrohstoffen hergestellt werden. Nun hat Bariumsulfat mit 4,5 g/cm³ eine hohe Dichte, was bei den Spezialpapieren ausgenutzt wird. Abgesehen davon sollte die Eignung des Gewölles zur Herstellung von Spezialpapier geprüft werden.

Energetische Verwertung

Eine potenzielle energetische Verwertung der Papierfraktion wurde gelegentlich diskutiert. Dieser Prozess ist auf Grund des Ausstoßes von CO2 nicht mehr zeitgemäß und sollte daher nicht weiterverfolgt werden.

3.2 Synthetischer Gips

3.2.1 Synthesegips aus Batteriesäureaufbereitung (Versuchsdurchführung)

Im Verlauf der Recherchen stellte sich Altbatteriesäure als eine mögliche und noch nicht genutzte Quelle für Sekundärgipse aus Reststoffen dar. Für Versuche wurden dem Projektteam dafür von der Firma Clarios GmbH rund 15 Liter Altbatteriesäure aus dem laufenden Betrieb einer Altbatteriere-cyclinganlage für weitergehende Versuche zur Verfügung gestellt. Die Fällungsversuche wurden in Anlehnung an das Patent DE1467292A1: „Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung von Gips und Eisenoxyd“ zur Rückgewinnung von Eisen bei gleichzeitiger Gipsfällung aus Abfallsäuren sowie unter Berücksichtigung von Hinweisen aus der Durchführung der REA-Gips-Fällung im laufenden Betrieb eines Kohlekraftwerks konzipiert. In den Versuchsansätzen wurden jeweils 100 ml Altbatteriesäure sowohl mit in Wasser gelöstem $Ca(OH)_2$, Kalkmilch, (in Anlehnung an REA-Gipsfällung in Kohlekraftwerken) als auch mit in Wasser gelöstem $CaCO_3$ (als gut zu verarbeitende Base) gefällt. Es wurden dazu jeweils 1-molare basische Lösungen verwendet. In den Versuchen wurden die Fällungsmittel bis zu einem Ziel-pH-Wert zu der Altbatteriesäure hinzugegeben. Mit Erreichen dieses Zielwertes wurden geringe Mengen, zunächst 0,4 g, an Calciumsulfat-Dihydrat ($CaSO_4$*$2H_2O$) als Impfkristalle zugegeben und die Suspension wurde über einen festgelegten Zeitraum gerührt. Zwei Versuche wurden mit Mischungen von Kalkmilch und Calciumcarbonatsuspension im Verhältnis 60:40 und 40:60 durchgeführt.

Nach Erreichen der festgelegten Rührdauer wurde der entstandene Gips über Papierfilter (Faltenfilter Whatman, Typ 2) abfiltriert und getrocknet. Die mit Kalkmilch gefällten Gipse konnten bei längerer Trocknungsdauer nur schwer von den Papierfiltern gelöst werden, so dass Papierfasern in den Gips gelangen konnten. Nachdem dies beim Ablösen der Gipse festgestellt wurde und auch an den thermogravimetrischen Messungen zu erkennen war, wurden die entsprechenden Versuchsansätze mit Kalkmilch wiederholt und die Filterung dieser Gipse erfolgte über Glasfaser Mikrofilter (Whatman GF/F). 50 ml der entstandenen Filtrate wurden aufgefangen und mit 500 µl konzentrierter Salzsäure angesäuert.

Der Gips wurde mit destilliertem Wasser abgespült und bei 40-45°C getrocknet. Um zu überprüfen, ob der Spülvorgang einen Effekt auf die Schwermetallgehalte der so gewonnenen Gipse hat, wurden von einigen Versuchsansätzen sowohl gespülte als auch nicht gespülte Gipsproben aufgefangen, getrocknet und analysiert. Falls Agglomerate im getrockneten Gips enthalten waren, wurden diese in einem Achatmörser für die nachfolgenden Analysen zerkleinert. In Abbildung 3.1 sind synthetische Gipse aus Altbatteriesäure (BS-Gipse) dargestellt. In einigen Versuchen zeigte der mit Calciumcarbonat gefällte Gips eine leicht rötlich-gelbe Färbung, die auf möglicherweise mitgefälltes Eisen zurückzuführen ist. Die mit Kalkmilch gefällten Gipse zeigten diese leichten Verfärbungen nicht.

Abbildung 55 Synthetischer Gips der mit Kalkmilch (links) bzw. Calciumcarbonatsuspension (rechts) aus Altbatteriesäure gefällt wurde

In den Versuchsansätzen wurden folgende Parameter variiert:

- Ziel-pH-Wertes
- Rührdauer
- Temperatur
- Menge und Art der verwendeten Gipsimpfkristalle
- Rührgeschwindigkeit

Die Modifikation der Versuche erfolgte in Abhängigkeit von den jeweils bereits vorliegenden Analyseergebnissen sowie in Hinblick auf möglichst geringe Energie- und Rohstoffverbräuche.

In 23 Versuchen wurde eine Massenbilanzierung durchgeführt. Dazu wurden die Massen von Altbatteriesäure, Fällungsmittel, Impfkristallen und getrocknetem Produkt durch Wägung bestimmt. Um zu überprüfen, ob die Menge an zugegebenen Impfkristallen in Hinblick auf eine Erhöhung der Menge des erzeugten Batteriesäuregipses noch optimiert werden konnte, wurden in einigen Ansätzen die Impfkristallzugaben auf 0,5 g, 0,6 g und 0,7 g erhöht. Zudem wurden REA-Gipse und RC-Gipse als Impfkristalle verwendet, um zu sehen, ob dies die Bildung der BS-Gipskristalle beeinflusst.

Zusätzlich wurden Versuche zur Lösung von anderen synthetischen Gipsen mit Säuren für eine anschließende Ausfällung von Gips mit reduzierten Schadstoffgehalten durchgeführt.

3.2.2 Analytik der Stoffströme (Analytische Untersuchungen)

Die analytischen Untersuchungen an den mittels Fällung aus Altbatteriesäure gewonnenen Gipsen wurden, wie bereits beschrieben, an getrockneten und gegebenenfalls zerkleinerten Proben durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Ziel-pH-Wert mittels Kalkmilchfällung geringfügig schneller erreicht werden konnte als mit der Suspension mit Caciumcarbonat. Es wurden dabei für die Erreichung des Ziel-pH-Wertes im Durchschnitt 210 ml Kalkmilch und 213 ml Calciumcarbonatsuspension benötigt. Zunächst wurden die Versuche überwiegend mit dem Ziel-pH-Wert 1 gestartet, da zum einen vermutet wurde, dass sich bei diesem pH-Wert weniger Schwermetalle in den ausgefällten Gipsen befinden würde und andererseits weniger Fällungsmittel verbraucht werden sollte.

Die Massenbilanzierungen ergaben unabhängig vom Typ der Impfkristalle für die Fällungen mit $CaCO_3$-Suspension eine Produktmenge zwischen 30 g und 36 g BS-Gips pro Versuchsansatz, Durchschnitt 35,2 g. Demgegenüber lagen die Ergebnisse für die Versuche mit Kalkmilch teilweise unter 30 g pro Versuchsansatz. Aufgrund der teilweise angegriffenen Filtermaterialien wurden einige dieser Versuche mit Glasfaserfiltern wiederholt, diese Ergebnisse lagen dann in zwischen 31 g und 35 g BS-Gips pro Versuchsansatz. Ein Einfluss der Zugabemenge der Impfkristalle konnte nicht festgestellt werden.

3.2.2.1 Bestimmung des Gipsgehaltes/Reinheitsgrads

Die Bestimmung des Gipsgehaltes erfolgte thermogravimetrisch mittels TGA-Messungen in Stickstoffatmosphäre (vgl. [2.5], [2.6]). Dabei wird der Gewichtsverlust einer Gipsprobe in Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung gemessen. An den spezifischen Masseveränderungen im Temperaturprofil kann der Gipsgehalt der Probe berechnet werden. In Abbildung 56 ist der typische Verlauf einer TGA-Messung eines Materials mit einem hohen Gipsgehalt dargestellt.

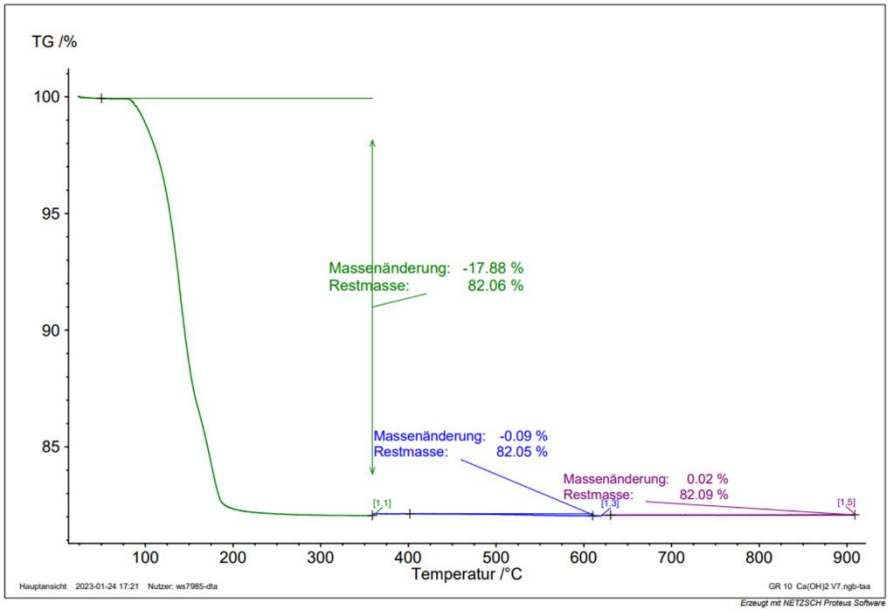


Abbildung 56 Verlauf des Masseverlustes einer gipshaltigen Probe bei der thermogravimetrischen Untersuchung

Die ermittelten Werte waren gut reproduzierbar und der Verlauf der Kurven von Gipsen aus denselben Versuchsansätzen unterschied sich dabei nur geringfügig. In Abbildung 57 sind die Verläufe der thermogravimetrischen Messungen von Gipsen aus dem gleichen Versuchsansatz, einmal aus der Fällung mit Kalkmilch und einmal aus der Fällung mit Calciumcarbonatsuspension abgebildet. Es ist gut zu erkennen, dass die Verläufe der Messkurven nahezu deckungsgleich sind.

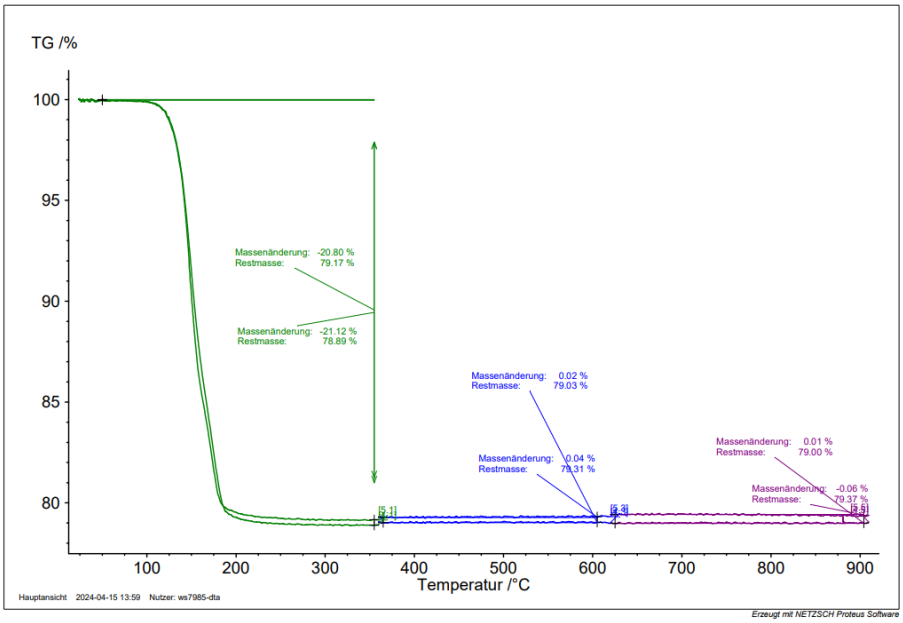


Abbildung 57 Verlauf der Messkurven bei der thermogravimetrischen Untersuchung von mit unterschiedlichen Fällungsmitteln gefällten Gipsen aus dem gleichen Versuchsansatz

Weiterhin wurden die Gipsproben, aus denen jeweils ein Teil mit destilliertem Wasser gespült bzw. ein Teil nicht gespült waren, analysiert und verglichen. Ein Einfluss des Spülvorgangs auf den Gipsgehalt war in keiner Probe feststellbar.

Die Auswertung der Versuche hat gezeigt, dass der angestrebte Reinheitsgrad bzw. Gipsgehalt von mindestens 85% (nach den Qualitätsempfehlungen des BV Gips [2.5]*/ in mehr als 80% der Versuche erreicht werden konnte. Dies galt sowohl für die mit Kalkmilch als auch für die mit Cacliumcarbonat gefällten Gipse. Die mit Mischungen aus beiden Fällungsreagenzien hergestellten Gipse wiesen einen Reinheitsgrad um 85% auf. Eine Übersicht über die Ergebnisse der thermogravimetrischen Bestimmungen des Gipsgehaltes bietet Abbildung 58.

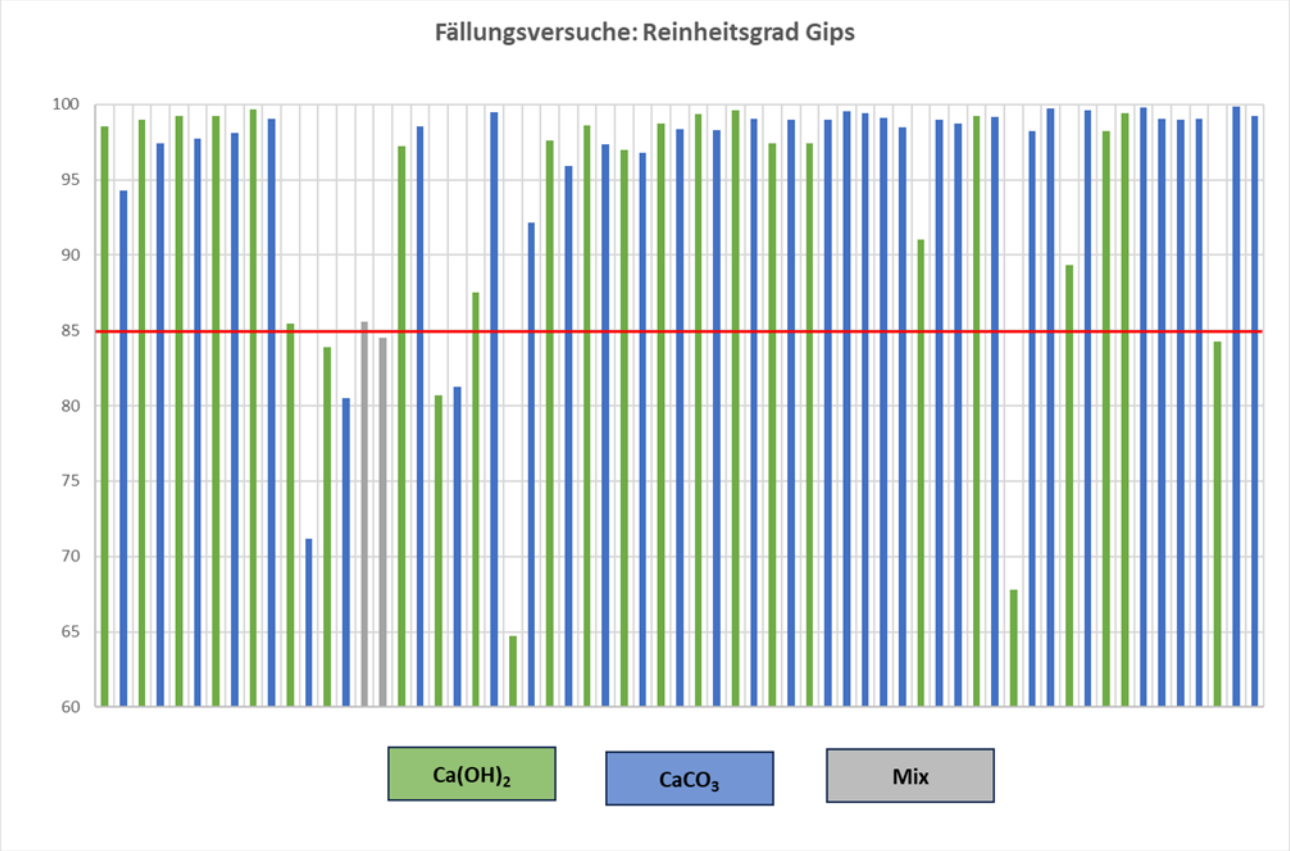


Abbildung 58 Gipsgehalte der in den Fällungsversuchen hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure

Bei der Auswertung der thermogravimetrischen Messungen zeigte sich, dass die Wahl des Fällungsmittels keine signifikanten Auswirkungen auf die Höhe des Reinheitsgrads hatte. und mit beiden Fällungsmitteln hohe Gipsausbeuten realisiert werden konnten. Dabei zeigten die Fällungen mit $CaCO_3$ stabilere Ergebnisse, was jedoch auch an der besseren Beständigkeit der verwendeten Filtermaterialien gegenüber diesem Fällungsmittel gelegen haben kann.

Im Anhang 3 sind diese Messergebnisse detailliert und zusammen mit den Variationen der Versuchseinstellungen aufgeführt. Zusammenfassend lässt sich in Bezug auf den Gipsgehalt feststellen, dass eine Zuführung von Wärme zur Temperaturerhöhung keinen Effekt auf den Reinheitsgrad der hergestellten Gipse hatte. Eine längere Versuchszeit, 4 bis 5 Stunden, nach der Impfkristallzugabe hat sich dahingegen günstig auf den Gipsgehalt ausgewirkt. Ein höherer Ziel-pH-Wert hat sich ebenfalls günstig ausgewirkt, jedoch wurde in Hinblick auf den geringeren Verbrauch an Fällungsmitteln sowie auf die mit dem Gips ausgefällten Schwermetalle der größere Teil der Versuche bei pH 1 durchgeführt.

3.2.2.2 Bestimmung der Schwermetallgehalte

Die Schwermetalle in den untersuchten synthetischen Gipsen aus der Fällung von Altbatteriesäure (BS-Gipse) stellten sich in Abhängigkeit von den einzelnen Elementen sehr unterschiedlich dar. Einige Schwermetalle, wie z.B. Blei, Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer oder Nickel in den gemessenen Proben immer oder überwiegend unter den vom Bundesverband der deutschen Gipsindustrie vorgeschlagenen Zielwerten [2.5] lagen, waren andere Elemente, z.B. Zinn, Selen oder Antimon in den meisten Proben oberhalb des Zielwertes zu verorten. Wiederum andere Schwermetalle, wie Zink, zeigten kein einheitliches Bild. Anhand von Arsen, Cadmium, Blei und Zinn werden nachfolgend die Ergebnisse der Schwermetallmessungen vorgestellt. Die Abbildung 59 Abbildung 62 zeigen diese Ergebnisse unterteilt nach den verwendeten Fällungsmitteln im Detail. Die eingefügte rote Linie markiert jeweils den Zielwert [2.5]. Die Ergebnisse der mit Kalkmilch gefällten Gipse sind grün dargestellt, die mit Calciumcarbonat gefällten blau.

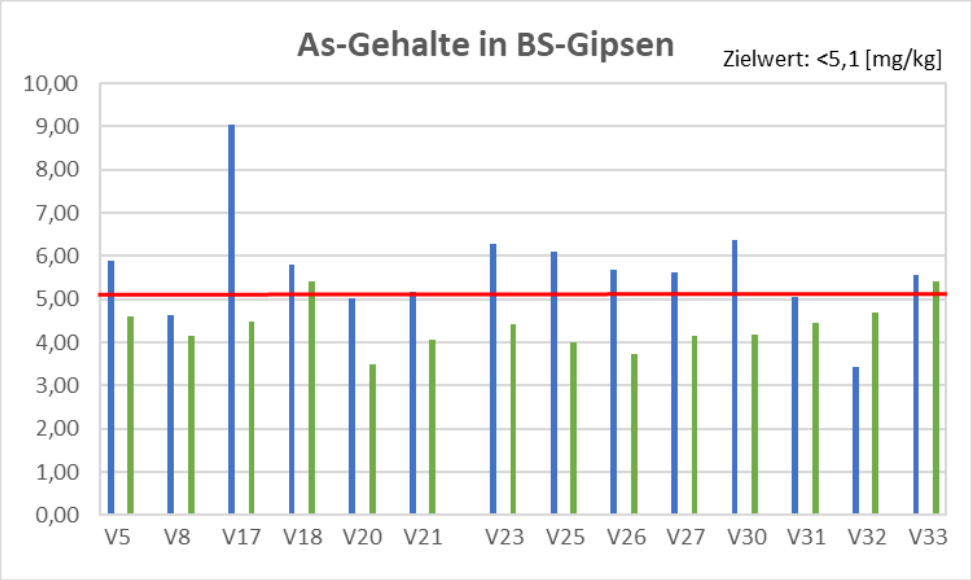


Abbildung 59 Arsengehalte [mg/kg] der in den Fällungsversuchen mit $CaCO_3$ (blau) und Kalkmilch (grün) hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure

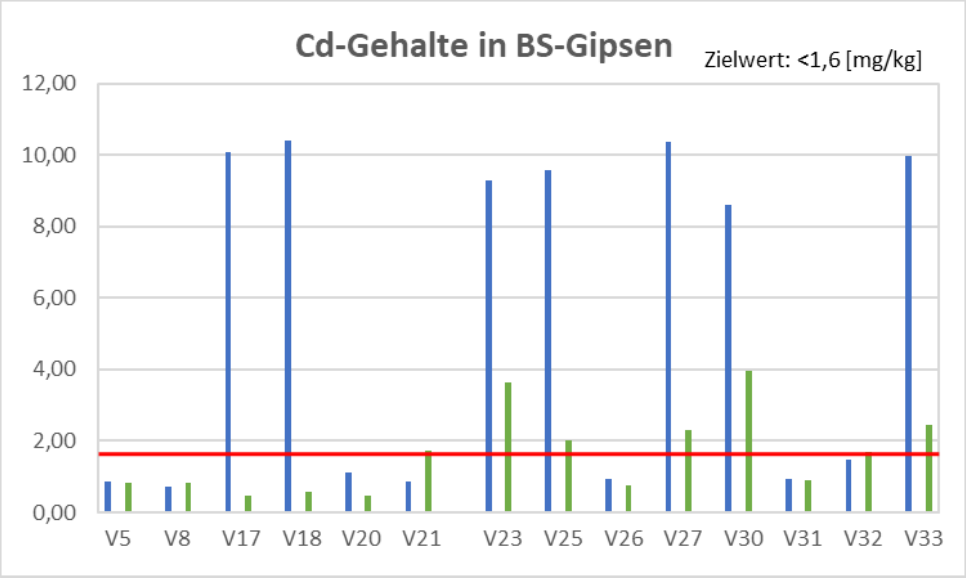


Abbildung 60 Cadmiumgehalte [mg/kg] der in den Fällungsversuchen mit $CaCO_3$ (blau) und Kalkmilch (grün) hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure

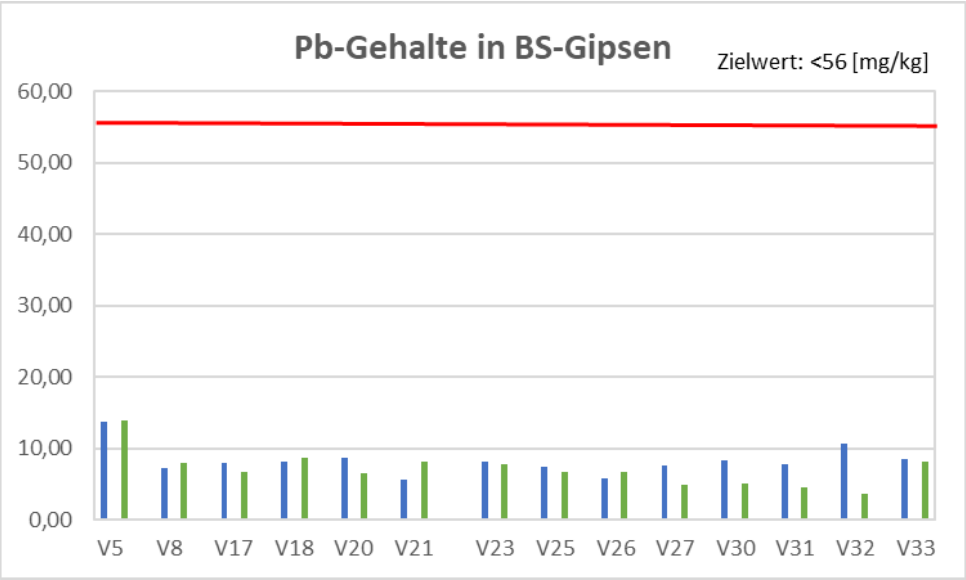


Abbildung 61 Bleigehalte [mg/kg] der in den Fällungsversuchen mit $CaCO_3$ (blau) und Kalkmilch (grün) hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure

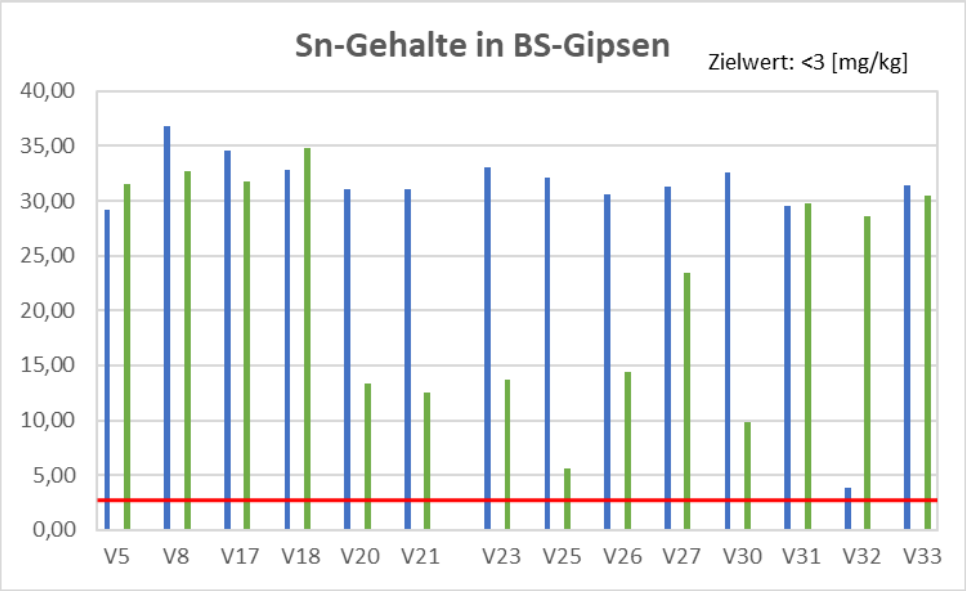


Abbildung 62 Zinngehalte [mg/kg] der in den Fällungsversuchen mit $CaCO_3$ (blau) und Kalkmilch (grün) hergestellten synthetischen Gipse aus Altbatteriesäure

Wie bei Versuchsstart vermutet, war in den Versuchsansätzen, die sich nur durch die Variation des Ziel-pH-Wertes unterschieden, eine klare Tendenz zu geringeren Schwermetallgehalten in den Gipsen aus den Ansätzen mit Ziel-pH Wert 1 im Vergleich zu Ziel-pH-Wert 2 zu erkennen. Nachfolgend werden die Messergebnisse von synthetischen Gipsen aus 2 Versuchsansätzen mit unterschiedlichen Ziel-pH-Werten wieder beispielhaft anhand der Werte von Arsen, Cadmium, Blei und Zinn in den Abbildung 63 Abbildung 66 dargestellt.

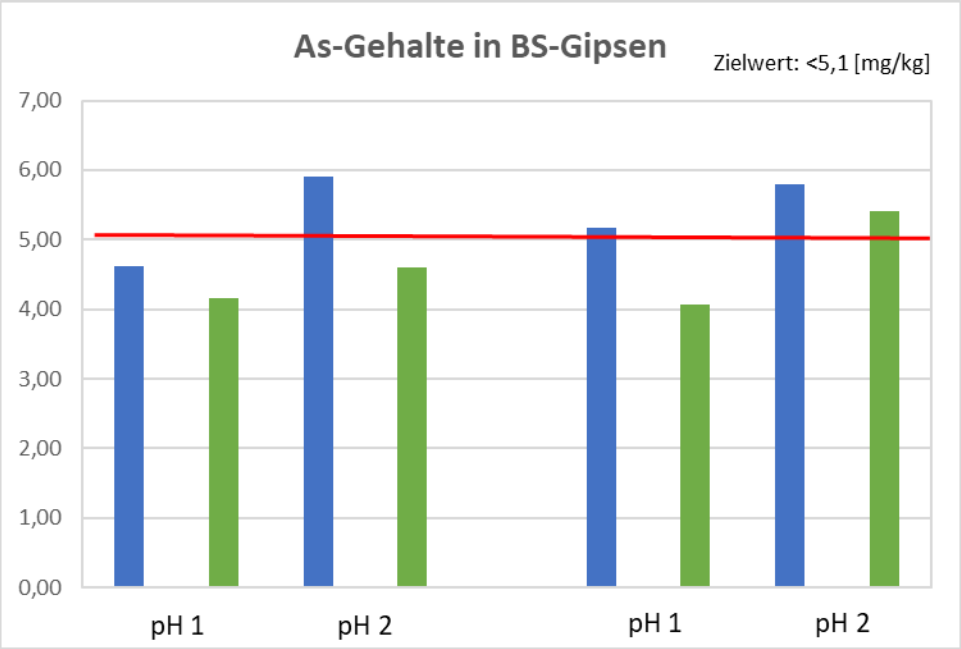


Abbildung 63 Gegenüberstellung der Arsengehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen aus zwei Versuchsansätzen, deren Versuchsparameter sich nur im Ziel-pH-Wert unterschieden. Die Fällungsmittel waren jeweils wieder $CaCO_3$ -Suspension (blau) oder Kalkmilch (grün)

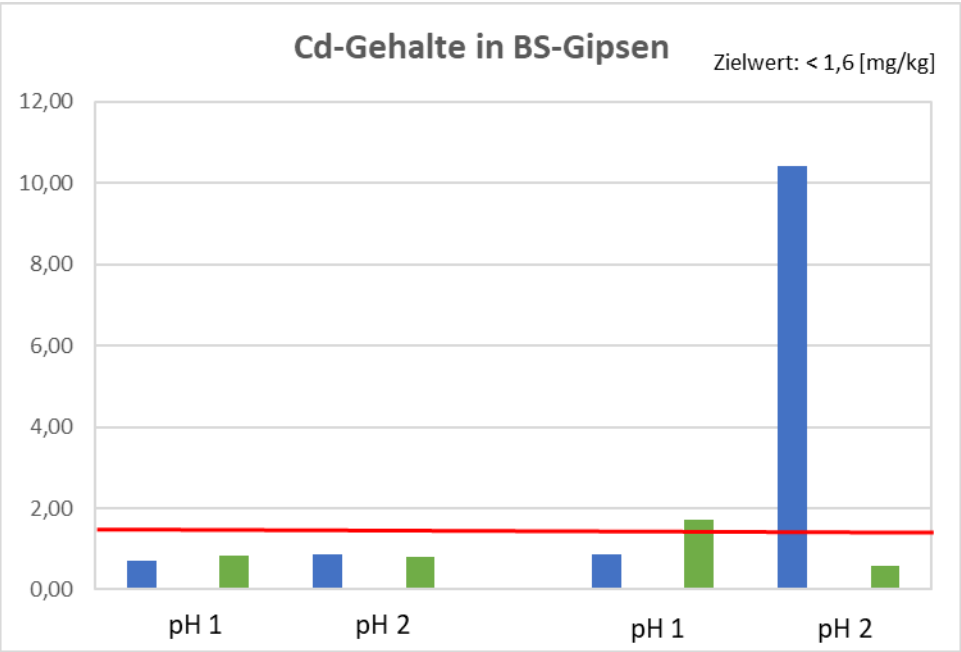


Abbildung 64 Gegenüberstellung der Cadmiumgehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen aus zwei Versuchsansätzen, deren Versuchsparameter sich nur im Ziel-pH-Wert unterschieden. Die Fällungsmittel waren jeweils wieder $CaCO_3$ -Suspension (blau) oder Kalkmilch (grün)

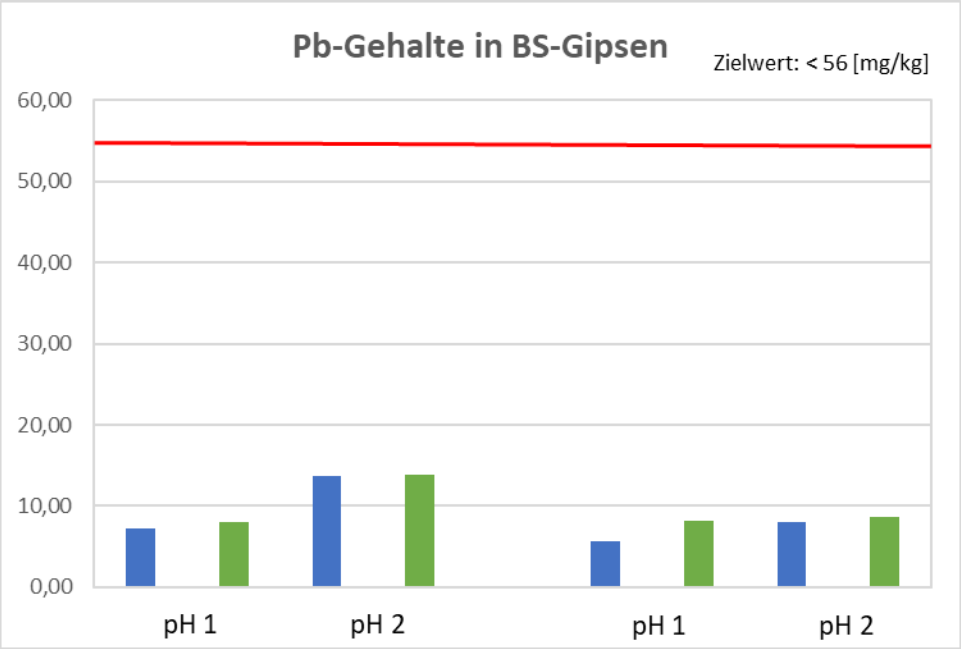


Abbildung 65 Gegenüberstellung der Bleigehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen aus zwei Versuchsansätzen, deren Versuchsparameter sich nur im Ziel-pH-Wert unterschieden. Die Fällungsmittel waren jeweils wieder $CaCO_3$ -Suspension (blau) oder Kalkmilch (grün)

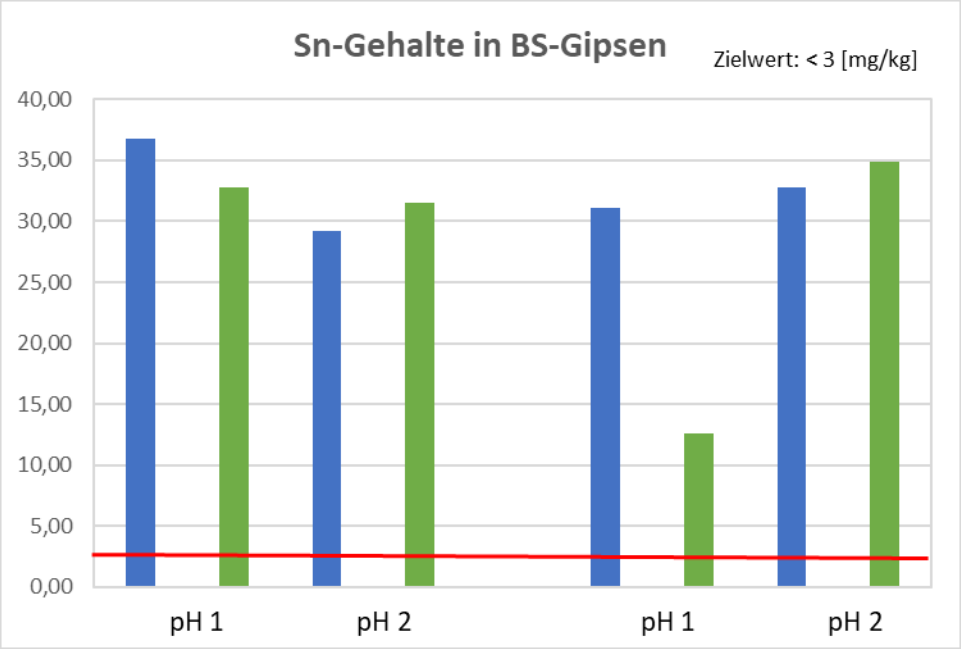


Abbildung 66 Gegenüberstellung der Zinngehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen aus zwei Versuchsansätzen, deren Versuchsparameter sich nur im Ziel-pH-Wert unterschieden. Die Fällungsmittel waren jeweils wieder $CaCO_3$ -Suspension (blau) oder Kalkmilch (grün)

Während die Arsengehalte des BS-Gipses nach einer Fällung bei pH-Wert 1 in den untersuchten Ansätzen ca. 20% unter den Werten der Fällung bei pH 2 lagen, war die Differenz bei den Bleiwerten zum Teil noch etwas höher. Die Cadmiumgehalte lagen in einem Versuchsansatz ebenfalls bei pH-Wert 1 um 20% unter dem Wert des Gipses der bei pH 2 gefällt wurde, der zweite Versuchsansatz war nicht auswertbar (siehe Abbildung 64) und zeigte ebenso wie die Zinngehalte ein uneinheitliches Bild.

Für die Betrachtung des Einflusses der Rührdauern wurde ein dreifacher Versuchsansatz, mit den Rührdauern 3, 4 und 5 Stunden herangezogen. Bei der Auswertung der unterschiedlichen Rührdauern konnte kein eindeutiger Trend festgestellt werden. Während z.B. Arsen-, Blei- und Zinngehalte der synthetischen Gipse keine Abhängigkeit von der Rührdauer erkennen ließen, zeigten die Cadmiumwerte eine Erhöhung mit Zunahme der Rührdauer. In den Abbildung 67 bis Abbildung ***70*** sind diese Messergebnisse dargestellt.

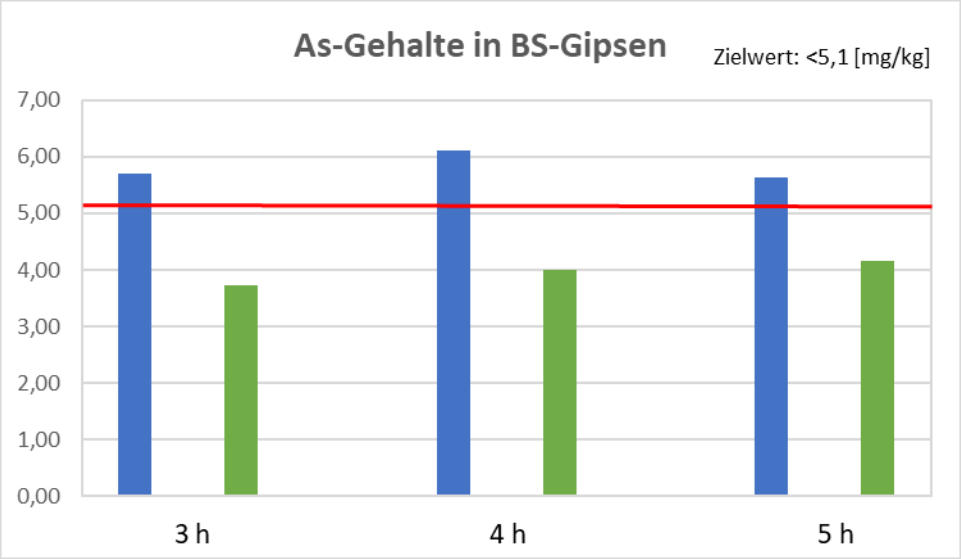


Abbildung 67 Gegenüberstellung der Arsengehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen in Abhängigkeit von der Rührdauer des Versuchsansatzes ($CaCO_3$-Suspension (blau), Kalkmilch (grün))

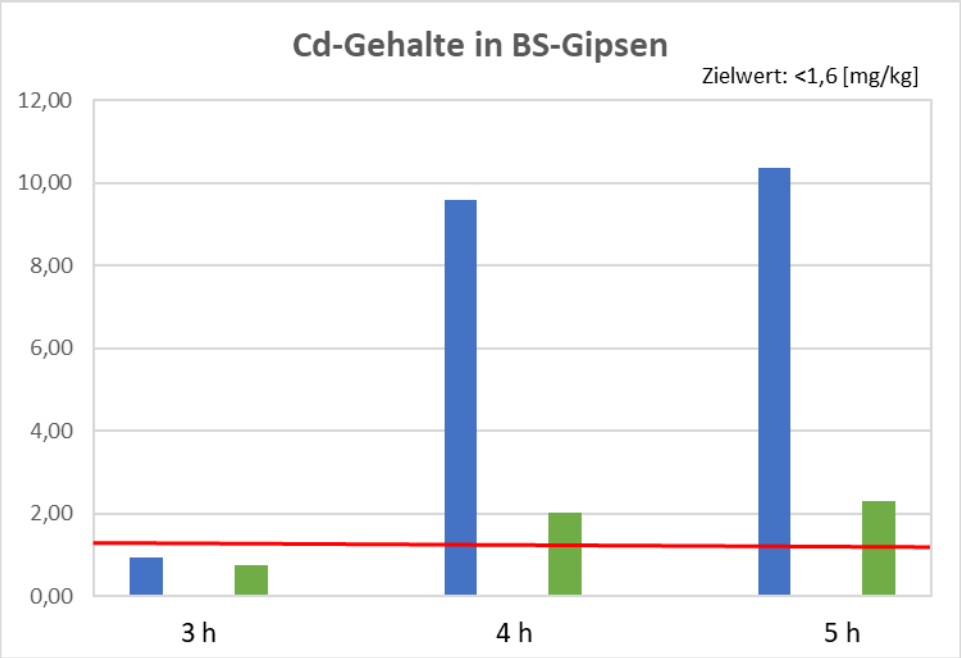


Abbildung 68 Gegenüberstellung der Cadmiumgehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen in Abhängigkeit von der Rührdauer des Versuchsansatzes ($CaCO_3$-Suspension (blau), Kalkmilch (grün))

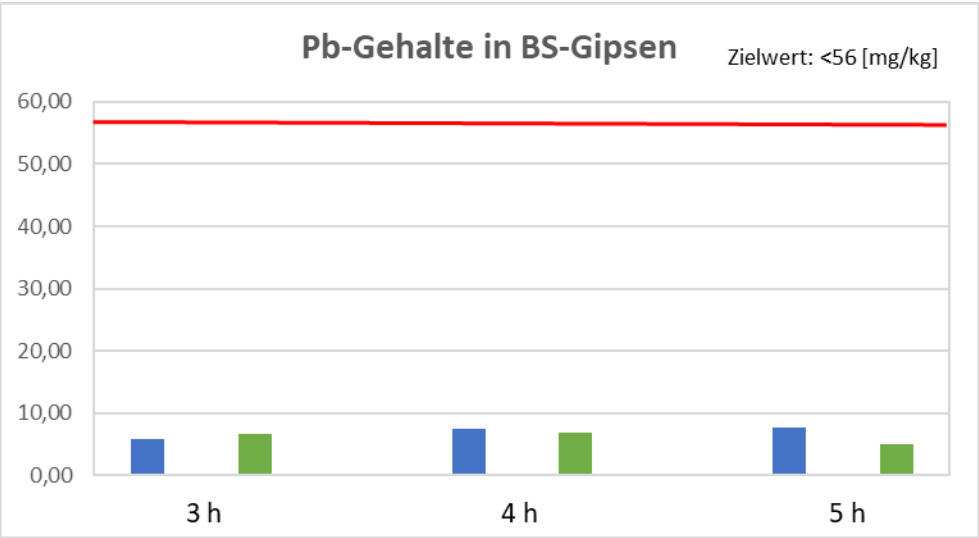


Abbildung 69 Gegenüberstellung der Bleigehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen in Abhängigkeit von der Rührdauer des Versuchsansatzes ($CaCO_3$-Suspension (blau), Kalkmilch (grün))

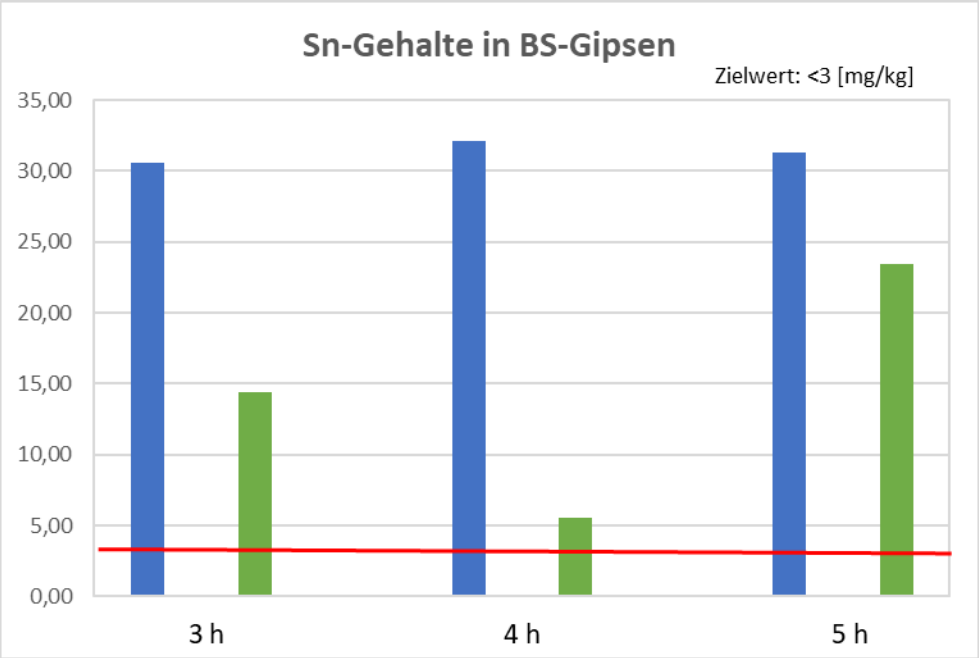


Abbildung 70 Gegenüberstellung der Arsengehalte [mg/kg] in synthetischen Gipsen in Abhängigkeit von der Rührdauer des Versuchsansatzes ($CaCO_3$-Suspension (blau), Kalkmilch (grün))

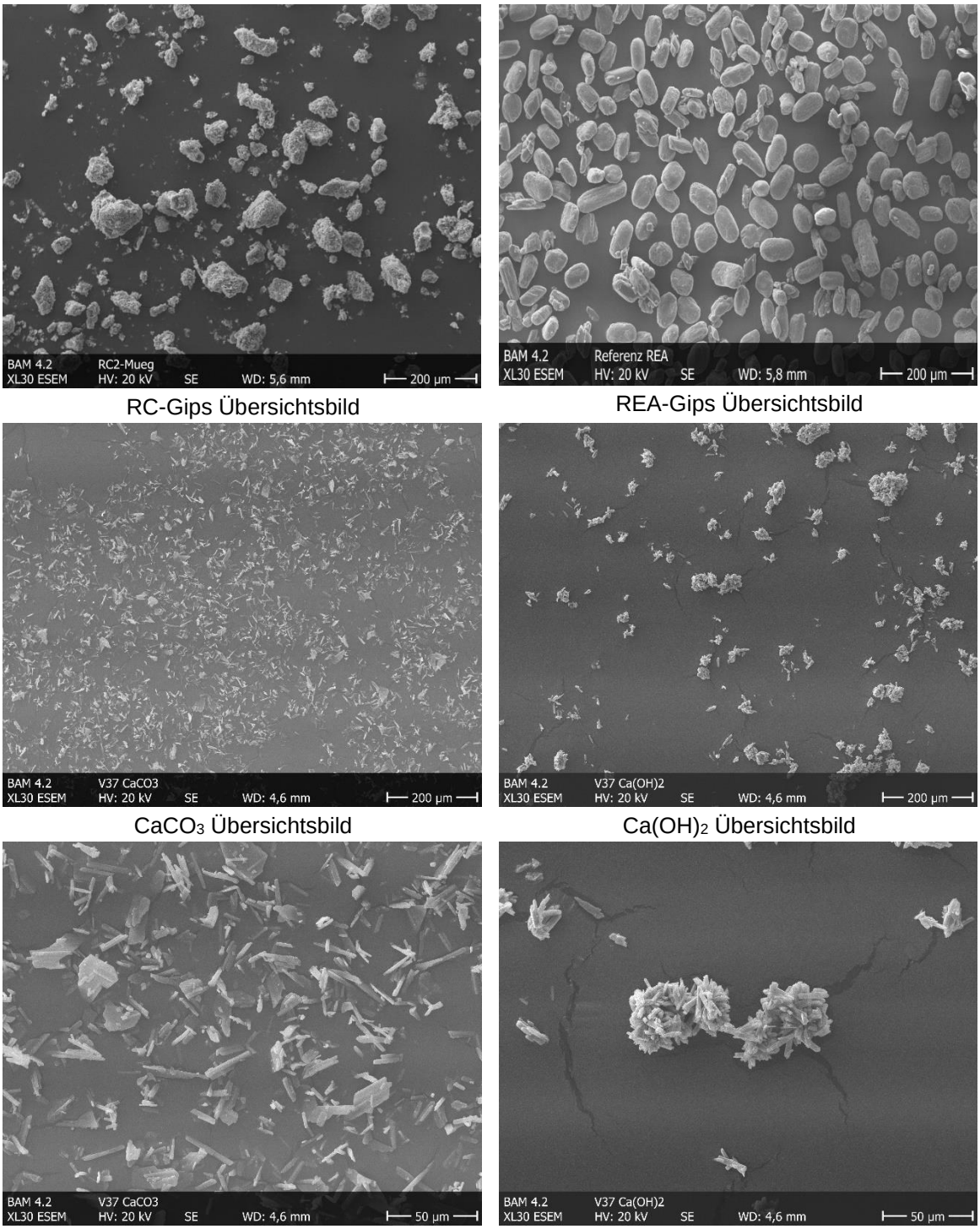
In den Versuchsansätzen, in denen ein Teil des gefällten BS-Gipsen durch Spülen mit destilliertem Wasser behandelt wurde, konnte kein Unterschied der Schwermetallgehalte zwischen gespülten und nicht gespülten Gipsen aus denselben Ansätzen festgestellt werden.

Zusammenfassend kann in Hinblick auf die Schwermetallanalysen festgestellt werden, dass Kalkmilch als Fällungsmittel überwiegend positivere Effekte auf den Schwermetallgehalt der gefällten Gipse aus Altbatteriesäure hatte als die Calciumcarbonatsuspension. Der niedrigere Ziel-pH-Wert von 1 hatte ebenso den Vorteil, dass die gefällten Gipse tendenziell geringere Schwermetallgehalte aufwiesen. Zudem konnte durch die schnellere Erreichung des Ziel-pH-Wertes der Verbrauch der Fällungsmittel etwas verringert werden. Ein Einfluss der Reaktionszeit, d.h. der zusätzlichen Rührdauer nach Erreichen des Ziel-pH-Wertes, konnte nicht festgestellt werden. Daher scheint eine Rührdauer von $\leq$ 4 Stunden vorteilhafter zu sein, da Prozessdauer und damit Energieverbrauch etwas reduziert werden können.

3.2.2.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Die rasterelektronenmikroskopischen (REM-)Untersuchungen wurden durchgeführt, um mögliche Effekte der Versuchseinstellungen bei der Fällung von Gips aus Altbatteriesäure auf die gebildeten Gipskristalle festzustellen. Dabei wurden Korngrößen, Korngrößenverteilungen sowie Kristallformen betrachtet und auch Unterschiede zu herkömmlichen Gipsen festgehalten.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die im Rahmen der Fällungsversuche hergestellten synthetischen Gipse deutlich geringere Korngrößen im Vergleich zu anderen synthetischen Gipsen oder Referenzgipsen aufwiesen. In Abbildung 71 sind SEM-Aufnahmen von RC-Gips, REA-Gips und synthetische Gipse aus einem Versuchsansatz zur Altbatteriesäurefällung (BS-Gipse) in gleicher Vergrößerung dargestellt sowie die BS-Gipse nochmals 4-fach vergrößert dargestellt. Trotz der vergleichsweise geringeren Korngröße weisen die BS-Gipse eine breitere Korngrößenverteilung als z.B. der REA-Gips auf, was wiederum günstig für die weitere Verarbeitung des synthetischen Gipses sein kann.



RC-Gips Übersichtsbild | REA-Gips Übersichtsbild

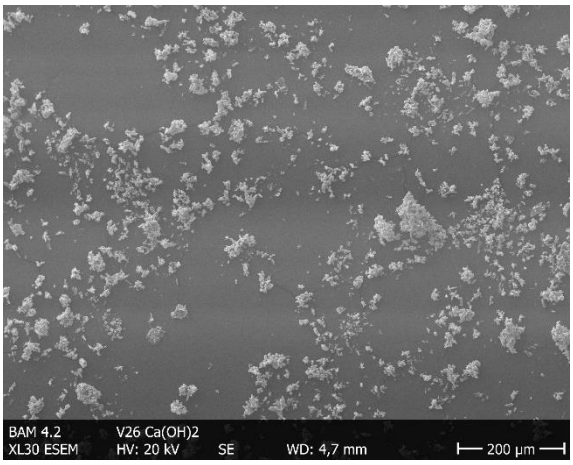
$CaCO_3$ Übersichtsbild | $Ca(OH)_2$ Übersichtsbild

$CaCO_3$ Vergrößerung | $Ca(OH)_2$ Vergrößerung

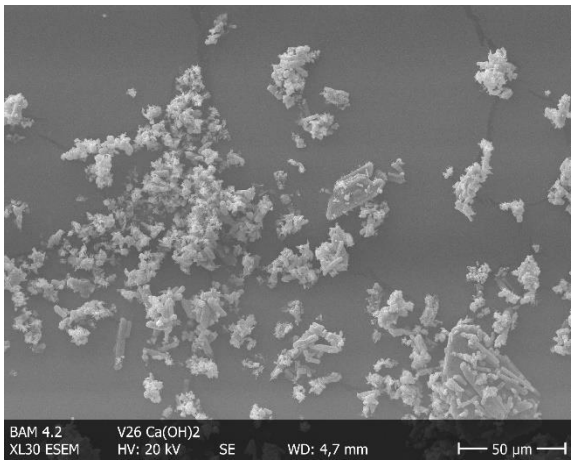
Abbildung 71 Synthetische Gipse im Vergleich: SEM-Aufnahmen von REA-Gips, RC-Gips (obere Reihe) und BS-Gipsen (mittlere Reihe) in gleicher Vergrößerung sowie vergrößerte Ausschnitte der BS-Gips-Aufnahmen (untere Reihe)

Die geringeren Korngrößen waren unabhängig von dem eingesetzten Fällungsmittel, Rührdauer, Ziel-pH-Wert sowie Art und Menge der Impfkristalle. In der nachfolgenden Abbildung 72 ist beispielhaft ein Versuchsansatz mit dem Ziel-pH-Wert 1, Kalkmilch als Fällungsmittel sowie Rührdauern von 3, 4 und 5 Stunden dargestellt.

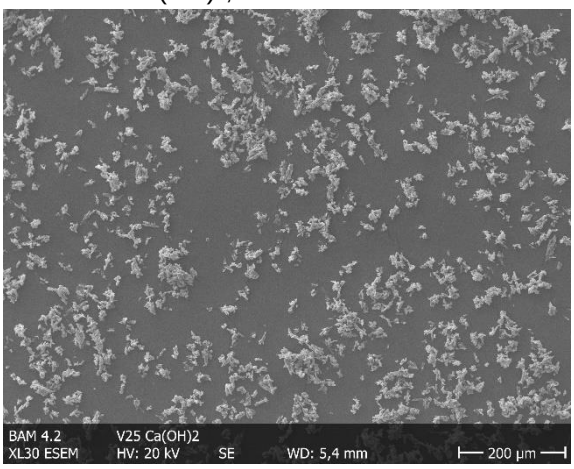
Auch in anderen Versuchsansätzen konnten keine signifikanten Veränderungen von Korngrößen und Korngrößenverteilungen durch unterschiedliche **Rühr-/Reaktionszeiten** nach der Zugabe der Impfkristalle festgestellt werden.



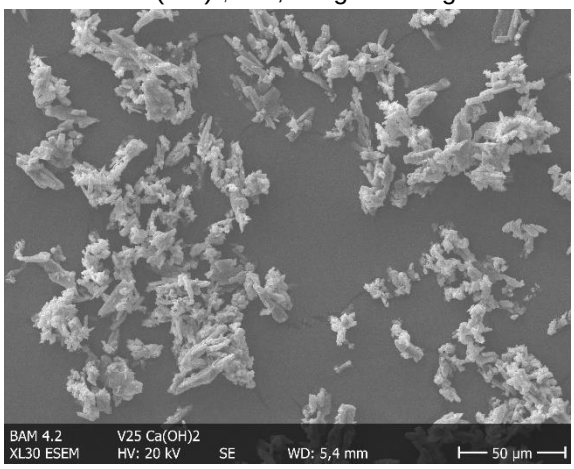
$Ca(OH)_2$, 3 h Übersichtsbild



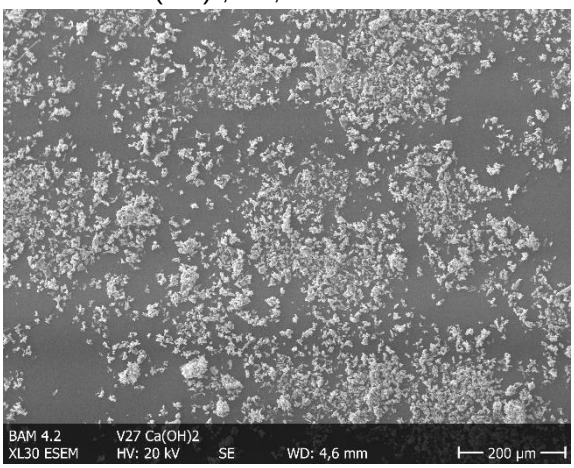
$Ca(OH)_2$, 3 h, Vergrößerung



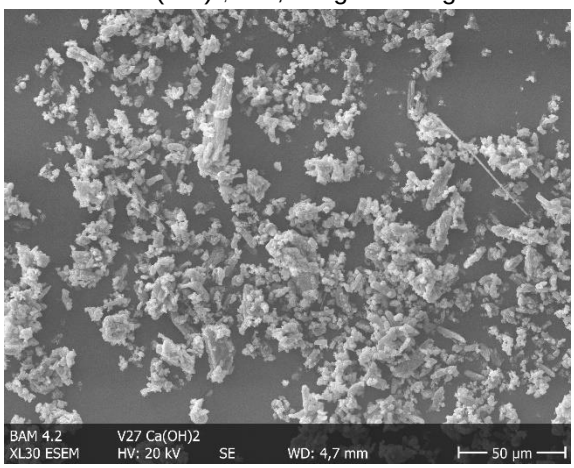
$Ca(OH)_2$, 4 h, Übersichtsbild



$Ca(OH)_2$, 4 h, Vergrößerung



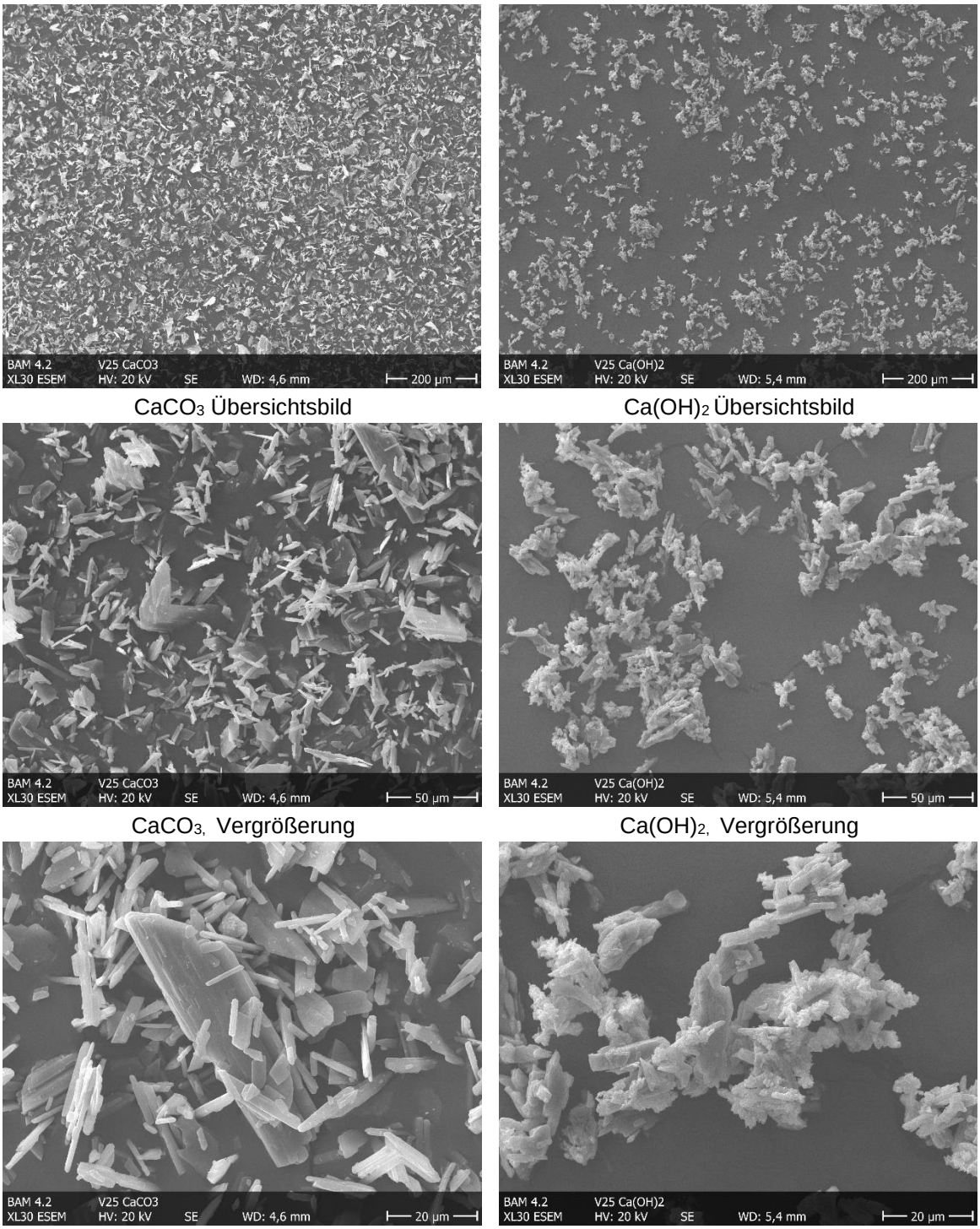
$Ca(OH)_2$, 5 h, Übersichtsbild



$Ca(OH)_2$ 5 h, Vergrößerung

Abbildung 72 BS-Gipse aus dem gleichen Versuchsansatz mit Kalkmilch als Fällungsmittel jedoch unterschiedlichen Versuchsdauern von 3, 4 und 5 Stunden

Bei ähnlichen Korngrößen und Korngrößenverteilungen kam es zu unterschiedlichen Ausbildungen der **Kornformen** der BS-Gipse. Es traten sowohl plattige als auch stäbchenartige Kornformen auf, wobei in der Regel mehr stäbchenförmige Kristalle zu finden waren. Eher kugelige Kornformen gab es insbesondere durch stäbchenförmige Gipskristalle die sich zu größeren Körnern, so wie sie beispielsweise auch in RC-Gipsen aus dem Gipskartonplattenrecycling zu finden sind, zusammenfügten. In der nachfolgenden Abbildung 73 sind Übersichten und Nahaufnahmen von Gipskristallen aus unterschiedlichen Versuchsansätzen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl in den Versuchsansätzen mit Kalkmilch als auch mit $CaCO_3$-Suspension beide Kornformen aufgetreten sind, jedoch in diesem Ansatz die stäbchenförmigen Kristalle überwogen.



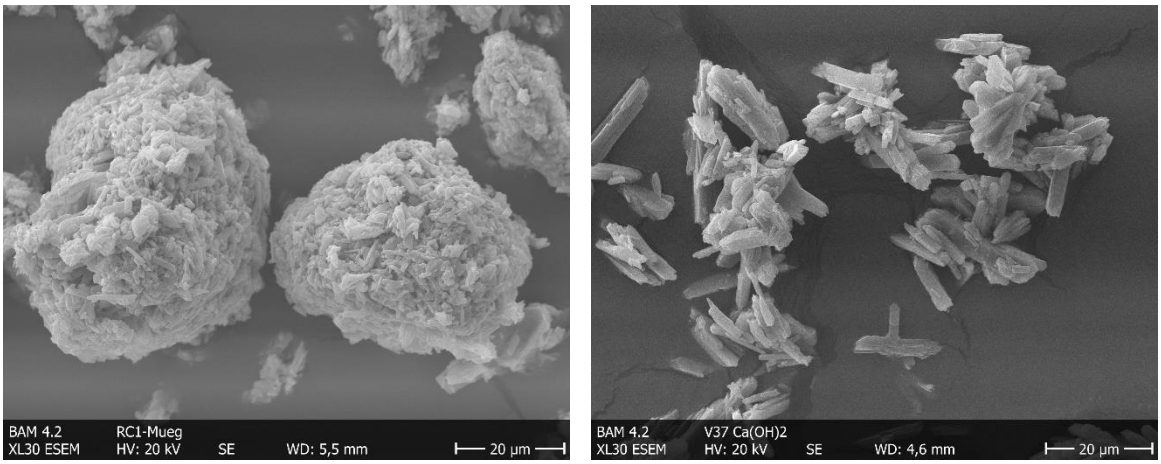
$CaCO_3$ Übersichtsbild | $Ca(OH)_2$ Übersichtsbild

$CaCO_3$, Vergrößerung | $Ca(OH)_2$, Vergrößerung

$CaCO_3$, Nahaufnahme | $Ca(OH)_2$ Nahaufnahme

Abbildung 73 Vergrößerungen von BS-Gipskristallen aus Fällungsversuchen in unterschiedlichem Maßstab

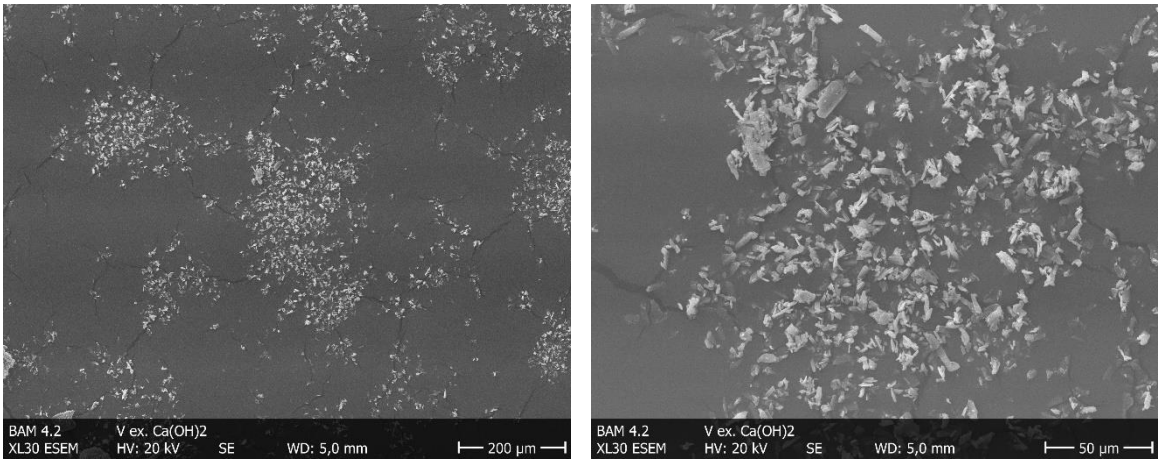
Abbildung 74 zeigt eine Nahaufnahme von BS-Gipskristallen aus einem Ansatz mit Kalkmilch als Fällungsmittel (vgl. Abbildung 3.5.17) im Vergleich zu RC-Gipskristallen. In beiden Fällen sind die Gipspartikel aus wesentlich kleineren, zum Teil eher stäbchenförmigen Gipskristallen zusammengesetzt, jedoch sind die RC-Gipspartikel erheblich größer.



RC-Gips, Nahaufnahme BS-Gips, Nahaufnahme

Abbildung 74 Vergleich von Nahaufnahmen von BS-Gipskristallen mit RC-Gipskristallen

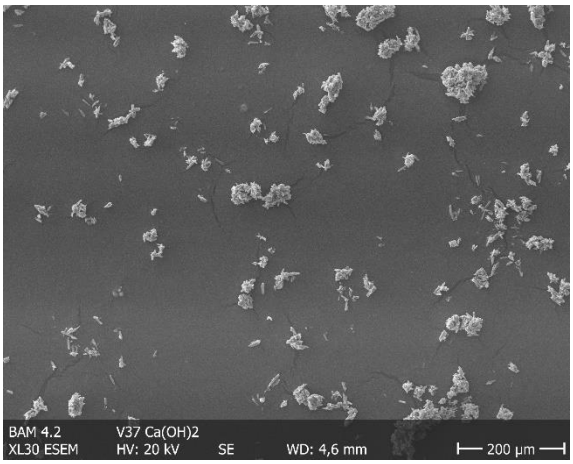
In weiteren Versuchsansätzen wurde untersucht ob unterschiedliche Rührgeschwindigkeiten einen Effekt auf Gipskristallbildung in den Versuchsansätzen haben. In einem Versuchsansatz wurde ganz auf Energieeintrag durch das Rühren der Ansätze verzichtet. In Bezug die Kornformen gab es keine signifikanten Unterschiede der ungerührten zu den gerührten Ansätzen, die Gipskristalle waren tendenziell etwas kleiner (siehe Abbildung 75 und Abbildung 76).



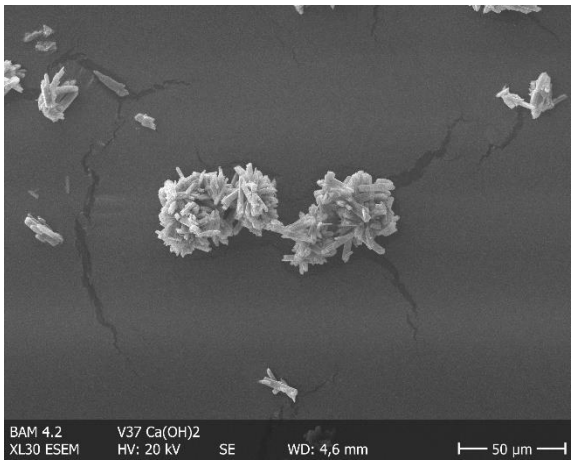
$Ca(OH)_2$, Übersichtsbild $Ca(OH)_2$ Nahaufnahme

Abbildung 75 Fällungsversuch mit Kalkmilch, ohne Energieeintrag durch Rühren, Übersichtsbild und Vergrößerung

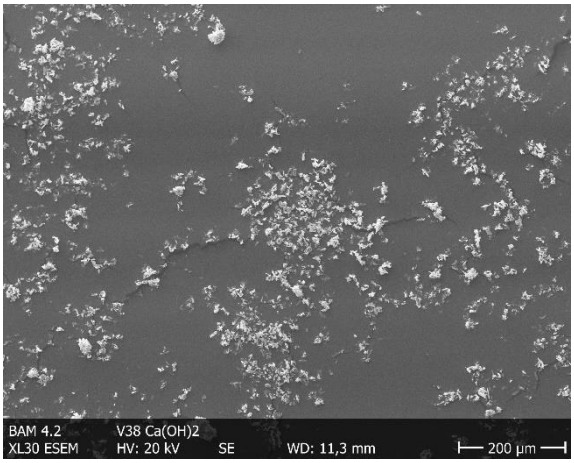
In der nachfolgenden Abbildung 76 sind die Ergebnisse eines Versuchsansatzes mit dem Ziel-pH-Wert 1, 5 Stunden Rührdauer und drei unterschiedlichen Rührgeschwindigkeiten dargestellt. In diesem Versuchsansatz wurden als Impfkristalle RC-Gipspartikel eingesetzt. Es ist gut zu erkennen, dass eine Reduzierung der Rührgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss auf die Größe der gebildeten BS-Gipskristalle hatte.



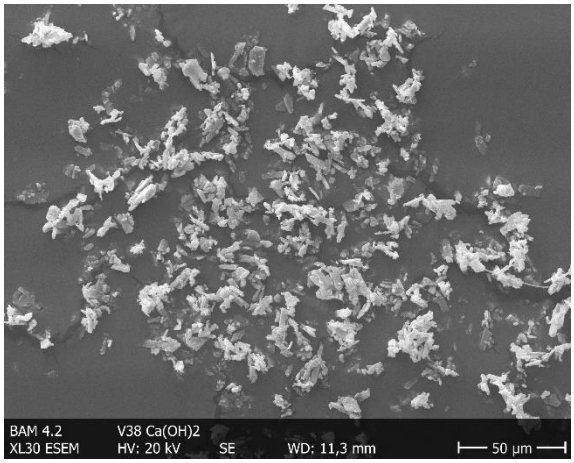
$Ca(OH)_2$, (n) Übersichtsbild



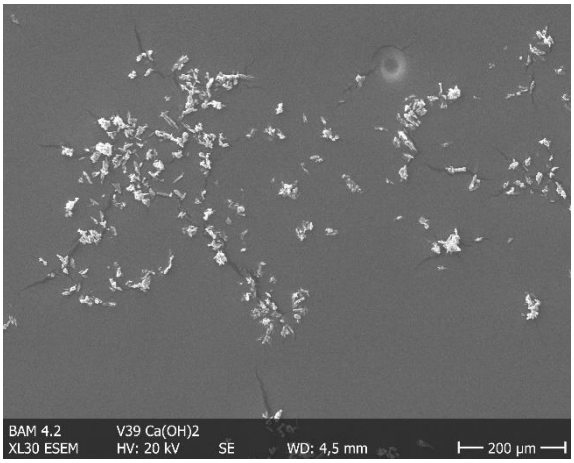
$Ca(OH)_2$, (n) Vergrößerung



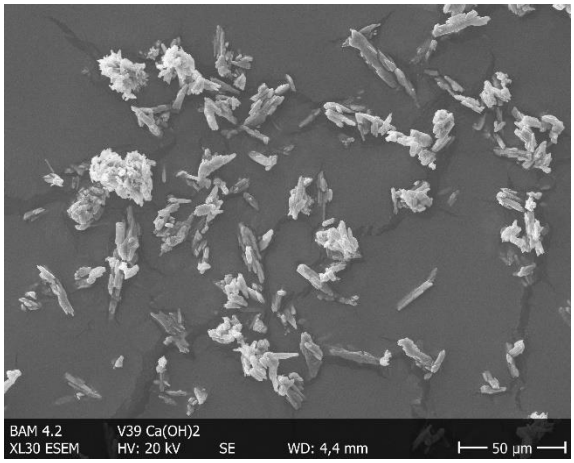
$Ca(OH)_2$, (n-20%), Übersichtsbild



$Ca(OH)_2$, (n-20%), Vergrößerung



$Ca(OH)_2$, (n-40%), Übersichtsbild



$Ca(OH)_2$, (n-40%), Vergrößerung

Abbildung 76 Vergrößerungen von BS-Gipskristallen aus Fällungsversuchen mit Kalkmilch mit variierten Rührgeschwindigkeiten

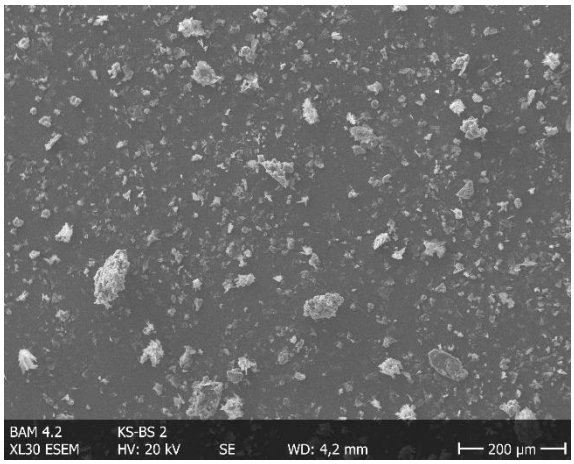
Weiterhin wurde der Einfluss der Impfkristalle auf die Kristallbildung der gefällten BS-Gipse untersucht. Der weit überwiegende Teil der Versuche wurde mit $CaSO_2$*$2H_2O$ p.a. als Impfkristalle durchgeführt. Jeweils 3 Versuchsansätze wurden mit RC-Gips und REA-Gips als Impfkristalle ausgeführt. Die Korngrößen und die Kornformen unterschieden sich jedoch nicht von den vorherigen Ansätzen.

Die Versuche zur Lösung anderer synthetischer Gipse mit unterschiedlichen Säuren (Salzsäure und Schwefelsäure) und anschließender Fällung in Hinblick auf geringere Schwermetallgehalte im so entstandenen Gips verliefen nicht erfolgreich. Obwohl die Säuren in konzentrierter Form eingesetzt wurden, lösten sich die synthetischen Gipse Titanogips und Fluorogips nicht zufriedenstellend. Daher wurde auf anschließende Fällungsversuche verzichtet.

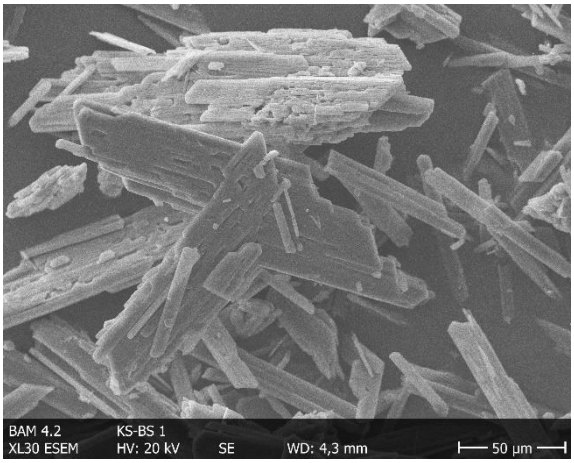
Demgegenüber verlief ein Versuchsansatz zur Lösung der ungünstig geformten, nadelförmigen Gipskristalle (KS-Gips) aus Versuchen zur Klärschlammbehandlung vielversprechender. Dazu wurden 100 ml Altbatteriesäure mit 10 g KS-Gips für 24 Stunden gerührt. Das bei der anschließenden Filtration gewonnene Filtrat wurde mit Kalkmilch gefällt und nach Zugabe von 0,4 g Impfkristallen weitere 1,5 Stunden gerührt. Der so ausgefällte Gips wurde wiederum abfiltriert, getrocknet und elektronenmikroskopisch untersucht. In Abbildung 77 werden die Kristalle von KS-Gips und die aus der anschließenden Lösung und Fällung gewonnenen KS-BS-Gipse einander gegenübergestellt.

Durch die Lösung und Wiederausfällung des KS-Gipses mit Altbatteriesäure haben sich Form und Größe der Gipskristalle deutlich verändert. Die KS-BS-Gipse waren deutlich kleiner, die ursprünglichen nadelförmigen Kristallformen waren von kompakteren, eher runden Kristallformen ersetzt worden. Dadurch würde sich ein solcher synthetischer Gips – unter der Voraussetzung, dass auch die anderen Parameter des Gipses in einem Rahmen bewegen, der eine weitere Nutzung als synthetischer Gips erlaubt – erheblich besser als Substitut in der Gipsindustrie einsetzen lassen. Für die Klärung einer möglichen gemeinsamen Verarbeitung und späteren Nutzung dieser beiden Nebenprodukte aus einer potenziellen Klärschlammbehandlung und dem Altbatterierecycling müssen jedoch weitere Versuche und anschließende Materialuntersuchungen durchgeführt werden.

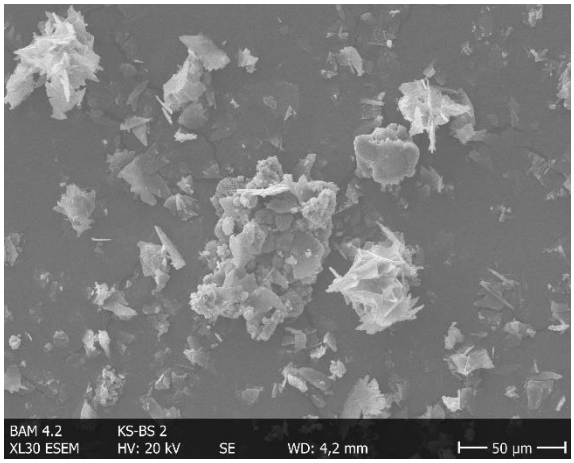
KS-Gips, Übersichtsbild



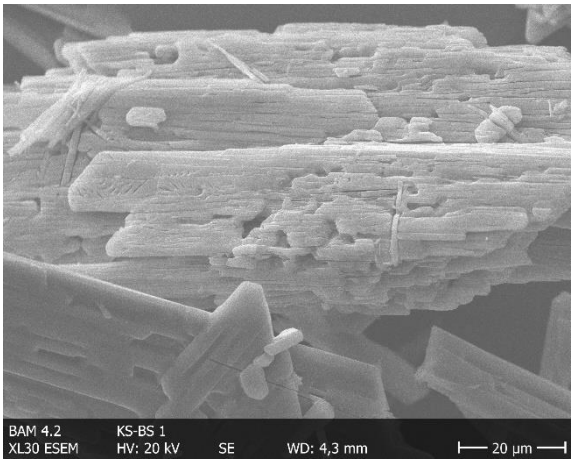
KS-BS-Gips, Übersichtsbild



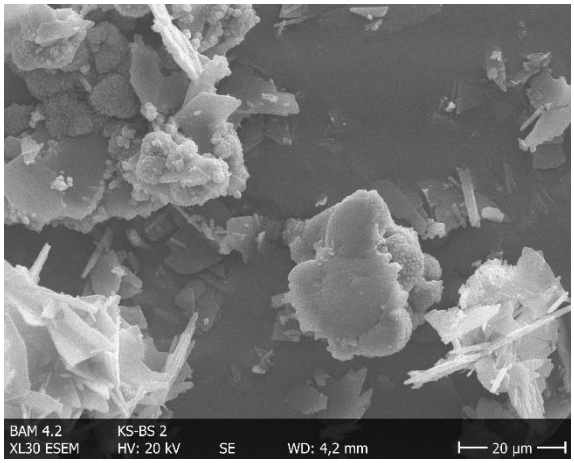
KS-Gips, Vergrößerung



KS-BS-Gips, Vergrößerung



KS-Gips, Nahaufnahme



KS-BS-Gips, Nahaufnahme

Abbildung 77 Vergrößerungen von KS-Gipskristallen und den durch Lösung in Altbatterie-säure mit anschließender Fällung hergestellten KS-BS-Gipskristallen

Sollten diese weitergehenden Untersuchungen und sowie eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung schließlich erfolgreich sein, so wäre dies eine sehr gute Möglichkeit zwei vormalige Reststoffe zu verwerten und in den Gipsstoffkreislauf zu überführen.

4 Standortanalyse Recyclinganlagen für GFP

Im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes GipsRec2.0 wurde das Forum für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V. am Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft beauftragt, in 4 Arbeitspaketen die Chancen und Herausforderungen für Anlagenstandorte für Gipsrecyclinganlage für Gipsfaserplattenabfälle (GFP-Abfälle) zu untersuchen (Untersuchungsbericht Anlage 1). Hierbei erfolgten im ersten Schritt Standortprüfungen, welche mittels einer Nutzwertanalyse durchgeführt wurden. Darüber hinaus wurden im weiteren Verlauf die technischen und (genehmigungs-) rechtlichen Rahmenbedingungen untersucht sowie eine überschlägige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine neue Anlage durchgeführt.

Zur Ermittlung der erforderlichen Recyclingkapazitäten stand vor allem im Vordergrund die markttechnische Ermittlung möglicher Anfallmengen von GFP. Ein großes Problem stellt hierbei die getrennte Erfassung der GPF-Abfälle dar, welche leider nicht möglich war. Hintergrund dazu ist aktuelle Entsorgungspraxis. Beide Abfallarten (GKP-Abfälle und GFP-Abfälle) werden noch unter einem Abfallschlüssel deklariert und kommen somit als Gemisch in den Recycling- bzw. Entsorgungsanlagen an. Aus diesem Grunde kann keine belastbare Mengenaussage getroffen werden. Somit wurde bei allen weiteren Betrachtungen die Unterscheidung zwischen GKP und GFP in Bezug auf ihre Abfallströme im Verhältnis auf ihre jährliche Produktionsmenge gesehen. Jährlich werden in Deutschland ca. 3,5 Mio. t GKP und ca. 450.000 t GFP produziert (ohne Berücksichtigung etwaiger Konjunkturschwankungen). Dieses Verhältnis wurde beim Aufkommen entsprechender Abfallmengen gleichermaßen angenommen.

Wie in den Forschungsarbeiten beschrieben, wird für die mechanische Aufbereitung (Recycling) von GFP andere Aufbereitungstechnik benötigt, wie die derzeitig für die Aufbereitung von GKP angewendete Technologie. Dieses liegt zum einen in der größeren Härte der GFP, zum anderen an der unterschiedlichen Zusammensetzung beider Gipsbauplatten. Somit ist die Nutzung existierenden Recyclinganlagen nach derzeitigem Kenntnisstand für das Recycling von GFP nicht möglich.

Auf Grund der viel geringeren Produktionsmenge an GFP gegenüber GKP sind nach ersten wirtschaftlichen Betrachtungen separate Standorte für Recyclinganlagen von GFP nicht sinnvoll. Vielmehr wird empfohlen, existierende Recyclinganlagen mit entsprechender Aufbereitungstechnik, z.B. als zweite Aufbereitungslinie auszurüsten.

Ausgehend von einem wirtschaftlich vertretbaren Abfalleinzugsgebiet von 200 km um eine Recyclinganlage, kann bereits fast flächendeckend das gesamte deutsche Abfalleinzugsgebiet mit den derzeitig betriebenen, geplanten sowie ruhenden Recyclinganlagen abgedeckt werden. Es zeigt sich lediglich ein Bedarf an Recyclingkapazitäten im bayerischen Raum.

Wie bereits erwähnt, ist die Grundlage dieser Betrachtung die Voraussetzung, dass existierende Recyclinganlagen mit entsprechender Aufbereitungstechnik, z.B. als zweite Aufbereitungslinie ausgerüstet werden.

Abbildung 78 zeigt die deutschlandweite Abdeckung bzw. den zusätzlichen Bedarf

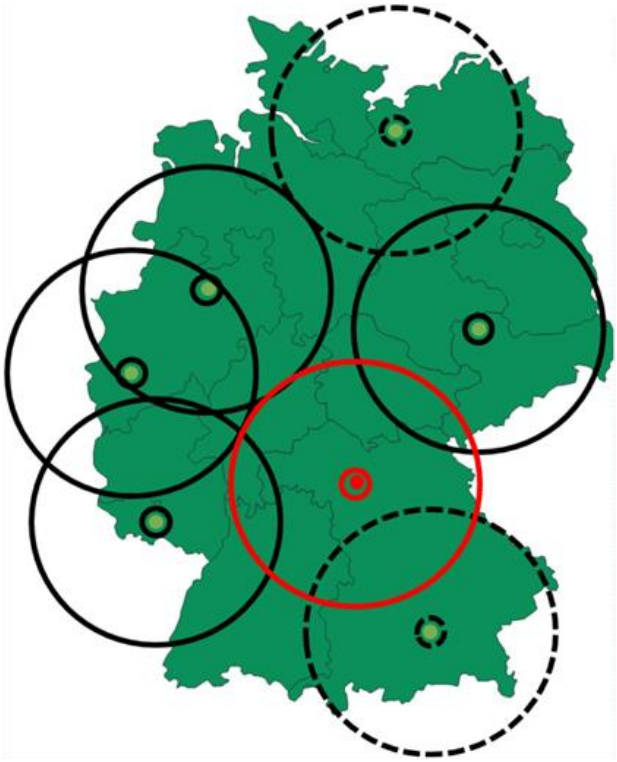


Abbildung 78 Abdeckung von Gipsrecyclinganlagen in Deutschland und Bedarf

Weiterer möglicher Anlagenstandort einer Gipsrecyclinganlage (roter Punkt mit rotem Transportentfernungsumkreis). Gestrichelter schwarzer Punkt sowie Transportentfernungsumkreis sind nach derzeitigem Kenntnisstand genehmigte bzw. ruhende Anlagen. Durchgezogener schwarzer Punkt sowie Transportentfernungsumkreis zeigen laufende Gipsrecyclinganlagen.

Wie im nachfolgenden Punkt erläutert, zeigt sich ein wirtschaftlicher Betrieb für das Recycling von GFP nur, sofern es mit einer bestehenden bzw. geplanten Recyclinganlage kombiniert wird (zweite Aufbereitungslinie). Dieses liegt vor allem in der Verfügbarkeit der erforderlichen, sortenreinen GFP-Mengen, als auch in den Investitionen für die Infrastruktur für den Recyclingstandort.

5 Diskussion der Ergebnisse und Interpretation

Die technischen Untersuchungen umfassen zwei Themenschwerpunkte:

a) Technische Untersuchungen zum GFP-Recycling und
b) Technische Untersuchungen zur Verwertung synthetischer Gipse.

Die Versuchsreihe a) wurde im Technikumsmaßstab durchgeführt, die Versuchsreihe b) im Labor. Qualitätskriterium für die Aufbereitung sowohl von GFP als auch synthetischen Gipsen waren die Vorgaben des Bundesverbandes der Gipsindustrie nach einem Reinheitsgrad bzw. Gipsgehalt von mindestens 85% im Recyclat, wobei werksspezifische Abweichungen bis mind. 80 MA.-% nach besonderer Vereinbarung zulässig sind. Die potenziellen Sekundärrohstoffverwerter hatten im Gespräch auch signalisiert, dass letztgenanntes Kriterium als akzeptabel angesehen wird. Die Ergebnisse beider Untersuchungsansätze werden im Folgenden diskutiert.

Technische Untersuchungen zum GFP-Recycling

Das Ziel bestand darin, die GFP-Materialien so aufzuschließen, dass sowohl eine kalzinierbare Gipsqualität als auch eine wiederverwendbare Papierfaser entsteht, um diese dem jeweiligen Produktionsprozess wieder als Rohstoff zuführen zu können. Dabei sollte eine Aufschlussmethode entwickelt werden, die eine Gipsqualität gemäß den Vorgaben des Bundesverbandes der Gipsindustrie erzeugt. In vorbereitenden Untersuchungen erfolgte die Materialcharakterisierung der marktüblichen GFP. Die Ergebnisse zeigten, dass die GFP-Mischung zu etwa 80 % aus Gips und zu etwa 20 % aus Fasern und Zusatzstoffen besteht.

Um die GFP dem Recycling zugänglich zu machen, muss im ersten Schritt der Aufschluss des Materials erfolgen. Der Verarbeitungsweg besteht aus zwei elementaren Schritten, dem Zerkleinern und dem Klassieren. Zur Identifizierung der optimalen Zerkleinerungs- und der optimalen Klassierungstechnologie wurden verschiedene Versuche durchgeführt sowie mehrere Zerkleinerungsaggregate getestet. Hierbei wurden geeignete Verfahren identifiziert, getestet und im Ausschlussverfahren hinsichtlich einer weiteren Eignung in der Prozesskette beurteilt. Auch für die Identifizierung der optimalen Klassierungstechnologie wurden verschiedene Techniken getestet.

Es zeigte sich, dass im ersten Aufschlussschritt (Zerkleinerung), GFP sowohl im Trockenverfahren (Hammermühle) als auch im Nassverfahren (Codukte®-Technologie) dem Aufschluss zugänglich sind. Auch ist eine Trennung des Gemisches aus Gips und Papierfasern in der Folge ebenfalls möglich.

Im direkten Vergleich dieser zwei Verfahrensansätze erfolgte aus Gründen der Ressourceneffizienz die Entscheidung für eine weitere Verarbeitung mittels Trockenverfahren, da a) dies keine Abwässer als zusätzlich aufzubereitenden Stoffstrom erzeugt, und b) kein zusätzlicher Energieaufwand für Materialtrocknung entsteht.

Das Papierfaser-Gips-Gemisch konnte nach dem Aufschluss in den durchgeführten großtechnischen Versuchen durch Klassierung (Siebung) gut voneinander getrennt werden. Die Ergebnisse zeigten bessere Separationsergebnisse mit dem 10G-Linearschwingsieb als mit dem Russell-Sieb.

Beim Einsatz kleinerer Siebweiten sinkt der TOC-Gehalt in der Gipsfraktion. Zu kleine Siebweiten führen aber zu einer Vergrößerung des Gipsanteils in der Papierfraktion. Hier ist ein Optimum auch unter Berücksichtigung weiter Siebparameter zu finden. Beim 10G-Sieb konnten beim Einsatz einer 308µm Maschenweite die besten Ergebnisse erzielt werden (2,33 Ma% TOC in der Gipsfraktion). Dennoch wird die Vorgabe des Gipsverbandes, die einen maximalen TOC-Gehalt von 1,0 Ma-% vorsieht [54], nicht ganz erreicht. Um einen TOC-Gehalt <1 Ma-% zu erreichen, muss entweder a) eine weitere Behandlung in die Prozesskette integriert werden, oder b) mit den Herstellern der Gipsplatten geprüft werden ob auch höhere TOC-Gehalte verarbeitbar sind.

Dazu wurden bereits erste Gespräche mit dem Bundesverband der deutschen Gipsindustrie geführt, inwieweit RC-Gips mit einem TOC-Gehalt von ca. 2,5 Ma% eingesetzt werden können. Dieses wurde als realisierbar eingeschätzt, ist jedoch mit dem jeweiligen Produzenten auf Grund unterschiedlicher Verarbeitungstechnologien im Einzelnen zu klären.

Somit ist das Linearschwingsieb als geeignete Klassiereinrichtung zu bezeichnen, um die Gips- und die Papierfraktion zu trennen. Die separierte Gipsfraktion ist qualitativ hochwertig und kann voraussichtlich in diesem Zustand als RC-Material in der Gipsindustrie eingesetzt werden.

Allerdings war der Gipsgehalt in der Papierfraktion nach wie vor hoch, was eine weitere Abreinigung der Papierfraktion erforderlich machte, um eine stoffliche Verwertung der Papierfaser zu ermöglichen. Im Rahmen der Versuche wurden sowohl Sichtertechnik (Trenntisch, Zick-Zack-Sichter) sowie Siebtechnik (Trommelsieb, Kreisschwingsieb, Vibrations-Taumelsieb) eingesetzt, welche sich nicht als zielführend erwiesen. Danach wurde in technischen Vergleichsuntersuchungen ein Ansatz mit dem zusätzlichen Einsatz einer Prallmühle, mit 4 mm Spaltöffnungen arbeitend, als Vorzugslösung identifiziert. Mit der untersuchten Verfahrensweise kann der Gipsgehalt in der Papierfraktion auf rein mechanischem Weg auf < 50 % abgesenkt werden. Dies ist für eine Rückführung in die Papierindustrie jedoch nicht ausreichend. Um hierzu technische Lösungsansätze zu finden, ist weiterer Forschungsbedarf notwendig.

Eine potenzielle Nutzung der Papierfraktion mit dem verbleibenden Gipsgehalt in der Gipsfaserplattenherstellung ist jedoch denkbar. Dabei würde der noch enthaltene Gips als reiner Füllstoff fungieren, während der Faseranteil von >50% als Armierung dient. Als weitere Einsatzmöglichkeiten sind Kompostierung, Vergasung, sowie stoffliche Verwertung (Kohlenstoffträger in der Stahlindustrie, Entwicklung als Dämmstoff) zu sehen.

Die über 10-Jahre angesetzte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (vgl. Abschnitt 7) bestätigte, dass die entwickelte Recyclingtechnologie wirtschaftlich eingesetzt werden kann, wenn sie mit einer bestehenden bzw. geplanten Recyclinganlage kombiniert wird (zweite Aufbereitungslinie).

Fazit: Gipsfaserplatten lassen sich mechanisch aufbereiten, das Ergebnis ist eine Gipsfraktion in einer für die Gipsindustrie verwertbaren Qualität. Die verbleibende gipshaltige Papierfraktion genügt den Qualitätsanforderungen für den Einsatz in der Papierindustrie nicht. Für eine weiterführende Aufbereitung zur Erreichung der erforderlichen Qualität wären weitere aufwendige bzw. energieintensive Aufbereitungsschritte erforderlich, so dass derzeit die Wirtschaftlichkeit nicht darstellbar ist. Daher müssen alternative Verwertungswege für die verbleibende gipshaltige Papierfraktion entwickelt werden, wie die Nutzung in der Gipsfaserplattenindustrie oder als Füllstoff, z.B. in Dämm-Materialien.

Technische Untersuchungen zur Verwertung synthetischer Gipse

Die betrachteten Synthesegipse umfassten: REA-Gipse, Phosphogipse, Fluorogipse, Titanogipse, Zitronensäuregipse, Milchsäuregipse, Gipse aus der Klärschlammbehandlung und Gipse aus der Batteriesäureaufbereitung (BS-Gipse). Die Informationen hierfür wurden im Rahmen von Recherchen, Umfragen oder Interviews mit Fachleuten eruiert. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich ihres Potenzials für den Ersatz von REA- und Naturgipsen untersucht und bewertet. Im Verlauf der Recherchen stellte sich Altbatteriesäure als eine geeignete und noch nicht genutzte Quelle für Sekundärgipse aus Reststoffen dar, so dass weiterführende Laborversuche mit Altbatteriesäure durchgeführt wurden, um das Recyclingpotenzial zu eruieren. Laborversuche mit anderen synthetischen Gipsen verliefen nicht erfolgreich. Demgegenüber verlief ein Versuchsansatz zur Lösung der ungünstig geformten, nadelförmigen Gipskristalle aus Versuchen zur Klärschlammbehandlung vielversprechender. Am günstigsten verliefen die Versuche mit BS-Gipsen. Die Auswertung der weiterführenden Versuche mit BS-Gipsen zeigte, dass das angestrebte Qualitätskriterium von 85% Gips-Reinheitsgrad in mehr als 80% der Versuche erreicht werden konnte. Die im Rahmen der Fällungsversuche hergestellten synthetischen Gipse zeigten deutlich geringere Korngrößen bei einer breiteren Korngrößenverteilung im Vergleich zu anderen synthetischen Gipsen oder Referenzgipsen, was günstig für die weitere Verarbeitung eines synthetischen Gipses sein kann.

Fazit: Einige Arten synthetischer Gipse, die auf Grund ihrer Eigenschaften ohne weiteres einsetzbar sind, werden in der Regel schon wiederverwendet, bei anderen Arten schränken die Eigenschaften die Wiederverwertung ein. Die Batteriesäureaufbereitung zeigt gute Ergebnisse, es ist aber darauf hinzuweisen, dass es sich bei den durchgeführten Untersuchungen um Grundlagenforschung handelt, für eine praxistaugliche Entwicklung sind weitere Untersuchungen notwendig. Bemerkenswert ist, dass die Industrie (sowohl die Gipsindustrie wie auch Industrien, bei denen Neutralisationsgipse anfallen. z.B. die Batteriehersteller) an einer Recyclinglösung interessiert sind. In diesem Bereich ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden und im Sinne einer effektiven Ressourcenwirtschaft auch sehr sinnvoll.

6 Ökologische Betrachtung von RC-Gipses

Eine ökobilanzielle Betrachtung wurde entsprechend ISO 14040 und 14044 in dem dafür vorgesehenen Format durchgeführt. Der Bericht befindet sich im Anhang 2. Nachstehend sollen die Kernstücke der Studie dargelegt werden.

6.1 Methodik

Die Ökobilanz quantifiziert die Umweltauswirkungen für die Bereitstellung von Gips aus GFP und Altbatteriesäure. Bei der Synthese von Altbatteriesäure zu Gips wurde unterschieden nach den beiden Fällungsmitteln Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) und Calciumkarbonat ($CaCO_3$). Diese werden ins Verhältnis zu den Umweltauswirkungen der zwei Routen gesetzt, über die Gips heute zum großen Teil gewonnen wird, die REA-Gips Route und die Naturgips Route (Vergleichssysteme).

Die funktionelle Einheit ist die Produktion von 1 Mg Gips. Zur besseren Vergleichbarkeit handelt es sich bei dem Gips um Kalziumsulfat Dihydrat ($CaSO_4$ x $2H_2O$) mit 0 % freiem Wasser. Die Bilanz orientiert sich zunächst am cut-off Ansatz. Das bedeutet, die Bilanz wird an dem Punkt abgeschnitten, an dem recycelbares Material das Produktsystem verlässt. In einem zweiten Schritt soll zusätzlich zur Berechnung nach cut-off entsprechend der Substitutionsmethode gerechnet werden. Dabei wird der Sekundärnutzen durch Erzeugung von Sekundärrohstoffen (z.B. aus der Rückgewinnung von Metallen) sowie die Erzeugung von Energie (z.B. aus der energetischen Verwertung von Reststoffen) gesondert als Gutschrift ausgewiesen.

6.2 Ergebnisse

Für das System Synthesegips zeigen die ökobilanziellen Ergebnisse höhere Lasten als die Vergleichssysteme. Für das System RC-Gips fällt die Bilanz in der Modellierung nach cut-off zunächst schlechter aus als für die Vergleichssysteme. Grund dafür sind Transporte und die Verwertung von Sekundärabfällen (insbesondere die energetische Verwertung der papier- und kunststoffreichen Fraktion). Werden nach der Substitutionsmethode jedoch auch Gutschriften für die Koppelprodukte bei der Verwertung der Sekundärabfälle erteilt, stellt sich das Ergebnis für das System RC-Gips in den meisten Wirkungskategorien besser dar als in den Vergleichssystemen. In Abbildung 6.1 sind die Ergebnisse anhand des Erderwärmungspotentials dargestellt.

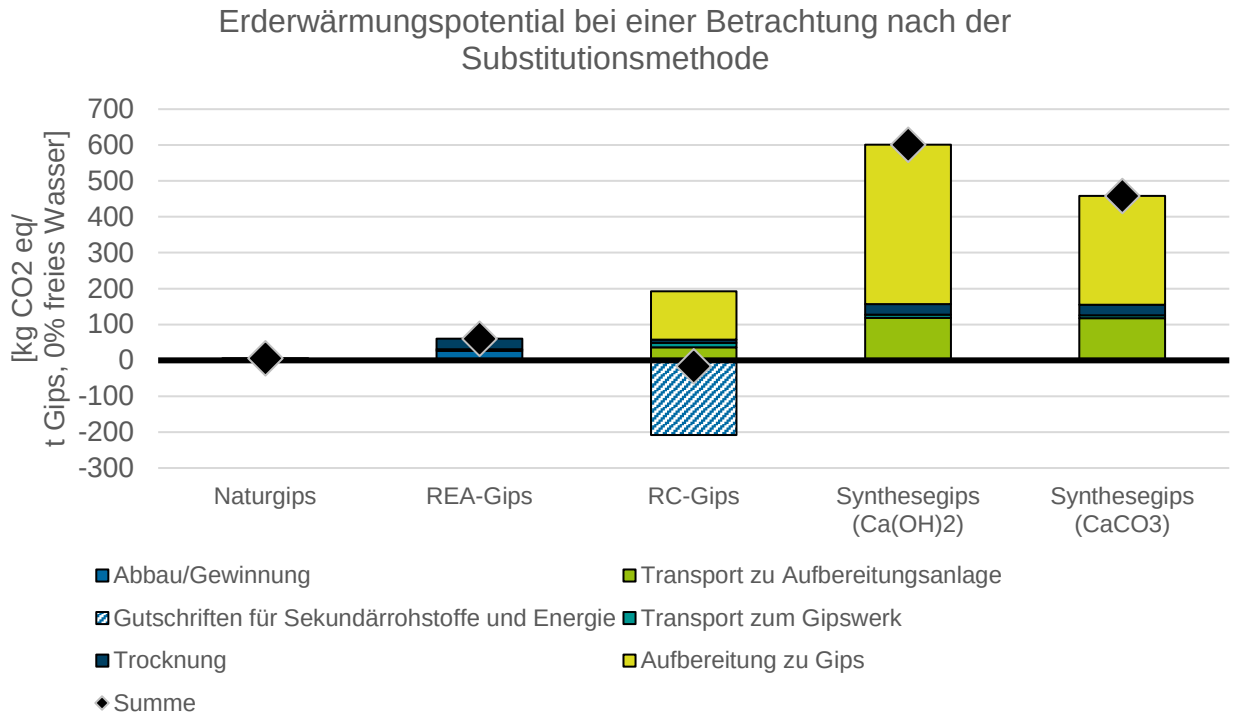


Abbildung 79 Erderwärmungspotenzial bei einer Betrachtung der untersuchten Systeme nach der Substitutionsmethode

6.3 Resümee

Angesichts der drohenden Verknappung von Gips in Deutschland ist die Erschließung alternativer Gipsquellen notwendig. Gleichzeitig ist die stoffliche Verwertung von Abfallprodukten zu Gips aus Sicht der Kreislaufwirtschaft ein Muss, selbst wenn die ökobilanziellen Ergebnisse dieser Alternativen nicht immer besser ausfallen als die herkömmlichen Methoden. Besonders beim Recycling von GFP zeigt die Ökobilanz, dass diese Verfahren durch die Berücksichtigung von Gutschriften und den Nutzen der Entsorgung sogar besser abschneiden können als Vergleichssysteme. Dies hängt von methodischen Entscheidungen ab, die nicht als „Schönrechnen“ verstanden werden sollten, sondern unterschiedliche Perspektiven darstellen.

Es wird dringend empfohlen, das Recycling von GFP voranzutreiben, da die Deponierung als derzeitige Alternative nach der Abfallhierarchie die schlechteste Option darstellt, die zu einem Ressourcenverlust führt und sich nicht mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft vereinbaren lässt. Änderungen in der Gesetzgebung, wie die Novellierung der Deponieverordnung 2024, die die Deponierung von recycelbaren Abfällen verbietet, und sinkende Recyclingkosten können höhere stoffliche Verwertungsquoten für GFP fördern. Vergleichbar ist diese Entwicklung mit der Gipskartonplatte, bei der das Recycling mittlerweile kostengünstiger als die Deponierung ist.

Für Synthesegips zeigen die Ökobilanz-Ergebnisse im Vergleich höhere Belastungen, weshalb sie trotz potenzieller Vorteile durch Sekundärnutzen nicht als primäres Argument dienen können. Es wird empfohlen, die Fällung mit Kalziumkarbonat zu bevorzugen, da sie in der Ökobilanz niedrigere Umweltlasten als die Fällung mit Kalziumhydroxid aufweist.

7 Ökonomische Betrachtung von RC-Gipsen

7.1 Methodik

Im Rahmen einer ersten Gewinn- und Verlustrechnung soll ermittelt werden, ob bzw. welches wirtschaftliche Gewinnpotential die Aufbereitung von Gipsfaserplatten besitzt. Es wurden zwei Betrachtungen vorgenommen, die Aufbereitung der GFP als eigenständige Anlage und als Erweiterungsprozess in Angliederung an eine Bestandsanlage. Die wirtschaftlichen Betrachtungen beider Anlagenkonzepte sind identisch aufgebaut, um die Ergebnisse repräsentativ darstellen und vergleichen zu können. Die Ermittlung dieser Gewinnpotentiale beruhen unter anderem auf vorgenannten Mengenannahmen sowie die aktuellen Marktbedingungen. Darüber hinaus wurden aus den langjährigen Erfahrungen des Betriebes der GRA Großpösna wirtschaftliche Rückschlüsse zu Verwertungskosten bzw. Erlösen gezogen. Bezüglich der Transportaufwendungen wurden entsprechende Richtpreisanfragen bei Spediteuren durchgeführt. Ebenso wurden Richtpreisangebote für Anlagenkomponenten von den Herstellern eingeholt, welche u.a. in diesem Bericht beschrieben sind bzw. bei denen bereits Technikumsversuche erfolgreich durchgeführt werden können.

Im Bereich der Betriebskosten einer solchen Aufbereitungsanlage konnten aus dem langjährigen Betrieb der Gipsrecyclinganlage der MUEG in Großpösna ebenfalls Erfahrungswerte für die ökonomische Betrachtung herangezogen werden.

7.2 Gewinn- und Verlustrechnung

7.2.1 Neuerrichtung einer Gipsrecyclinganlage für Gipsfaserplatten

Für die Aufbereitung der GFP in einer eigenständigen Anlage sollen hier zunächst die Vor- und Nachteile in ihrer Gesamtheit gegenübergestellt werden. Da die Wirtschaftlichkeit einer Anlage das wichtigste Kriterium für eine mögliche Investition ist, soll mit Hilfe einer vergleichenden Gewinn- und Verlustrechnung

Vorteile:

- Freie, optimierte Standortwahl (siehe Pkt. 4)
- Keine Anpassung der Technologie an bestehende Standortbedingungen erforderlich (z.B. Hallen, Technik etc.)

Nachteile:

- Keine Nutzung vorhandener Infrastruktur möglich
- Keine Synergieeffekte im Bereich Personal und mobile Technik
- Höhere Investkosten, damit stärkere Mengenabhängigkeit
- Ggf. höhere Hürden im Genehmigungsverfahren

Die wichtigsten Randbedingung für die Errichtung und den Betrieb einer neuen Recyclinganlage für GFP als Basis für die Gewinn- und Verlustrechnung sind in Tabelle 37 dargestellt.

Betriebskosten, wie Aufwendungen für Energie, Instandhaltung, Qualitätssicherung wurden entsprechend der eingesetzten Technik, der Erfahrungen der MUEG sowie des Qualitätsmanagements bei der bestehenden RC-Gips Produktion berechnet. Die Rechnung beinhaltet den Betrieb der Anlage für einen Zeitraum von 10 Jahren. Preisindizierungen sind berücksichtigt, die Höhe wurde auf Basis statistischer Angaben abgeschätzt.

Tabelle 37 Rahmenbedingungen für den Betrieb einer Aufbereitungsanlage für GFP

Bezeichnung	Menge/ Wert	Erläuterung
Inputmenge Gipsabfälle	15.000 t/a	Festlegung auf Basis Potenzialerhebung
Inputerlös für Gipsfaserplatten	45 €/a	aktueller Marktpreis
Outputmenge Gipsfraktion	12.000 t/a	Aus Material Zusammensetzung
Outputmenge Papierfraktion	3.000 t/a	Aus Materialzusammensetzung
Personalbedarf Anlagenleiter Anlagenfahrer Gerätefahrer Anlagenfahrer/ Springer	 1 1 1 1	Festlegung aus der Technologie und Erfahrung der Fa. MUEG aus bestehender Anlage
Investsumme Maschinen- und Anlagentechnik	ca. 1.300 T€	Zweiwellenzerkleinerer, Hammermühle 10G-Linearschwinger Turbomühle/ Vibrationssieb Pneumatische Förderung, Transportbänder, Bunker, Silos, Container für Output-Material E-Technik, Steuerung
Infrastruktur	ca. 1.150 T€	Richtpreisangebote für Flächenbefestigung 2.500 m² Hallenbau Inputhalle, Anlagenhalle als Kalthallen
Gerätetechnik	ca. 620 T€	Abfragen MUEG aus 2023 Radlader, Bagger, Teleskoplader
Miete	ca. 45 T€	Miete für Gewerbefläche sowie Büro und Sozialräume aus Internetrecherche

Tabelle 38 zeigt die Gewinn- und Verlustrechnung für einen 10 Jahreszeitraum.

Tabelle 38 Gewinn- und Verlustrechnung Errichtung und Betrieb einer Gipsrecyclinganlage für GFP

Erlöse/ Kosten	Menge	Wert	Indizierung	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	*Gesamt*
Umsatzerlöse														
Input Gipsabfälle	15.000 t/a	45,00 €/t	1,00%	675.000 €	681.750 €	688.568 €	695.453 €	702.408 €	709.432 €	716.526 €	723.691 €	730.928 €	738.238 €	*7.061.993 €*
Erlös RC-Gips	12.000 t/a	4,50 €/t		54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	*540.000 €*
Erlös Papierfraktion	3.000 t/a	0,00 €/t		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	*0 €*
Umsatzerlöse				**729.000 €**	**735.750 €**	**742.568 €**	**749.453 €**	**756.408 €**	**763.432 €**	**770.526 €**	**777.691 €**	**784.928 €**	**792.238 €**	***7.601.993 €***
Dieselkraftstoff			2,00%	54.750 €	55.845 €	56.962 €	58.101 €	59.263 €	60.448 €	61.657 €	62.891 €	64.148 €	65.431 €	*599.497 €*
Elektroenergie			2,00%	30.690 €	31.304 €	31.930 €	32.568 €	33.220 €	33.884 €	34.562 €	35.253 €	35.958 €	36.677 €	*336.047 €*
Aufwendung Qualitätssicherung			1,00%	20.000 €	20.200 €	20.402 €	20.606 €	20.812 €	21.020 €	21.230 €	21.443 €	21.657 €	21.874 €	*209.244 €*
Transportleistungen	3.000 t/a	35,00 €/t	2,00%	105.000 €	107.100 €	109.242 €	111.427 €	113.655 €	115.928 €	118.247 €	120.612 €	123.024 €	125.485 €	*1.149.721 €*
Instandhaltung			1,00%	67.080 €	67.751 €	68.429 €	69.113 €	69.804 €	70.502 €	71.207 €	71.919 €	72.638 €	73.365 €	*701.808 €*
Betriebskosten gesamt				**277.520 €**	**282.200 €**	**286.964 €**	**291.815 €**	**296.754 €**	**301.783 €**	**306.904 €**	**312.118 €**	**317.426 €**	**322.832 €**	***2.996.317 €***
Rohertrag				*451.480 €*	*453.550 €*	*455.603 €*	*457.638 €*	*459.653 €*	*461.648 €*	*463.622 €*	*465.574 €*	*467.502 €*	*469.406 €*	*4.605.676 €*
Personalaufwand			**2,00%**	**224.464 €**	**228.953 €**	**233.532 €**	**238.203 €**	**242.967 €**	**247.826 €**	**252.782 €**	**257.838 €**	**262.995 €**	**268.255 €**	***2.457.813 €***
Mieten/Pachten			1,00%	44.400 €	44.844 €	45.292 €	45.745 €	46.203 €	46.665 €	47.131 €	47.603 €	48.079 €	48.560 €	*464.522 €*
übr.Kosten pauschal			1,00%	12.000 €	12.120 €	12.241 €	12.364 €	12.487 €	12.612 €	12.738 €	12.866 €	12.994 €	13.124 €	*125.547 €*
sonst. betrieblicher Aufwand				**56.400 €**	**56.964 €**	**57.534 €**	**58.109 €**	**58.690 €**	**59.277 €**	**59.870 €**	**60.468 €**	**61.073 €**	**61.684 €**	***590.069 €***
betr. Cash flow				**170.616 €**	**167.633 €**	**164.538 €**	**161.326 €**	**157.997 €**	**154.546 €**	**150.970 €**	**147.267 €**	**143.434 €**	**139.467 €**	***1.557.794 €***
Abschreibungen				361.804 €	361.804 €	361.804 €	361.804 €	361.804 €	361.804 €	258.471 €	258.471 €	258.471 €	258.471 €	*3.204.705 €*
Betriebsergebnis				**-191.188 €**	**-194.171 €**	**-197.266 €**	**-200.478 €**	**-203.807 €**	**-207.258 €**	**-107.500 €**	**-111.203 €**	**-115.036 €**	**-119.003 €**	***- 1.646.911 €***
Unternehmensgemeinkosten	5,0%			32.133 €	32.386 €	32.643 €	32.906 €	33.173 €	33.445 €	28.556 €	28.839 €	29.127 €	29.420 €	*312.629 €*
Jahresergebnis				**-223.321 €**	**-226.557 €**	**-229.910 €**	**-233.383 €**	**-236.980 €**	**-240.704 €**	**-136.057 €**	**-140.042 €**	**-144.163 €**	**-148.424 €**	***- 1.959.540 €***
				-31%	**-31%**	**-31%**	**-31%**	**-31%**	**-32%**	**-18%**	**-18%**	**-18%**	**-19%**	**-26%**

Das Ergebnis zeigt, dass sich unter den dargestellten Randbedingungen und der derzeitigen Marksituation der Betrieb einer neu zu errichtenden Aufbereitungsanlage für Gipsfaserplatten wirtschaftlich nicht darstellen lässt.

7.2.2 Erweiterung einer bestehenden Anlage um eine zusätzliche Aufbereitungslinie

Die Betrachtung von Vor- und Nachteilen aus dem Pkt. 7.2.1 dreht sich bei dieser Konzeption im Wesentlichen um. Entscheidend ist, dass wirtschaftlich relevante Kriterien, wie Investitionskosten für Technik und Infrastruktur ganz oder teilweise entfallen. Zusätzlich spielen Synergieeffekte z. B. bei der Nutzung bereits vorhandener mobiler Gerätetechnik oder der flexiblere Arbeitskräfteeinsatz (z.B. durch Mehrschichtbetrieb) eine kostensenkende Rolle. Tabelle 39 zeigt die wichtigsten Änderungen bzw. Erläuterungen im Vergleich zum Konzept unter Pkt. 7.2.1

Tabelle 39 Beschreibung / Erläuterung der geänderten Rahmenbedingen

Bezeichnung	Menge/ Wert	Erläuterung
Personalbedarf Anlagenfahrer Gerätefahrer	 1 1	Anlagenleiter und Springer kommen aus dem Personalpool der bestehenden Anlage
Investsumme Maschinen- und Anlagentechnik	ca. 1.300 T€	analog zu Pkt. 7.2.1, aufgrund der anderen Technologie bleibt der erforderliche Invest gleich
Infrastruktur	ca. 1.150 T€	z.T. vorhanden, bei Kalkulation aber gleicher Investitionsansatz, da zusätzliche Hallenfläche und ggf. kostenaufwendige Anpassungen der vorhandenen Struktur erforderlich
Gerätetechnik	0 T€	Ist komplett vorhanden, Einsatz in der zweiten Schicht für GFP
Miete	ca. 45 T€	Miete für Gewerbefläche sowie Büro und Sozialräume aus Internetrecherche

Tabelle 40 Gewinn- und Verlustrechnung Erweiterung einer bestehenden Gipsrecyclinganlage

Erlöse/ Kosten	Menge	Wert	Indizierung	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	*Gesamt*
				1										
Umsatzerlöse														
Input Gipsabfälle	15.000 t/a	45,00 €/t	1,00%	675.000 €	681.750 €	688.568 €	695.453 €	702.408 €	709.432 €	716.526 €	723.691 €	730.928 €	738.238 €	*7.061.993 €*
Erlös RC-Gips	12.000 t/a	4,50 €/t		54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	54.000 €	*540.000 €*
Erlös Papierfraktion	3.000 t/a	0,00 €/t		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	*0 €*
Umsatzerlöse				**729.000 €**	**735.750 €**	**742.568 €**	**749.453 €**	**756.408 €**	**763.432 €**	**770.526 €**	**777.691 €**	**784.928 €**	**792.238 €**	***7.601.993 €***
Dieselkraftstoff			2,00%	54.750 €	55.845 €	56.962 €	58.101 €	59.263 €	60.448 €	61.657 €	62.891 €	64.148 €	65.431 €	*599.497 €*
Elektroenergie			2,00%	30.690 €	31.304 €	31.930 €	32.568 €	33.220 €	33.884 €	34.562 €	35.253 €	35.958 €	36.677 €	*336.047 €*
Aufwendung Qualitätssicherung			1,00%	20.000 €	20.200 €	20.402 €	20.606 €	20.812 €	21.020 €	21.230 €	21.443 €	21.657 €	21.874 €	*209.244 €*
Transportleistungen	3.000 t/a	35,00 €/t	2,00%	105.000 €	107.100 €	109.242 €	111.427 €	113.655 €	115.928 €	118.247 €	120.612 €	123.024 €	125.485 €	*1.149.721 €*
Instandhaltung			1,00%	44.330 €	44.774 €	45.221 €	45.674 €	46.130 €	46.592 €	47.058 €	47.528 €	48.003 €	48.483 €	*463.793 €*
Betriebskosten gesamt				254.770 €	259.222 €	263.757 €	268.376 €	273.081 €	277.873 €	282.754 €	287.726 €	292.791 €	297.951 €	*2.758.302 €*
Rohertrag				*474.230 €*	*476.528 €*	*478.810 €*	*481.077 €*	*483.327 €*	*485.559 €*	*487.772 €*	*489.965 €*	*492.137 €*	*494.287 €*	*4.843.691 €*
Personalaufwand			**2,00%**	**109.101 €**	**111.283 €**	**113.509 €**	**115.779 €**	**118.095 €**	**120.457 €**	**122.866 €**	**125.323 €**	**127.830 €**	**130.386 €**	***1.194.630 €***
Mieten/Pachten			1,00%	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	*0 €*
übr.Kosten pauschal			1,00%	12.000 €	12.120 €	12.241 €	12.364 €	12.487 €	12.612 €	12.738 €	12.866 €	12.994 €	13.124 €	*125.547 €*
sonst. betrieblicher Aufwand				**12.000 €**	**12.120 €**	**12.241 €**	**12.364 €**	**12.487 €**	**12.612 €**	**12.738 €**	**12.866 €**	**12.994 €**	**13.124 €**	***125.547 €***
betr. Cash flow				**353.128 €**	**353.124 €**	**353.060 €**	**352.934 €**	**352.745 €**	**352.490 €**	**352.168 €**	**351.776 €**	**351.313 €**	**350.776 €**	***3.523.515 €***
Abschreibungen				243.471 €	243.471 €	243.471 €	243.471 €	243.471 €	243.471 €	243.471 €	243.471 €	243.471 €	243.471 €	*2.434.705 €*
Betriebsergebnis				**109.658 €**	**109.654 €**	**109.590 €**	**109.464 €**	**109.274 €**	**109.019 €**	**108.697 €**	**108.305 €**	**107.842 €**	**107.306 €**	***1.088.810 €***
Unternehmensgemeinkosten	5,0%			18.229 €	18.344 €	18.461 €	18.581 €	18.703 €	18.827 €	18.954 €	19.083 €	19.215 €	19.349 €	*187.744 €*
Jahresergebnis				91.429 € 13%	91.310 € 12%	91.129 € 12%	90.883 € 12%	90.572 € 12%	90.192 € 12%	89.743 € 12%	89.223 € 11%	88.628 € 11%	87.957 € 11%	*901.065 €* 12%

7.3 Ergebnisse und Diskussion

Wie in der kalkulatorischen Betrachtung einer eigenständigen Anlage zu entnehmen ist, kann keine Gewinnmarge erzielt werden. Es wird ein prozentualer Verlust von 26% gefahren. Verbesserungen im Markt oder bei den Betriebskosten müssten in größerem Maßstab erfolgen, um mit diesem Konzept wirtschaftlich zu werden. Damit wären Investitionen in der Form sehr risikobehaftet und damit eher unwahrscheinlich.

Eine deutliche Veränderung zeigt die wirtschaftliche Betrachtung einer anlagenergänzenden Prozessstrecke gemäß Tabelle 40, mit einer erzielbaren Gewinnmarge von 12%. Besonders durch einen optimierten Personalschlüssel und ohne zusätzlich aufkommende Grundstücksmieten können Kosten entscheidend gesenkt werden. Dazu kommt eine bessere Auslastung der bereits vorhanden Gerätetechnik. Unter Berücksichtigung von weiteren Optimierungsmöglichkeiten im Anlagenbetrieb sowie einer positiven Marktentwicklung (z.B. steigende Entsorgungspreise) ist das unter Pkt. 7.2.2 dargestellte Konzept einer Anlagenerweiterung ein wirtschaftlich durchaus realistisches Szenario.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

Der Rückgang der Verfügbarkeit von REA-Gips infolge des im Juli 2020 beschlossenen Kohleausstiegsgesetzes (KVBG), dass die Beendigung der Kohleverstromung in Deutschland bis 2038 zum Ziel hat, wird sich weiter fortsetzen [8.1]. Es ist davon auszugehen, dass die entstehende Lücke aufgrund der nur begrenzt verfügbaren Mengen geeigneter Abfälle auch durch konstante Erhöhung des Anteils an Recycling-Gips (RC-Gips) nicht zu kompensieren sein wird. Umso wichtiger ist es, möglichst umfangreich potenzielle Sekundärgipsquellen zu nutzen, um den Abbau von Naturgips und eine mögliche Importabhängigkeit zu begrenzen.

Im Projekt GipsRec 2.0 wurden technische, wirtschaftliche und ökologische Untersuchungen und Bewertungen der Potenzialerschließung von End-of-Life Gipsfaserplatten und von diversen Synthesegipsen durchgeführt. Ziel war die Ausweitung der Sekundärrohstoffpotenziale für die RC-Gips-Herstellung. Veranlassung des Projektes war die Schließung von Stoffkreisläufen von Bauprodukten auf Gipsbasis sowie die Sicherstellung der Rohstoffversorgung. Mehr als die Hälfte des derzeit in Deutschland verbrauchten Gipses entstammt als sogenannter REA-Gips den Rauchgasentschwefelungsanlagen aus der Verstromung von fossilen Brennstoffen (maßgeblich Braunkohle). Der Restbedarf wird derzeit noch fast ausschließlich aus dem Abbau von heimischem Naturgips gedeckt.

Vor dem Hintergrund der Energiewende ist mit einem starken Rückgang des Angebots an REA-Gips zu rechnen, während gleichzeitig die Ausweisung neuer Gipsabbauflächen zunehmend schwieriger wird.

Daher besteht die Notwendigkeit, nach neuen Quellen für das Gipsrecycling zu suchen. Eine wesentliche Rohstoffquelle hierfür können Baustoffe auf Gipsbasis bilden, die im Rückbau als Abfälle anfallen. Für die Materialfraktion Gipskartonplatten sind bereits Recyclingtechnologien verfügbar, die in Gipsrecyclinganlagen in Deutschland unter marktwirtschaftlichen Bedingungen eingesetzt werden. Für Gipsfaserplatten (GFP), welche mittlerweile ebenfalls in nennenswerten Mengen produziert werden, existiert bisher keine Recyclingtechnologie. Im Rahmen des Projektes GipsRec 2.0 wurden Untersuchungen in Form von technischen Aufbereitungsversuchen zur Untersuchung einer zukünftigen Recyclingtechnologie durchgeführt. Weiterhin entstehen Gipse auch in chemischen Prozessen, wie der Säureneutralisation. Das Projekt beinhaltete eine entsprechende Bestandsaufnahme der industriellen Prozesse, bei denen Gips anfällt, in welcher Qualität diese Abfallgipse vorliegen bzw. ob sie sich für eine weitere Aufbereitung zu RC-Gips eignen. Qualitätskriterium für die Aufbereitung sowohl von GFP als auch synthetischen Gipsen war die Vorgaben des Bundesverbandes der Gipsindustrie (z.B. Gipsgehalt min. 85%, TOC <1%), wobei werksspezifisch Abweichungen nach besonderer Vereinbarung zulässig sind.

Gespräche mit Produzenten haben hier bereits positive Signale derart erbracht, dass die versuchstechnisch erreichten Größenordnungen (TOC ca. 2,5%, Gipsgehalt 80%) durchaus akzeptabel sind.

Im Rahmen von GipsRec 2.0 wurden die Potenziale dieser Abfallgruppen bundesweit untersucht. Der Themenkomplex der Potenzialerhebung zur Erhöhung der recycelfähigen Gipsabfallmengen durch die Nutzung der zusätzlichen Gipsabfallquellen wurde von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) bearbeitet. Dabei spielten für die betrachteten Abfallarten (Gipsfaserplatten, verschiedene Synthesegipse) neben Qualität und Menge auch die Anfallorte bzw. die damit verbundenen Transporte der Materialien eine Rolle. Die betrachteten Synthesegipse umfassten: REA-Gipse, Phosphogipse, Fluorogipse, Titanogipse, Zitronensäuregipse, Milchsäuregipse, Gipse aus der Klärschlammbehandlung und Gipse aus der Batteriesäureaufbereitung (BS-Gipse). Die Informationen hierfür wurden im Rahmen von Recherchen, Umfragen oder Interviews mit Fachleuten eruiert. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich ihres Potenzials für den Ersatz von REA- und Naturgipsen untersucht und bewertet. Im Verlauf der Recherchen stellte sich Altbatteriesäure als eine geeignete und noch nicht genutzte Quelle für Sekundärgipse aus Reststoffen dar, so dass weiterführende Laborversuche mit Altbatteriesäure durchgeführt wurden, um das Recyclingpotenzial zu eruieren. Laborversuche mit anderen synthetischen Gipsen verliefen nicht erfolgreich. Demgegenüber verlief ein Versuchsansatz zur Lösung der eher ungünstig geformten, nadelförmigen Gipskristalle aus Versuchen zur Klärschlammbehandlung vielversprechender.

Die besten Ergebnisse zeigten die Versuche mit Batteriesäure-Gipsen. Die Auswertung der weiterführenden Versuche mit diesen Gipsen ergab, dass das angestrebte Qualitätskriterium in mehr als 80% der Versuche erreicht werden konnte.

Die im Rahmen der Fällungsversuche hergestellten synthetischen Gipse zeigten deutlich geringere Korngrößen bei einer breiteren Korngrößenverteilung im Vergleich zu anderen synthetischen Gipsen oder Referenzgipsen, was günstig für die weitere Verarbeitung eines synthetischen Gipses sein kann.

Der Themenkomplex der technischen Aspekte eines zukünftigen Recyclings der Abfälle aus der Baustoffindustrie wurde durch die Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH (MUEG) untersucht. Zunächst wurde mit Hilfe der ermittelten Materialanalysen verschiedener Abfälle die Qualität einzelner Stoffströme bewertet. Aus diesen Daten wurden Rückschlüsse auf mögliche Absteuerungswege der potenziellen Wertstofffraktionen sowie auf eine geeignete Aufbereitungstechnologie gezogen.

Generell ist für die GFP-Aufbereitung eine andere Recyclingtechnologie notwendig als für die Aufbereitung von GKP, allerdings bestand aus wirtschaftlicher Sicht der MUEG das Interesse daran, die bereits bestehende GKP-Aufbereitung mit der neu zu entwickelnden GFP-Aufbereitung zu kombinieren, um Synergien zu nutzen. Auch ist auf Grund der viel geringeren Produktionsmenge an GFP gegenüber GKP nach wirtschaftlichen Betrachtungen separate Standorte für Recyclinganlagen von GFP nicht zielführend. Im Rahmen des Projektes wurden praktische Versuche im Technikumsmaßstab durchgeführt und für die großtechnische Umsetzung bewertet.

Die entwickelte Aufbereitungstechnologie basiert auf dem Aufschluss der GFP, sodass im ersten Schritt ein Gemisch aus pulverisiertem Gips und den Papierfasern vorliegt. Dieses Gemisch muss im zweiten Schritt einerseits in eine kalzinierbare Gipsqualität als auch eine wiederverwendbare Papierfaser separiert werden. Die Ergebnisse zeigten, dass die GFP-Mischung zu etwa 80 % aus Gips und zu etwa 20 % aus Fasern und Zusatzstoffen besteht. Das Papierfaser-Gips-Gemisch konnte nach dem Aufschluss in den durchgeführten großtechnischen Versuchen durch Klassierung (Siebung) gut voneinander getrennt werden. Im Rahmen der vergleichenden Untersuchungen verschiedener Klassierungstechnologien wurden die besten Separationsergebnisse wurden mit dem 10G-Linearschwingsieb erreicht. Allerdings war der Gipsgehalt in der Papierfraktion nach wie vor hoch, was eine weitere Abreinigung der Papierfraktion erforderlich machte, um eine stoffliche Verwertung der Papierfaser zu ermöglichen. Hierbei wurden weitere technische Vergleichsuntersuchungen durchgeführt und eine Vorzugslösung identifiziert. Mit der untersuchten Verfahrensweise kann der Gipsgehalt in der Papierfraktion auf rein mechanischem Weg auf < 50 % abgesenkt werden.

Eine weitere Absenkung des Gipsgehaltes mit mechanischen Verfahrensstufen ist theoretisch möglich, wird jedoch zum derzeitigen Zeitpunkt auf Grund der erforderlichen zusätzlichen Aufbereitungsschritte wirtschaftlich kritisch gesehen. Ein Einsatz dieser Fraktion mit einem Restgipsgehalt von ca. 50% wäre aber beispielsweise in der Produktion neuer Gipsfaserplatten oder als Füllstoff in Dämmmaterialien denkbar.

Auf Basis dieser Versuchsergebnisse wurde eine ökonomische Betrachtung der entwickelten Verfahren des speziellen Gipsrecyclings im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchgeführt und die Umsetzbarkeit der entwickelte Recyclingtechnologie bewertet. Hierfür erfolgten Standortprüfungen, welche mittels einer Nutzwertanalyse untersetzt wurden. Darüber hinaus wurden die technischen und (genehmigungs-) rechtlichen Rahmenbedingungen untersucht sowie eine überschlägige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine neue Anlage durchgeführt. Zur Ermittlung der erforderlichen Recyclingkapazitäten stand vor allem im Vordergrund die markttechnische Ermittlung möglicher Anfallmengen von GFP.

Ein großes Problem stellt hierbei die nicht getrennte Erfassung der GPF-Abfälle der aktuellen Entsorgungspraxis dar. Beide Abfallarten (Gipskartonplatten GKP und GFP-Abfälle) werden noch unter einem Abfallschlüssel deklariert und kommen somit als Gemisch in den Recycling- bzw. Entsorgungsanlagen an. Diesbezüglich kann seitens des Forschungsteams der Vorschlag des BV-Gips [8.2] nur eindringlich unterstützt werden, zukünftig eine eindeutige Unterscheidung bei der Abfalldeklaration zwischen GKP und GFP im Rahmen der Änderung der Gewerbeabfallverordnung zu fixieren.

Aus diesem Grunde wurden Erfahrungswerte des Verhältnisses zwischen Gipskarton- und Gipsfaserplatten in Bau- und Abbruchmassen zur Anwendung gebracht. Die über 10-Jahre angesetzte Analyse bestätigte, dass die entwickelte Recyclingtechnologie wirtschaftlich eingesetzt werden kann, wenn sie mit einer bestehenden bzw. geplanten Recyclinganlage kombiniert wird (zweite Aufbereitungslinie).

Außerdem wurde eine ökologische Bewertung der Umweltauswirkungen eines zukünftigen Recyclings der Abfälle durch das Öko-Institut e. V. durchgeführt. Es wurden für die Gipsfaserplatten und für ausgewählte Synthesegipse jeweils auf das Projekt bezogene Öko-Bilanzen ISO 14040 und 14044 und Sensitivitätsanalysen erstellt. Die Ökobilanz quantifiziert die Umweltauswirkungen für die Bereitstellung von Gips aus GFP und Altbatteriesäure. Bei der Synthese von Altbatteriesäure zu Gips wurde unterschieden nach den beiden Fällungsmitteln Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) und Calciumkarbonat ($CaCO_3$). Diese wurden ins Verhältnis zu den Umweltauswirkungen der zwei Routen gesetzt, über die Gips heute zum großen Teil gewonnen wird, die REA-Gips Route und die Naturgips Route (Vergleichssysteme).

Als funktionelle Einheit kam die Produktion von 1 Mg Gips zur Anwendung.

Für das System Synthesegips zeigen die ökobilanziellen Ergebnisse höhere Umweltlasten als die Vergleichssysteme. Auch für das System RC-Gips fiel die Bilanz zunächst schlechter aus als für die Vergleichssysteme. Grund dafür sind Transporte und die Verwertung von Sekundärabfällen (insbesondere die energetische Verwertung der papier- und kunststoffreichen Fraktion).

Werden nach der Substitutionsmethode jedoch auch Gutschriften für die Koppelprodukte bei der Verwertung der Sekundärabfälle erteilt, stellt sich das Ergebnis für das System RC-Gips in den meisten Wirkungskategorien besser dar als in den Vergleichssystemen, wie insbesondere am Kriterium Erderwärmung nachgewiesen wurde.

Zu den Erkenntnissen des Projektes GipsRec 2.0 gehört auch, dass die Industrie (sowohl die Gipsindustrie wie auch Industrien, bei denen Neutralisationsgipse anfallen. z.B. die Batteriehersteller) an einer Recyclinglösung interessiert sind. Elementar ist eine Gesamtbetrachtung des Produktzyklus inklusive des Recyclings. So müssen Produktionsprozesse ggf. so angepasst werden, dass ein späteres Recycling der hergestellten Produkte wirtschaftlich möglich ist.

Die gewonnenen Erkenntnisse können interessierten Firmen in den relevanten Branchen der Entsorgung und Verwertung von Abfällen zur Verfügung gestellt werden. Im Ergebnis des Projektes können folgende zielgruppenspezifische Empfehlungen an die Wirtschaft, Politik usw. gegeben werden:

- Gipsfaserplatten lassen sich mechanisch aufbereiten, das Ergebnis ist eine Gipsfraktion in einer für die Gipsindustrie verwertbaren Qualität. Alternative Verwertungswege müssen für die verbleibende gipshaltige Papierfraktion entwickelt werden, wie die Nutzung in der Gipsfaserplattenindustrie oder als Füllstoff in der Dämmstoffindustrie

- Ein limitierender Faktor beim GFP-Recycling ist die nicht getrennte Erfassung der GKP- und der GPF-Abfälle der aktuellen Entsorgungspraxis. Beide Abfallarten kommen derzeit als Gemisch in den Recycling- bzw. Entsorgungsanlagen an. Die Pflicht zur Separation der unterschiedlichen Materialfraktionen auf der Baustelle würde die Aufbereitung substanziell erleichtern.

- Einige Arten der synthetischen Gipse sind auf Grund ihrer Eigenschaften ohne weiteres einsetzbar und werden teilweise schon wiederverwendet, bei den anderen Arten schränken die Eigenschaften die Verwertung ein. Die Grundlagenuntersuchungen für die Aufbereitung von Batteriesäure zeigten ein großes Potenzial für eine zukünftige Verwertung in der Gipsindustrie.

- Die Hauptempfehlung des Projektes GipsRec 2.0 ist, das Recycling von Gipsabfällen voranzutreiben, da die Deponierung zu einem Ressourcenverlust führt und sich nicht mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft vereinbaren.

9 Literatur

[1.1] Szednyj, D. Brandhuber, D. (2007). Stand der Technik zur Kalk-, Gips- und Magnesiaherstellung – Beschreibung von Anlagen in Österreich, Umweltbundesamt Österreich, verfügbar online: https://data.europa.eu/data/datasets/5b56fa20-95b3-45ef-97fd-3e23e04ad082/?locale=de

[1.2] Müller, A. (2018). Baustoffrecycling - Entstehung – Aufbereitung – Verwertung, Springer Vieweg, Wiesbaden.

[1.3] Infodienst für Ausschreibungen ibau (2022). Warum Sie in Zukunft auch bei Gips mit Engpässen rechnen müssen!, verfügbar online: https://www.ibau.de/akademie/wissenswertes/wo-kommt-in-zukunft-der-gips-her/

[1.4] Demmich, J. (2019). Festlegung eines einheitlichen, rechtsgebietsübergreifenden Grenzwertes zur Beurteilung der Asbestfreiheit von Bauabfällen und Baustoffen, verfügbar online: https://www.vivis.de/wp-content/uploads/MNA6/2019_MNA_418-429_Demmich, abgerufen am 22.02.2024.

[1.5] Deutscher Bundestag (2020). Drucksache 19/2149. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Steffi Lemke, Annalena Baerbock, Christian Kühn (Tübingen), weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN– Drucksache 19/21229 – Gipsabbau in Deutschland und Auswirkungen auf Naturschutz

[1.6] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (2020). Gutachten: "Umweltverträgliche Alternativen zum Abbau von Naturgips", verfügbar online: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/naturschutz/naturschutz_gipsgutachten.pdf21,

[1.7] Forum Nachhaltiges Bauen (). Gipskartonplatten – Ökobilanz, verfügbar online: https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/gipskartonplatten

[1.8] Bundesverband der Gipsindustrie (2023). Rohstoffe. Das System CaSO4 & H2O, verfügbar online: https://www.gips.de/wissen/rohstoffe/das-system-caso4-h2o,

[1.9] Bundesverband der Gipsindustrie (2013). GIPS-Datenbuch. Verfügbar online: https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjVx-bh4peE-AxWAefEDHT3yAUQQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.gips.de%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2Fgipsdatenbuch_2013.pdf&usg=AOvVaw2TDmz0qmd-MeQ9kQGJkzmSY&opi=89978449

[1.10] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2022). Deutschland –Rohstoffsituation 2021, verfügbar online: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/produkte_node.html,

[1.11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016). Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, verfügbar online: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-klimaschutzplan-2050.html

[1.12] Kreislaufwirtschaft Bau (2023) Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020, https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-13.pdf

[1.13] Kreislaufwirtschaft Bau (2021). Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018 - Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018, https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-12.pdf

[1.14] Buchert, M.; Sutter, J.; Alwast, H.; Schütz, N.; Weimann, K. (2017). Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten, UBA-Texte 33/2017, im Auftrag des Umweltbundesamtes, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24_texte_33-2017_gipsrecycling.pdf

[1.15] Aschern, W. et al. (2011). "Ressourcen- und Energieeffizienzsteigerung bei der Herstellung von Gipsfaserplatten", Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 27776/02, 1 August 2011 (2011-08-01), pages 1-91, XP055142150, Retrieved from the Internet: URL:https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlu ssbericht-AZ-27776_02.pdf [retrieved on 2014-09-23]

[1.16] Hartmann et al. (2011). Alpha-Halbhydrat aus Gipsfaserplattenreststoffen", Tagungsbericht / 1. Weimarer Gipstagung, 30. - 31. März 2011, Weimar F. A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus Universität Weimar. [red.: H.-B. Fischer ...], 30 March 2011 (2011-03-30), pages 261-271, XP008172307, ISBN: 978-3-00-034074-1

[1.17] Ante, A. et al. (2008). Verwendungsmoeglichkeiten von Waschsaeure-Gips aus dem BMAG-Verfahren Possible use of weak acid gypsum from the BAMAG process", Aufbreitungstechnik, Verlag für Aufbereitung, Wiesbaden, Bd. 49, Nr. 5, 1. Mai 2008 (2008-05-01), Seiten 21-31, XP001512497, ISSN: 0004-783X

[1.18] Industriegruppe Baugipse im Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (2017). Gipsputz und Brandschutz, Ergänzende technische Richtlinien für die Ausführung von Gips-Trockenmörteln und Gips-Flächenspachteln, IGB Informationsdienst Nr. 5, Februar 2017

[1.19] Ali, M.A., Grimer, F.J. (1969). Mechanical properties of glass fibre-reinforced gypsum. J Mater Sci 4, 389–395 (1969). https://doi.org/10.1007/BF00549703

[1.20] Geeraert, E.A.C.H. (1990). Method for producing glass fiber reinforced plasterboard, Patent US5330691A

[1.21] Gonçalves RM, Martinho A, Oliveira JP. (2022). Recycling of Reinforced Glass Fibers Waste: Current Status. Materials (Basel). 2022 Feb 21;15(4):1596. doi: 10.3390/ma15041596. PMID: 35208135; PMCID: PMC8876600.

[1.22] Ruiquan Jia, Qiang Wang, Peng Feng (2021). A comprehensive overview of fibre-reinforced gypsum-based composites (FRGCs) in the construction field, Composites Part B: Engineering, Volume 205, 2021, 108540, ISSN 1359-8368, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108540.

[1.23] Fantilli AP, Jóźwiak-Niedźwiedzka D, Denis P. (2021). Bio-Fibres as a Reinforcement of Gypsum Composites. Materials (Basel). 2021 Aug 25;14(17):4830. doi: 10.3390/ma14174830. PMID: 34500919; PMCID: PMC8432728.

[1.24] Wu, L.; Tao, Z.; Huang, R.; Zhang, Z.; Shen, J.; Xu, W. (2023). Basalt-Fiber-Reinforced Phosphorus Building Gypsum Composite Materials (BRPGCs): An Analysis on Their Working Performance and Mechanical Properties. Inorganics 2023, 11, 254. https://doi.org/10.3390/inorganics11060254

[1.25] M. Murillo, A. Sánchez, A. Gil, G. Araya-Letelier, C. Burbano-Garcia, Y.F. Silva, (2024). Use of animal fiber-reinforcement in construction materials: A review, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02812, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02812.

[1.26] Walica, W.; Flamme, S.; Aschern, W. (2023) Einfluss von Papier- und Fasereigenschaften auf die Armierungswirkung in Gipsfaserplatten [online]. Müll und Abfall, Ausgabe 10. Berlin: Erich Schmidt Verlag. https://muellundabfall.de/ce/einfluss-von-papier-und-fasereigenschaften-auf-die-armierungswirkung-in-gipsfaserplatten/detail.html

[1.27] Aschern, W.; Pietzsch, D. (2015). Hochwertige Verwertung von Gipsfaserabfallstoffen durch energieeffiziente Umwandlung von Calciumsulfat-alpha-Halbhydrat, Aktenzeichen: NKa3 – 002038, verfügbar online: https://www.umweltinnovationsprogramm.de/projekte/hochwertige-verwertung-von-gipsfaserabfallstoffen-durch-energieeffiziente-umwandlung-von,

[1.28] Demmich, J., Weisflog, E.; Kempf, W.-D. (1997). Verfahren zur stofflichen Verwertung von mit organischem Material verunreinigtem Gips und seine Verwendung, Patent DE19708907C1

[1.29] Lösch, S.; Staffel, T. (2013). Abbindeverzögerer-Zusammensetzung für Gips-Zementmischungen, Patent EP2730550A2

[1.30] Stark, J., Wicht, B. (2000). Zement. In: Zement und Kalk. BauPraxis. Birkhäuser, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8382-5_2

[1.31] n.n. (2022). Recycling von Gips vorantreiben: Promovend der FH Münster untersucht ganzheitliche Wiederverwertung von Gipskartonplatten, verfügbar online: https://www.fh-muenster.de/bau/aktuelles/pressemitteilungen.php?pmid=9022,

[1.32] Caspar, J.P.; Lelong, B. (1977). Verfahren zur Herstellung von Gips aus Phosphogips, Patent DE2815792A1

[1.33] Stockhoff, P.; Helmle, S.; Villarreal´, D.J.R.; Daheim, N. (2020). Verfahren zur Herstellung von Phosphorsäure und Klinkerprozess-geeigneter Kalziumsulfatqualität zur kommerziellen und industriellen Verwertung von Kalziumsulfat, Patent DE102020100241A1

[1.34] Piasecki, J.R.; Kingston, W.L. (1999). Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen Gipskalzinierung, Patent DE60019737T2

[1.35] Benedix, R. (2014). Bauchemie für das Bachelor-Studium, Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, https://doi.org/10.1007/978-3-658-05424-3

[1.36] Montag, D.M. (2008). Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung – Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen, Dissertation an der RWTH Aachen

[1.37] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2022). Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammasche Eigenschaften verschiedener Verfahren

[1.38] Industrie-Anzeiger (2001). Zink-Recycling: Umweltschonende Abwasserbehandlung: Sauberes Wasser statt kontaminiertem Gips, verfügbar online: https://industrieanzeiger.industrie.de/allgemein/sauberes-wasser-statt-kontaminiertem-gips/,

[1.39] Reichelt, A.; Weiß, D.; Wiegand, J. (2005). Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM-Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände, Teil 4b: Orientierende radiologische Untersuchungen an industriellen Hinterlassenschaften der Rohphosphat-Verarbeitung, Abschlussbericht über das Forschungsvorhaben StSch 4386 Teil 4b, im Auftrag des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, erstellt von der TÜV Industrie Service GmbH, TÜV SÜD Gruppe, Abteilung Umweltradioaktivität und radiologische Altlasten, München, November 2005, BMU-Schriftenreihe "Reaktorsicherheit und Strahlenschutz" als Publikation BMU-2007-695, http://www.bmu.de/38864

[1.40] Bahram, D.; Gosch, H.-W. (1982). Verfahren zum Betrieb einer Gips-Schwefelsäureanlage, Patent DE19823222721

[1.41] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1999). Materialien Nr.53 Entsorgungsbericht 1996/97 über Sonder- und Massenabfälle in Nordrhein-Westfalen

[1.42] Skoda, C.; Birdwell. S. (2013). Stabilized Red Mud and Methods of Making the Same, Patent 2880417, Government of Canada

[1.43] Bullerjahn, F.; Schmitt, D.; Haha, M.B. (2011). Ternesit-Belit-Calciumsulfoaluminat-Klinker und Verfahren zu seiner Herstellung, Patent EP2559674A1

[1.44] Kocyan, A. (1950). Über die Nutzbarmachung des Schwefels im Gips, Dissertation an der ETH Zürich.

[1.45] Neumann, E.W.; Bech, C. (2007). Process and apparatus for handling synthetic gypsum, Patent US20070216068A1

[1.46] Ginn, T.D.; Gray, D.L. (2013). Synthetic gypsum fertilizer product and method of making, Patent US9873638B2

[1.47] J. K. (2020). Cement additive, Patent CN114901610A

[1.48] Kranert, M., Hrg. (2017). Einführung in die Kreislaufwirtschaft: Planung -- Recht – Verfahren, Springer Vieweg; 5. Aufl. 2017 Edition (6. April 2017)

[1.50] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2016a): Partikelgrößenanalyse – Siebanalyse – Teil 2: Durchführung DIN 66165-2, Beuth Verlag GmbH, Berlin

[1.51] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2016b): Partikelgrößenanalyse – Siebanalyse – Teil 1: Grundlagen DIN 66165-1, Beuth Verlag GmbH, Berlin

[1.52] MSV Mediaservice & Verlag GmbH (2021): Abfalltrennung mit dem Zick-Zack-Sichter, https://eu-recycling.com/Archive/16372

[1.53] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2022). Möglichkeiten der Einsparung, der Substitution und des Recyclings von Gips.

[1.54] Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (2020). Recyclinggips (RC-Gips) Erstprüfung für Recyclinganlagen, Qualitätsmanagement, Qualitätsempfehlungen und Analyseverfahren, verfügbar online: https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/aktuelles/Qualitaetsempfehlungen_Gipsrecycling_Analyseverfahren_Stand_Juni_2020.pdf

[1.55] Umweltbundesamt (2019). Gips Factsheet, Erarbeitet im Projekt „Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“ (FKZ 3716 35 3230)

[1.56] Council decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 and Annex II to Directive 1999/31/EC.

[1.57] Materialarchiv.ch (o.J.). Gipsfaserplatte. Verfügbar online: https://materialarchiv.ch/de/ma:material_1250?type=all&n=Grundlagen

[1.58] Hausberater.de (o.J.). Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten – was ist der Unterschied?, verfügbar online: https://www.hausberater.de/bauen-modernisieren/trockenbau/gipskartonplatten-und-gipsfaserplatten-was-ist-der-unterschied/

[1.59] WECOBIS Ökologisches Baustoffinformationssystem: www.wecobis.de

[1.60] Produktdatenblatt Fermacell: fermacell.de/de/content/gipsfaser-platte.php (Stand 30.11.2010)

[1.61] Fermacell GmbH (2011). Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31: FERMACELL Gipsfaserplatte, verfügbar online: https://www.raiffeisen.com/agrar_sdb/detail/1531

[1.62] Demmich, J., ’Impact of the coal phase-out on Germany's gypsum supply‘ (in German), REWIMET Symposium August 2021 Ressourcenmanagement, Clausthal-Zellerfeld, (2021).

[1.63] Alwast, H. ‘Nachhaltige Ausstiegsszenarien für Naturgips und REA-Gips für die nächsten 25 Jahre‘ (in German), available online: https://www.rewimet.de/images/downloads/symposium2021_alwast.pdf (2021) (accessed 24.05.2023).

[1.64] Bunzel, J., Wilczek, M. ‚Industrielles Recycling von gipshaltigen Abfällen‘ in: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, 3. Auflage, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, ISBN: 978-3-944310-282 (2016) 487-497.

[1.65] Gläser, J.; Laudel. G. (2010). Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen, VS Verlag für Sozialwissenschaften | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden 2010

[1.66] Mayring, Philipp (2008). Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken (10. Aufl.). Weinheim: Beltz

[1.67] STEINERT MT (o.J.). Magnettrommeln mit hoher Leistung und extremer Robustheit, verfügbar online: https://steinertglobal.com/de/magnete-sensorsortierer/magnetseparation/magnettrommeln/

[1.68] die Magnetprofis (o.J.). Überbandmagnetabscheider, verfügbar online: https://die-magnetprofis.de/pages/uberbandmagnetabscheider

[1.69] Jöst GmbH & Co KG (o.J). Spannwellensiebe OSCILLA, verfügbar online: https://www.jo-est.com/products/sieben/spannwellensieb-oscilla/

[1.71] Baunetz_Wissen (o.J.). Zellulosefaserdämmstoffe, verfügbar online: https://www.baunetz-wissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/zellulosefaserdaemmstoffe-793615

[1.72] Ouadi, Q.; Brammer, J.G..; Kay, M.; Hornung, A. (2013). Fixed bed downdraft gasification of paper industry wastes, Applied Energy, Volume 103, 2013, Pages 692-699, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.038.

[1.73] Elsaddik. M. (2022). Hydrogen-rich syngas from steam gasification of cellulose in a biorefinery approach. Chemical and Process Engineering. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2022. English. NNT : 2022EMAC0016. tel-04368491

[1.74] Eintrag zu Bariumsulfat. In: Römpp Online. Georg Thieme Verlag

[1.75] Gabriel, M. (2022). Herstellung eines Kohlestoffträgers auf Basis nachwachsender Ressourcen zum Einsatz in der Stahlindustrie, Bachelorarbeit an der Hochschule Magdeburg-Stendal, unveröffentlicht (mit Sperrvermerk)

[1.76] Schneider, P.-; Stachowiak, P.; Marx, A.; Wilhelm, G.; Fauk, T.; Kannengießer, J.; Schwerdt, S. (2024). Eignung und ökologisches Potenzial von Ersatzbaustoffen in Dachbegrünungen, Wasser und Abfall, 1/2/2024, pp. 53-58

[2.1] Statista: Produktion von Gipsplatten in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2021. Online verfügbar: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/589581/umfrage/produktion-von-gipsplatten-in-deutschland/ (letzter Zugriff 04.03.2024).

[2.2] ÖKOBAUDAT: Prozessdatensätze Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten, Referenzjahre 2019 und 2022, https://www.oekobaudat.de/ (letzter Zugriff 04.03.2024).

[2.3] Weimann, K.; Matyschik, J.; Adam, C.; Schulz, T.; Linß, E.; Mueller, A.: Optimierung des Rückbaus/Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insb. Sulfat) des RC-Materials sowie okobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Bericht im Umweltforschungsplan; FKZ 3709 33 317. Umweltbundesamt, Dessau, Deutschland (2012).

[2.4] Buchert, M.; Sutter, J.; Alwast, H.; Schuetz, N.; Weimann, K.: Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten. Bericht im Umweltforschungsplan; FKZ 3715 34 320. Umweltbundesamt, Dessau, Deutschland (2012).

[2.5] Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (Hrsg.): Erstprüfung für Recyclinganlagen, Qualitätsmanagement, Qualitätsempfehlungen und Analyseverfahren, (Juni 2020).

[2.6] VGB PowerTech: Merkblatt „Analyse von REA-Gips", VGB-M 701, 2. Ausgabe 2008, herausgegeben von der VGB PowerTech e. V. (Oktober 2008).

[2.7] Förthner, S.: Untersuchungen zur Kristallisation und zur Kristallmorphologiebeeinflussung von Gipsen zur Steuerung der makro-physikalischen Kenngrößen, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, (2011)

[2.8] Demmich, J.: persönliche Mitteilung am 28.05.2021

[2.9] Monitoringberichte Kreislaufwirtschaft Bau, Download unter: https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/, letzter Zugriff

[2.10] Theys, T., The future of phosphogypsum: Prayon case study, UNECE Virtual workshop Phosphates for sustainable development: Fertilizers and phosphogypsum in the circular economy, 22.10.2020

[2.11] Pavinato, P.S.: Agricultural applications of Phosphogypsum, Virtual workshop on Phosphates for sustainable development: Fertilizers and phosphogypsum in the circular economy, 22.10.2020

[2.12] Alessandro Dal Pozzo, Daniele Guglielmi, Giacomo Antonioni, Alessandro Tugnoli, Environmental and economic performance assessment of alternative acid gas removal technologies for waste-to-energy plants, Sustainable Production and Consumption, Volume 16, (2018), https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.08.004.

[2.13] Eurostat, env_wasbat (2024), https://doi.org/10.2908/ENV_WASBAT

[2.14] Steve Binks (ILA): persönliche Mitteilung am 04.06.2021

[2.15] European Bureau for Reseach on Industrial Transmissions and Emissions – BAT reference documents (BREFs) https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference

[8.1] BGR: Deutschland - Rohstoffsituation 2021. Hrsg. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, ISBN 978-3-948532-72-7 (pdf), (2022).

[8.2] Kersten H.-J., Bundesverband der Gipsindustrie e.V. Vorschlag des BV Gips zur Novellierung der Gewerbeabfallverordnung, Sondersitzung vom 06.05.2024

GEFÖRDERT VOM *

ReMin -Verbundvorhaben: GipsRec2.0 – Technische Vorbereitung der Verfügbarmachung von Gipsfaserplatten und Synthesegipsen zur Herstellung von RC-Gips

TP1: Technische Untersuchungen und Bewertungen

Förderkennzeichen 033R267A

Kurzbericht zum Abschlussbericht

MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH (Koordination)

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)

Öko-Institut e.V.

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

Im Projekt GipsRec 2.0 wurden technische, wirtschaftliche und ökologische Untersuchungen und Bewertungen der Potenzialerschließung von End-of-Life Gipsfaserplatten und von diversen Synthesegipsen, mit dem Ziel der Schließung von Stoffkreisläufen von Bauprodukten auf Gipsbasis sowie die Sicherstellung der Rohstoffversorgung, durchgeführt. Beim Material Gips führt dabei der zeitnahe Wegfall der größten Rohstoff-Ressource, dem Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen von Kraftwerken (REA-Gips), bedingt durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland, zu einer besonderen Situation. Da auch der Abbau von Naturgips, insbesondere die Eröffnung neuer Abbaustätten große Akzeptanzprobleme beinhaltet, entsteht hier zwangsläufig ein Defizit. Deshalb ist die Generierung neuer, potenzieller Gipsquellen eine wichtige Aufgabe für die Zukunft. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des Projektes umfangreiche Untersuchungen zur Erschließung neuer Gipsquellen aus Recyclingverfahren untersucht. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stand dabei das Recycling von Gipsfaserplatten (GFP) sowie von synthetischen Gipsen aus Neutralisationsprozessen. Dazu wurden Recherchen zum Stand von Wissenschaft und Technik in dem Bereich, Potenzialen der verschiedenen Gipsabfälle, regulatorische Rahmenbedingungen und aktuellen Marktbedingungen durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Recherchen wurden anschließen umfangreiche Untersuchungen zu Recyclingverfahren der genannten Gipsabfälle vorgenommen.

Das Programm des Projektes bestand aus 5 Arbeitspaketen, welche von den 3 Projektpartnern gemeinsam und vollständig abgearbeitet wurden.

AP1 Potenzialerhebung für RC-Gips aus Gipsfaserplatten und Synthesegipsen
AP 2 Technische Untersuchungen und Bewertungen zur Aufbereitung
AP 3 Ökologische Untersuchungen und Bewertungen der Aufbereitung (Ökobilanz)
AP 4 Wirtschaftliche Untersuchungen und Bewertungen der Aufbereitung
AP 5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Empfehlungen

Gipsfaserplatten lassen sich nicht wie Gipskartonplatten (GKP) recyceln. Deshalb sind die bereits bestehenden Anlagen zur Aufbereitung von Gipskartonplatten für Gipsfaserplatten nicht geeignet. Diese Abfälle werden derzeit auf Deponien entsorgt und stellen somit auch unter Berücksichtigung des Mengenpotentials eine alternative Gipsressource dar.

Die Resultate der Untersuchungen im Rahmen des Projektes zeigen, dass Gipsfaserplatten sich mechanisch aufbereiten lassen. Eine entsprechende Prozesskette mit geeigneter Zerkleinerungs- und Klassiertechnik wurde im Technikumsmaßstab erarbeitet und kann auf eine industrielle Anlage skaliert werden.

Das Materialergebnis ist eine Gipsfraktion in einer für die Gipsindustrie verwertbaren Qualität. Die beim Aufbereitungsprozess entstehende Papierfraktion kann bei der Produktion von Gipsfaserplatten eingesetzt werden.

Die über 10-Jahre angesetzte Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigte, dass die entwickelte Recyclingtechnologie wirtschaftlich eingesetzt werden kann, wenn sie mit einer bestehenden Recyclinganlage für Gipskartonplatten kombiniert wird (zweite Aufbereitungslinie).

Die Untersuchung der synthetischen Gipse zeigte, dass einige Materialarten auf Grund ihrer Eigenschaften ohne weiteres einsetzbar sind und teilweise schon wiederverwendet werden. Bei anderen Arten der Synthesegipse schränken die Eigenschaften die Verwertung ein. Die Grundlagenuntersuchungen zu Gipsen aus der Batteriesäureaufbereitung zeigten im Rahmen des Projektes das größte Potenzial für eine zukünftige Verwertung in der Gipsindustrie. Wirtschaftliche Bewertungen für ein Anlage in industrieller Größenordnung können für dieses Verfahren erst auf Basis weiterer Untersuchungen im Technikumsmaßstab erfolgen, die sich an die im Projekt erfolgte Grundlagenforschung im Labor anschließen sollten.

Im Rahmen der Ökobilanzierung gemäß ISO 14040 und 14044 wurde festgestellt, dass das System Synthesegips derzeit noch höhere Umweltlasten verursacht als die Vergleichssysteme. Auch für das System RC-Gips fiel die Bilanz zunächst schlechter aus als für die Vergleichssysteme. Grund dafür sind Transporte und die Art der Verwertung von Sekundärabfällen (insbesondere die energetische Verwertung der papier- und kunststoffreichen Fraktion). Werden nach der Substitutionsmethode Gutschriften für die Koppelprodukte bei der Verwertung der Sekundärabfälle erteilt, stellt sich das Ergebnis für das System RC-Gips in den meisten Wirkungskategorien besser dar als in den Vergleichssystemen.

Die Hauptempfehlung des Projektes GipsRec 2.0 ist daher, das Recycling von Gipsabfällen voranzutreiben, da die Deponierung zu einem Ressourcenverlust führt und sich nicht mit den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft vereinbaren lässt. Als weiterer, wichtiger Punkt lässt sich aus den geführten Gesprächen mit Experten und Shareholdern insbesondere aus der Gips- und Recyclingindustrie erkennen, dass ein großes Interesse an alternativen Gipsquellen besteht und dass man den Einsatz von Recycling-Gips inzwischen vielversprechender sieht. Dies ist für die weitere Entwicklung von Aufbereitungsverfahren zum Gipsrecycling und die Akzeptanz für den Einsatz von Recycling-Gips in der Fertigung von elementarer Bedeutung.

Die bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen, wie z.B. Kreislaufwirtschaftsgesetz (Stichwort Abfallhierachie!), Deponieverordnung, Gewerbeabfallverordnung u.a. bieten gute Voraussetzungen für die Zuführung von Abfällen in Recyclinganlagen.

Es fehlt die Kontrolle der Umsetzung dieser Vorgaben. Dies ist aus Sicht des Projektteams die wichtigste Empfehlung in Richtung Politik/Administration. Zum Teil sind auch Anpassungen (z.B. Trennung Abfallschlüsselnummern GKP und GFP) sinnvoll und wünschenswert. Damit würden sich die Bedingungen für das Gipsrecycling in Deutschland verbessern.