

Untersuchung des Einflusses von Gips- und Fasereigenschaften gipshaltiger Bauabfälle auf die Produktfestigkeit von Doppelbodenplatten nach DIN EN 12825 aus dem Taktpressverfahren

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Wojciech Walica, M. Sc.

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Georg Quicker

Tag der mündlichen Prüfung: 09.07.2026

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institut für Infrastruktur·Wasser·Ressourcen·Umwelt (IWARU) der FH Münster im Rahmen einer kooperativen Promotion mit der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. Dieses Vorhaben wurde über das Forschungskolleg VERBUND.NRW gefördert, wofür ich mich herzlich bedanke.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme für die langjährige Betreuung, die konstruktiven Gespräche und ihre fachliche Unterstützung. Großer Dank gilt ebenfalls Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker für den fachlichen Austausch, die hilfreichen Impulse und die Übernahme der Pflichten als Berichtender im Promotionsverfahren. Bei Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Kathrin Greiff bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein besonderer Dank gilt Dr. Winfried Ascher für seine Rolle als Mentor sowie den Mitarbeiter*innen der Firma Lindner Norit GmbH, wobei ich Andreas Michel besonders hervorheben möchte. Durch den fachlichen Austausch und die Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen sowie die Nutzung des Technikums, haben sie wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Mein Dank gilt zudem dem Institut für Mineralogie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, insbesondere Dr. Schmid-Beurmann und Dr. Arno Rohrbach, sowie der Universität Siegen, insbesondere Dr. rer. nat. Christian Pritzel, für die Unterstützung bei den analytischen Untersuchungen. Ohne diese Unterstützungen wäre die vorliegende Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Für die langjährige und gute Zusammenarbeit am IWARU möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen herzlich bedanken. Bei Dipl.-Ing. Gotthard Walter bedanke ich mich für seinen ruhigen und offenen Umgang, sowie für seine Unterstützung, auch in schwierigen Situationen. Merle Zorn danke für Ihr offenes Ohr in schwierigen Phasen, den fachlichen Austausch im Büro sowie für Ihr wertvolles Feedback zu meinen Grafiken und Präsentationen. Darüber hinaus möchte ich mich bei den Kollegiatinnen und Kollegiaten des Promotionskollegs VERBUND.NRW, Dr. Sonja Stahn, Niclas Depenbrock, Yulia Fetishcheva, Luca Reiter, Tabea Bongert, Ellen Sterk, Vanessa Overhage, Berfin Bayram, Kai Schlögel, Linda Reinhart - für den Austausch, sowie die vielen gemeinsamen Fortbildungen, Messebesuche und Workshops bedanken. Die gemeinsamen Aktivitäten und Gespräche haben mich fachlich und persönlich sehr bereichert.

Zuletzt gilt mein tief empfundener Dank meiner Familie und meinen Freunden, die stets an mich geglaubt und mich während dieser herausfordernden Zeit bedingungslos unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt meiner Freundin Nele, die mir mit großer Geduld und Nachsicht begegnet ist und mir den notwendigen Rückhalt für den Abschluss dieser Dissertation gegeben hat. Diese Arbeit ist meinem verstorbenen Vater Zbigniew Walica gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1. Einleitung	1
1.1. Hintergrund und Motivation	1
1.2. Aufbau der Arbeit.....	2
2. Kreislaufführung von gipshaltigen Bauabfällen in Deutschland	6
2.1. Politische und regulative Rahmenbedingungen für die Kreislaufführung von gipshaltigen Bauabfällen	6
2.2. Gipsplatten im Bauwesen	10
2.2.1. Gipskartonplatten (GKP)	11
2.2.2. Gipsfaserplatten (GFP)	12
2.3. Gipsversorgung in Deutschland: Rohstoffquellen, Marktsituation und Zukunftsperspektiven.....	13
2.4. Aufkommen und Verbleib gipshaltiger Bauabfälle	16
2.5. Derzeitige Verwertungswege für gipshaltige Bauabfälle	17
2.5.1. Recycling von gipshaltigen Bauabfällen	18
2.5.2. Sonstige Verwertung von gipshaltigen Bauabfällen	22
2.5.3. Beseitigung von gipshaltigen Bauabfällen	23
2.5.4. Qualitätskriterien für RC-Gips in Deutschland	23
2.6. Prognose der Rücklaufmenge von GKP und GFP bis 2050	25
2.7. Zwischenfazit zur Kreislaufführung von gipshaltigen Bauabfällen	30
3. Grundlagen Einsatz gipshaltiger Bauabfälle in der GFP-Produktion	31
3.1. Physikalisch-chemische Grundlagen von Calciumsulfat und seinen Phasen	31
3.2. Verfahren zur Herstellung von GFP	35
3.3. Mechanismus des Versagens von GFP	38
3.4. Einflussfaktoren auf die mechanische Festigkeit von GFP.....	39
3.5. Status Quo: Verwertung gipshaltiger Bauabfälle zur Herstellung von GFP	42
4. Zwischenfazit und Forschungsbedarf	45
5. Material und Methodik	48
5.1. Methodik.....	48
5.1.1. Konzept zur Beantwortung der Forschungsfragen	48
5.1.2. Methoden zur Charakterisierung von Gips und Faserstoffen.....	49
5.2. Material.....	50
5.2.1. Gipshaltige Bauabfälle und Stuckgips	50
5.2.2. Faserstoffe	51
5.3. Versuchsbeschreibung	52

5.3.1.	Vorgehen zur Analyse der Armierungswirkung von Faserstoffen in Doppelbodenplatten	52
5.3.2.	Vorgehen zur Verwertung gipshaltiger Bauabfälle in Doppelbodenplatten.....	53
5.3.3.	Vorgehen zur modellbasierten Analyse des kombinierten Einflusses von Gips- und Faserstoffeigenschaften auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten	58
6.	Charakterisierung von Gips und Kartonummantelung sortenreiner GKP	59
6.1.	Phasenzusammensetzung von Gips aus GKP	59
6.2.	Kristallmorphologie von Gips aus GKP	62
6.3.	Faserstoffeigenschaften der Kartonummantelung von GKP.....	64
7.	Quantitative Bewertung der Faserstoffarmierung am Beispiel von Doppelbodenplatten	66
7.1.	Eingangsdaten für die statistische Analyse und das Regressionsmodell	66
7.2.	Analyse der linearen Zusammenhänge zwischen Faserstoff-eigenschaften und Bruchlast von Doppelbodenplatten	69
7.2.1.	Analyse der Bruchlast von Doppelbodenplatten mit variierenden Faserstoffen und Fasergehalten	69
7.2.2.	Pearson-Korrelationsanalyse zwischen Faserstoffparametern, Fasergehalt und Bruchlast.....	71
7.3.	Multivariate Modellierung der Armierungswirkung in Doppelbodenplatten	73
7.3.1.	Ergebnisse und Interpretation der multiplen linearen Regressionsanalyse zur Vorhersage der Bruchlast.....	73
7.3.2.	Validierung des multiplen linearen Regressionsmodells	76
7.4.	Zwischenfazit: Modellierung der Armierungswirkung	80
8.	Prozess- und Qualitätseinflüsse durch den Einsatz von gipshaltigen Bauabfällen für die Herstellung von Doppelbodenplatten	82
8.1.	Stoffliche und fasertechnische Analyse der verwendeten Ausgangsmaterialien	82
8.1.1.	Stoffliche und fasertechnische Charakterisierung der gipshaltigen Bauabfälle vor der Nasskalzinierung	82
8.1.2.	Untersuchung der physikalisch-chemischen Parameter von α -Halbhydrat-Suspensionen und Stuckgips	85
8.1.2.1.	Korngrößenverteilung von α -Halbhydrat-Suspensionen sowie von Stuckgips	86
8.1.2.2.	Kristallmorphologie von α -Halbhydrat-Suspensionen und Stuckgips	87
8.1.2.3.	Spezifische Oberfläche und Phasenzusammensetzung vor und nach der Nasskalzinierung.....	90
8.2.	Umwandlungsgeschwindigkeit von gipshaltigen Bauabfällen in der Nasskalzinierung	92
8.3.	Einfluss von gipshaltigen Bauabfällen auf Presszeit und Bruchlast von Doppelbodenplatten.....	93
8.3.1.	Parameterdefinition und Probenzusammensetzung	94
8.3.2.	Einfluss gipshaltiger Bauabfälle auf die Presszeit von Doppelbodenplatten	95

8.3.3.	Einfluss der Rohstoffeigenschaften auf die Bruchlast und Einsatzgebiete von Doppelbodenplatten	96
8.4.	Zwischenfazit: Bewertung der Verwertbarkeit von gipshaltigen Bauabfällen in Doppelbodenplatten.....	98
9.	Bewertung von Gips- und Fasereigenschaften zur Steuerung der Bruchlast von Doppelbodenplatten	100
9.1.	Bewertung der Effekte von Gipseigenschaften und Gips-Faser-Interaktionen auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten.....	100
9.1.1.	Einfluss von Gipseigenschaften auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten...	101
9.1.2.	Einfluss von a-HH auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten.....	102
9.1.3.	Einfluss von Gips-Faser-Interaktionen auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten	103
9.2.	Anwendung des Regressionsmodells auf Doppelbodenplatten mit gipshaltigen Bauabfällen.....	106
10.	Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf	108
11.	Zusammenfassung	113
	Literaturverzeichnis	116
	Anhang	i
A.	Grundlagen zur Prognose der Rücklaufmengen von GFP und GKP	i
B.	Einordnung gipshaltiger Abfälle nach ASN	iv
C.	Methodik zur Charakterisierung von Faserstoffen und Gipsen	v
D.	Altpapiersorten nach DIN EN 643 und Faserstoffeigenschaften ausgewählter Sorten	xii
E.	Probenvorbereitung zur Charakterisierung von GKP	xiv
F.	Charakterisierung der Materialeigenschaften von GKP	xvi
G.	Rezepturen und Versuchsparameter zur Ermittlung der Armierungswirkung	xviii
H.	Evaluierung von Modellannahmen für das Regressionsmodell	xx
I.	Probenvorbereitung zur Charakterisierung von Gips-Faser-Gemischen	xxiii
J.	Charakterisierung aufbereiteter GKP, Produktionsabfälle aus der GFP-Herstellung sowie von Stuckgips	xxiv
K.	Phasenzusammensetzung der a-HH-Suspensionen	xxvii
L.	Messunsicherheit bei der Charakterisierung von Fasereigenschaften in Gips-Faser-Gemischen	xxviii
M.	Gips- und Fasereigenschaften von Doppelbodenplatten mit Sekundärrohstoffen	xxix
	Kurzfassung	xxxi
	Abstract	xxxiii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Vorgehensweise (eigene Darstellung)	5
Abbildung 2: Abfallhierarchie nach §6 KrWG.....	7
Abbildung 3: Geschädigter Betonprüfkörper mit Netzzissen und Verformungen in Folge von Ettringitbildung	9
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Querschnitts von Gipskartonplatten nach DIN 18180 und Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2	11
Abbildung 5: Aufbau einer Doppelbodenplatte der Firma Lindner Norit GmbH	12
Abbildung 6: Gipsbedarf sowie Aufkommen nach Gipsarten in Deutschland (2015-2040) unter der Annahme eines vorzeitigen Kohleausstiegs bis 2030, konstantem Gipsbedarf und Außenhandelssaldo sowie einer konstanten Menge an sonstigen synthetischen Gipsen sowie einer Ausweitung des Gipsrecyclings und der Abbauflächen für Naturgips	15
Abbildung 7: Aufkommen und Verbleib von gipshaltigen Abfällen in Deutschland (2020) ...	17
Abbildung 8: Art und Qualität von gipshaltigen Abfällen nach Entstehungsort	18
Abbildung 9: Standorte von Aufbereitungsanlagen für gipshaltige Abfälle in Deutschland - Stand 2024.....	19
Abbildung 10: Beispielhaftes Schema eines Aufbereitungsprozesses für gipshaltige Abfälle	20
Abbildung 11: Prognostizierte, potenzielle Rücklaufmenge von GKP und GFP bis 2050 in drei Szenarien auf Basis des Inlandverbrauchs von GKP und GFP seit 1995 mit T = durchschnittliche Lebensdauer und β = Weibull-Faktor	29
Abbildung 12: Gipskreislauf	31
Abbildung 13: Nadelige und tafelige Kristallhabita im SEM (links, eigene Aufnahme) und als Modell mit Wachstumsflächen (rechts).....	33
Abbildung 14: Zerklüftete Oberfläche eines β - HH Korns aus REA-Gips (links) und gut ausgebildete α - HH Kristalle / Kristallite aus GKP (rechts)	34
Abbildung 15: Fließbild eines Nassverfahrens mit Einzeltaktpressverfahren zur Herstellung von Doppelbodenplatten der Firma Lindner Norit GmbH	37
Abbildung 16: Schematische Darstellung möglicher Mechanismen bei der Rissentwicklung in GFP durch Krafteinwirkung.....	39
Abbildung 17: Konzept zur Beantwortung der Forschungsfragen	49
Abbildung 18: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Versuchsreihe: Einsatz diverser Faserstoffe zur Herstellung von Doppelbodenplatten	53

Abbildung 19: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Verwertung von GKP, GFP, Gipsschlamm und Schleifstaub aus der GFP.- bzw. GKP- Produktion für die Herstellung neuer Doppelbodenplatten	55
Abbildung 20: Versuchsreaktor für die Umwandlung von gipshaltigen Bauabfällen zu α -HH-Suspension	56
Abbildung 21: Schematische Darstellung der Probenahme des Gips-Faser-Gemisches zur Bestimmung des Umwandlungsfortschrittes von Gips zu α -HH und die Analytik zu Charakterisierung der α -HH-Suspension	57
Abbildung 22: Dihydratgehalt von Gips aus GKP (Typ A, DF und H2) aus verschiedenen Produktionswerken	61
Abbildung 23: Rehydratisierbarer Anteil von Gips aus GKP (Typ A, DF und H2) aus verschiedenen Produktionswerken	62
Abbildung 24: Aufnahme von GKP Typ DF (SH3) mit einem Rasterelektronenmikroskop in 300-facher Vergrößerung mit Glasfasern (rot) und Papierfaser (grün) (links) und 2900-facher Vergrößerung mit typischen nadeligen und plattigen Kristallmorphologien und mineralischen Nebenbestandteilen (blau) (rechts)	63
Abbildung 25: Übersicht der Bruchlast von GFP armiert mit diversen Faserstoffen und unterschiedlichen Fasergehalten	70
Abbildung 26: Pearson-Korrelationsmatrix zur Darstellung der linearen Beziehungen zwischen Faserstoffeigenschaften, Fasergehalt und Bruchlast in Doppelbodenplatten	72
Abbildung 27: Prinzip der 5-fachen Kreuzvalidierung (eigene Darstellung nach)	79
Abbildung 28: Korngrößenverteilung von verschiedenen α -HH-Suspensionen sowie von Stuckgips	87
Abbildung 29: REM-Aufnahmen von verschiedenen α -HH-Suspensionen aus Gipsschlamm (GS1; a), Schleif-staub Werk 1 (S1; b) aufbereiteten GFP (GFP2; c) und GKP (SL1; d & SH3; e) sowie Abfallgemisch (AM1; f) nach der Nasskalzinierung bei 2.700-facher Vergrößerung (eigene Aufnahmen) ...	89
Abbildung 30: REM-Aufnahmen von Stuckgips (SG1) mit 1.000-facher (links) und 100-facher Vergrößerung (rechts)	90
Abbildung 31: Umwandlungsgeschwindigkeit von aufbereiteten GKP auf Basis von REA-Gips (SL1), Naturgips (SH1, SH2, SH3), GFP (GFP2), Schleifstaub (S1), Gipsschlamm (GS1) und einem Abfallmix (AM1) in der Nasskalzinierung in einem mit Mantelbeheizung betriebenen Reaktor	93
Abbildung 32: Abweichung der Presszeiten von GFP aus 50 % Stuckgips und 50 % α -HH-Suspension aus gipshaltigen Bauabfällen zum Referenzwert	96

Abbildung 33: Vergleich der Bruchlasten von GFP aus 50 M.-% Stuckgips und 50 M.-% α -HH-Suspension aus gipshaltigen Bauabfällen. Die gestrichelten Linien stellen die Mindestanforderungen an die Bruchlast von Doppelbodenplatten für die Elementklassen 2 & 3 nach DIN EN 12825 da ...	98
Abbildung 34: Vergleich der Bruchlast von Doppelbodenplatten mit den Faserstoffen „Krafthaltiger Sorte 2“ und „GKP- Karton2 und Zugabe von 50 M.-% alpha-HH auf Grundlage von Gipsschlamm (VG1) und GKP (VG10) sowie 100 M.-% Stuckgips (V12 und V24)	103
Abbildung 35: Vergleich der beobachteten und berechneten Bruchlasten von Doppelbodenplatten mit Zusatz von 50 M.-% alpha-HH auf Grundlage von GKP mit Faserstoffen GKP-Karton (VG10), GKP-Karton & Krafthaltiges Papier 2 (VG5) sowie GKP-Karton & Krafthaltiges Papier 8 (VG12) (links) sowie die Abweichung der beobachteten und berechneten Bruchlasten (rechts)	105
Abbildung 36: Vergleich der beobachteten Bruchlasten und der auf Grundlage der Regressionsgleichung berechneten Bruchlasten von GFP mit gipshaltigen Bauabfällen	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ausgewählte Gipsplatten-Typen nach DIN EN 520 und DIN 18180	11
Tabelle 2:	Zuordnung von Elementklassen für GFP-Doppelböden nach DIN EN 12825	13
Tabelle 3:	Die wichtigsten Anforderungen an Gips- und Anhydritstein für verschiedene Verwendungszwecke	14
Tabelle 4:	Zusammensetzung und Calciumsulfatdihydratgehalte von Naturgipsen und REA-Gips	14
Tabelle 5:	Qualitätsanforderungen an Recyclinggips (Technische Parameter)	23
Tabelle 6:	Parameter für Gesundheit, Sicherheit und Umwelt nach Eurogypsum	24
Tabelle 7:	Annahmen für die Ableitung des potenziellen Rücklaufs von GKP und GFP in Deutschland	27
Tabelle 8:	Rücklaufmengen von GKP und GFP und deren Anteil am Inlandverbrauch im Jahr 2030 für verschiedene Szenarien	29
Tabelle 9:	Übersicht der Calciumsulfat-Phasen und ihrer Eigenschaften	32
Tabelle 10:	Ausgewählte Eigenschaften von α – Halbhydrat aus dem Autoklaven und β - Halbhydrat aus dem Drehofen und Kocher	34
Tabelle 11:	Angewendete Methoden zur Charakterisierung von Gips und Faserstoffen	50
Tabelle 12:	Phasenzusammensetzung von Gips aus verschiedenen GKP	60
Tabelle 13:	Ausgewählte Parameter der Faserstoffqualität von GKP-Karton (Vorderseite und Rückseite) zweier Hersteller im Vergleich mit Altpapier der krafthaltigen und unteren Sorte	65
Tabelle 14:	Eingangsdaten zur Analyse der Armierungswirkung von Faserstoffeigenschaften auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten	68
Tabelle 15:	Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zur Vorhersage der Bruchlast von GFP	74
Tabelle 16:	Annahmen des Regressionsmodells und Ergebnisse der Überprüfung des zugrundeliegenden multiplen linearen Regressionsmodells mit den angewandten Testverfahren	78
Tabelle 17:	Ergebnis der 5-fachen Kreuzvalidierung des multiplen linearen Regressionsmodells zur Vorhersage der Bruchlast anhand von Faserlänge_ISO_I, Fasergehalt_GFP, Holzstoffanteil_GFP und Feinanteil_B_GFP	80
Tabelle 18:	Kristallwasser, Reinheit und Fasergehalt von aufbereiteten GKP und GFP sowie von Schleifstaub aus den Werken 1 und 2 und Gipsschlamm	84

Tabelle 19:	Ausgewählte Fasereigenschaften aufbereiteter GKP (SL1), GFP aus Werk 2 (GFP2), Schleifstaub aus Werk 1 und 2 (S1, S2) sowie Gipsschlamm (GS1).....	84
Tabelle 20:	Materialzusammensetzung für die Umwandlung zu α -Halbhydrat-Suspensionen in der Nasskalzinierung	85
Tabelle 21:	Spezifische Oberfläche, häufigste Kristallgröße, HH- und Anhydrit-Gehalte von α -HH-Suspensionen aus aufbereiteten GKP und GFP sowie Gipsschlamm, Schleifstaub und Abfallmix.....	91
Tabelle 22:	Zusammensetzung der Nassmischungen zur Herstellung von Gipsfaserplatten mit diversen gipshaltigen Bauabfällen als α -HH-Suspension.....	94
Tabelle 23:	Zusammensetzung, Fasereigenschaften, berechnete und beobachtete Bruchlast von Doppelbodenplatten mit GKP-Karton und 50 M.-% α -HH auf Basis von GKP Typ A (SL1) und Gipsschlamm (GS1).....	101
Tabelle 24:	Materialzusammensetzung und Faserstoffeigenschaften von Doppelbodenplatten mit Zugabe von 50 M.-% α -HH-Suspension (VG1 auf Basis von Gipsschlamm (GS1) und VG10 auf Basis von GKP(SL1)) sowie ohne α -HH-Zusatz (V12 und V24 mit 100 M.-% Stuckgips). Alle Angaben beziehen sich auf die Gesamtgipsmenge	102
Tabelle 25:	Materialzusammensetzung und Faserstoffeigenschaften von Doppelbodenplatten mit Zugabe von 50 M.-% α -HH auf Basis von Gipsschlamm (VG11) und GKP (VG10, VG5 und VG12).....	104

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
α-HH	α -Halbhydrat
ASN	Abfallschlüsselnummer
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
β-HH	β -Halbhydrat
BauPVO	Bauprodukteverordnung
BET	Brunauer, Emmett, Teller
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CaSO₄	Calciumsulfat
CaSO₄·2H₂O	Calciumsulfatdihydrat
CaSO₄ · ½ H₂O	Calciumsulfathalbhydrat
Cd	Cadmium
CE	Conformité Européenne (EU-Konformität)
Cr VI	Sechswertiges Chrom
DH	Dihydrat
DoP	Leistungserklärung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EU	Europäische Union
FGH	Fasergehalt
FstGH	Feststoffgehalt
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
GKP	Gipskartonplatte
GKP Typ A	Gipskartonplatte Bauplatte
GKP Typ DF	Gipskartonplatte Feuerschutzplatte
GKP Typ H2	Gipskartonplatte imprägniert
GKP Typ DFH2	Gipskartonplatte Feuerschutzplatte imprägniert
GFP	Gipsfaserplatte
H₂O	Wasser
Hg	Quecksilber
HH	Halbhydrat
ISO	Internationale Organisation für Normung
K₂O	Kaliumoxid
Kap.	Kapitel
kg	Kilogramm

km	Kilometer
kN	Kilonewton
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KW	Kristallwasser
L/D	Länge-Breite-Verhältnis
m	Minute
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
M.-%	Massenprozent
Mg	Megagramm
MgO	Magnesiumoxid
mm	Millimeter
Mio.	Millionen
Na₂O	Natriumoxid
n.b.	nicht bestimmt
N	Newton
NRW	Nordrhein-Westfalen
Pb	Blei
PGH	Faserstoffgehalt
REA-Gips	Rauchgasentschwefelungsgips
REACH	Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
RC-Gips	Recyclinggips
GKB	Gipskarton- Bauplatte
GKBI	Gipskarton Bauplatte imprägniert
GKFI	Gipskarton Feuerschutzplatte imprägniert
DIN	Deutsches Institut für Normung
RMSE	Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff
U	Umdrehung
VIF	Varianzinflationsfaktor
VVA	Verbringung von Abfällen
vgl.	Vergleich
X_{mod}	Am häufigsten vorkommende Korngröße
z. B.	Zum Beispiel
°C	Grad Celsius

1. Einleitung

1.1. Hintergrund und Motivation

Gips ist ein zentraler Rohstoff für die Baustoffindustrie mit einem breiten Anwendungsspektrum, das von Gipskarton- und Gipsfaserplatten über Estriche und Putze bis hin zum Einsatz als Zementzuschlagstoff reicht. Als hydraulisches Bindemittel basiert Gips auf Calciumsulfat (CaSO_4), das in der Natur als Dihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Anhydrit (CaSO_4) vorkommt. Darüber hinaus wird Gips auch synthetisch als Nebenprodukt verschiedener industrieller Verfahren gewonnen, insbesondere als REA-Gips (Rauchgasentschwefelungs-anlagengips) aus Kohlekraftwerken.

Bisher deckte REA-Gips rund die Hälfte des deutschen Gipsbedarfs. Mit dem geplanten Kohleausstieg bis spätestens 2038 entfällt diese Bezugsquelle jedoch vollständig, was zu einer absehbaren Verknappung des Rohstoffs führen wird. Die verbleibenden Abbaugelände liegen häufig in ökologisch sensiblen Karstlandschaften, sodass eine Ausweitung des Naturgipsabbaus mit erheblichen ökologischen und sozialen Herausforderungen verbunden ist.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Rückführung gipshaltiger Bauabfälle in den Wertstoffkreislauf zunehmend an Bedeutung. Das Recycling dieser Abfälle ist mit zahlreichen Herausforderungen verbunden. Dazu zählen die sortenreine Erfassung, kostengünstige Entsorgungswege und die bislang unzureichende Weiterentwicklung von Recyclingprozessen. Diese Hürden spiegeln sich in einer aktuell niedrigen Recyclingquote von lediglich 10 bis 15 %¹ wider. Angesichts eines erwarteten Anstiegs gipshaltiger Bauabfälle wird deutlich, dass ein konsequenter Ausbau der Kreislaufwirtschaft notwendig ist, um eine nachhaltige und verlässliche Versorgung mit Gips langfristig sicherzustellen.

Gipskartonplatten (GKP) bestehen aus einem Gipskern, der beidseitig mit Karton ummantelt ist. Bei Gipsfaserplatten (GFP) werden hingegen Gips und recycelte Papierfasern zu einem homogenen, tragfähigen Verbundmaterial kombiniert. Die gegenwärtige Recyclingpraxis konzentriert sich überwiegend auf die Rückgewinnung des Gipskerns aus Gipskartonplatten (GKP).² Während der Gips als Sekundärrohstoff in der Produktion neuer GKP oder von Estrichen genutzt wird, bleibt der abgetrennte Karton bislang weitgehend ungenutzt und wird in der Regel energetisch verwertet.^{3,4} Bei Gips-Faser-Kombinationen wie sie in GFP oder Produktionsresten aus der GFP-Produktion vorkommen, verhindern die in der Gipsmatrix

¹ [Schäfer; Basten, 2023], S. 9.

² [Buchert et al., 2017], S. 50.

³ [Henning, 2025], S. 66.

⁴ [Buchert; et al., 2017], S. 48.

eingebundenen Zellulosefasern bislang eine stoffliche Verwertung in der Gipsindustrie, sodass diese Gips-Faser-Gemische in der Regel deponiert werden müssen.

Aus ökologischer und ressourcentechnischer Sicht ist diese Praxis unbefriedigend, da sowohl der Gips als auch die Faserstoffe prinzipiell als Sekundärrohstoffe für die Herstellung neuer Gipsprodukte geeignet sind. Ein ganzheitlicher Ansatz, der die stoffliche Verwertung beider Fraktionen ermöglicht, besteht im Einsatz für die Herstellung neuer GFP. Die große Bandbreite an Gipsprodukten und deren unterschiedliche Einsatzbereiche führen jedoch dazu, dass beim Einsatz gipshaltiger Bauabfälle eine erhebliche Schwankungsbreite der Materialeigenschaften und -zusammensetzungen in den Produktionsprozess eingebracht wird.

Aus der wissenschaftlichen Forschung zu dieser Thematik ist bekannt, dass neben den spezifischen Eigenschaften des Gipses auch die Art der Fasern, die komplexen Wechselwirkungen zwischen Gipskristallen und Fasern sowie der gesamte Herstellungsprozess die Festigkeit und Qualität des Endprodukts maßgeblich bestimmen. Bisherige Untersuchungen im industriellen Maßstab zeigten, dass der Einsatz von Schleifstäuben, aufbereiteten GFP sowie RC-Gips aus GKP zur Herstellung neuer GFP in Anteilen von 25 bis 50 M.-% grundsätzlich technisch umsetzbar ist.⁵ Im Mittelpunkt dieser Studien stand jedoch primär der Einfluss der Gipseigenschaften auf den Produktionsprozess und die Produktqualität, während der Einfluss von Additiven in GKP (z. B. Siloxane), mineralischen Nebenbestandteilen im Gips sowie die Rolle der Fasern und deren Wechselwirkungen mit der Gipsmatrix weitgehend unberücksichtigt geblieben sind.

Für die industrielle Praxis bedeutet dies: Der Einsatz gipshaltiger Bauabfälle für die Herstellung neuer GFP erfordert ein fundiertes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Rohstoffeigenschaften und Produktfestigkeit, um trotz schwankender Materialeigenschaften eine gleichbleibend hohe Produktqualität sicherstellen zu können. An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an, indem sie die zuvor genannten und bislang vernachlässigten Einflussgrößen systematisch untersucht und damit die Grundlage für einen ressourceneffizienten Einsatz gipshaltiger Bauabfälle in der GFP-Produktion schafft.

1.2. Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit wird die Ausgangssituation der Kreislaufführung gipshaltiger Bauabfälle umfassend erläutert (vgl. Kapitel 2). Nach der Einführung in die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Kreislaufführung von gipshaltigen Bauabfällen (vgl. Kapitel 2.1) werden die Nutzung von Gipsplatten im Bauwesen (vgl. Kapitel 2.2) sowie die aktuelle Rohstoffsituation von Gips und die Auswirkungen des Kohleausstiegs auf die zukünftige

⁵ [Aschern; Hartmann, 2011], S. 71.

Versorgungslage (vgl. Kapitel 2.3) dargelegt. Anschließend werden die derzeitige Verwertungspraxis gipshaltiger Bauabfälle beschrieben (vgl. Kapitel 2.4, 2.5), die potenzielle Rücklaufmenge von GKP und GFP in drei Szenarien mit unterschiedlichen Rückbauraten bis 2050 prognostiziert (vgl. Kapitel 2.6) und das daraus resultierende Substitutionspotential bewertet.

In Kapitel 3 werden die Grundlagen für die Verwertung gipshaltiger Bauabfälle im Kontext der GFP-Produktion beschrieben. Es werden chemisch-physikalische Grundlagen von Calciumsulfat (vgl. Kapitel 3.1) der Herstellungsprozess von GFP (vgl. Kapitel 3.2), die Versagensmechanik von GFP (vgl. Kapitel 3.3) und abschließend der aktuelle Stand der Forschung und Entwicklung zu festigkeitsrelevanten Fragestellungen bei GFP, insbesondere im Hinblick auf Doppelbodenplatten beschrieben (vgl. Kapitel 3.4, 3.5).

In Kapitel 4 wird ein Zwischenfazit gezogen und der Forschungsbedarf hergeleitet, während Kapitel 5 die methodische Herangehensweise, die verwendeten Materialien sowie die Versuchsdurchführung zur Beantwortung der Forschungsfragen beschreibt.

Der Hauptteil beginnt mit einer quantitativen Analyse der Materialeigenschaften des Gipskerns und der Kartonummantelung von GKP verschiedener Typen und Hersteller (vgl. Kapitel 6). Ziel ist es die Bandbreite an Materialqualitäten aufzuzeigen, die beim Recycling von GKP zu erwarten und zu berücksichtigen sind.

Die Festigkeitsmechanik von Gipsfaserplatten wird durch zahlreiche Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen beeinflusst. Um die maßgeblichen Faserstoffeigenschaften auf die mechanische Belastbarkeit von GFP bewerten zu können, wird diese Komplexität systematisch reduziert, indem die Armierungswirkung von Faserstoffen in GFP am Beispiel von Doppelbodenplatten aus Stuckgips mit definierten, konstanten Materialeigenschaften und variierenden Faserstoffen analysiert wird (vgl. Kapitel 7). Mit einer multiplen linearen Regressionsanalyse werden die Effekte einzelner Fasereigenschaften auf die Bruchlast quantifiziert, wobei deren gegenseitige Wechselwirkungen explizit berücksichtigt werden. Ziel ist es, die maßgeblichen Faserkennwerte auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten zu identifizieren und sowohl ihren Einfluss als auch deren Einflussstärke zu quantifizieren.

In dem darauffolgenden Kapitel 8 werden Einflüsse spezifisch aufbereiteter GKP sowie GFP, Schleifstaub und Gipsschlamm auf die Produktionsprozesse sowie die Produktfestigkeit von Doppelbodenplatten analysiert. Neben der Charakterisierung der genannten Sekundärrohstoffe (vgl. Kapitel 8.1) werden die Auswirkungen ihrer Gips- und Fasereigenschaften sowie zugesetzter Additive (z. B. hydrophobe Mittel und mineralische Nebenbestandteile) auf die Umwandlungsgeschwindigkeit der Nasskalzinierung (vgl. Kapitel

8.2), die Presszeit (vgl. Kapitel 8.3.2) und die Bruchlast (vgl. Kapitel 8.3.3) von Doppelbodenplatten untersucht.

Anschließend wird in Kapitel 9 das entwickelte Regressionsmodell auf ausgewählte Doppelbodenplatten aus den Kapiteln 7 und 8 sowie auf gezielt ergänzte Versuche angewandt. Damit werden spezifische Erkenntnisse zum Einfluss der Gipseigenschaften (vgl. Kapitel 9.1.1), von α -Halbhydrat (vgl. Kapitel 9.1.2) sowie der Gips-Faser-Interaktion (vgl. Kapitel 9.1.3) auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten quantifiziert und nachgewiesen.

Auf Grundlage der ermittelten Ergebnisse werden in Kapitel 10 Schlussfolgerungen zur Steigerung und effektiven Steuerung der Produktfestigkeit von Doppelbodenplatten abgeleitet. Dabei werden sowohl deren Grenzen als auch weiterer Forschungsbedarf herausgearbeitet. Die Resultate bilden eine fundierte Basis für den industriellen Einsatz gipshaltiger Bauabfälle in der Herstellung neuer GFP und zeigen die damit verbundenen Chancen und Herausforderungen auf. Zugleich unterstützen sie die Entwicklung nachhaltiger, ressourceneffizienter Verwertungsstrategien und tragen zu einem vertieften Verständnis der maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Produktqualität von GFP bei. Der gesamte Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1 nochmal im Überblick dargestellt.

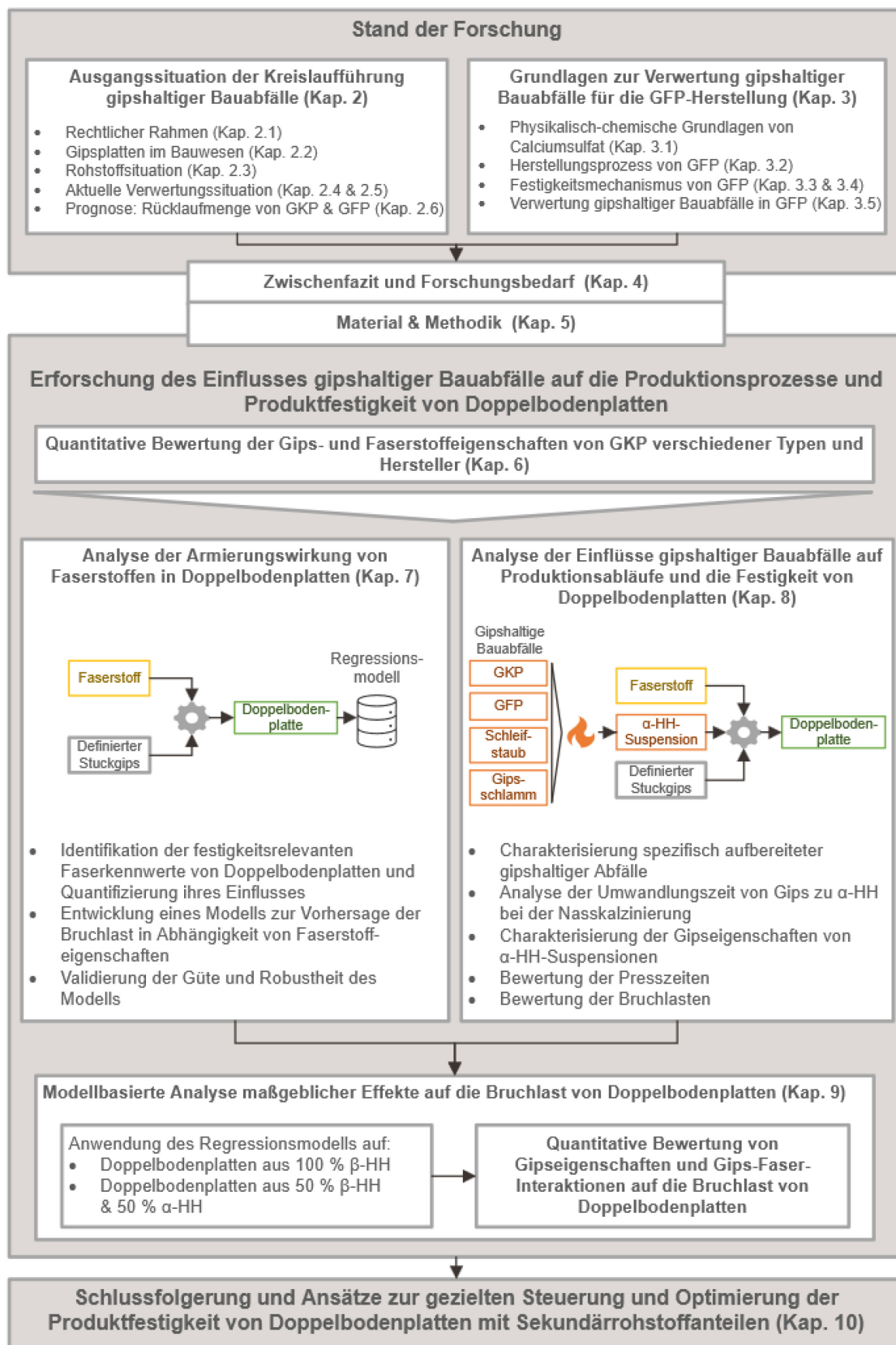


Abbildung 1: Schematische Vorgehensweise (eigene Darstellung)

2. Kreislaufführung von gipshaltigen Bauabfällen in Deutschland

Gips ist als Rohstoff für die deutsche Baustoffindustrie von elementarer Bedeutung. Die Versorgung erfolgt traditionell über drei Hauptquellen: Naturgips aus heimischen Lagerstätten, REA-Gips aus der Kohleverstromung und zunehmend Recycling-Gips (RC-Gips).^{6,7} Der geplante Kohleausstieg bis 2038 führt jedoch zu fundamentalen Veränderungen in der Rohstoffversorgung und stellt die Branche vor erhebliche Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund wird in diesem Kapitel die gegenwärtige Rohstoffsituation analysiert sowie die Chancen und Grenzen einer kreislaforientierten Versorgung für die zukünftige Rohstoffsicherheit untersucht. Dabei wird zunächst der rechtliche Rahmen für die Kreislaufführung von gipshaltigen Bauabfällen erörtert. Daraufhin werden die grundlegenden materialtechnischen Eigenschaften und Funktionsweisen von Gipsplatten im Bauwesen definiert. Anschließend wird die gegenwärtige Rohstoffsituation von Gips in Deutschland analysiert und die Versorgungsrisiken im Kontext des Kohleausstiegs benannt. Darauf aufbauend wird die Recyclingsituation gipshaltiger Bauabfälle separat bilanziert und die technischen sowie logistischen Herausforderungen für eine kreislaufgestützte Rohstoffversorgung erörtert. Abschließend wird auf Basis dieser Analyse eine Prognose zum Aufkommen von Gipskarton- und Gipsfaserplattenabfällen bis 2050 dargestellt, um daraus die zukünftigen Recycling-Potenziale zu quantifizieren und deren Beitrag zur Versorgungssicherheit zu bewerten.

2.1. Politische und regulative Rahmenbedingungen für die Kreislaufführung von gipshaltigen Bauabfällen

Auf europäischer Ebene werden politische Strategien und Ziele gemeinsam von der EU und ihren Institutionen festgelegt, um das zukünftige gesellschaftliche Zusammenleben zu bestimmen. Die Europäische Kommission setzt diese Strategien in Form politischer Maßnahmen und Initiativen um, die in Rechtsakte wie Verordnungen und Richtlinien münden. Verordnungen gelten unmittelbar und müssen von allen EU-Ländern in vollem Umfang umgesetzt werden. Richtlinien legen ein Ziel fest, dessen Umsetzung den EU-Ländern überlassen bleibt.

Die Umwelt- und Klimapolitik der EU ist im Europäischen Grünen Deal verankert, der die Klimaneutralität bis 2050 und die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcennutzung zum Schutz von Mensch und Umwelt anstrebt.⁸ Das europäische

⁶ [Länderoffenen Arbeitsgruppe Ressourceneffizienz, 2022], S. 7.

⁷ [Henning, 2025].

⁸ [Europäische Kommission, 2019].

Klimagesetz verpflichtet zur Klimaneutralität bis 2050 und zur Reduzierung der Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % bis 2030 gegenüber 1990.⁹ Zentrale Maßnahmen sind der Aktionsplan¹⁰ für die Kreislaufwirtschaft, der darauf abzielt die Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Rezyklierbarkeit von Produkten zu erhöhen und Abfall zu vermeiden. Deutschland setzt diese Ziele durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz¹¹ (KrWG), die Ersatzbaustoffverordnung¹² sowie auf Landesebene im Fall von Nordrhein-Westfalen durch das Landeskreislaufwirtschaftsgesetz NRW¹³ um.

Die Verwertung und das Recycling von gipshaltigen Bauabfällen werden in Deutschland durch eine Vielzahl von Gesetzen, Normen und Verordnungen geregelt. Diese rechtlichen Rahmenbedingungen legen Anforderungen an die Abfallbewirtschaftung, das Inverkehrbringen von Bauprodukten sowie an die Sammlung, Behandlung und Verbringung von Abfällen fest. Im Folgenden werden die wichtigsten Regelwerke und ihre Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft gipshaltiger Bauabfälle erläutert.

Das **Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)**¹⁴ bildet die zentrale Grundlage für die Abfallbewirtschaftung in Deutschland. Mit dem KrWG ist **die europäische Abfallrahmenrichtlinie 2018/851 (AbfRRL)**¹⁵ in deutsches Recht umgesetzt worden. In beiden ist die fünfstufige Abfallhierarchie: Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung und Beseitigung definiert (Abbildung 2). Sie gibt die Rangfolge von Maßnahmen zur Vermeidung und Bewirtschaftung von Abfällen vor.



Abbildung 2: Abfallhierarchie nach §6 KrWG¹¹

⁹ [Europäisches Parlament und europäischer Rat, 2021].

¹⁰ [Europäische Kommission, 2020b].

¹¹ [Bundesregierung (D), 2021a].

¹² [Bundesregierung (D), 2021b].

¹³ [Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen, 2023].

¹⁴ [Bundesregierung (D), 2021a].

¹⁵ [Europäisches Parlament und europäischer Rat, 2018].

¹⁶ [Bundesregierung (D), 2021a]. 11 KrWG.

Im KrWG wird der Abfallbegriff (§3 KrWG) definiert und auch die Abgrenzung von Abfällen zu Nebenprodukten (gemäß §4 KrWG) sowie das Ende der Abfalleigenschaft (gemäß §5 KrWG) geregelt. Auf dieser rechtlichen Grundlage wird REA-Gips als Nebenprodukt geführt. Aus den gesetzlichen Anforderungen an Nebenprodukte ergibt sich hierbei als wesentliche Voraussetzung, die Einhaltung spezifischer, fachlich definierter Qualitätskriterien, die die Verwendbarkeit des Materials außerhalb des Abfallregimes sicherstellen. Der europäische Gipsverband EUROGYPSUM hat entsprechende Qualitätskriterien¹⁷ festgelegt und konnte die Gleichwertigkeit von REA-Gips und Naturgips durch toxikologische Gutachten belegen. Daraufhin wurde REA-Gips im Jahr 1993 aus dem Europäischen Abfallverzeichnis gestrichen, trägt seitdem den Status „Nebenprodukt“ und wird nach chemikalienrechtlichen Vorschriften (REACH) registriert und gehandelt.¹⁸

Während REA-Gips somit aufgrund seiner definierten Herkunft, gleichbleibenden Qualität und der nachgewiesenen Unbedenklichkeit nicht als Abfall, sondern als Nebenprodukt im Sinne des § 4 KrWG gilt, unterliegen gipsbasierte Materialien nach ihrer Nutzung anderen rechtlichen Bewertungen. Sobald diese Stoffe aus Bau- oder Rückbauprozessen stammen und keiner weiteren bestimmungsgemäßen Verwendung mehr zugeführt werden, gelten sie gemäß § 3 KrWG als Abfälle.

Ergänzend dazu legt die **Abfallverzeichnisverordnung (AVV)** die genaue Bezeichnung von Abfällen sowie ihre Einstufung nach Gefährlichkeit fest. Diese werden mit sechsstelligen Abfallschlüssel (ASN) gekennzeichnet, einer Abfallart zugeordnet und im Abfallverzeichnis gelistet. Gipshaltige Bauabfälle werden unter **dem Abfallschlüssel 17 08 02** geführt. Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung und der vielfältigen Anwendungen gipsbasierter Produkte – wie GKP, GFP, sowie gipsgebundener Putze und Estriche – kann die stoffliche Zusammensetzung dieser Abfälle erheblich variieren, sodass sie in Einzelfällen auch unter abweichenden Abfallschlüsselnummern zuzuordnen sind (Anhang B, Tabelle B 1).

Die **Bauprodukteverordnung (EU) Nr. 305/2011 (BauPVO)** regelt das Inverkehrbringen von Bauprodukten wie Gipsplatten auf dem europäischen Markt und gilt für alle Bauprodukte, die dauerhaft in Bauwerken verbaut werden. Ein zentrales Ziel ist die Förderung der Kreislaufwirtschaft, indem Bauprodukte wiederverwendbar und recycelbar sein sollen. Zudem wird der Einsatz von Recyclingmaterialien unterstützt.

Hersteller müssen eine Leistungserklärung (DoP) erstellen und das CE-Zeichen anbringen, was die Einhaltung europäischer Normen (z. B. DIN EN 520¹⁹) bestätigt. Die Leistungserklärung umfasst Angaben zu mechanischen Eigenschaften, Brandverhalten,

¹⁷ [EUROGYPSUM, 2012], S. 2.

¹⁸ [Hamm et al., 2004], S. 5.

¹⁹ [DIN EN 520:2009-12, 2009].

Emissionen und Nachhaltigkeitsaspekten. Auch Händler und Importeure sind zur Konformitätssicherung verpflichtet, für Kleinunternehmen gelten vereinfachte Verfahren. Die BauPVO sorgt europaweit für einheitliche Qualitäts-, Sicherheits- und Nachhaltigkeitsstandards und fördert Transparenz sowie den Einsatz von Recyclingmaterialien im Bausektor.

Erreichen Bauprodukte ihr Lebensende regelt die **Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV)**, die getrennte Sammlung und Behandlung von Bau- und Abbruchabfällen. Damit soll sichergestellt werden, dass Wertstoffe wie Gips möglichst sortenrein erfasst und recycelt werden können. Sie verpflichtet Erzeuger und Besitzer als auch Betreiber von Vorbehandlungs- und Aufbereitungsanlagen zur getrennten Sammlung sowie zur Behandlung von Abfällen gemäß Abfallhierarchie. Die Verpflichtung zur getrennten Sammlung der jeweiligen Abfallfraktion entfällt, sofern dies technisch nicht möglich oder wirtschaftlich nicht zumutbar ist. (§ 8 Absatz 2 GewAbfV).

Daher können Baustoffe auf Gipsbasis in Gemischen, die überwiegend aus Beton, Ziegel, Fliesen oder Keramik bestehen, enthalten sein. Der getrennten sortenreinen Erfassung von Baustoffen auf Gipsbasis kommt jedoch eine besondere Bedeutung zu. Gips ist aufgrund seiner Sulfatbestandteile maßgeblich für Sulfatbelastungen in Bau- und Abbruchabfällen verantwortlich. Sulfatbelastungen sind im Baustoffrecycling unerwünscht, da sie unter bestimmten Bedingungen unerwünschte Reaktionen eingehen und betonschädigende Minerale wie Ettringit oder Thaumasit bilden, die zu Schäden an Bauwerken im Hoch-, Erd- und Straßenbau führen können (Abbildung 3).^{20,21,22} Zudem schränken hohe Sulfatbelastungen von Ersatzbaustoffen deren Einsatzmöglichkeiten ein.²³



Abbildung 3: Geschädigter Betonprüfkörper mit Netzzissen und Verformungen in Folge von Ettringitbildung²⁴

²⁰ [Rigo; Unterderweide K., 2021], S. 15.

²¹ [Neroth & Vollenschaar D., 2011], S. 161.

²² [Müller, 2012].

²³ [Bundesregierung (D), 2021b].

²⁴ [Stark & Wicht, 2013], S. 238.

Schließlich ist auch die grenzüberschreitende **Verbringung von Abfällen (VVA)** innerhalb der Europäischen Union durch die Verordnung (EG) Nr. 1013/2006²⁵ geregelt, um eine sichere und umweltgerechte Verwertung sicherzustellen. Diese Verordnung wurde im Oktober 2020 durch die Delegierten Verordnung (EU) 2020/2174²⁶ angepasst und setzt das Basler Übereinkommen²⁷ über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung sowie den OECD-Beschluss C(2001) 107²⁸ in Unionsrecht um.

Bei der Verbringung von Abfällen zur Verwertung innerhalb der Europäischen Union mit oder ohne Durchfuhr durch Drittstaaten wird nach zwei Verfahrenstypen unterschieden:

- Abfälle nach „**Allgemeine Informationspflichten**“²⁹ können ohne Genehmigung grenzüberschreitend verbracht werden.
- Für Abfälle die einer „**Vorherige schriftliche Notifizierung und Zustimmung**“³⁰ bedürfen, ist eine Zustimmung der zuständigen Behörden nötig.

Gipskartonplattenabfälle aus dem Abbruch von Gebäuden gelten gemäß dem Basler Abkommen als nicht gefährliche Abfälle und sind der grünen Liste zugeordnet³¹. Die Verbringung dieser Abfälle zur Verwertung unterliegt demnach der Allgemeinen Informationspflicht und kann innerhalb der Europäischen Union grenzüberschreitend erfolgen, ohne dass hierfür eine behördliche Genehmigung erforderlich ist.

2.2. Gipsplatten im Bauwesen

Gips spielt als Baustoff im modernen Innenausbau eine zentrale Rolle und findet vor allem in Gipsplatten, aber auch als Putz- und Spachtelsysteme oder Estrich Verwendung.³² Als Gipsplatten werden Plattenwerkstoffe bezeichnet, die zu einem überwiegenden Teil aus Gips bestehen. Sie werden vorwiegend als Wand,- Decken- und Bodensysteme, zur Schall- und Wärmedämmung verwendet. Allgemein wird in Gipskartonplatten (GKP) nach DIN 18180 oder Gipsfaserplatten (GFP) nach DIN EN 15283-2 unterschieden. Sie unterscheiden sich unter anderem im Aufbau (Abbildung 4), der Zusammensetzung, der Herstellungsverfahren und den bautechnischen Eigenschaften voneinander.

²⁵ [Europäisches Parlament und europäischer Rat, 2006].

²⁶ [Europäische Kommission, 2020a].

²⁷ [Europäischer Rat, 1993].

²⁸ [OECD-Rat, 2001].

²⁹ [Europäisches Parlament und europäischer Rat, 2006].

³⁰ [Europäisches Parlament und europäischer Rat, 2006].

³¹ Anhang V; Teil1; Liste B; B2040; Verordnung (EG) Nr. 1013/2006

³² [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013].

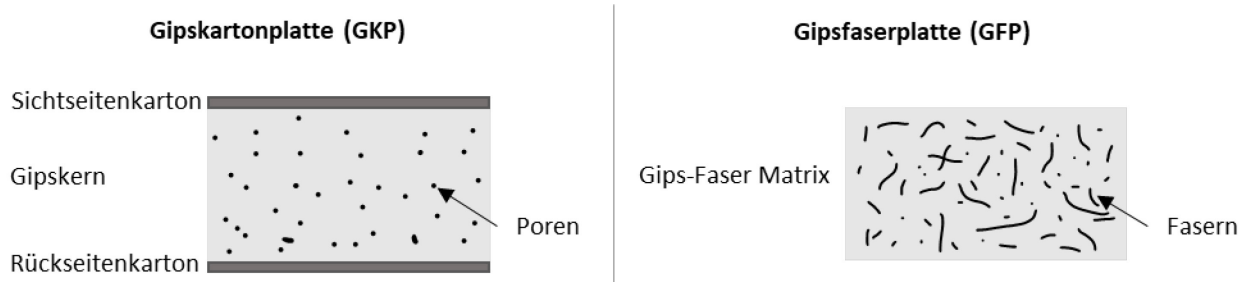


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Querschnitts von Gipskartonplatten nach DIN 18180 und Gipsfaserplatten nach DIN EN 15283-2 (eigene Darstellung)

2.2.1. Gipskartonplatten (GKP)

GKP bestehen aus einem Gipskern, der beidseitig mit Karton ummantelt ist (Abbildung 4). Der Karton verleiht den Platten Festigkeit und Biegesteifigkeit. Die Zusammensetzung umfasst etwa 94 % Gips, 3,5 % Papier und 2,5 % weitere Zusätze.³³ GKP sind nach DIN EN 520 (europäisch) und DIN 18180 (national) klassifiziert und werden nach bautechnischen Eigenschaften wie Festigkeit oder Rohdichte sowie nach Brandverhalten definiert. (Tabelle 1).

Tabelle 1: Ausgewählte Gipsplatten-Typen nach DIN EN 520 und DIN 18180³⁴

	DIN EN 520	DIN 18180	Kartonfarbe	Rohdichte [kg/m³]
Bauplatte	Typ A	GKB	Weiß - gelblich	680
Feuerschutzplatte	Typ DF	GKF	grau	800
Bauplatte (imprägniert)	Typ H2	GKBI	grünlich	680
Feuerschutzplatte (imprägniert)	Typ DFH2	GKFI	grünlich	800

Die Differenzierung der Gipskarton-Bauprodukte wird durch die Modifikation des Gipskerns sowie durch chemische Oberflächenbehandlung erreicht. Die wesentlichen GKP-Typen lassen sich wie folgt charakterisieren:

- **Gipskarton-Bauplatte** (Typ A nach DIN EN 520³⁵; Typ GKB nach DIN 18180) ist die Standardplatte.
- **Gipskarton-Bauplatte-imprägniert** (Typ H2 nach DIN EN 520; Typ GKBI nach DIN 18180) werden bei der Herstellung hydrophobierte Mittel wie Siloxane zugesetzt. Dadurch wird die Wasseraufnahme reduziert und der Einsatz dieser Platten in Feuchträumen ermöglicht.³⁶

³³ [Länderoffenen Arbeitsgruppe Ressourceneffizienz, 2022], S. 9.

³⁴ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013], S. 53.

³⁵ [DIN EN 520:2009-12, 2009].

³⁶ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013], S. 52.

- **Gipskarton-Feuerschutzplatte** (Typ DF nach DIN EN 520; Typ GKF nach DIN 18180) enthält mineralische Zusätze wie Glasfasern im Gipskern und weist eine höhere Rohdichte von mindestens 800 kg/m³ auf. Dies gewährleistet den Gefügezusammenhalt auch bei hohen Temperaturen im Brandfall.³⁷

2.2.2. Gipsfaserplatten (GFP)

GFP sind ebene, rechteckige Platten, aus einem Gipskern, der durch organische Fasern, meist Zellulose aus Altpapier, verstärkt wird (Abbildung 4). Der Faseranteil liegt zwischen 4 bis 20 M.-% je nach Herstellungsverfahren und Rohstoffeigenschaften.³⁸ Die Fasern haben eine armierende Wirkung und verleihen der verdichteten Gips-Fasermatrix eine hohe mechanische Festigkeit. GFP gelten als nicht brennbar und enthalten keine gesundheitsgefährdenden Stoffe.³⁹

Anwendungsbereiche

Gipsfaserplatten (GFP) stehen in verschiedenen Ausführungen zur Verfügung, die je nach Norm und Einsatzgebiet unterschiedliche Anforderungen erfüllen. GFP nach DIN EN 15283-2 werden im trockenen Innenausbau vielfältig eingesetzt, beispielsweise als Bau- und Feuerschutzplatten, für Wand- und Deckenbekleidungen, bei nichttragenden Trennwänden oder in häuslichen Feuchträumen. Ein gesondertes systemisches Anwendungsgebiet von GFP ist der Einsatz als Doppelbodenplatten nach DIN EN 12825. Doppelböden bestehen in der Regel aus quadratischen GFP (z. B. 600 × 600 mm) mit einer Dicke von 18 bis 44 mm, die auf vier Stützen aufgelegt werden (Abbildung 5). Dies ermöglicht eine flexible Nutzung des darunterliegenden Raums für Installationen und Leitungen, wie sie in Bürobereichen, Rechenzentren oder Werkstätten benötigt wird.⁴⁰

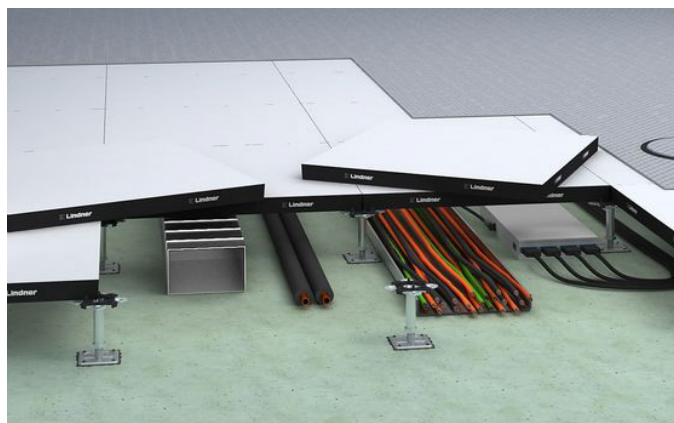


Abbildung 5: Aufbau einer Doppelbodenplatte der Firma Lindner Norit GmbH³⁶

³⁷ [Tichelmann, 2019], S. 17.

³⁸ [Nürnberger, 2009], S. 2.

³⁹ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013], S. 75.

⁴⁰ [Bundesverband Systemböden e.V., 2005], S. 3.

⁴¹ Bildquelle: <https://www.lindner-group.com/>

Klassifizierung und Festigkeit

Die Klassifizierung der Doppelböden erfolgt anhand der Bruchlast, also der maximalen Belastung, der eine Platte standhält, bevor sie versagt.⁴² Die DIN EN 12825 unterscheidet sechs Elementklassen mit Bruchlasten von ≥ 4 kN bis ≥ 14 kN. Die Zuordnung zu den Klassen orientiert sich am Einsatzbereich, von Büros ohne Publikumsverkehr bis hin zu hochbelasteten Fertigungsbereichen. (Tabelle 2)

Tabelle 2: Zuordnung von Elementklassen für GFP-Doppelböden nach DIN EN 12825^{43, 44}

Beispielhafte Einsatzempfehlung	Element- klasse	Bruchlast [kN]
Büros ohne Publikumsverkehr und ohne schwere Geräte	1	≥ 4
Bürobereiche mit Publikumsverkehr	2	≥ 6
Räume mit erhöhten statischen Belastungen, Flächen mit fester Bestuhlung, Konstruktionsbüros	3	≥ 8
Ausstellungsflächen, Werkstätten mit leichtem Betrieb, Lagerräume, Bibliotheken	4	≥ 10
Wie Elementklasse 4, jedoch mit höheren Lastanforderungen, Industrie- und Werkstattböden, Tresorräume	5	≥ 12
Hochbelastete Böden, Fertigungsbereiche wie z. B. Reinräume	6	≥ 14

2.3. Gipsversorgung in Deutschland: Rohstoffquellen, Marktsituation und Zukunftsperspektiven

Als Calciumsulfat**dihydrat** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) oder als kristallwasserfreies **Anhydrit** (CaSO_4) findet sich Gips weltweit als Mineral in ausgedehnten Ablagerungen. Es ist durch Auskristallisation aus übersättigten, wässrigen Lösungen seichter Meeresteile entstanden. Bedingt durch die geologische Vorgeschichte unterscheiden sich die Gipsgesteine in ihrem Reinheitsgrad sowie in ihrer Farbe und in ihrem Gefüge. Zu den natürlichen Beimengungen zählen jene Sedimente, die während der Abscheidung des Gipses aus ehemaligen Meeren niedergeschlagen wurden, wie z. B. Kalkstein, Dolomit, Mergel, Ton und gelegentlich auch Sand, Bitumen oder verschiedene Salze.⁴⁵ In Deutschland treten wirtschaftlich bedeutende Gips- und Anhydritlagerstätten vor allem in Sulfatgesteinen des Zechsteins sowie des Mittleren Muschelkalks und Mittleren Keupers auf, die insbesondere in Niedersachsen, Thüringen, Hessen, Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowohl im Tage- als auch im Untertagebau gewonnen werden.⁴⁶

⁴² [Europäische Norm EN 12825, 2001], S. 5.

⁴³ [Europäische Norm EN 12825, 2001], S. 6.

⁴⁴ [Bundesverband Systemböden e.V., 2005], S. 13.

⁴⁵ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013], S. 14.

⁴⁶ [Henning, 2025], S. 14.

Der Gipsgehalt der Gipse variiert zwischen etwa 70–80 %⁴⁷ Calciumsulfatdihydrat in vielen Muschelkalk- und Keupervorkommen bis hin zu sehr reinen Zechsteingipsen mit bis zu rund 98 %⁴⁸ Gipsgehalt. Während für Bauprodukte wie Gipsplatten und Putze Gipse mit etwa 75–85 % Gipsgehalt ausreichend sind, werden für Spezialanwendungen (Modell-, Dental- oder Formgipse) Gipse mit einem Gipsgehalt von mindestens 97 % benötigt. (Tabelle 3)

Tabelle 3: Die wichtigsten Anforderungen an Gips- und Anhydritstein für verschiedene Verwendungszwecke⁴⁹

	Zement-industrie	Gipsplatten	Gipsputze	Gips-Wand-Bauplatten	Spezialgipse
Gipsgehalt	> 70 – 80 %	> 80 %	75-80 %	> 85 %	> 97 %
Anhydritgehalt	> 90 %	unerwünscht	unerwünscht	unerwünscht	unerwünscht
Tonminerale	-	max. 10 %	max. 10 %	max. 5 %	möglichst frei von Ton
Quelltone	-	0,8 / 0,6 %	< 1,2 %	< 1 %	unerwünscht
Karbonat	-	max. 10 %	max. 10 %	max. 5 %	möglichst frei von Karbonaten
Sonstige Störkomponenten	-	möglichst frei von Quarz	möglichst frei von Quarz	möglichst frei von Quarz	möglichst frei von Quarz

Neben Naturgipsen fallen große Mengen Calciumsulfatdihydrat als Nebenprodukte in technischen Prozessen an (z. B. REA-Gips). REA-Gips ist der mengenmäßig wichtigste technische Gips. Er wird bei der nassen Rauchgasentschwefelung mit Kalk(stein)-waschverfahren nach Oxidation mit Luft, Abtrennung der Gipskristalle, Waschen und Filtrieren gezielt als Nebenprodukt gewonnen.⁵⁰ Gegenüber gemahlenem Naturgips weist REA-Gips eine hohe Reinheit, ein enges Kornband und eine gedrungene Kristallstruktur auf.^{51, 52} Die chemische Zusammensetzung des Calciumsulfats ist bei REA-Gips und Naturgips identisch, jedoch enthält Naturgips zusätzlich mineralische Fremdbestandteile (u. a. Dolomit, Quarz, Magnesit, Calcit, Illit), sodass dessen Reinheitsgrad geringer ist. In Tabelle 4 ist die typische Zusammensetzung für REA- und Naturgipse sowie der jeweilige Calciumsulfatdihydratgehalt dargestellt.

Tabelle 4: Zusammensetzung und Calciumsulfatdihydratgehalte von Naturgipsen und REA-Gips⁵³

	Typische Nebenbestandteile	Calciumsulfatdihydrat
Naturgips	Dolomit, Quarz, Magnesit, Calcit, Illit	70 – 98 % ⁵⁴
REA-Gips	-	~ 96 %

⁴⁷ [Henning, 2025], 39 ff.

⁴⁸ [Henning, 2025], S. 14.

⁴⁹ [Henning, 2025].

⁵⁰ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013], S. 15.

⁵¹ [Müller M., 2007], S. 10.

⁵² [Abdussaljamov, 2003], S. 27.

⁵³ [Müller M., 2007], S. 66.

⁵⁴ [Henning, 2025].

Das jährliche Gipsaufkommen in Deutschland betrug zwischen 2015 bis 2022 etwa 10,5 bis 12 Mio. Mg. Es setzte sich dabei zu etwa gleichen Teilen aus Naturgips (etwa 5 – 6 Mio. Mg)⁵⁵ und REA-Gips (etwa 4,5 – 6,5 Mio. Mg)⁵⁶ zusammen. Eine weitere, jedoch mengenmäßig untergeordnete Rolle in der Versorgung spielen derzeit Recycling – Gips (RC-Gips, etwa 0,1 Mio. Mg⁵⁷) oder andere synthetische Gipse⁵⁸ (etwa 0,4 Mio. Mg⁵⁹). (Abbildung 6)

Im Jahr 2019 wurden etwa im Jahr 2019 etwa 59 % des abgebauten Naturgipses für Gipserzeugnisse im Bauwesen und 28 % für die Zementherstellung genutzt.⁶⁰ Weitere 13 %⁶¹ wurden exportiert. Vom angefallenen REA-Gips wurden im selben Jahr etwa 72 % für die Herstellung von Gipserzeugnissen im Bauwesen und 4 % für die Zementherstellung verwendet.⁶² Exportiert wurden etwa 21 %.⁶³ Die übrigen Anteile des REA-Gipses fanden Anwendung in sonstigen Sektoren.

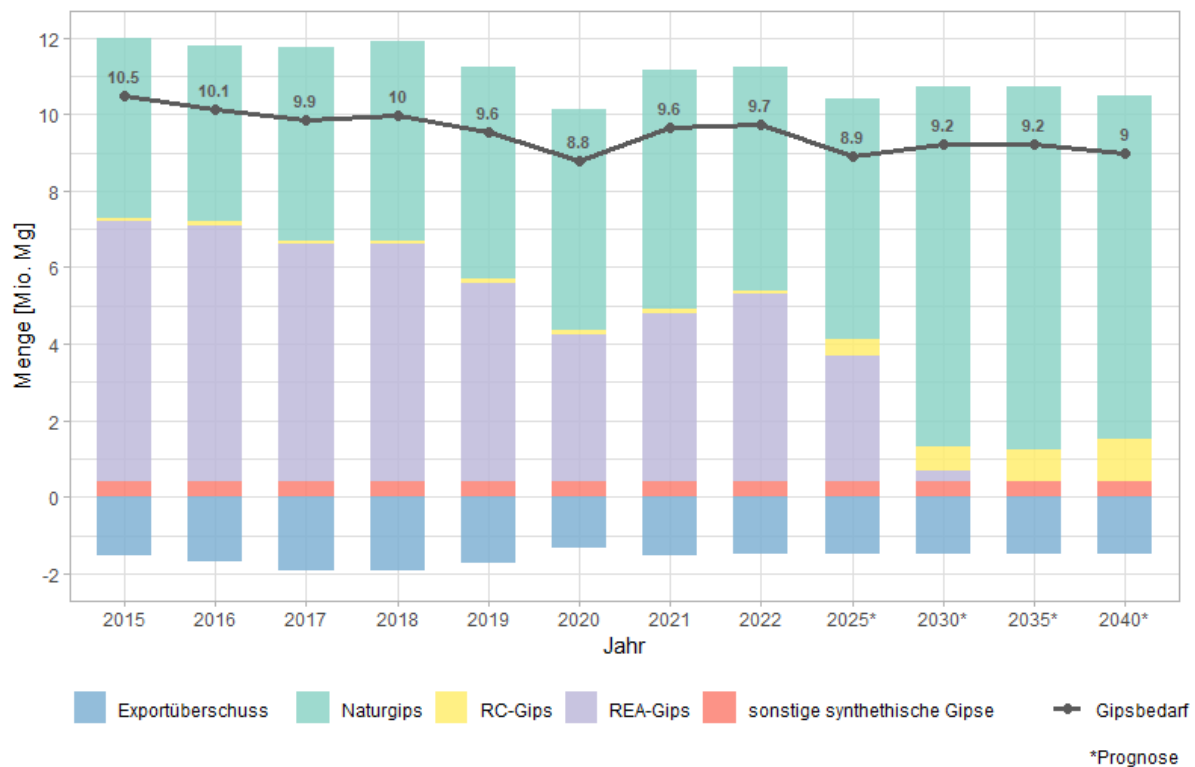


Abbildung 6: Gipsbedarf sowie Aufkommen nach Gipsarten in Deutschland (2015-2040) unter der Annahme eines vorzeitigen Kohleausstiegs bis 2030, konstantem Gipsbedarf und Außenhandelssaldo sowie einer konstanten Menge an sonstigen synthetischen Gipsen sowie einer Ausweitung des Gipsrecyclings und der Abbaufächen für Naturgips (eigene Darstellung nach ^{56,58,59})

⁵⁵ Diese Zahl setzt sich zusammen aus der Abbaumenge von Gips- und Anhydritstein (5,8 Mio. Mg) und des Außenhandelssaldos (= Import-Export) von -0,8 Mio. Mg im Jahr 2022

⁵⁶ Diese Zahl gibt das Aufkommen von REA-Gips an. Zahlen für das Außenhandelssaldo bezogen auf reinen REA-Gips für das Jahr 2022 sind nach aktueller Informationslage nicht vorhanden.

⁵⁷ [Länderoffenen Arbeitsgruppe Ressourceneffizienz, 2022], S. 14.

⁵⁸ Unter sonstige synthetische Gipse fallen z. B. Fluorgips, Fruchtsäuregips oder MVA-Gips.

⁵⁹ [Bastian et al., 2023], S. 68.

⁶⁰ [Basten, 2022], S. 38.

⁶¹ [Basten, 2022], S. 38.

⁶² [Basten, 2022], S. 47.

⁶³ [Basten, 2022], S. 47.

Angesichts sich wandelnder Rahmenbedingungen steht die Gipsversorgung in Deutschland vor großen Herausforderungen. Das Kohleausstiegsgesetz (KVBG) sieht die Beendigung der Kohleverstromung in Deutschland bis spätestens 2038 vor, wobei der politische Wille der vergangenen Jahre einen Ausstieg bereits bis 2030 vorsieht.⁶⁴ Durch den Wegfall von REA-Gips werden Versorgungsengpässe befürchtet.⁶⁵ Laut dem Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. kann die entstehende Angebotslücke nur durch eine Erhöhung der Abbauf Flächen für die Gewinnung von Naturgips gedeckt werden.⁶⁶ Dieses Szenario ist in Abbildung 6 dargestellt.^{67,68} Die Auswirkungen des Kohleausstiegs zeichnen sich bereits im Jahr 2025 mit einem Rückgang von REA-Gips auf 3,4 Mio. Mg ab, der bis 2030 fast gänzlich wegfällt.⁶⁹ Unter der Annahme eines zukünftig konstanten Gipsbedarfs von etwa 9 Mio. Mg müsste die jährlich abgebaute Naturgipsmenge im Vergleich zum Referenzjahr 2022 um rund 3,7 Mio. Mg (+ 60 %) erhöht werden. Dies wäre mit einem ausgedehnten Eingriff in die Umwelt verbunden und würde zum Teil ökologisch besonders wertvolle Gipskarstlandschaften bedrohen.^{70,71} Genehmigungsrechtliche Aspekte⁷² sowie Widerstand in der Bevölkerung und von Umweltverbänden⁷³ erschweren den Abbau weiterer Gipsvorkommen.

Die Gipsversorgung in Deutschland steht vor einem tiefgreifenden Wandel. Um die durch den Wegfall von REA-Gips entstehende Lücke zu schließen und den ökologisch und gesellschaftlich umstrittenen Ausbau des Naturgipsabbaus auf ein Minimum zu begrenzen, ist insbesondere eine konsequente Stärkung der Kreislaufwirtschaft unerlässlich.

2.4. Aufkommen und Verbleib gipshaltiger Bauabfälle

Im Jahr 2020 fielen in Deutschland etwa 740.000 Mg gipshaltiger Bauabfälle (Abfallart gem. AVV 17 08 02) an. Davon wurden knapp 60 % (442.000 Mg) verwertet, wobei ein Fünftel davon recycelt (95.000 Mg) und der Rest der sonstigen Verwertung zugeführt wurde (Abbildung 7). Die Recyclingquote betrug somit knapp 13 %. Etwa 40 % (299.000 Mg) der Abfallmenge wurde auf Deponien beseitigt.⁷⁴ Laut Bundesverband Gipsindustrie ist etwa die Hälfte der anfallenden gipshaltigen Bauabfälle (370.000 Mg) recyclingfähig, was insbesondere auf

⁶⁴ [SPD; Bündnis 90/Die Grünen und FDP, 2021], S. 5.

⁶⁵ [Pavel et al., 2022], S. 146.

⁶⁶ [Bastian et al., 2023], S. 68.

⁶⁷ Unter der Annahme eines Kohleausstiegs bis 2030 bei gleichzeitig konstanten Mengen für den Gipsbedarf, das Außenhandelssaldo und synthetische Gipse sowie einem Anstieg der jährlichen RC-Gipsmengen auf 1,13 Mio. Mg.

⁶⁸ [Ruff; Samtleben, 2022], S. 4.

⁶⁹ [Basten, 2022].

⁷⁰ [König, 2023].

⁷¹ [Ständiger LANA-Ausschuss Eingriffsregelung und Landschaftsplanung, 2021], S. 2.

⁷² [Höding et al., 2021], S. 43.

⁷³ [König, 2023], S. 6f.

⁷⁴ [Schäfer; Basten, 2023], S. 9.

Gipsplattenabfälle zutrifft.⁷⁵ Die übrigen, nicht recyclingfähigen Mengen bestehen vor allem aus ziegel- und betonhaltigen Bauabfällen mit geringen Gipsputzanhaftungen sowie anderen nicht recycelbaren Bauabfällen mit geringen Gipsanteilen.⁷⁶ Die gesamte Aufbereitungskapazität für gipshaltige Abfälle in Deutschland wird von den Aufbereitungsbetrieben mit mindestens 287.000 Mg angegeben. Aktuell wird etwa ein Drittel der bestehenden Recyclingkapazitäten genutzt.⁷⁷

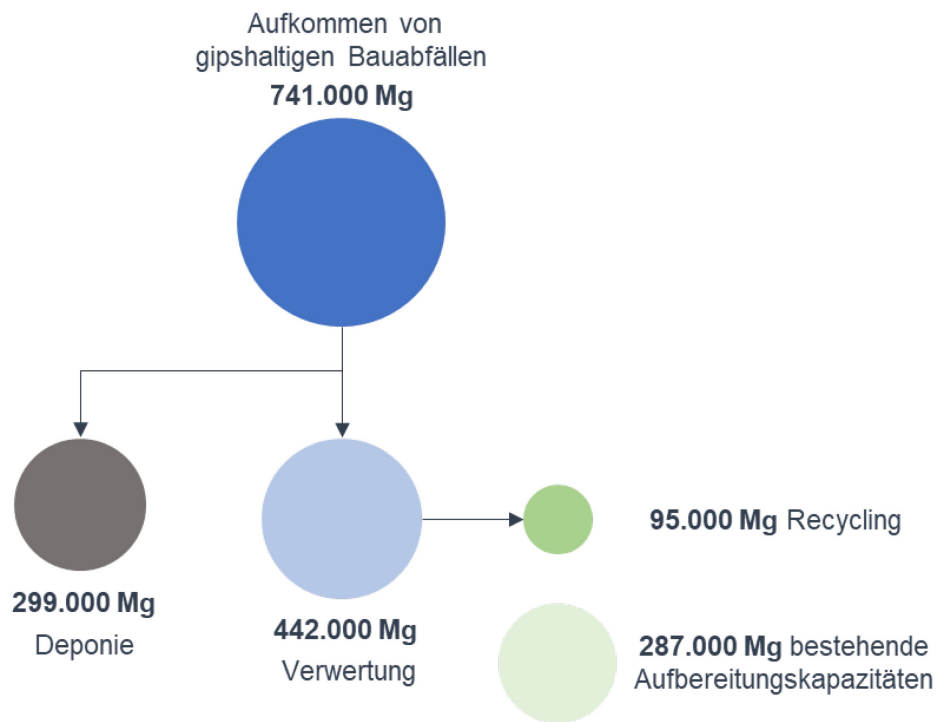


Abbildung 7: Aufkommen und Verbleib von gipshaltigen Abfällen in Deutschland (2020) (eigene Darstellung nach^{78,79})

2.5. Derzeitige Verwertungswege für gipshaltige Bauabfälle

Gipshaltige Bauabfälle, vor allem Gipskartonplatten und Gipsfaserplatten fallen unter anderem in der Gipsindustrie, der weiterverarbeitenden Industrie (z. B. Fertighaushersteller), im Neubau und beim Rückbau oder Abbruch von Gebäuden an (Abbildung 8). Zudem fallen sie bei der Produktion und Weiterverarbeitung unter anderem als Verschnitt oder in Form von Schleifstäuben oder Gipsschlämmen an. Sie werden meist sortenrein erfasst. Auch im Neubau fallen meist störstofffreie Verschnittreste an. Die größte Menge an Gipskartonplattenabfällen (80 bis 90 %) ⁸⁰ fällt beim Rückbau oder Abbruch von Gebäuden an.⁸¹ Gipsplatten können

⁷⁵ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2020].

⁷⁶ [Bookhagen et al., 2023], S. 11.

⁷⁷ [Länderoffenen Arbeitsgruppe Ressourceneffizienz, 2022], S. 14.

⁷⁸ [Schäfer; Basten, 2023].

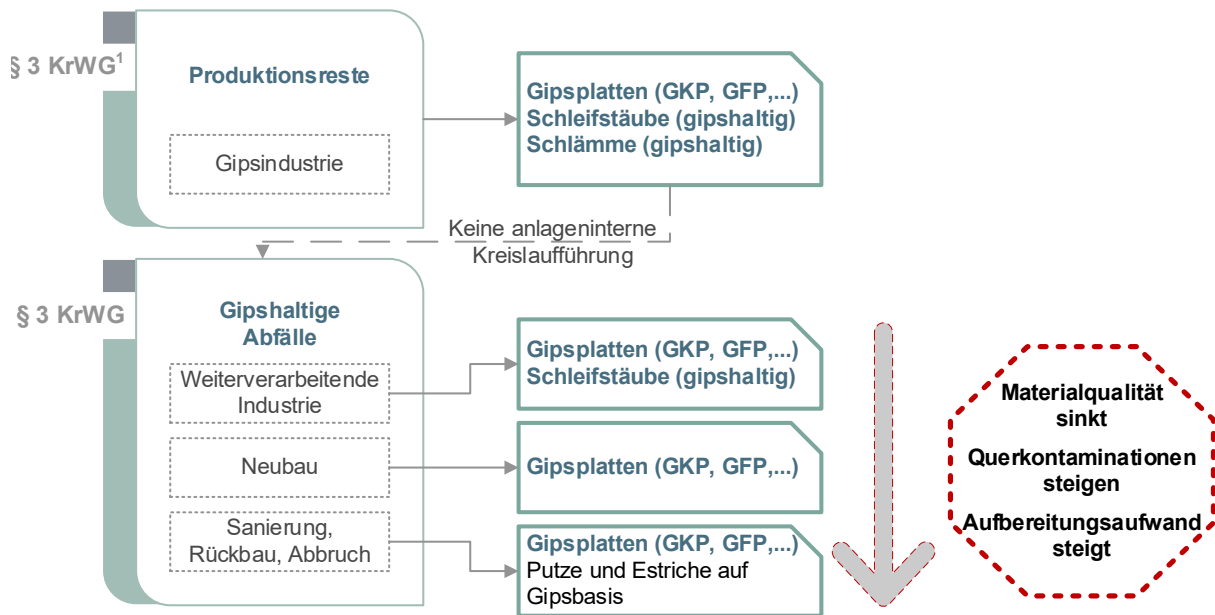
⁷⁹ [Länderoffenen Arbeitsgruppe Ressourceneffizienz, 2022].

⁸⁰ [Bunzel & Farago, 2023], S. 65.

⁸¹ [Müller, 2019], S. 2.

aufgrund des Einsatzes in Bauwerken sowie durch Einflüsse aus der Anwendung oder durch Fehlwürfe, Störstoffe und Verunreinigungen aufweisen. Typische Störstoffe sind:

- Mineralische Abfälle (Beton, Gasbeton, Ziegel)
- Organischer Abfall (Holz, Spanplatten)
- Baustellenabfälle (Folien, Kunststoffe, Elektrokabel)
- Verbundbaustoffe.⁸²



¹ Abfallvermeidung nach § 3 Absatz 20 KrWG: Produktionsreste, die anlagenintern im Kreislauf geführt werden sind **keine** Abfälle.

Abbildung 8: Art und Qualität von gipshaltigen Abfällen nach Entstehungsort (eigene Darstellung)

Mit sinkender Materialqualität und steigenden Querkontaminationen steigt der Aufbereitungsaufwand.⁸³ Eine sortenreine Erfassung dieser Abfälle im Sinne der GewAbfV ist entscheidend für ein erfolgreiches Gipsrecycling.⁸⁴ Neben Gipsplatten fallen unter anderem Gipsputze und Estriche⁸⁵ sowie fälschlicherweise Gas- und Porenbeton unter der ASN 17 08 02 an. Diese gipshaltigen Abfälle sind aufgrund ihrer geringen Reinheit von etwa zwei bis acht % für das stoffliche Recycling ungeeignet, während GKP mit einem Gipsgehalt von > 85 % gut recycelbar sind.

2.5.1. Recycling von gipshaltigen Bauabfällen

In Deutschland gibt es derzeit fünf stationäre Aufbereitungsanlagen für das Recycling von gipshaltigen Bauabfällen (Abbildung 9). In Pulheim (New West Gypsum), Ennigerloh (Tadick

⁸² [Bunzel J. & Wilczek M., 2016], S. 494.

⁸³ [Demmich J., 2015], S. 626.

⁸⁴ [Bunzel & Farago, 2023], S. 70.

⁸⁵ Estriche und Putze stehen meist im Verbund mit dem jeweiligen Trägermaterial und sind für ein Recycling ungeeignet (vgl. Kap. 2.3.3.).

Urban Mining GmbH), Zweibrücken (Remondis) und Großpösna (MUEG) kommen konventionelle Aufbereitungsverfahren zum Einsatz (vgl. Abbildung 10). In Dettelbach (Bayern) betreibt die Firma Lindner Norit GmbH hingegen seit Anfang 2025 eine Anlage mit einem neuartigen Recyclingverfahren. Dieses Verfahren entspricht mit geringfügigen Abweichungen dem in Abbildung 19 (vgl. Kapitel 5.3.2) dargestellten schematischen Versuchsaufbau. Der Verfahrensschritt zur Aufbereitung von GKP für die Verwertung in der GFP-Herstellung wird in Kapitel 3.5 detailliert beschrieben.

Das durchschnittliche Einzugsgebiet für gipshaltige Abfälle wird in Deutschland auf 50 bis 100 km (maximal 200 km) Transportentfernung geschätzt.⁸⁶ Unter dieser Annahme besteht vor allem in den Ballungsgebieten im Westen- und Südwesten sowie im Osten und in der Mitte Deutschlands ein guter Zugang zu Aufbereitungsanlagen (Abbildung 9). In Nord- und Süddeutschland ist der Zugang zu Aufbereitungsanlagen für gipshaltige Abfälle mit größeren Transportentfernungen verbunden, was dem ökologischen und ökonomischen Nutzen des Recyclings schmälert. In Deutschland fehlt zudem eine flächendeckende Infrastruktur zur Erfassung und Aufbereitung von gipshaltigen Abfällen.⁸⁷

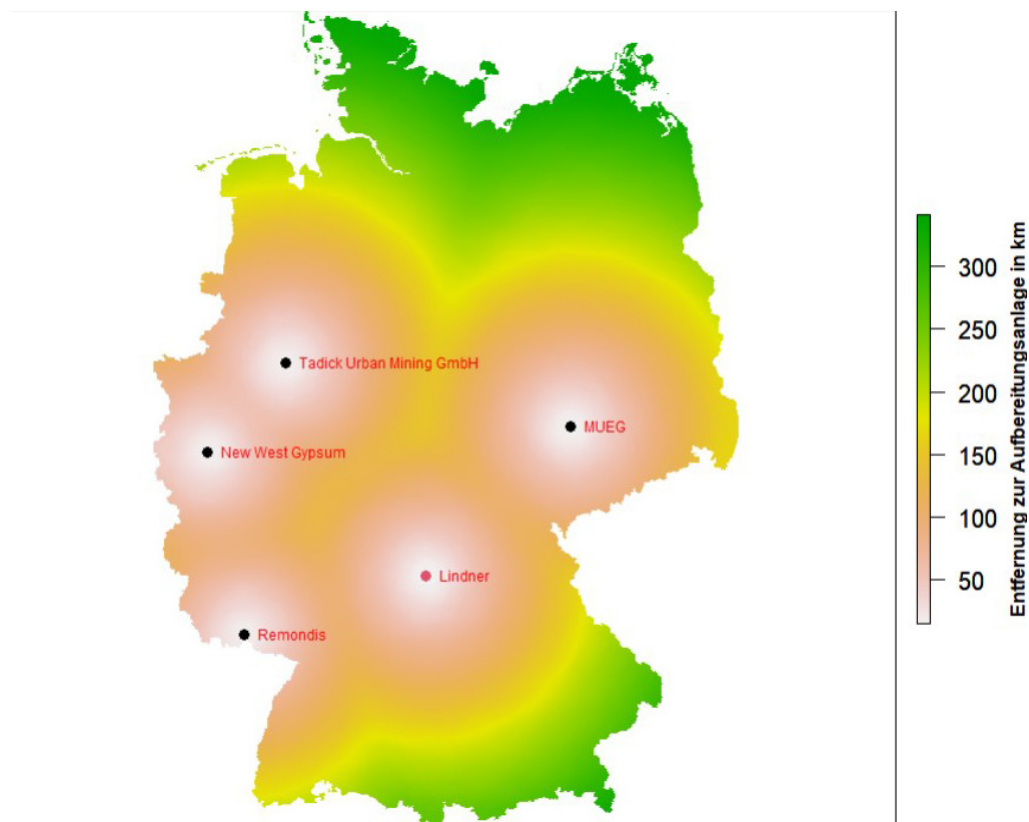
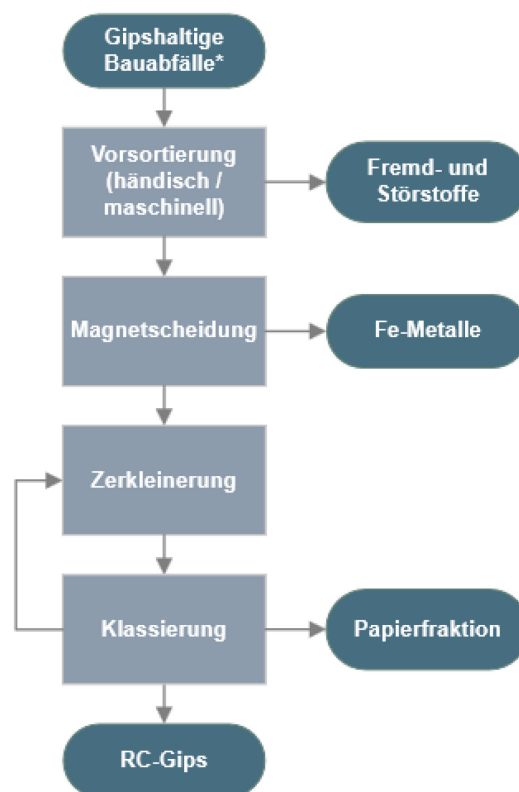


Abbildung 9: Standorte von Aufbereitungsanlagen für gipshaltige Abfälle in Deutschland - Stand 2024 (eigene Darstellung)

⁸⁶ [Buchert et al., 2017], S. 47.

⁸⁷ [Bastian et al., 2023], S. 14.

In den Aufbereitungsanlagen mit konventionellen Aufbereitungsverfahren werden möglichst sortenreine⁸⁸ Gipsplatten oder Gipsformen angenommen. Diese können neben ASN 17 08 02 auch gipshaltige Abfälle aus weiteren ASN umfassen (vgl. Anhang B, Tabelle B 1). Der Aufbereitungsprozess erfolgt über die mechanischen Verfahrensschritte: Zerkleinern, Sortieren und Klassieren (Abbildung 10). Neben der Entfernung von Fremd- und Störstoffen besteht das Hauptziel darin, den Gipskern freizulegen und die Kartonummantelung der GKP abzutrennen. Nach der Vorsortierung zur Entfernung grober Störstoffe, wie beispielsweise Metallteile oder Bauschutt, erfolgt die Abtrennung von Fe-Metallen mithilfe eines Magnetscheiders. Anschließend erfolgt in einer mehrstufigen Zerkleinerung die Abtrennung der Papierfraktion und die Einstellung der Zielkorngroße (Herstellerspezifisch z. B. 0-2 mm und 2-8 mm)⁸⁹ des Recycling-Gipses (RC-Gips). Die Trennung der Papierfraktion vom RC-Gips ist aufgrund von TOC-Obergrenzen für RC-Gipse (vgl. Tabelle 5) von besonderer Bedeutung.



*Eine Liste potenzieller gipshaltiger Bauabfälle ist im Anhang B (vgl. Tabelle B 1) hinterlegt.

Abbildung 10: Beispielhaftes Schema eines Aufbereitungsprozesses für gipshaltige Abfälle (eigene Darstellung nach⁹⁰)

⁸⁸ Störstoffanteil max. 3 %: Annahmekriterien New West Gypsum – Pulheim.

⁸⁹ [Bunzel & Farago, 2023], S. 70.

⁹⁰ [Buchert; et al., 2017], S. 48.

Die abgetrennte Papierfraktion ist mit Gipsstaub kontaminiert, was ihre stoffliche Verwertung erheblich beeinträchtigt.⁹¹ Infolgedessen wird diese Fraktion überwiegend als Ersatzbrennstoff energetisch verwertet.^{92,93} Diese Verwertungsrouten sind jedoch mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Bei der Verbrennung wird der Schwefel aus dem Gipsstaub zu Schwefeldioxid (SO_2) oxidiert, was zu erhöhten Luftschadstoff-Emissionen führt. Zudem begünstigen Sulfat- und Chloridkondensationen aus den Rauchgasen Hochtemperatur-Korrosionsprozesse bei SiC-Feuerfest-Auskleidungen der Kesselwände.⁹⁴

Darüber hinaus sind GFP und imprägnierte GKP für die konventionellen Aufbereitungsverfahren und Nutzungsmöglichkeiten des RC-Gipses problematisch.⁹⁵ GFP weisen einen erhöhten Faseranteil auf, der zu einer Anreicherung von Fasern im RC-Gips und zu einer Überschreitung des TOC-Grenzwertes führt.⁹⁶ Eine Aufbereitung von GFP ist in den vorhandenen Anlagen grundsätzlich möglich, allerdings fehlt es noch an Abnehmern aus der GFP-Produktion. Deshalb werden GFP nicht oder nur nach vorheriger Absprache gesondert angenommen. In einem Forschungsprojekt mit Beteiligung der Fa. MUEG wird die Möglichkeit der Abtrennung von Papierfasern aus Gips untersucht.⁹⁷

Imprägnierte GKP enthalten Siloxane, welche die Wirksamkeit des in GKP eingesetzten Schaummittels beeinträchtigen. Daher kann die Verwertung in Abhängigkeit der jeweiligen Anforderungen bei der Weiterverwendung der Gipsgranulate eingeschränkt sein. Für den Einsatz als Sekundärrohstoff in GKP sind imprägnierte GKP nicht oder nur in sehr geringen Anteilen (max. 5 % im RC-Gips) geeignet.⁹⁸

RC-Gips wird unter anderem in der Zementindustrie als Sulfatträger oder in der Gipsindustrie in Gipsestrich⁹⁹, Gipsputz oder GKP als Sekundärrohstoff eingesetzt.¹⁰⁰ Die technische Grenze für den maximalen zumischbaren Anteil von RC-Gips in GKP beträgt derzeit 30%.¹⁰¹

⁹¹ [Bunzel J. & Wilczek M., 2016], S. 496.

⁹² [Henning, 2025], S. 66.

⁹³ [Buchert et al., 2017], S. 48.

⁹⁴ [Hohmann et al., 2017], S. 172.

⁹⁵ [Buchert et al., 2017], S. 50.

⁹⁶ [Buchert et al., 2017], S. 50.

⁹⁷ <https://www.remin-kreislaufwirtschaft.de/projekte/gipsrec20>

⁹⁸ [Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2018], S. 2.

⁹⁹ [Bunzel J., 2020].

¹⁰⁰ [Buchert et al., 2017], S. 13.

¹⁰¹ [Buchert et al., 2017], S. 13.

2.5.2. Sonstige Verwertung von gipshaltigen Bauabfällen

Als sonstige Verwertung von gipshaltigen Abfällen werden in der Regel Verfüllmaßnahmen in Bergwerken (z. B. im Raum Trier¹⁰²) oder Uranschlammteichen in Tschechien verstanden. Der Einsatz von gipshaltigen Abfällen zur Rekultivierung von Kalihalden ist seit 2010 untersagt.¹⁰³

In den vergangenen Jahren wurden schätzungsweise 100.000 Mg/a¹⁰⁴ recyclingfähiger GKP zur Sanierung von Uranschlammteichen in Tschechien (Mydlovary) eingesetzt. Mit dieser Entsorgungsrouten gingen jährlich große Mengen recyclingfähiger Materialien für eine Kreislaufführung verloren, ein Sachverhalt, der der europäischen Abfallhierarchie widerspricht, welche Recycling der sonstigen Verwertung vorzieht. Zudem wurde die physikalisch-technische Eignung in Frage gestellt und vor einer möglichen Umweltgefährdung durch die Bildung von Schwefelwasserstoff, bei Kontakt mit dort ebenfalls abgelagerten biologisch abbaubaren Abfällen, gewarnt.¹⁰⁵

In Tschechien wurde mit Inkrafttreten der Vyhláška č. 273/2021 Sb.¹⁰⁶ (Verordnung Nr. 273/2021 Slg.) am 7. August 2021 die Verwendung von „odpad na bázi sádry“ (Abfällen auf Gipsbasis) zur Verfüllung explizit verboten. Insbesondere § 12 Abs. 1 lit. d und Abs. 3 lit. a¹⁰⁷ untersagen deren Deponierung auf inerten Deponien (S-IO) sowie auf Deponien der Untergruppe S-OO3 für andere nicht-hazardöse Abfälle, eine Kategorie, unter die auch der Uranschlammteich in Mydlovary fällt. Obwohl das tschechische Umweltministerium das Bundesumweltministerium (BMUV) im Sommer 2023 über die geänderte Gesetzeslage informierte, berichten Investigativmedien, dass die Verbringung gipshaltiger Bauabfälle aus Deutschland in tschechischen Verfüllmaßnahmen weiterhin praktiziert wird.¹⁰⁸

Ein strukturelles Hindernis für die Kontrolle dieser Entsorgungsrouten ist die Einstufung gipshaltiger Abfälle auf der „Grünen Liste“ (vgl. Kapitel 2.1). Mit dieser Klassifizierung ist eine Notifizierung von Transporten nicht notwendig und ermöglicht Verbringungen ohne erweiterte Kontrollen. Da gipshaltige Abfälle zudem keinen eigenen Zollcode besitzen, liegen keine zuverlässigen Daten aus der Außenhandelsstatistik vor, weshalb das Ausmaß dieser Entsorgungsrouten nicht exakt beziffert werden kann.¹⁰⁹

¹⁰² [Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz, 2022], S. 156.

¹⁰³ [Bookhagen et al., 2023], S. 9.

¹⁰⁴ [Buchert et al., 2017], S. 13.

¹⁰⁵ [Buchert et al., 2017], S. 94.

¹⁰⁶ [Ministerstvo životního prostředí, 2021].

¹⁰⁷ [Ministerstvo životního prostředí, 2021].

¹⁰⁸ [Münstermann, M., 2025].

¹⁰⁹ [Bundesregierung, 2019], S. 5.

2.5.3. Beseitigung von gipshaltigen Bauabfällen

Die Beseitigung von gipshaltigen Abfällen ist gemäß der Abfallhierarchie des KrWG die letzte Stufe im Umgang mit Abfällen. Gipshaltige Plattenprodukte ohne Mineralfaserdämmstoffe sowie nass aufgetragene Baugipse und Estriche können abhängig vom Schadstoffgehalt auf Deponien der Klasse I und II beseitigt werden.¹¹⁰ Die Ablagerung von gipshaltigen Abfällen kann zu Korrosion und Schädigung von Betonbauteilen auf Deponien führen (vgl. Kapitel 2.1). Zudem besteht die Gefahr der Bildung von geruchsintensivem und toxischem Schwefelwasserstoff bei Kontakt zu biologisch abbaubaren Abfällen unter anaeroben Bedingungen.¹¹¹ Dennoch wird die Deponierung von gipshaltigen Abfällen als Entsorgungsweg in vielen Regionen aufgrund der niedrigen Deponiepreise bevorzugt.¹¹²

Gipshaltige Abfälle sind gemäß § 14 Absatz 2 Satz 3 DepV¹¹³ aus funktionalen und bautechnischen Gründen als Deponieersatzbaustoff nicht geeignet und daher nicht zugelassen.¹¹⁴

2.5.4. Qualitätskriterien für RC-Gips in Deutschland

Die deutsche Gipsindustrie orientiert sich bei der Verwendung von Recyclinggips (RC-Gips) an den Qualitätskriterien hinsichtlich technischer, gesundheitlicher und umweltbezogener Parameter an den Vorgaben des Bundesverbandes Gips e. V.¹¹⁵ (Tabelle 5). Die Eurogypsum-Kriterien¹¹⁶ sind bewusst breiter gefasst, um europaweit eine Mindestqualität zu gewährleisten. Es sei erwähnt, dass die vorgegebenen technischen Parameter vom Bundesverband und Eurogypsum als Richt- und Zielwerte zu verstehen sind, die keiner gesetzlichen Regelung entsprechen, sondern als Branchenempfehlungen dienen.

Tabelle 5: Qualitätsanforderungen an Recyclinggips (Technische Parameter)^{117, 118}

Parameter	Einheit	Zielwert Deutschland	Zielwert Eurogypsum
Korngröße	[mm]	≤ 1	≤ 50
Feuchte	[M.-%]	≤ 5 (≤ 10)*	≤ 10
CaSO ₄ • H ₂ O	[M.-%]	≥ 85 (≥ 80)*	≥ 80
Organischer Kohlenstoff TOC	[M.-%]	≤ 1 (≤ 1,5)*	≤ 2
Sichtbare Verunreinigungen	-	Ausschluss	keine
Geruch	-	neutral	neutral
Magnesiumsalze wasserlöslich als MgO	[M.-%]	≤ 0,02 (≤ 0,1)*	< 0,1

¹¹⁰ [Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2018], S. 3.

¹¹¹ [Schlöghofer, 2008], S. 21.

¹¹² [Länderoffenen Arbeitsgruppe Ressourceneffizienz, 2022], S. 13.

¹¹³ [Bundesregierung (D), 2009].

¹¹⁴ [Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 2018].

¹¹⁵ [Kersten, 2020], S. 6f.

¹¹⁶ [EUROGYPSUM, 2024].

¹¹⁷ [Kersten, 2020], S. 6f.

¹¹⁸ [EUROGYPSUM, 2024].

Parameter	Einheit	Zielwert Deutschland	Zielwert Eurogypsum
Natriumsalze wasserlösliche als Na ₂ O	[M.-%]	≤ 0,02 (≤ 0,04)*	< 0,04
Kaliumsalze wasserlöslich als K ₂ O	[M.-%]	≤ 0,02 (≤ 0,06)*	< 0,06
Chlorid	[M.-%]	≤ 0,02 (≤ 0,02)*	< 0,01
pH-Wert	-	5 bis 9	5 bis 9

* werkspezifische Abweichungen

Neben diesen technischen Parametern ist die Einhaltung gesundheitlicher und umweltrelevanter Anforderungen zentral. Die novellierte LAGA M 23¹¹⁹ schafft einen bundesweiten Rahmen für den Asbestnachweis. Gebäude deren Errichtung vor dem Stichtag 31.10.1993 liegen, unterliegen einer Pflicht-Erkundung nach VDI 6202 Bl. 3¹²⁰ mit Probenahme nach VDI 3866 Bl. 5¹²¹ (Einzelproben) bzw. VDI 3876¹²² (Haufwerke). Angefallene Abfälle, die bei einer baulichen Maßnahme an einem Gebäude anfallen, dessen Errichtung nach dem genannten Stichtag liegt, gelten als Asbestfrei.¹²³

Diese Regelungen untermauern die Empfehlungen des Bundesverbands der Deutschen Gipsindustrie, der die Verwendung von Gipskartonplattenabfällen ausschließlich aus Gebäuden nach 1995 (mindestens nach 31.10.1993 bei nachweisbarer CE-Kennzeichnung/EN-Aufdruck) fordert.¹²⁴ Zusätzlich wird eine werkseigene Produktionskontrolle mit regelmäßigen Analysen und erhöhter Prüffrequenz (chargenweise alle 1.000 Mg, sonst vierteljährlich) gefordert.¹²⁵

Tabelle 6: Parameter für Gesundheit, Sicherheit und Umwelt nach Eurogypsum¹²⁶

HSE-Parameter	Qualitätskriterien	Verwendete Methode
Spurenelemente	schadlos	Gemäß den nationalen gesetzlichen Anforderungen oder durch interne Bewertung
Radioaktivitätsindex I	< 0,5	Richtlinie 2013/59/Euratom
Asbest	nationale Vorgaben	ISO Methode (ISO 22262-2 (2014)) und/oder geeignete nationale Methode erforderlich
Schwefel (elementar)	geruchlos/neutral	VGB, Teil 1, 8.9 ¹²⁷
Künstliche Mineralfasern	0.1 Gew.-%	ISO-Methode (ISO 22262-2 (2014)) und/oder geeignete nationale Methode erforderlich

Ergänzend zu den genannten Qualitätsanforderungen ist hervorzuheben, dass für die Begrenzung potenziell gefährlicher Spurenelemente in Recyclinggips in Deutschland keine bundeseinheitlich gesetzlich festgelegten Grenzwerte existieren. Für GFP gibt es in der

¹¹⁹ [LAGA, 2023].

¹²⁰ [VDI-Richtlinie 6202 Bl. 3, 2021].

¹²¹ [VDI-Richtlinie 3866 Bl. 5, 2017].

¹²² [VDI-Richtlinie 3876, 2018].

¹²³ [LAGA, 2023].

¹²⁴ In diesem Fall nur sofern ein CE-Zeichen und / oder EN- Aufdruck auf der Platte nachweisbar ist.

¹²⁵ Erhöhte Prüffrequenz des RC-Gipses: Chargenweise alle 1.000 Mg, sonst 4 mal jährlich.

¹²⁶ [EUROGYPSUM, 2024].

¹²⁷ [VGB PowerTech, 2008].

REACH-Verordnung keine explizit produktspezifischen Grenzwerte für sämtliche Spurenelemente. Allerdings gelten die allgemeinen Beschränkungen und Grenzwerte für bestimmte gefährliche Stoffe, die in Anhang XVII der REACH-Verordnung¹²⁸ gelistet sind.

Die Einhaltung der Unbedenklichkeit wird im Rahmen der Produktzulassung und Genehmigung im Einzelfall geprüft und orientiert sich an branchenspezifischen Empfehlungen oder an Werten aus anderen europäischen Regelwerken, wie etwa der österreichischen Recyclinggips-Verordnung¹²⁹ oder der Empfehlung des Bundesverbandes für Gips e. V.¹³⁰. Somit dienen die in Tabelle 6 aufgeführten Kriterien für Gesundheit, Sicherheit und Umwelt nach Eurogypsum sowie die Richtwerte des Bundesverbandes als praxisnahe Orientierung, sind aber rechtlich nicht verbindlich und beinhalten zusätzliche Sicherheiten. Eine Überschreitung dieser Zielwerte ist daher nicht automatisch mit einer Gesundheitsgefährdung gleichzusetzen, sondern erfordert im Einzelfall eine nachgeschaltete Bewertung.

2.6. Prognose der Rücklaufmenge von GKP und GFP bis 2050

Die Herstellung von Gipsplatten erfordert in Deutschland die größte Menge Gips. Im Jahr 2023 wurden laut statistischem Bundesamt etwa 234 Mio. m² (~ 2 Mio. Mg¹³¹) GKP und 31 Mio. m² (~ 0,5 Mio. Mg¹³²) GFP hergestellt.¹³³ Für die Kreislaufführung ist entscheidend, zu welchem Zeitpunkt und in welchem Umfang diese Produkte das Ende ihrer Lebensdauer erreichen und als potenzielle Sekundärrohstoffe anfallen.

Die direkte Bestimmung der Verweilzeit von Stoffen im Baubereich ist aufgrund der langen Zeiträume und fehlender direkter Verknüpfung zwischen Input und Output kaum möglich.¹³⁴ Daher wird die tatsächliche Lebensdauer mithilfe von Modellen abgeleitet, um Abweichungen von der technisch maximal möglichen Lebensdauer, beispielsweise infolge von Gebäudeabriss, Umnutzung oder Sanierung zu berücksichtigen.

In diesem Kapitel wird die potenziell anfallende Menge an GKP und GFP nach Ende der Nutzungsphase bis zum Jahr 2050 mithilfe eines Modells auf Basis der Weibull-Verteilung prognostiziert. Damit soll die potentielle Menge an GKP und GFP bestimmt werden, die bei der Annahme einer Rücklaufquote von 100 % theoretisch für die Kreislaufführung zur Verfügung stehen würde. Verluste durch unzureichende Sammlung, fehlenden selektiven Rückbau, mangelnde Getrennthaltung oder logistische Einschränkungen bleiben

¹²⁸ [Amtsblatt der Europäischen Union, 2006]. 396 REACH-Verordnung.

¹²⁹ [Bundeskanzleramt Republik Österreich, 2024].

¹³⁰ [Kersten, 2020].

¹³¹ Unter der Annahme eines Flächengewichtes von 8,5 kg/m² nach [Buchert; et al., 2017], S. 37.

¹³² Unter der Annahme eines Flächengewichtes von 16,375 kg/m² basierend auf dem Mittelwert aus GFP mit Plattendicke 10,5, 12,5, 15, 18 mm nach [James Hardie Europe GmbH, 2016].

¹³³ [destatis, 1997 - 2018].

¹³⁴ [Arendt, 2001], S. 98.

unberücksichtigt. Die Berechnung der Rücklaufmengen für GKP und GFP basiert auf deren Inlandsverbrauch in Deutschland im Zeitraum 1995–2050. Die Modellierung startet ab dem Jahr 1995, da ab diesem Zeitpunkt Gipsplatten aus Gebäuden als asbestfrei gelten¹³⁵ und Einschränkungen der Rücklaufquote von GKP und GFP aufgrund von Asbestkontaminationen ausgeschlossen werden können. Zudem besteht für den genannten Zeitraum eine solide Datenbasis. Es gilt weiterhin:

- Bis 2023 liegen belastbare Daten vor. Daher wird für die weitere Prognose ab 2024 der jährliche Verbrauchswert durch den Mittelwert der Jahresverbräuche von 1995 bis 2023 ersetzt.
- Bei GFP wurden für die Jahre 1995 bis 1998 keine Daten erfasst. Daher wird für diese Jahre der Verbrauch des Jahres 1999 angenommen.

Die Annahmen ermöglichen eine Prognose trotz lückenhafter oder historisch begrenzter Daten. Eine Auflistung der Daten ist dem Anhang A (vgl. Tabelle A 1) zu entnehmen. Der Inlandverbrauch setzt sich aus der Produktionsmenge^{136,137} und dem Außenhandelsaldo, abzüglich des jährlichen Verschnittes¹³⁸ von 5 M.-%¹³⁹ zusammen. Für die Kennzahlen der Importe und Exporte werden Daten von Eurostat¹⁴⁰ für die Gütekatégorie-Nummer 23621050¹⁴¹ zugrunde gelegt.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit von GKP und GFP wird mithilfe der Weibull-Verteilung modelliert, die sich besonders zur Beschreibung der Lebensdauer und Ausfallhäufigkeit von technischen Systemen eignet. Sie stellt eine rechtsschiefe Verteilung dar, die die theoretische Annahme unterstützt, dass Gebäude eine anfängliche zerstörungsfreie Phase durchlaufen, gefolgt von einem Anstieg der Ausfallrate, die im weiteren zeitlichen Verlauf langsam abnimmt.¹⁴² Durch Anpassung des Weibull-Faktors (β) lässt sich die Verteilung an verschiedene Ausfallmuster (Normal-, Rayleigh- oder anderen asymmetrischen Verteilungen) anpassen.¹⁴³ Bei einem Weibull Faktor von 2 entspricht die Weibull-Verteilung der Rayleigh-Verteilung. Unter der Annahme eines Weibull-Faktors von 2 und einer mittleren Lebensdauer von 25 Jahren für Bauteile sind nach 15 Jahren bereits 25 % der Bauteile aufgefallen, während nach

¹³⁵ Die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Verwendung von Asbest und asbesthaltigen Produkten ist seit dem 31. Oktober 1993 in Deutschland verboten. [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2020].

¹³⁶ [destatis, 1997 - 2018].

¹³⁷ Zur Umrechnung wurden Flächengewichte von 8,5 kg/m² (GKP) sowie von 16,375 kg/m²¹³⁷ (GFP) angenommen. [Buchert; et al., 2017], S. 37, [James Hardie Europe GmbH, 2016].

¹³⁸ Anteil der Verschnittreste bezieht sich auf GKP und GFP

¹³⁹ [Buchert; et al., 2017], S. 37.

¹⁴⁰ [Eurostat, 2024].

¹⁴¹ Platten, Tafeln, Dielen, Fliesen und ähnliche Waren aus Gips oder aus Mischungen auf der Grundlage von Gips die mit Papier oder Pappe überzogen oder verstärkt sind.

¹⁴² [Miatto et al., 2017], S. 147.

¹⁴³ [Buchert; et al., 2017], S. 37.

40 Jahren etwa 14 % der Bauteile in Nutzung sind. (vgl. Anhang A, Abbildung A 1) Diese Angaben stellen eine beispielhafte Bewertung der Ausfallrate dar und verdeutlichen, wie sich die Lebensdauer und die Ausfallwahrscheinlichkeit von Bauteilen im Zeitverlauf entwickeln können.

In der Literatur wird die technische Lebensdauer von Gipswandplatten und Doppelböden mit 50 Jahren¹⁴⁴ angegeben. Um die Varianz der Nutzungsdauern aufgrund von konjunkturellen Schwankungen im Baubereich, einer Flexibilisierung der Lebensgewohnheiten oder kürzeren Sanierungszyklen von Wohn- und Nichtwohngebäuden abzubilden, wurden drei Szenarien mit unterschiedlichen mittleren Lebensdauern modelliert.

In Szenario 1 wurde in Anlehnung an Buchert¹⁴⁵ eine mittlere Lebensdauer von 25 Jahren angenommen. Diese Annahme unterstellt kürzere Sanierungszyklen durch sich ändernde Nutzungsanforderungen, häufige Mieterwechsel in Bürogebäuden (Mietvertragslaufzeiten von 5 – 10 Jahren¹⁴⁶) und ein damit verbundener vorzeitiger Austausch von Gipsplatten vor Ende ihrer technischen Lebensdauer.¹⁴⁷ Szenario 2 folgt mit einer mittleren Lebensdauer von 40 Jahren der Annahme von Arendt¹⁴⁸, während in Szenario 3 die technische Lebensdauer nach BBSR-Tabellen¹⁴⁹ angenommen wurde. Für alle Szenarien wurde nach Arendt¹⁵⁰ ein Weibull-Faktor von 2 angenommen, um die Unsicherheiten in der Schätzung des zukünftigen Plattenaufkommens auszudrücken. Eine Übersicht der betrachteten Szenarien sowie wichtige Parameter sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Dichtefunktionen sowie die Verteilungsfunktionen der Weibull-Verteilung sind für jedes Szenario im Anhang A dargestellt.

Tabelle 7: Annahmen für die Ableitung des potenziellen Rücklaufs von GKP und GFP in Deutschland.

	Einheit	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Mittlere Lebensdauer	[Jahre]	25	40	50
Weibullfaktor	[-]	2	2	2
Anteil Verschnitt am Inlandsverbrauch	[M.-%]	5	5	5
Rücklaufquote	[M.-%]	100	100	100
Grundannahmen nach	[-]	Buchert ¹⁵¹	Arendt ¹⁵²	BBSR-Tabellen ¹⁵³

¹⁴⁴ Angaben der Nutzungsdauern zur Berechnung von Lebenszykluskosten und Ökobilanzen von Gebäuden im Rahmen des BNB-Systems bei Bundesbauprojekten [BNB, 2017].

¹⁴⁵ [Buchert; et al., 2017].

¹⁴⁶ [Colliers International, 2024].

¹⁴⁷ [Klöpfer, 2024], S. 37.

¹⁴⁸ [Arendt, 2001], S. 143.

¹⁴⁹ [BNB, 2017].

¹⁵⁰ [Arendt, 2001], S. 143.

¹⁵¹ [Buchert; et al., 2017].

¹⁵² [Arendt, 2001], S. 143.

¹⁵³ [BNB, 2017].

Die Berechnung der jährlichen Rücklaufmenge erfolgt gemäß Formel (1) auf Basis der im Anhang A beschriebenen Weibull-Verteilung, des Inlandverbrauchs sowie der jährlich anfallenden Verschnittmenge. Zusätzlich wird der berechnete Inlandverbrauch von GKP und GFP dargestellt.

$$m_{Abfall,t} = \left(\sum_{x=1}^{100} f(x | \beta, \eta) \times m_{Verbrauch,(t-x)} \right) + m_{Verschnitt,t} \quad (1)$$

$m_{Abfall,t}$:	Abfallaufkommen von GKP und GFP im Jahr t [Mg]
$f(x \beta, \eta)$:	Dichtefunktion der Weibull-Verteilung [-]
β :	Formparameter (Weibull-Faktor) [-]
η :	Skalenparameter (charakteristische Lebensdauer) [a]
x :	Lebensdauer bzw. Zeit seit Einbau der GKP und GFP [a]
$m_{Verbrauch}$:	Inlandverbrauch GKP und GFP [Mg]
$m_{Verschnitt,t}$:	Verschnittmenge im Jahr t [Mg]

Für die Berechnung der Formel wurde der Skalenparameter (η) auf Grundlage der mittleren Lebensdauer (μ) ermittelt. Die Umrechnung zwischen beiden Größen erfolgt mit Hilfe der Gammafunktion und ist im Anhang A detailliert beschrieben. Die Rücklaufquote wird mit 100 % angenommen, um das theoretische maximale Rücklaufpotential von GKP und GFP zu bestimmen. In Abbildung 11 wird die Entwicklung des Inlandverbrauchs sowie der prognostizierten Rücklaufmengen (Abfallaufkommen) von GKP und GFP in Deutschland bis zum Jahr 2050 für eine mittlere Lebensdauer der GKP und GFP von 25, 40 und 50 Jahren dargestellt. Die Rücklaufmengen steigen in allen betrachteten Szenarien kontinuierlich an. Es zeigt sich deutlich, dass die Höhe der jährlichen Rücklaufmenge maßgeblich von der angenommenen Lebensdauer der Produkte abhängt.

- **Szenario 1 – kurze Sanierungszyklen ($\mu = 25$ Jahre):**

Das Rücklaufaufkommen wächst am schnellsten und erreicht bereits 2040 ein Niveau, das nahe an der jährlichen Produktionsmenge liegt. Im Jahr 2020 beträgt die Rücklaufmenge etwa 1,3 Mio. Mg, im Jahr 2030 etwa 1,8 Mio. Mg.

- **Szenario 2 und Szenario 3 – lange Sanierungszyklen ($\mu = 40$ bzw. 50 Jahre):**

Hier steigt die Rücklaufmengen deutlich langsamer. 2020 liegt die potenzielle Rücklaufmenge von GKP und GFP bei etwa 0,7 Mio. Mg (40 Jahre) bzw. 0,5 Mio. Mg (50 Jahre). Die Rücklaufmenge erreicht 2030 ca. 1,1 Mio. Mg bzw. 0,8 Mio. Mg und bleibt bis 2050 spürbar unterhalb des Verbrauchsniveaus, insbesondere im Szenario mit einer mittleren Lebensdauer von 50 Jahren.

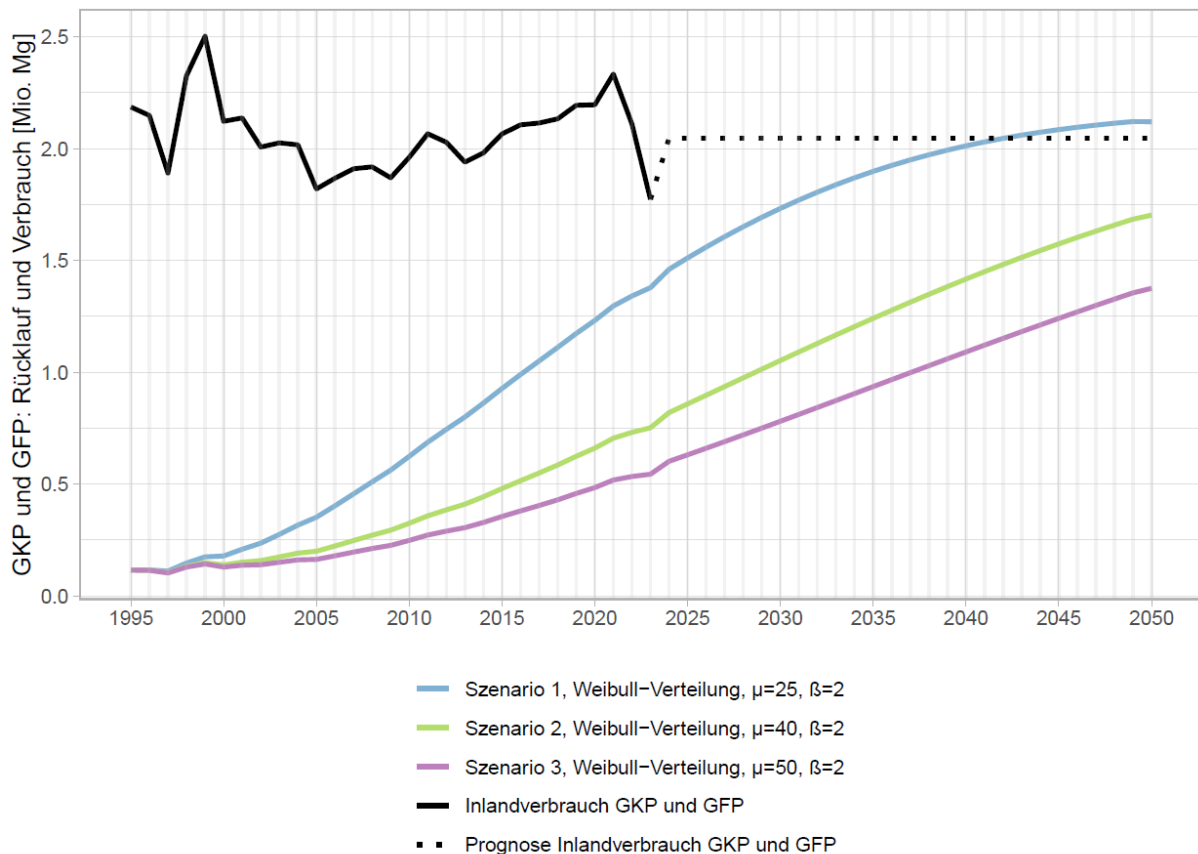


Abbildung 11: Prognostizierte, potenzielle Rücklaufmenge von GKP und GFP bis 2050 in drei Szenarien auf Basis des Inlandverbrauchs von GKP und GFP seit 1995 mit T = durchschnittliche Lebensdauer und β = Weibull-Faktor (eigene Darstellung)

Mit dem vollständigen Wegfall von REA-Gips ab 2030 wird die Nutzung von Sekundärgips aus dem Gebäudebestand immer wichtiger. Die Rücklaufmengen könnten 2030, je nach Szenario, einen erheblichen Anteil am prognostizierten Inlandverbrauch decken (Tabelle 8)

Tabelle 8: Rücklaufmengen von GKP und GFP und deren Anteil am Inlandverbrauch im Jahr 2030 für verschiedene Szenarien

	Rücklaufmenge [Mio. Mg]	Inlandverbrauch [Mio. Mg]	Anteil Rücklaufmenge am Inlandverbrauch [%]
Szenario 1 (25 J.)	1,8	2,1	86 %
Szenario 2 (40 J.)	1,1	2,1	52 %
Szenario 3 (50 J.)	0,8	2,1	39 %

Das dargestellte Potenzial der Rücklaufmengen kann jedoch nur bei einer Rücklauf- und Recyclingquote von 100 % ausgeschöpft werden. In der Praxis ist dies kaum realistisch, da Verluste durch nicht erfasste Rückbaumengen, Verunreinigungen oder ineffiziente Sammel- und Recyclingprozesse auftreten. Entscheidend ist, dass GKP und GFP am Ende Ihres Lebenszyklus sortenrein und selektiv zurückgebaut werden, andernfalls bleibt ein erheblicher Teil des Sekundärrohstoffpotenzials ungenutzt.

2.7. Zwischenfazit zur Kreislaufführung von gipshaltigen Bauabfällen

Die Kreislaufführung von gipshaltigen Bauabfällen steht in Deutschland vor erheblichen Herausforderungen. Obwohl die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen auf europäischer und nationaler Ebene die Kreislaufwirtschaft und das Recycling von Baustoffen fördern sollten, bleibt die tatsächlich in den Kreislauf zurückgeführte Menge gipshaltiger Bauabfälle bislang deutlich hinter dem bestehenden Kreislaufpotential zurück. Während die modellierten Rücklaufmengen von Gipskarton- und Gipsfaserplatten je nach Lebensdauerszenario zwischen 0,5 und 1,3 Mio. Mg pro Jahr (vgl. Kapitel 2.6) liegen könnten, werden aktuell insgesamt rund 740.000 Mg gipshaltige Bauabfälle erfasst, wovon rund 370.000 Mg als recyclingfähige Gipsplatten gelten.¹⁵⁴ Davon wird wiederum nur ein Bruchteil (95.000 Mg) tatsächlich recycelt. Die Differenz zwischen den modellierten und dem tatsächlich erfassten recyclingfähigen Aufkommen gipshaltiger Bauabfälle deutet darauf hin, dass in der Praxis große Mengen gipshaltiger Bauabfälle der Kreislaufführung entzogen werden. Ursachen dafür sind u. a.:

- Unzureichende Recyclinginfrastruktur und regionale Unterschiede beim Zugang zu Aufbereitungsanlagen
- Fehlende sortenreine Erfassung
- Vermischung mit anderen mineralischen Bauabfällen
- Export und sonstige Verwertungsmaßnahmen, die dem Recycling entgegenstehen
- Fehlende praxistaugliche Recyclingprozesse, insbesondere für imprägnierte Gipskartonplatten, Gipsfaserplatten und Papierfraktionen.

Das ungenutzte Kreislaufpotenzial ist erheblich, insbesondere, da bislang viele Abfallfraktionen wie imprägnierte GKP, GFP oder die Papierfraktion aus GKP technisch nicht oder nur eingeschränkt recycelt werden. Neue Verfahren, wie die Verwertung in der GFP-Produktion, könnten die rezyklierte Menge deutlich erhöhen. Im nächsten Kapitel werden daher die Grundlagen zur Verwertung gipshaltiger Bauabfälle in der Gipsfaserplattenproduktion vorgestellt. Dieses Verfahren eröffnet die Möglichkeit, bislang nicht recycelte Fraktionen gipshaltiger Bauabfälle in den Stoffkreislauf zurückzuführen und damit das Kreislaufpotenzial von Gipsprodukten zu steigern.

¹⁵⁴ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2020].

3. Grundlagen Einsatz gipshaltiger Bauabfälle in der GFP-Produktion

Im vorliegenden Kapitel werden die technischen, chemischen und physikalischen Grundlagen der Verwertung von gipshaltigen Abfällen zur Herstellung neuer GFP beschrieben.

3.1. Physikalisch-chemische Grundlagen von Calciumsulfat und seinen Phasen

Die Bedeutung des Gipses als industriell gut verwertbares Produkt beruht auf seiner Eigenschaft zur leichten Entwässerung (Dehydratation). Dabei wird das an das CaSO_4 gebundene Wasser teilweise oder vollständig ausgetrieben (Gleichung 1, Abbildung 12). Abhängig von der ausgetriebenen Wassermenge entsteht Calciumsulfat**halbhydrat** ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) oder Anhydrit, welche das Ausgangsmaterial für Gipsprodukte darstellen. Durch Zugabe von Wasser erlangt der hydratisierte Gips unter Bildung eines kristallinen Gefüges seine Festigkeit (Gleichung 2; Abbildung 12). Dieser Prozess, auch Gipskreislauf genannt, ist theoretisch unendlich oft durchführbar. Aus diesem Grund eignen sich Gipsbauteile in besonderem Maße für eine geschlossene Kreislaufführung. Dabei ist Calciumsulfatdihydrat Ausgangs- und Endprodukt dieses Kreislaufes.

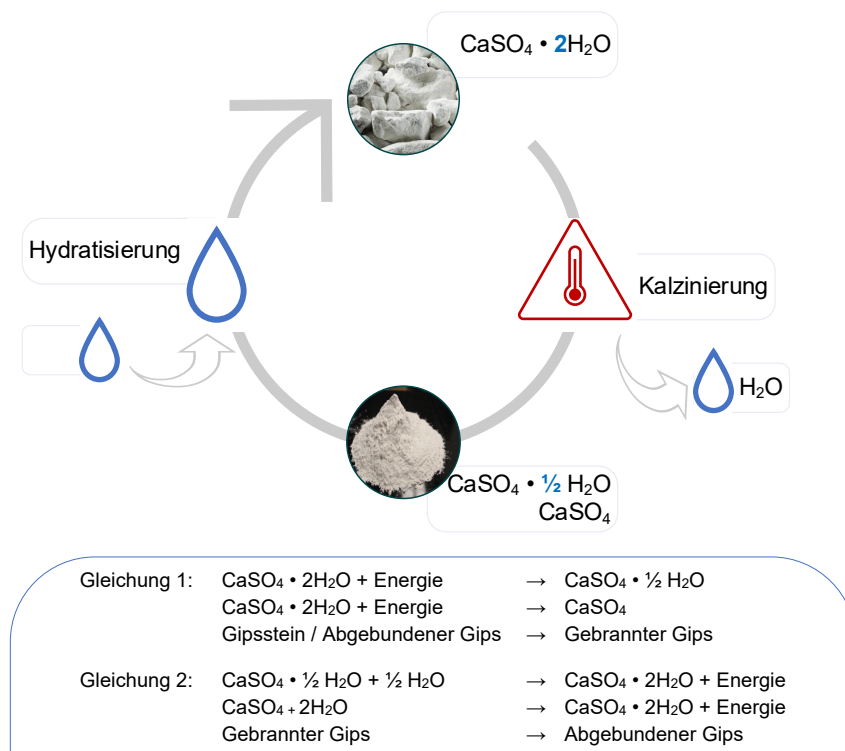


Abbildung 12: Gipskreislauf (eigene Darstellung nach¹⁵⁵)

¹⁵⁵ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2020].

In Tabelle 9 sind die Phasen des $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -Systems mit ausgewählten Eigenschaften aufgeführt. Neben Calciumsulfat-Dihydrat (Gips), Halbhhydrat (Bassanit), löslichem Anhydrit (AIII), Anhydrit (AII), gibt es als fünfte Phase noch Anhydrit I, diese jedoch erst bei Temperaturen oberhalb von ca. 1.180 °C auftritt und im weiteren Verlauf nicht betrachtet wird. Die Phasenumwandlungen verlaufen mit steigender Temperatur in der Reihenfolge: Dihydrat - Halbhhydrat - Anhydrit III - Anhydrit II – Anhydrit I. Halbhhydrat und löslicher Anhydrit (Anhydrit III) treten im wässrigen System metastabil auf.¹⁵⁶

Tabelle 9: Übersicht der Calciumsulfat-Phasen und ihrer Eigenschaften¹⁵⁷

Chemische Formel der Phase	$\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	CaSO_4 , III	CaSO_4 , II
Bezeichnung	Calciumsulfat-dihydrat	Calciumsulfat-halbhhydrat	Anhydrit (A) III	Anhydrit (A) II
Weitere Formen	Naturgips REA-Gips	β - Form → Stuckgips α - Form	α -A III β -A III	A II-s (schwerlöslich) A II-u (unlöslich) A II-E (Estrichgips)
Kristallwasser (M.-%)	20,9	6,2	0	0
Stabilität	< 40 °C	metastabil	metastabil	200 - 1.180 °C
Bildungstemperatur im technischen Prozess		β : 120 - 180 °C trocken α : 80 - 180 °C nass - Autoklaven	β : 290 °C trocken α : 110 °C nass	300 - 900 °C AII-s: 300 - 500 °C AIII-u: 300 – 500°C A II-E: > 700 °C

Für die Kreislaufführung von Gipsprodukten und die Entwicklung von Recyclingprozessen sind die materialtechnischen Eigenschaften der einzelnen Gipsphasen entscheidend, da sie Verarbeitbarkeit, Hydratationskinetik sowie Festigkeitsentwicklung im Produktionsprozess und Endprodukt maßgeblich bestimmen. Daher werden diese Eigenschaften im Folgenden detailliert beschrieben:

- **Calciumsulfatdihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)**

Calciumsulfatdihydrat, in Form von Naturgips oder REA-Gips, stellt einen wichtigen Ausgangsstoff für die Herstellung von Calciumsulfatbindemitteln dar und bildet den Hauptbestandteil von Gipsbauteilen. Der stöchiometrische Kristallwassergehalt beträgt 20,9 %. Gips kristallisiert monoklin-prismatisch, typisch ist dabei eine tafelige bis nadelförmige Kristallmorphologie (Abbildung 13).¹⁵⁸ Gipsdihydratkristalle wachsen im Hydratationsprozess schichtweise, wobei die Wachstumsgeschwindigkeit anisotrop ist, d. h. einige Kristallflächen wachsen schneller als andere. Die schneller wachsenden Bereiche dominieren den Habitus.

¹⁵⁶ [Freyer D., 2000].

¹⁵⁷ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013], S. 17.

¹⁵⁸ [Schneider, 2010], S. 16.

Veränderte Prozessparameter (Temperatur, Druck, Mischintensität) sowie der Einsatz von Additiven wirken auf die Wachstumsgeschwindigkeit einzelner Kristallflächen und können damit die Kristallmorphologie verändern.¹⁵⁹

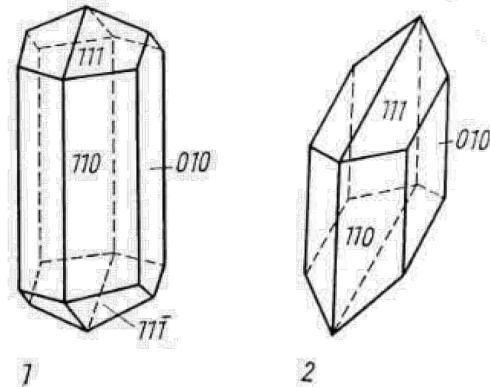
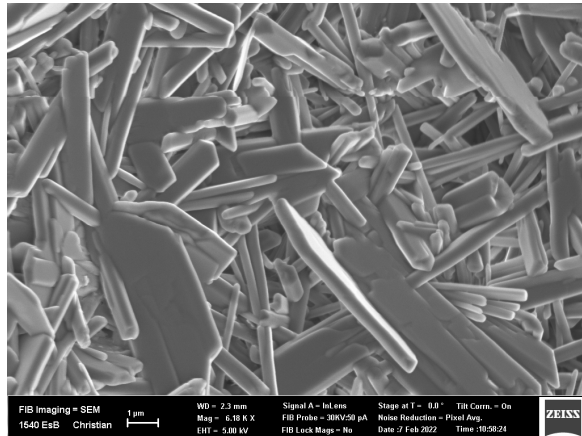


Abbildung 13: Nadelige und tafelige Kristallhabita im SEM (links, eigene Aufnahme) und als Modell mit Wachstumsflächen (rechts)¹⁵⁵

• Calciumsulfat-Halbhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$): α - und β -Formen im Vergleich

Bei Calciumsulfat-Halbhydrat werden zwei Formen unterschieden, die als alpha- und beta-Halbhydrat (α - HH bzw. β - HH) bezeichnet werden. Sie entstehen bei unterschiedlichen Brennbedingungen und unterscheiden sich in ihren physikalischen Eigenschaften, wie Dichte, Löslichkeit, Einstreumenge und spezifische Oberfläche.

Die β - HH-Form wird in trockener Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 120 °C und 180 °C beispielsweise in Drehrohröfen oder Kochern hergestellt. Dabei entweicht das Kristallwasser schlagartig, was die für β - HH kennzeichnende rissige und zerklüfteten Oberflächenstruktur verursacht (Abbildung 14). Dies führt zu einer hohen spezifischen Oberfläche mit kleinen Kristalliten, wobei die Morphologie des Ausgangsmaterials beibehalten wird. Bei β - HH handelt es sich nicht um Einzelkristalle, sondern um Partikel, die aus einer Zusammenballung kryptokristalliner Einzelteilchen bestehen. Im Gegensatz dazu wird α - HH in feuchter Umgebung bei 100 bis 140 °C unter Druck im Autoklav entwässert. Bei der Entstehung kommt es zur nahezu vollständigen Umlösung in große, gut ausgebildete und kompakte Kristalle¹⁶¹ (Abbildung 14). Eine Zerklüftung der Partikeloberfläche wird durch die schonende Entwässerung vermieden.¹⁶²

¹⁵⁹ [Pritzel & Trettin, 2012].

¹⁶⁰ [Arens, 2002].

¹⁶¹ [Nowak S., 2012], S. 8.

¹⁶² [Abdussaljamov, 2003], S. 16.

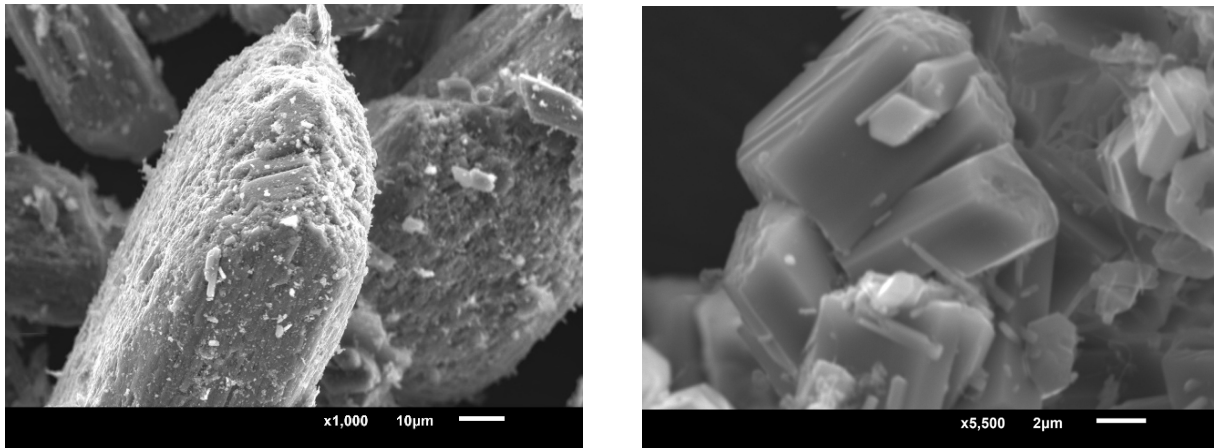


Abbildung 14: Zerklüftete Oberfläche eines β - HH Korns aus REA-Gips (links) und gut ausgebildete α - HH Kristalle / Kristallite aus GKP (rechts) (eigene Aufnahmen)

Darüber hinaus weist α - HH eine höhere Dichte sowie eine geringere Löslichkeit in Wasser auf. Dies ist auf eine deutlich geringere spezifische Oberfläche und eine störungsfreie Gitterstruktur zurückzuführen. Aus der zerklüfteten Oberfläche des β – HH resultiert eine große Kapazität, Feuchtigkeit aufzunehmen, weshalb dieses gegenüber α - HH einen höheren Wasserbedarf und damit eine geringere Einstreumenge aufweist.¹⁶³ Der geringere Wasserbedarf von α - HH führt zu einem geringeren Porenvolumen, das wiederum führt zur Ausbildung von Kristallen mit einem kompakteren Gefüge und höheren Festigkeiten (Tabelle 10).¹⁶⁴ In der Dissertation von Nowak¹⁶⁵ sind weitere wesentliche Unterschiede der α - und β – Form von Calciumsulfathalbhydrat zusammengefasst.

Tabelle 10: Ausgewählte Eigenschaften von α – Halbhydrat aus dem Autoklaven und β - Halbhydrat aus dem Drehofen und Kocher¹⁶⁶

Eigenschaften	Einheit	α - Halbhydrat	β - Halbhydrat
Dichte	[g/cm ³]	2,76	2,62
Löslichkeit in H ₂ O bei 20°C	[gCaSO ₄ /l]	6,7	8,8
Spezifische Oberfläche BET ¹	[m ² /g]	0,8 – 0,9 ¹	9 – 10,5 ¹
Einstreumenge ²	[g/100 g H ₂ O]	263	137 - 156
W/G ³	[100/E]	0,38	0,73 – 0,64
Biegezug	[N/mm ²]	12	5
Druck	[N/mm ²]	40	11-14

¹ Brunauer-Emmett-Teller-Werte beziehen sich auf ein standardisiertes Analyseverfahren zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche (in m²/g) poröser Festkörper durch Gasadsorption.

² Die Einstreumenge gibt die Menge an Bindemittel an, welche beim Einstreuen in 100 g Wasser durchfeuchtet werden kann.

³ Wassergipswert W/G = 100/E, wobei E = Einstreumenge

Die Form β – HH weist weiterhin Eigenschaften auf, die spezifisch für diese Halbhydratform und von Relevanz für dessen Nutzung sind. Eine dieser Eigenschaften ist die

¹⁶³ [Nowak S., 2012], S. 16.

¹⁶⁴ [Förthner, 2011], S. 4.

¹⁶⁵ [Nowak S., 2012], S. 6ff.

¹⁶⁶ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013], S. 21.

„hygromechanische Instabilität“. Dieser Effekt beschreibt den Zerfall von Kristallen in Bruchstücke bei Kontakt mit Wasser, bevor die Hydratation beginnt. Er hängt u. a. von der spezifischen Oberfläche, dem verwendeten Ausgangsstoff (Gipsart und Korngröße) sowie der Art des Brennverfahrens und der Temperatur ab.¹⁶⁷ Mit steigendem Kornzerfall wächst der Wasseranspruch und sinkt die Fließfähigkeit der Gipse¹⁶⁸ sowie die Produktfestigkeit.

Eine weitere Eigenschaft des β – HH ist die „Alterung“. Dabei kommt es durch Einwirkung von Luftfeuchtigkeit zum Abbau von anhaftenden Anhydrit III Kristallen sowie zur Ausbildung von Dihydratkristallen auf der Partikeloberfläche. Diese decken, die durch die Entwässerung entstandenen Risse ab und vermindern die Anzahl der Schwachstellen im Korn. Durch dieses „Ausheilen“ der mechanischen Defekte nimmt die spezifische Oberfläche bereits nach drei Tagen deutlich ab (von 9 auf 3 m²/g¹⁶⁹) und stabilisiert die Verarbeitungseigenschaften (verringertes Wasseranspruch, erhöhte Einstreumenge, verkürzte Versteifungszeiten, bessere Entwässerbarkeit), wodurch eine höhere Festigkeit des Endproduktes erreicht werden kann. Die sogenannte Stuckgipsalterung verbessert die hygro-mechanische Stabilität des Stuckgipses und wirkt dem Kornzerfall entgegen.^{170, 171}

- **Anhydrit III**

Anhydrit III entsteht durch die weitere Entwässerung des Halbhydrats. Er ist extrem hygroskopisch und reagiert schon mit Luftfeuchtigkeit zu Halbhydrat, was den Alterungsprozess begünstigt. Im technischen Brennprozess wird immer ein gewisser Anteil AIII erzeugt¹⁷². Die weiteren Anhydritformen (AII, AI) sind für die Fragestellungen dieser Arbeit irrelevant und werden daher nicht weiter beschrieben.

3.2. Verfahren zur Herstellung von GFP

Die industrielle Fertigung von GFP erfolgt im Wesentlichen über drei Verfahren:

- Trockenverfahren
- Halbtrockenverfahren
- Nassverfahren.

Jedes dieser Verfahren weist spezifische Prozessschritte, Vorteile und Herausforderungen auf. Beim Trocken- und Halbtrockenverfahren werden trockene oder vorgefeuchtete Altpapierfasern¹⁷³ mit Calciumsulfat-Halbhydrat vermischt. Die Mischung wird vorverdichtet

¹⁶⁷ [Abdussaljamov, 2003], S. 20.

¹⁶⁸ [Abdussaljamov, 2003], S. 19f.

¹⁶⁹ [Abdussaljamov, 2003], S. 22.

¹⁷⁰ [Abdussaljamov, 2003], S. 148ff.

¹⁷¹ [Nowak S., 2012], S. 13ff.

¹⁷² [Förthner, 2011], S. 4.

¹⁷³ [Wilke et al., 25.01.85].

und erst kurz vor¹⁷⁴ oder während¹⁷⁵ des Pressvorganges mit dem für das Abbinden erforderlichen Wasser besprüht. Typische Beispiele sind das Siempelkamp-Verfahren, das sich besonders für die Massenproduktion von GFP in Form von Bau- und Feuerschutzplatten, für Wand- und Deckenbekleidungen bei nichttragenden Trennwänden gemäß DIN EN 15283-2 (vgl. Kapitel 2.2.2) eignet und hohe Durchsatzleistungen ermöglicht.¹⁷⁶ Der Mischvorgang, die Art, Menge und der Zeitpunkt der Wasserzugabe sowie die Absaugprozesse werden kontinuierlich weiterentwickelt, sodass zahlreiche Modifikationen existieren.

Im Nassverfahren werden die GFP aus einer wässrigen Suspension geformt. Zu den etablierten Verfahren zählen das Hatschek¹⁷⁷- und das Langsiebverfahren¹⁷⁸. Beim Hatschek-Verfahren wird die Suspension auf ein Sieb aufgebracht, auf eine Walze übertragen und anschließend abgetrennt, abgebunden und getrocknet. Beim Langsiebverfahren erfolgt die Entwässerung und Formgebung auf einem endlosen Austragsband.

Eine weitere Variante des Nassverfahrens ist das Einzeltaktpressverfahren (Abbildung 15). Es wird speziell für die Herstellung von Doppelbodenplatten nach DIN EN 12825 angewendet und wurde im Rahmen dieser Arbeit als methodische Grundlage für die experimentellen Untersuchungen eingesetzt. In diesem Verfahren werden Faserstoffe aus Altpapier unterschiedlicher Qualitäten (Zeitungspapier, Pappe, Kraftpapier und andere zellulose- oder holzschliffartige Sorten) sowie Zellulose mit Wasser (Brunnenwasser und/oder Prozesswasser) in einem Pulper schonend aufgeschlossen. Im Anschluss werden nacheinander die Pulpe sowie Abbindeverzögerer, α -HH Suspension¹⁷⁹ und Calciumsulfathalbhydrat (Bindemittel) in einen Nassmischer gegeben und jeweils kurz eingemischt. Schließlich wird die Mischung im Einzeltaktpressverfahren zu Platten mit Kantenlängen von 600 mm x 600 mm und einer Dicke von < 50 mm gepresst. Während des Pressvorgangs wird überschüssiges, gipshaltiges Wasser abgesaugt, filtriert, und anschließend dem Prozesskreislauf wieder zugeführt. Der abgefilterte Gips fällt als Gipsschlamm an und wird entsorgt. Nach der Presse erfolgt das drucklose Abbinden des Gipses. Anschließend werden die GFP zur weiteren Aushärtung und Trocknung in einem speziellen Trocknungssofen platziert, bis die Endfestigkeit erreicht ist. Danach werden die Platten auf die gewünschte Enddicke geschliffen. Die hierbei entstehenden Schleif- und Frästäube werden erfasst und in einem Rührautoklaven zu α -HH kalziniert. Die daraus resultierende Suspension wird in definierter Menge wieder in den Herstellungsprozess

¹⁷⁴ [Bold, 1991], S. 3.

¹⁷⁵ [Winkler, 1986], S. 3.

¹⁷⁶ [Bold, 1991].

¹⁷⁷ [Knauf, 1957].

¹⁷⁸ [Hoyer et al., 1973].

¹⁷⁹ α -HH Suspension aus Schleif- und Frästäub, hergestellt im hydrotrothermalen Suspensionsverfahren

zurückgeführt, um eine Beeinträchtigung der Produktqualität und der Verarbeitungseigenschaften zu vermeiden. In der Endbearbeitung werden die Kanten und Oberflächen der GFP mit gewünschten Belägen veredelt.

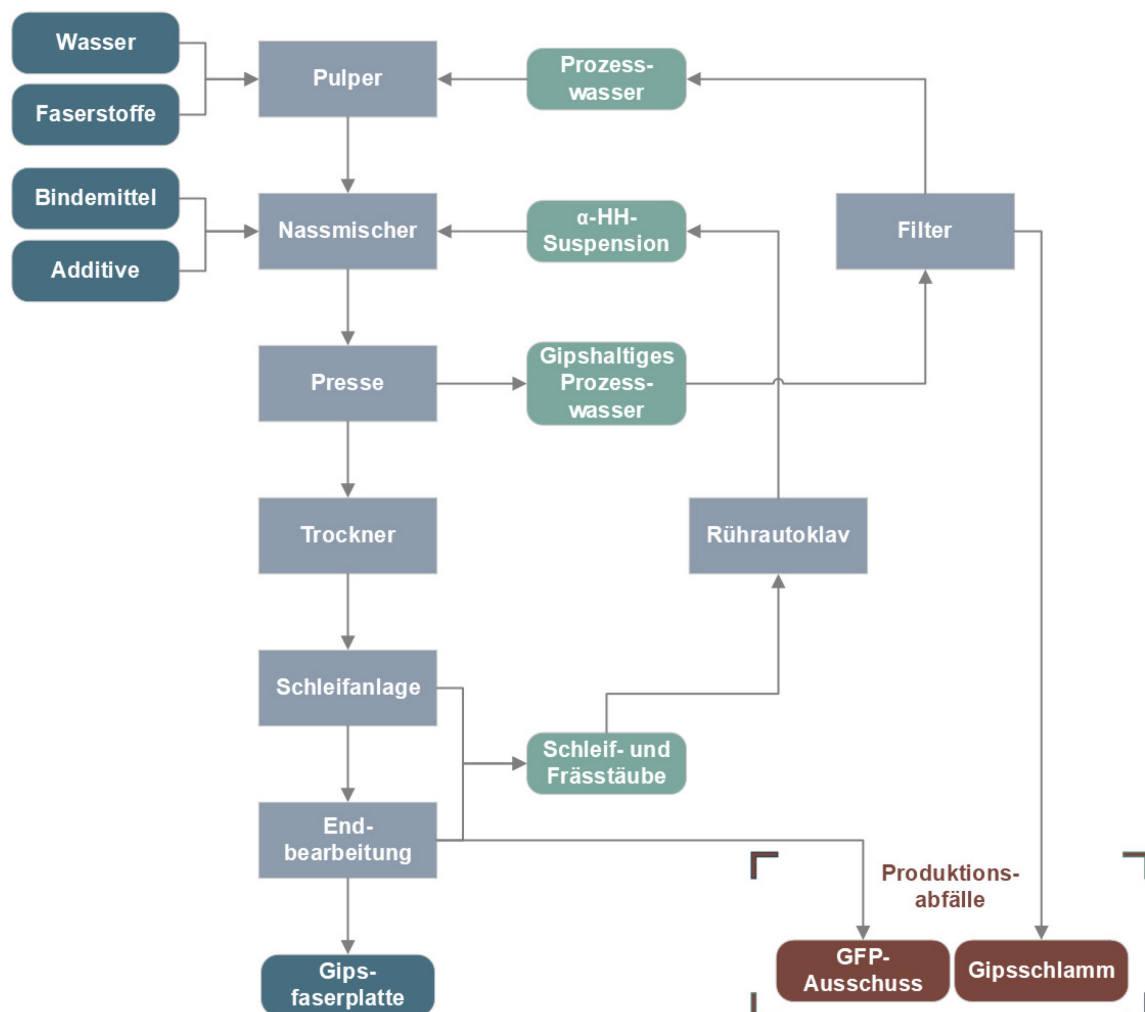


Abbildung 15: Fließbild eines Nassverfahrens mit Einzeltaktpressverfahren zur Herstellung von Doppelbodenplatten der Firma Lindner Norit GmbH (eigene Darstellung)

Nassverfahren weisen einige Vorteile hinsichtlich der Festigkeit der Gipsfaserplatten auf. Der schonendere und feinere Aufschluss der Fasern im sogenannten „Nassaufschluss“ führt zu einer gleichmäßigen Vermischung und optimalen Orientierung der Fasern in der Plattenebene. Dies verstärkt die Armierungswirkung der Fasern und erhöht die Festigkeiten bei gleichzeitig geringerer Faseranteilen.¹⁸⁰

Nassverfahren sind daher hinsichtlich Qualität, Effizienz und Kosten häufig zu bevorzugen. Es ermöglicht besonders hohe Produktfestigkeiten, erfordert einen geringeren Energiebedarf beim Papieraufschluss und ist mit niedrigeren Investitionskosten für die Produktionsanlage verbunden.¹⁸¹ Demgegenüber stehen jedoch auch Herausforderungen, wie der Anfall großer

¹⁸⁰ [Bold, 1991].

¹⁸¹ [Bold, 1991].

Mengen gipsgesättigten Wassers, die Entwässerbarkeit der Suspension und eine im Vergleich zu Trockenverfahren geringere Produktionsleistung.¹⁸²

Die Wahl des jeweiligen Herstellungsverfahrens hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften, die Qualität und die Wirtschaftlichkeit der Gipsfaserplatten. Während Trocken- und Halbtrockenverfahren auf hohe Produktionsraten und Prozesssicherheit ausgelegt sind, bieten Nassverfahren Vorteile hinsichtlich Produktfestigkeit und Ressourceneffizienz, erfordern jedoch ein gezieltes Management der Prozesswasserströme und der Entsorgung von Produktionsabfällen.

3.3. Mechanismus des Versagens von GFP

Die Einbindung von Fasern in Verbundwerkstoffe verbessert deren mechanische Eigenschaften, indem sie Zugfestigkeit, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit und Bruchlast erhöht. Die Fasern fungieren als Verstärkungselemente, die Lasten tragen, Spannungen verteilen und Rissbildung verhindern, wodurch die strukturelle Integrität des Materials verbessert wird.

Das Versagen von GFP entspricht dem typischen Bruchverhalten von spröden Matritzen mit Zugarmierung¹⁸³ und beruht auf Defekten im Materialverbund. Diese Defekte können verschiedene Ursachen haben, darunter gebrochene Fasern, Fehler in der Matrix und gestörte Faser/Matrix-Grenzflächen.¹⁸⁴

Für das Versagen von GFP ist die Voraussetzung das Auftragen einer ausreichend große Last, in dessen Folge es zu Mikrorissen in der Matrix kommt. Diese Spannungen werden zunächst von den Fasern aufgenommen und abgeleitet. Bei zunehmender Belastung kann es zur Ruptur der Oberflächenbindung an der Grenzfläche zwischen Faser und Matrix kommen. In Regionen mit hoher Beanspruchung nahe der Rissfront besteht die Gefahr des Ablösens von Fasern von der Gipsmatix (Abbildung 16, (1)). Dies kann in der Folge zu einem vollständigen Ablösen der Faser von der Matrix führen (Abbildung 16, 2). Wird die Belastung der Rissausbreitung auf eine Faser übertragen kann das bei ausreichender starker Belastung auch zu ihrem Bruch führen (Abbildung 16, 3).¹⁸⁵ Die Art des Versagens (Faserbruch oder Faserauszug) ist abhängig von der Stärke der Gips-Faser-Bindung sowie der Faserfestigkeit.

¹⁸² [Bold, 1991].

¹⁸³ [Tichelmann, 2019], S. 22.

¹⁸⁴ [Coutts, 1983], S. 144.

¹⁸⁵ [Coutts, 1983], S. 144.

Es ist auch möglich, dass eine Faser intakt bleibt, während der Riss fortschreitet. Dieser Vorgang wird als Rissüberbrückung bezeichnet und kann das Versagen des Verbundwerkstoffes verzögern.¹⁸⁶

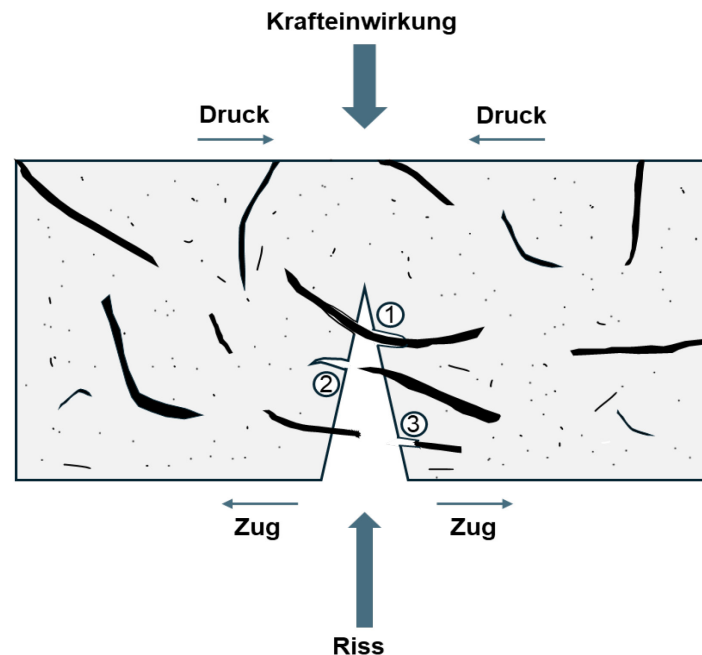


Abbildung 16: Schematische Darstellung möglicher Mechanismen bei der Rissentwicklung in GFP durch Krafteinwirkung (eigene Darstellung)

3.4. Einflussfaktoren auf die mechanische Festigkeit von GFP

Die mechanische Festigkeit von GFP wird durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt, die sich aus den Eigenschaften der eingesetzten Fasern und Gipse, der Art der Faser-Gips-Haftung sowie dem Herstellungsprozess ergeben. Zu den wesentlichen Einflussgrößen zählen:

- Fasereigenschaften wie z. B. Faserlänge, Feinanteil etc.
- Fasergehalt
- Gipseigenschaften, einschließlich der Gipsart, des Wasser-Gips-Wertes, der Rohdichte und der Kristallmorphologie
- Wechselwirkung zwischen Gips und Faser
- Faserorientierung
- Herstellungsverfahren

Coutts zeigte in seiner Studie, dass neben der Faserlänge, das Verhältnis von Faserlänge zu Faserdicke, der Feinanteil sowie die Dichte und der Fasergehalt der Gipsfaserplatte die mechanische Festigkeit maßgeblich beeinflussen.¹⁸⁷ Demnach bewirkt ein größeres

¹⁸⁶ [Coutts, 1983], S. 144.

¹⁸⁷ [Coutts, 1991].

Verhältnis von Faserlänge zu Faserdicke eine höhere Biegezugfestigkeit als auch Bruchzähigkeit. Wohingegen ein steigender Feinanteil¹⁸⁸ sich vor allem auf die Bruchzähigkeit negativ auswirkt. Der Feinanteil hat eher die Wirkung eines Füllstoffes als die einer Faser und weist einen geringen Widerstand gegen den Faserauszug auf.¹⁸⁹ Der optimale Fasergehalt liegt, abhängig von Faserart und Beanspruchungsart, zwischen 8 und 14 M.-%. Höhere Faseranteile können die mechanische Festigkeit aufgrund verminderter Faserverzweigung innerhalb der Matrix, reduzieren.¹⁹⁰

Weitere Faktoren für die Festigkeit von GFP sind die physikalische und morphologische Gipseigenschaften. Die Art und Stärke der Bindungen zwischen den Kristalliten ist entscheidend für die mechanische Festigkeit.^{191, 192} Bei harten Gipskörpern lassen sich in der Regel kleine Gefügekristalle, eine geringe Porosität sowie eine regelmäßige Textur beobachten. Die gute Kohäsion wird auf eine Kombination von zahlreichen Kontaktstellen der Kristalle und deren Adhäsionskraft sowie eine optimale Verfilzung zurückgeführt.^{193, 194} Grundsätzlich weisen Gipse mit einem höheren Wasseranspruch niedrigere Festigkeiten der Endprodukte auf.¹⁹⁵ Ein hoher Wasseranspruch geht mit niedrigen Einstreumengen, hohen Wasser/Gips- und BET-Werten sowie niedrigen Rohdichten einher. Diese Gipse weisen geringere Festigkeiten auf, da sie bei der Erhärtung Poren und Hohlräume durch Wasserverdunstung bilden, was zu geringerer Produktfestigkeit führt.^{196, 197} Durch den Einsatz von α -Halbhydrat werden im Allgemeinen kompaktere, besser verzahnte Gefüge mit geringerer Porosität ausgebildet, weshalb Gipsprodukte aus α -Halbhydrat (α -HH) tendenziell höhere Festigkeiten aufweisen als solche aus β -HH.¹⁹⁸ Zudem können mineralische Nebenbestandteile wie Dolomit das Gefüge stören und dadurch die Produktfestigkeit mindern.¹⁹⁹

Die Korngrößenverteilung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Feinkörnige Gipse fördern die Festigkeit, da viele Kontaktstellen der Kristalle untereinander und zu den Fasern bestehen. Bei abnehmender Kristallgröße verlängert sich die Entwässerungszeit, da kleine Kristalle im

¹⁸⁸ Damit sind in dieser Studien Fasern mit einer Länge von < 0,6 mm gemeint.

¹⁸⁹ [Coutts, 1991], S. 78.

¹⁹⁰ [Coutts, 1986], S. 2961.

¹⁹¹ [Schneider, 2010], S. 19.

¹⁹² [Zhu et al., 2018], S. 546.

¹⁹³ [Schneider, 2010], S. 19.

¹⁹⁴ [Singh & Middendorf, 2007].

¹⁹⁵ [Müller M., 2007], S. 11.

¹⁹⁶ [Singh & Middendorf, 2007], S. 74.

¹⁹⁷ [Tesch, 2006], S. 6f.

¹⁹⁸ [Jäger & Brosig, 2008], S. 1.

¹⁹⁹ [Schneider, 2010], S. 97.

Vergleich zu großen Kristallen schlechter filtrierbar sind. Dies kann in der Konsequenz die Produktionsleistung beeinträchtigen.²⁰⁰

Darüber hinaus beeinflusst der Kristallhabitus sowohl die Entwässerungszeit als auch die Produktfestigkeit. Aschern²⁰¹ konnte zeigen, dass ein nadeliger Kristallhabitus mit einem Aspektverhältnis von $L/D = 5$ bzw. 8 ²⁰² sich negativ auf die Entwässerbarkeit sowie auf die Festigkeitsparameter wie Biegezugfestigkeiten und Bruchlasten auswirkt²⁰³. Demgegenüber stellten Förthner²⁰⁴ und Pritzel²⁰⁶ fest, dass ein nadeliger Habitus im Vergleich zu kurzen, dicken Kristallen für faserfreie Gipse bezüglich Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls von Gipsprodukten vorteilhafter ist. Während sich Aschern's Ergebnisse auf hoch verdichtete GFP im monolithischen Pressverfahren beziehen, betrachteten Förthner und Pritzel faserfreie nicht verdichtete Gipse. Dies verdeutlicht die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Rohstoffeigenschaften und Produktfestigkeit von Gipsprodukten.

Demnach sollte für stark verdichtete GFP im monolithischen Pressverfahren sowie im Taktpressverfahren (Doppelbodenplatte) ein α -HH mit einem möglichst geringem L/D ohne nadelige Fraktion verwendet werden.^{207,208} Eine unvollständige oder lange Entwässerung kann die Produktfestigkeit und auch die Produktivität negativ beeinflussen.²⁰⁹

Ein weiterer entscheidender Einflussfaktor auf die mechanische Festigkeit von GFP ist der Verbund zwischen Fasern und Gipsmatrix. Dabei spielen sowohl Wasserstoffbrückenbindungen als auch mechanische Bindungen eine zentrale Rolle. Wasserstoffbrückenbindungen entstehen zwischen den hydrophilen Zellulosefasern und den Wassermolekülen des Gipses.²¹⁰ Mechanische Bindungen werden durch die Verzweigung von Gipspartikeln untereinander sowie durch das Anwachsen und Verwachsen von Gipspartikeln auf den Fasern gefördert.²¹¹ Nindiyasari²¹² beschreibt, dass dieses Anwachsen durch heterogene Gipskeimbildung an der Oberfläche von Zellulosefasern hervorgerufen wird und durch die Wasserbereitstellung von Zellulose begünstigt wird. Eine raue, zerklüftete und fibrillierte Faseroberfläche vergrößert die verfügbare Fläche für Gips-Faser-Bindungen und kann dadurch die mechanische Festigkeit der Gipsfaserplatte positiv beeinflussen.²¹³

²⁰⁰ [Aschern; Hartmann, 2011], S. 38.

²⁰¹ [Aschern; Hartmann, 2011].

²⁰² Beschreibt das Verhältnis von Länge zu Breite (L/D) der Kristalle.

²⁰³ [Aschern; Hartmann, 2011], S. 86.

²⁰⁴ [Förthner, 2011], S. 101.

²⁰⁵ [Pritzel et al., 2017].

²⁰⁶ [Pritzel et al., 2017].

²⁰⁷ [Aschern, 2010], S. 97.

²⁰⁸ [Aschern; Hartmann, 2011], S. 69.

²⁰⁹ [Abdussaljamov, 2003], S. 146.

²¹⁰ [Coutts, 1983], S. 148.

²¹¹ [Nindiyasari et al., 2015], S. 8.

²¹² [Nindiyasari et al., 2015].

²¹³ [Mohammed et al., 2022], S. 7044.

Allerdings können starke Volumenänderungen durch Aufquellen und Schrumpfen von Fasern infolge von Wasserabsorption bzw. -abgabe die Ablösung der Fasern von der umgebenden Gipsmatrix begünstigen, was zu einer Reduktion der Produktfestigkeit führen kann.²¹⁴

Insgesamt ergibt sich die mechanische Festigkeit von Gipsfaserplatten aus der komplexen Interaktion der Rohstoffcharakteristik, der Gips-Faser-Bindung und des Herstellungsprozesses. Durch die bewusste Auswahl und Anpassung der Fasern und Gipse sowie die Optimierung der Verfahrensschritte kann die Leistungsfähigkeit der Platten beeinflusst werden.

3.5. Status Quo: Verwertung gipshaltiger Bauabfälle zur Herstellung von GFP

Die Verwertung gipshaltiger Bauabfälle in der Herstellung von Gipsfaserplatten (GFP) stellt aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen den Rohstoffeigenschaften von Gips und Papier, deren Wechselwirkungen sowie deren Einfluss auf die Produktfestigkeit erhebliche Herausforderungen dar. Insbesondere werden durch den Einsatz von gipshaltigen Bauabfällen größere Materialschwankungen in den Produktionsprozess eingebracht, was den Prozess sowie die Produktqualität negativ beeinflussen kann.

- **Aktuelle Studienlage**

Im Rahmen einer umfassenden Studie wurde der Einsatz von GKP des Typs Bauplatte sowie Produktionsabfälle aus der Herstellung von GFP, dazu zählen feinkörnige Stäube, Plattenreste und Schlämme, als Sekundärrohstoffe für die Herstellung von Gipsfaserplatten untersucht.

^{215, 216, 217} Die Bauabfälle wurden mittels eines Suspensionsverfahren²¹⁸ zu α -Halbhydrat (α -HH-Suspension) umgewandelt und der Nassmischung der GFP - Produktion zugemischt.

Bei konstanten Produktionsparametern entstand ein nadelförmiges α -HH mit hohem Wasseranspruch sowie erschwelter Entwässerung und Filtration. Durch die gezielte Anpassung der Prozessbedingungen konnten die Rohstoffeigenschaften optimiert und gute Produktfestigkeiten erzielt werden. Dabei reduzierte die Verwendung von Brauchwasser^{219, 220} die spezifische BET-Oberfläche sowie den Feinanteil der Kristalle. Zusätzlich führte die Zugabe von 0,1 M.-% Bernsteinsäure zu einer positiven Beeinflussung der Kristallmorphologie, wobei prismatische Kristalle mit einem niedrigen Länge-zu-Durchmesser-

²¹⁴ [Savastano et al., 2005], S. 585.

²¹⁵ [Aschern, 2012].

²¹⁶ [Aschern; Hartmann, 2011].

²¹⁷ [Aschern, 2010].

²¹⁸ [Aschern; Hartmann, 2011], S. 15.

²¹⁹ Brauchwasser ist aufbereitetes Prozesswasser aus der GFP-Produktion

²²⁰ [Aschern; Hartmann, 2011], S. 57ff.

Verhältnis (L/D) entstanden. Dies beschleunigte die Filtration, senkte den Wasserbedarf und verbesserte die Produktfestigkeit.²²¹ Zudem hat sich eine Kalzinierungstemperatur von 125 °C als optimaler Kompromiss für eine schnelle Umwandlung zu α -HH und einer geringen spezifischen Oberfläche herausgestellt.²²²

Unter diesen optimierten Prozessbedingungen konnte ein Abfallmix aus 55 % Schleifstaub, 25% Sedimentationsschlamm und 20 % gemahlenen Gipsfaserplattenabfällen als α -HH-Suspension zu einem Anteil von 25 - 50 % am gesamten Bindemittel zugemischt werden, ohne Produktivitätseinbußen und mit vergleichbaren Produktfestigkeiten zu Referenzplatten aus REA-Gips.²²³

Die Ergebnisse zeigen, dass gipshaltige Bauabfälle ein vielversprechendes Potenzial als Sekundärrohstoffe in der GFP-Herstellung besitzen. Jedoch wurde in den untersuchten Fällen nur die Gipsfraktion von GKP genutzt. Weitere GKP-Typen wie Feuchtraumplatten, Feuerschutzplatten oder GKP auf Basis von Naturgips (die größere Qualitätsschwankungen und höhere Störstoffanteile aufweisen) blieben in der Studie unberücksichtigt. Zudem wurden die Eigenschaften von Papier- und Fasermaterialien sowie deren Wechselwirkung mit den Gipseigenschaften bislang nicht systematisch analysiert.

- **Nassrecyclingverfahren für GKP**

Anders als konventionelle Verfahren, bei denen der Karton von GKP nach mechanischer Trennung nur in geringen Mengen in der Gipsindustrie verwertet werden kann, ermöglicht das Nassrecyclingverfahren die gemeinsame Aufbereitung von Gipskern und Kartonummantelung zu hochwertigen Sekundärrohstoffen für die Herstellung neuer GFP.

In üblichen Recyclingprozessen von GKP-Abfällen wird die Kartonummantelung vom Gipskern getrennt (vgl. Kapitel 2.5). Der abgetrennte Karton weist jedoch Gipsanhaftungen auf, die sich durch ihre sehr hohe Feinheit und sehr reaktiven Kristallisationskeime auszeichnen. Diese wirken beschleunigend auf die Reaktion von Calciumsulfat-Halbhydrat zu Calciumsulfat-Dihydrat.²²⁴ Würde dieser unkalzinierte, getrennt erfasste Karton in den Produktionsprozess von Gipsfaserplatten eingebracht, so führten die sehr feinen Gipskeime zu einer unkontrollierten und stark beschleunigten Abbindereaktion der Gipsfasermischung. Selbst bei sehr hohen Dosierungen von Abbindeverzögerern könnte eine sichere Prozesssteuerung nicht gewährleistet werden.²²⁵

²²¹ [Aschern, 2010], S. 80.

²²² [Aschern; Hartmann, 2011], S. 3.

²²³ [Aschern; Hartmann, 2011], S. 71.

²²⁴ [Müller M., 2007].

²²⁵ [Koch et al., 2020], S. 4.

Im Gegensatz dazu werden beim Nassrecyclingverfahren GKP-Abfälle zunächst grob zerkleinert und in einen Pulper eingebracht, in dem mit Wasser ein Gips-Faser-Brei erzeugt wird.²²⁶ Die so gewonnene Gipsfasersuspension wird unter erhöhtem Druck thermisch in α -HH-Halbhydrat überführt und kann direkt als Ausgangsmaterial für die Herstellung neuer GFP eingesetzt werden.

Entscheidend ist dabei die gemeinsame Nasskalzinierung des Kartons und des Gipskerns. Dies ermöglicht es, die Papierfraktion zu nutzen und zugleich die sehr feinen, reaktiven Gipsanhaftungen gezielt in den Prozess der Matrixbildung einzubinden, sodass auch diese im Materialgefüge wirksam werden. Kartonfasern aus GKP können so als armierende Komponente in der GFP dienen.

Mit der Nutzung der Kartonummantelung ergeben sich jedoch auch neue Herausforderungen. Die Fasereigenschaften des recycelten Kartons z. B. sind unbekannt, was die Vorhersagbarkeit und Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften der Gipsfaserplatten beeinflussen kann.

²²⁶ [Koch et al., 2020].

4. Forschungsbedarf

Der Einsatz gipshaltiger Bauabfälle zur Herstellung von GFP stellt eine ressourcenschonende und nachhaltige Verwertungsmöglichkeit dar, deren industrielle Bedeutung angesichts des Rückgangs der REA-Gips-Mengen kontinuierlich zunimmt. Gleichzeitig ist in den kommenden Jahren mit einem zunehmenden Aufkommen von GKP und GFP aus dem Rückbau zu rechnen. Die vielfältigen gipshaltigen Bauabfälle weisen aufgrund ihrer unterschiedlichen Materialeigenschaften eine heterogene Qualität auf, was zu einer stark variierenden Zusammensetzung der gipshaltigen Bauabfälle führt. Zudem ist bei GKP verschiedener Plattentypen (vgl. Tabelle 1) unterschiedlicher Hersteller aufgrund verschiedener Zusatzstoffe, Qualitätsunterschieden bei Naturgips und REA-Gips sowie unbekannten Fasereigenschaften der Kartonummantelung mit einer gewissen Schwankungsbreite der Materialqualität zu rechnen. Diese Variabilität stellt eine wesentliche Herausforderung für die Prozesssteuerung und die Sicherung der Produktqualität dar, die grundsätzlich auf möglichst konstante Materialeigenschaften ausgelegt ist. Daher müssen die Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften, den Produktionsprozessen sowie deren Einfluss auf die Produktqualität untersucht werden, um eine effektive Verwertung der heterogenen gipshaltigen Bauabfälle für die GFP-Herstellung zu ermöglichen.

Bisherige Forschungsansätze verblieben meist im Labormaßstab und konzentrierten sich hauptsächlich auf die Untersuchung einzelner Gips- oder Faserstoffeigenschaften sowie deren Einfluss auf die Biegezugfestigkeit und Bruchzähigkeit von nicht verdichteten Gips-Faser-Probekörpern. Dabei wurde der Einfluss des gesamten Herstellungsprozesses und damit verbundene Faktoren wie Faserorientierung oder Pressen der Gips-Faser-Mischung auf die Festigkeit weitgehend vernachlässigt. Aus diesem Grund sind die gewonnenen Erkenntnisse auf industrielle Maßstäbe und beispielsweise hochverdichtete Doppelbodenplatten nur eingeschränkt übertragbar. Um sämtliche relevanten Einflussfaktoren angemessen zu berücksichtigen und darauf aufbauend fundierte, praxisorientierte Handlungsempfehlungen für den Einsatz gipshaltiger Bauabfälle in der Herstellung neuer GFP abzuleiten, sind weiterführende Untersuchungen im industriellen Maßstab unerlässlich.

Untersuchungen, die bereits im halbindustriellen Maßstab an Doppelbodenplatten durchgeführt wurden, belegen das beträchtliche Verwertungspotenzial sowohl von GKP als auch von Produktionsabfällen aus der GFP-Herstellung für die Erzeugung neuer Doppelbodenplatten. Der Schwerpunkt dieser Untersuchungen lag jedoch auf der gezielten Anpassung der Gipseigenschaften, um Schwankungen im Rohstoff auszugleichen und die Auswirkungen auf Presszeit und Produktfestigkeit zu reduzieren. Der Einfluss mineralischer Nebenbestandteile und Additive im Gips sowie der Faserstoffeigenschaften und deren Wechselwirkungen mit Gipseigenschaften blieb bislang weitgehend unberücksichtigt.

Kenntnisse zu diesen Einflüssen sind allerdings maßgeblich, um die Produktqualität bei heterogenen Materialzusammensetzungen durch gezielte Auswahl der Ausgangsrohstoffe sicherstellen zu können.

Ein innovatives Nassrecyclingverfahren²²⁷ für GKP ermöglicht erstmals die gleichzeitige Nutzung sowohl des Gipskerns als auch der Kartonummantelung zur Herstellung von GFP. Um gipshaltige Bauabfälle wie GKP, GFP sowie Produktionsabfälle aus der GFP-Herstellung ganzheitlich zu verwerten, ergeben sich folgende Forschungsfragen:

Welche qualitative Schwankungsbreite weisen Gipskerne und Kartonummantelungen sortenreiner GKP auf?

Die Zusammensetzung sowie die Eigenschaften der Gips- und Faserstoffe in GKP haben bei einer Verwertung zur Herstellung neuer GFP einen maßgeblichen Einfluss auf die Produktionsprozesse und deren Produktqualität. Eine detaillierte Charakterisierung dieser Materialeigenschaften ist unerlässlich, um im industriellen Maßstab eine konstant hohe Produktqualität sicherzustellen, die Fertigungsprozesse effizient zu steuern und die Rezepturen sowie Prozessparameter fundiert auszulegen und planen zu können.

Welche Fasereigenschaften haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten aus dem Einzeltaktpressverfahren?

Die gezielte Auswahl von Faserstoffen kann die mechanische Festigkeit und das Versagensverhalten von Gipsfaserplatten steigern. Ein vertieftes Verständnis der Fasereinwirkung fördert die Entwicklung von Produkten mit höherer Festigkeit, ermöglicht Materialeinsparungen bei gleichzeitig verbesserter Tragfähigkeit und ist essentiell für qualitätsgesicherte Herstellungsprozesse.

Welche Auswirkungen hat der Einsatz von GKP, GFP, Schleifstäube und Gipsschlamm auf die Umwandlungsgeschwindigkeit der Nasskalzinierung, die Presszeit sowie die Bruchlast von Doppelbodenplatten?

Bisher ist nicht bekannt, inwieweit Materialeigenschaften der genannten gipshaltigen Bauabfälle Einfluss auf die Umwandlungsgeschwindigkeit der Nasskalzinierung, die Presszeit sowie die Bruchlast von Doppelbodenplatten haben. Diese Erkenntnisse sind notwendig, um bei der Verwendung von Recyclingrohstoffen eine präzise Anpassung der Rezepturen und eine zuverlässige Sicherstellung der Produktqualität sicherzustellen.

Welchen Einfluss haben die Gipseigenschaften, das α -Halbhydrat und die Wechselwirkungen zwischen Gips und Fasern auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten beim Einsatz von GKP und Produktionsabfällen aus der GFP-Herstellung?

²²⁷ [Koch et al., 2020].

Durch die isolierte Betrachtung dieser drei Einflussfaktoren in gezielten Versuchsreihen werden ihre individuellen und synergistischen Beiträge zur mechanischen Festigkeit quantifiziert. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für eine optimierte Rezepturenentwicklung und die gezielte Steuerung der Produktqualität bei der industriellen Verwertung von Sekundärrohstoffen.

Die Beantwortung der Forschungsfragen erfolgt am Beispiel von Doppelbodenplatten und schafft damit eine fundierte Grundlage für den industriellen Einsatz gipshaltiger Bauabfälle als Sekundärrohstoffe in der GFP-Herstellung. Dabei werden sowohl das Potenzial als auch die Herausforderungen des Einsatzes verschiedener gipshaltiger Bauabfälle systematisch aufgezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen zu einem vertieften Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Rohstoffeigenschaften und Produktqualität bei und liefern konkrete Anhaltspunkte für die Optimierung von Rezepturen und Fertigungsprozessen für Gipsfaserprodukte.

5. Material und Methodik

In diesem Kapitel werden die methodische Vorgehensweise, die verwendeten Materialien sowie der Versuchsaufbau zur Beantwortung der Forschungsfragen vorgestellt.

5.1. Methodik

Nachfolgend wird zunächst das Konzept zur Beantwortung der Forschungsfragen beschrieben. Im Anschluss werden die angewendeten Verfahren zur systematischen Charakterisierung der eingesetzten Materialien beschrieben.

5.1.1. Konzept zur Beantwortung der Forschungsfragen

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird ein drei-stufiges, experimentell-modellbasiertes Vorgehen gewählt, das Technikumsversuche mit statistischer Auswertung verknüpft. (Abbildung 17)

Ausgangspunkt ist die systematische Charakterisierung der eingesetzten Gipse und Faserstoffe (vgl. Kapitel 6 und 8.1), um die stoffliche Variabilität der unterschiedlichen GKP bzw. gipshaltigen Produktionsabfälle aus der GFP-Produktion quantitativ zu erfassen. Dabei werden die Gipskerne und Kartonummantelungen von GKP verschiedener Typen und Hersteller untersucht, um einen Überblick über die zu erwartenden Qualitäten zu gewinnen (vgl. Kapitel 6). Zudem werden die Gips- und Faserstoffeigenschaften von GKP, GFP, Schleifstaub und Gipsschlamm nach den jeweiligen Aufbereitungsprozessen (vgl. Kapitel 8.1 bzw. Anhang J) sowie nach der Kalzinierung an Gips-Faser-Gemischen charakterisiert (vgl. Kapitel 8.1.2). Dies bildet die Grundlage, um die Eignung der unterschiedlichen Recyclingströme für die GFP-Herstellung zu bewerten und den Einfluss ihrer Gips- und Faserstoffeigenschaften auf die resultierenden Platteneigenschaften systematisch analysieren zu können.

Darauf aufbauend werden im ersten Schritt Doppelbodenplatten hergestellt (vgl. Kapitel 7), deren Ausgangsrohstoffe zu 100 M.-% β -HH (Stuckgips) mit konstanten Gipseigenschaften sowie unterschiedlichen Faserstoffen mit variierenden Faserstoffeigenschaften- und gehalten eingesetzt werden. Ziel ist es die Armierungswirkung der Faserstoffe isoliert untersuchen unter Ausschluss des Einflusses von Gipseigenschaften. Die Festigkeit der hergestellten Doppelbodenplatten wird bestimmt, indem die Bruchlast, also die maximale Last bis zum Versagen, gemessen wird. Die experimentell ermittelten Bruchlasten werden anschließend mittels multipler linearer Regression analysiert (vgl. Kapitel 7.3), um ein prädiktives Modell zu entwickeln, das den Zusammenhang zwischen Fasereigenschaften, Fasergehalt und Bruchlast beschreibt.

Im zweiten Schritt werden Doppelbodenplatten hergestellt, bei denen Stuckgips zu 50 M.-% durch gipshaltige Bauabfälle ersetzt wird (vgl. Kapitel 8.2 und 8.3). Damit wird der Einfluss der verwendeten Sekundärrohstoffe auf die Nasskalzinierung, die erforderliche Presszeit und die Bruchlast unter praxisnahen Bedingungen untersucht und ihr Substitutionspotenzial für die Herstellung neuer Doppelbodenplatten quantitativ bewertet.

Im dritten Schritt wird auf Basis der Versuchsreihen aus den Schritten 1 und 2, ergänzender Zusatzversuche (VG10 , VG11, VG12, vgl. Anhang M, Tabelle M 1) sowie unter Nutzung des Regressionsmodells der kombinierte Einfluss von Gips- und Faserstoffeigenschaften sowie ihrer Wechselwirkungen auf die Bruchlast modellbasiert bewertet (vgl. Kapitel 9).

Dieses methodische Vorgehen verknüpft experimentelle Versuchsreihen, statistische Auswertungen und modellgestützte Prognosen zu einem ganzheitlichen Ansatz, der die Entwicklung ressourceneffizienter, kreislaufgerechter Optimierungsstrategien für die Herstellung von Gipsfaserplatten aus heterogenen Sekundärrohstoffen ermöglicht

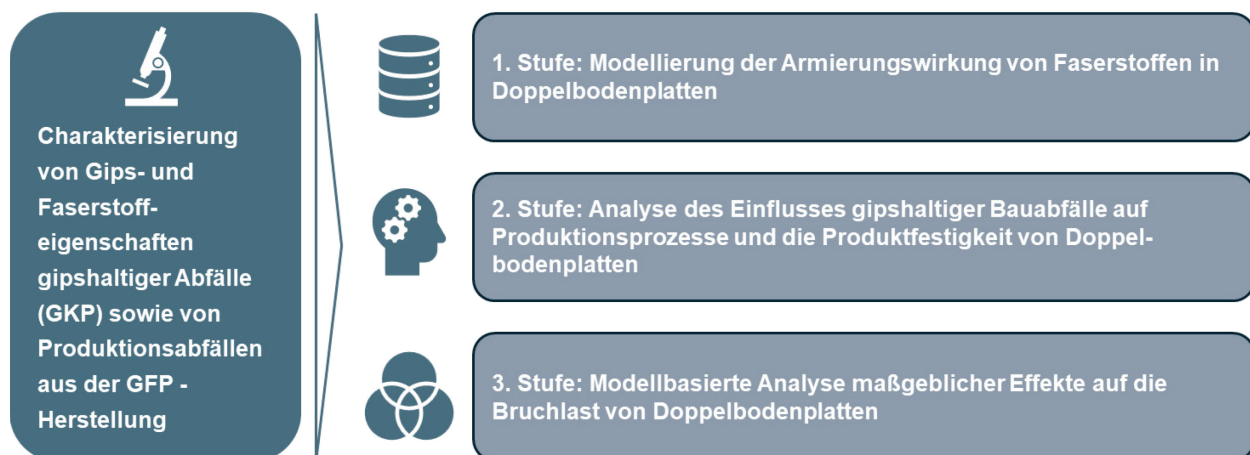


Abbildung 17: Konzept zur Beantwortung der Forschungsfragen

5.1.2. Methoden zur Charakterisierung von Gips und Faserstoffen

Die Charakterisierung der verwendeten Gipse und Faserstoffe stellt eine zentrale Grundlage dieser Arbeit dar. In Tabelle 11 sind die angewendeten Untersuchungsmethoden dargestellt, die dazu dienen, die physikalischen und chemischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien zu ermitteln. Diese Methoden liefern zusammen ein detailliertes Bild der Materialeigenschaften, das notwendig ist, um deren Einfluss auf die Qualität der Endprodukte analysieren und bewerten zu können. Eine detaillierte Beschreibung der angewendeten Methoden ist im Anhang C hinterlegt.

Tabelle 11: Angewendete Methoden zur Charakterisierung von Gips und Faserstoffen

Methode	Zielparameter
Gips	
Röntgenbeugungsanalyse (XRD) mit Rietveld-Verfeinerung	• Phasenzusammensetzung (qualitativ und quantitativ)
Lasergranulometrie	• Korngrößenverteilung
Rasterelektronenmikroskopie	• Kristallmorphologie • Qualitative Bestimmung von Nebenbestandteilen und Störstoffen
Blaine nach DIN EN 196-6	• „Äußere“ Oberfläche von Pulvern
BET-Methode	• „Innere“ Oberfläche von Pulvern
Wasserbindemittel-Wert / Einstreumenge nach DIN EN 13279-2	• Wasserbedarf
Knick'sche Filtrationsmethode	• Filtrationsgeschwindigkeit
Thermogravimetrie	• Feuchte • Kristallwasser • Umwandlungsgeschwindigkeit
Faserstoffe	
Paper Bale Sensor	• Feuchte • Holzstoffanteil
Glühverlust in Anlehnung an DIN 54370	• Ascheanteil • Fasergehalt (FGH)
Valmet FS5 Fibre Image Analyzer	• Faserlänge, -dicke, -krümmung, -feinheit • Feinanteil • Feinanteil A • Feinanteil B
Mahlgrad nach Shopper-Riegler	• Mahlgrad

5.2. Material

5.2.1. Gipshaltige Bauabfälle und Stuckgips

Für die in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden sortenreine Verschnittreste und Produktionsabfälle aus Produktionsanlagen für GKP und GFP sowie Stuckgips verwendet. Diese sind im Folgenden kurz beschrieben.

- **Gipskartonplatten (Post Consumer)**

Folgende Platten wurden für die Untersuchungen ausgewählt:

- Bauplatte Typ A
- Imprägnierte Bauplatte Typ H2
- Feuerschutzplatte Typ DF.

Diese wiesen eine Dicke von 12,5 mm und 1.250 x 2.000 mm Kantenabmessung auf. Insgesamt wurden 20 Platten von zwei Herstellern (Knauff und ETEX) aus acht Werken bezogen. Die Platten waren sortenrein und frei von Anhaftungen. Eine detaillierte Untersuchung der Gipseigenschaften ist im Ergebnisteil (vgl. Kapitel 6) dargestellt.

- **Gipsfaserplatten, Schleifstäube, Gipsschlamm (Produktionsabfälle)**

Diese Produktionsabfälle wurden von der Firma Lindner Norit GmbH aus dem Werk in Dettelbach zur Verfügung gestellt. Die GFP bestanden aus einer Mischung von Verschnitt und nicht getrockneten Nassplatten aus dem Werk 2. Die Schleifstäube wurden aus dem Werk 1 und 2 bezogen. Der Gipsschlamm lag in Form eines Filterkuchens vor. Details zu den Materialeigenschaften vor (vgl. Kapitel 8.1.1, Anhang J) und nach (vgl. Kapitel 8.1.2) der Nasskalzinierung sind im weiteren Verlauf der Arbeit sowie im Anhang J beschrieben.

- **Stuckgips (β -Halbhydrat)**

Eingesetzt wurde ein industriell hergestellter Stuckgips aus REA-Gips. Dieser wurde in allen Versuchsreihen genutzt. Die spezifischen Eigenschaften des Stuckgipses werden detailliert im Ergebnisteil der Arbeit dargestellt (vgl. Kapitel 8.1.2).

5.2.2. Faserstoffe

Für die Versuchsreihen wurden Altpapiersorten unterschiedlicher Qualitätsstufen sowie GKP-Karton verwendet. Insgesamt kamen 15 Altpapiersorten zum Einsatz, die gemäß der Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten²²⁸ in untere, mittlere, bessere und krafthaltige Sorten (vgl. Anhang D, Tabelle D 1) eingeteilt sind. Die Altpapiere stammen von verschiedenen Händlern und repräsentieren ein breites Qualitätsspektrum. Die Kartonummantelung von GKP besteht aus zwei Sorten, der Vorder- und Rückseite. Während für Bau- und Feuerschutzplatten gleiche Kartons verwendet werden, enthält die Kartonummantelung für imprägnierte GKP hydrophobe Mittel. Für die Charakterisierung der Fasereigenschaften wurden Kartons von „Hamburger Containerboard“ und „Weig“ analysiert, wobei für Versuchsplatten ausschließlich Karton von „Hamburger Containerboard“ eingesetzt wurden. Zudem wurde ein Faserstoffmix bestehend aus 50 % Kraftpapier²²⁹, 20 % GKP-Karton²³⁰, 20 % Kurzfasern²³¹ und 10 % Altpapier der mittleren Sorte²³² verwendet. Eine detaillierte Übersicht der verwendeten Faserstoffe sowie deren Materialeigenschaften ist im Anhang D, (vgl. Tabelle D 2) dargestellt.

²²⁸ [DIN EN 643, 2014].

²²⁹ Kraftpapier 8 (vgl. Anhang D, Tabelle D 2)

²³⁰ Vorderseite GKP Typ A (vgl. Anhang D, Tabelle D 2)

²³¹ Cellulosefasern des Typs ARBOCEL PWC 500, J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG, Deutschland.

²³² Mittlere Sorte 1 (vgl. Anhang D, Tabelle D 2)

5.3. Versuchsbeschreibung

5.3.1. Vorgehen zur Analyse der Armierungswirkung von Faserstoffen in Doppelbodenplatten

Im ersten Schritt wurde die Armierungswirkung von Faserstoffen in GFP am Beispiel von Doppelbodenplatten mittels multipler linearer Regression analysiert. Dazu wurde eine Versuchsreihe mit 35 Einzelversuchen durchgeführt. Es wurden Doppelbodenplatten aus konstantem Stuckgips mit definierten Materialeigenschaften sowie Frischwasser und diversen Faserstoffen hergestellt. Die Auswahl der Faserstoffe und Planung der Versuche erfolgte so, dass das gesamte Spektrum relevanter Altpapierqualitäten gemäß der Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten abgedeckt wurde. Ergänzend wurden Kartonummantelungen aus GKP sowie eine heterogene Faserstoffmischung („Papiermix“) berücksichtigt, um die Bandbreite der Faserstoffeigenschaften zu erweitern und die Robustheit der statistischen Analyse zu erhöhen. Die verwendeten Rezepturen (vgl. Anhang G, Tabelle G 1) sowie Versuchsparameter (vgl. Anhang G, Tabelle G 2) sind im Anhang detailliert aufgeführt.

Die Versuche wurden bei der Firma Lindner Norit GmbH am Produktionsstandort Dettelbach durchgeführt. Dabei kamen Technikumsaggregate wie ein Pulper und ein Nassmischer sowie eine Produktionspresse zum Einsatz. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 18 dargestellt. Zunächst wurde der Faserstoff in einem Pulper (vgl. Anhang E, Abbildung E 2) mit Frischwasser (Temperatur 20 °C) und einem Feststoffgehalt von 3,6 M.-% bis 5,9 M.-% abhängig von der Rezeptur, für 40 Minuten zerkleinert. Anschließend wurde die Pulpe mit Stuckgips und Verzögerer auf Proteinbasis für 180 s im Nassmischer zu einer homogenen Gipsfasermischung verrührt.

Diese Mischung wurde in einer Chargenpresse bei 5 N/mm² spezifischem Druck zu jeweils zwei Platten mit einer Kantenlänge von 600 mm x 600 mm und einer Dicke von > 40 mm entwässert und verdichtet. Danach trockneten die Platten für einen Zeitraum von drei Tagen bei einer Temperatur von 60 °C im Trockenschrank, bis sie vollständig abgebunden waren und die endgültige Produktfestigkeit erreicht hatten. Anschließend wurden die Doppelbodenplatten auf eine Dicke von 40 mm geschliffen. Die Bruchlast wurde in Anlehnung an DIN EN 12825 an starren Auflagern im Lastpunkt 2 ermittelt und der Fasergehalt sowie die Rohdichte ermittelt. Die Rohdichte wurde über das Gewicht und die Abmessung berechnet, während der Fasergehalt an den getrockneten, abgebundenen Doppelbodenplatten bestimmt wurde und den tatsächlichen Anteil der Fasern im fertigen Produkt an. Dabei wurden Faserverluste während des Pressvorgangs sowie unterschiedliche Ascheanteile der verwendeten Faserstoffe berücksichtigt. Die Methodik zur Ermittlung des Fasergehaltes (FGH) ist in Anhang C beschrieben.

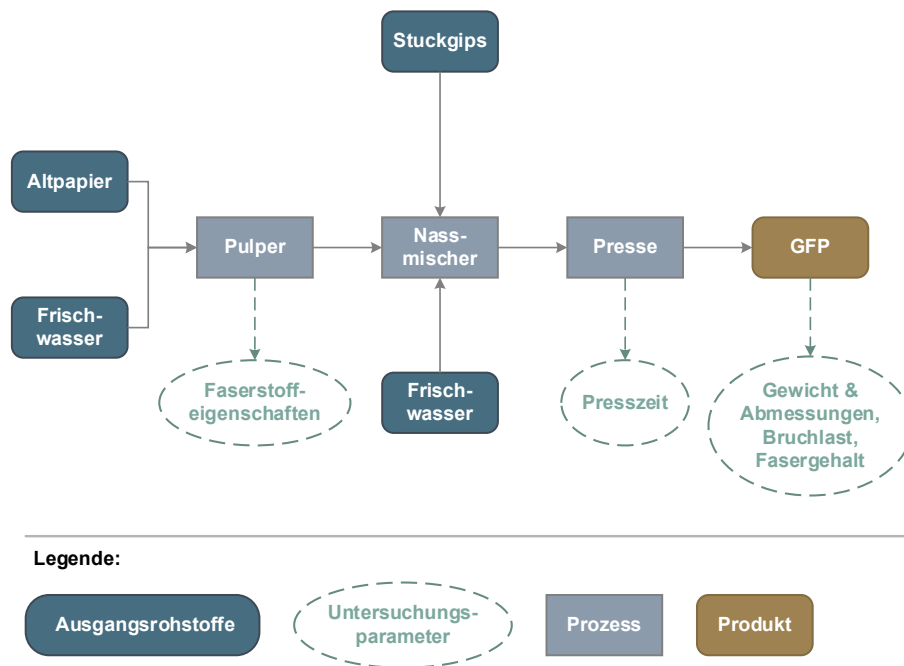


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Versuchsreihe: Einsatz diverser Faserstoffe zur Herstellung von Doppelbodenplatten (eigene Darstellung)

Im Anschluss erfolgte eine statistische Auswertung der erhobenen Daten mittels multipler linearer Regression, um den kombinierten Einfluss verschiedener Fasereigenschaften und des Fasergehalts auf die Bruchlast zu modellieren. Das erstellte Modell wurde mit der Software R-Studio implementiert und einer Validierung durch Prüfung grundlegender Annahmen der Regressionsanalyse, nämlich Linearität, Homoskedastizität, Normalverteilung der Residuen und Multikollinearität unterzogen. Zusätzlich wurde eine k-fache ($k=5$) Kreuzvalidierung durchgeführt, um einer Überanpassung zu begegnen und die Generalisierbarkeit des Modells zu gewährleisten.

Diese Methodik erlaubt sowohl die isolierte Betrachtung des Einflusses einzelner Fasereigenschaften als auch die Entwicklung eines prädiktiven Modells zur Vorhersage der Bruchlast von Doppelbodenplatten basierend auf Faserstoffcharakteristika.

5.3.2. Vorgehen zur Verwertung gipshaltiger Bauabfälle in Doppelbodenplatten

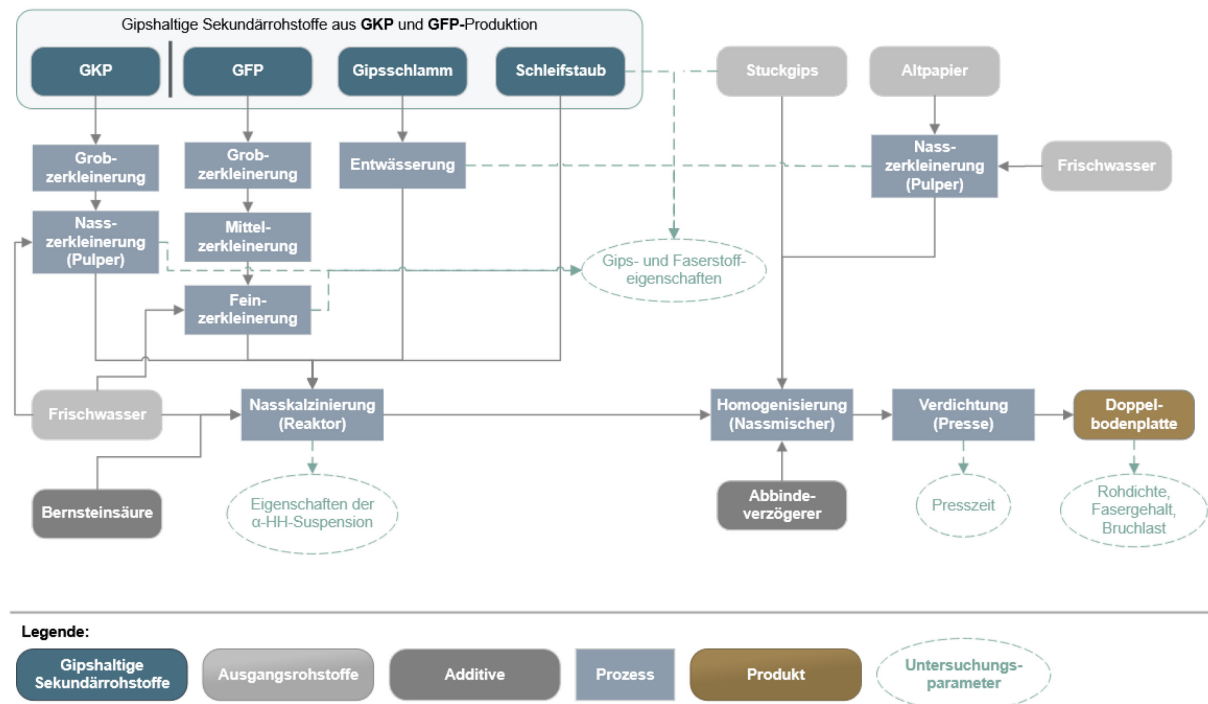
Im nächsten methodischen Schritt wurde die Verwertung ausgewählter gipshaltiger Bauabfälle für die Herstellung neuer Gipsfaserplatten am Beispiel von Doppelbodenplatten aus dem Taktpressverfahren analysiert. Dabei lag der Fokus auf der Substitution von 50 % der herkömmlichen Ausgangsmaterialien durch gipshaltige Bauabfälle und der Einflussnahme dieser Substitution auf die Nasskalzinierung, die Presszeit sowie die Bruchlast der fertigen Produkte.

In Abbildung 19 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Die Versuchsreihe umfasste insgesamt neun Versuche mit variierenden Anteilen und Zusammensetzungen der Ausgangsrohstoffe, bestehend aus gipshaltigen Bauabfällen, Stuckgips und Faserstoffen. Die spezifischen Zusammensetzungen und deren Mengen werden im Ergebnisteil dargestellt (vgl. Tabelle 22).

Im weiteren Verlauf werden GKP sowie GFP, Schleifstäube und Gipsschlamm unter der Bezeichnung gipshaltige Bauabfälle zusammengefasst. Die GKP wurden von der Firma ETEX aus den Werken Lippendorf und Hartershofen als Verschnittreste und Produktionsausschuss (Typ A, Typ H2, Typ DF) zur Verfügung gestellt und repräsentieren eine breite Palette verschiedener Gipsqualitäten und Additive. Die GFP, Schleifstäube und Gipsschlamm stammten als werksinterne Produktionsabfälle aus der GFP Herstellung von der Firma Lindner Norit GmbH.

Die Aufbereitung der gipshaltigen Bauabfälle erfolgte gezielt in mehreren Verfahrensschritten:

- Schleifstäube und entwässerte Gipsschlämme wurden direkt in Suspension überführt. Die Entwässerung der Gipsschlämme erfolgte vorab, um den Wassergehalt gezielt einstellen und damit die Zusammensetzung der Gips-Faser-Mischung präziser steuern zu können.
- Der GFP - Ausschuss wurde mit einem Walzenbrecher auf < 50 mm gebrochen, anschließend mit einer Prallhammermühle auf < 10 mm nachzerkleinert und mit einer Feinprallmühle auf 0,5 mm feinzerkleinert.
- GKP – Ausschuss und Verschnitt wurde im Nassverfahren (vgl. Kapitel 3.6) zerkleinert.

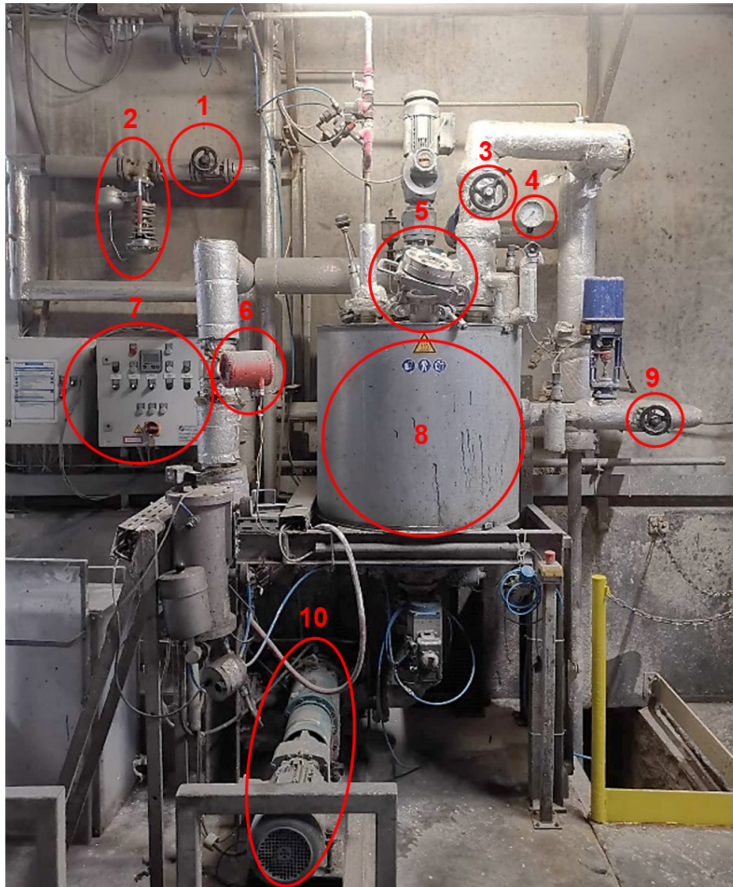


Hinweis: Der in dieser Abbildung dargestellte Versuchsaufbau orientiert sich am in der Praxis eingesetzten Recyclingverfahren. In der Praxis wird Brauchwasser anstelle von Frischwasser eingesetzt, die Zerkleinerung der GFP erfolgt als Nasszerkleinerung und der entstehende Gipsschlamm wird ohne vorherige Entwässerung direkt in die Nasskalzinierung überführt.

Abbildung 19: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Verwertung von GKP, GFP, Gipsschlamm und Schleifstaub aus der GFP- bzw. GKP- Produktion für die Herstellung neuer Doppelbodenplatten (eigene Darstellung)

Die aufbereiteten gipshaltigen Bauabfälle wurden je nach Rezeptur einzeln oder kombiniert im hydrothermalen Suspensionsverfahren nasskalzinieren, wobei α -Halbhydrat (α -HH) entsteht. Diese Form der Kalzinierung führt zur Ausbildung kompakter, gut strukturierter Gipskristalle (vgl. Kapitel 3.1), was die Produkteigenschaften verbessert und mehrfache Recyclingzyklen ermöglicht.

Die Nasskalzinierung erfolgte in einem doppelwandigen Spitzboden-Rührbehälter mit einem Volumen von 160 Litern und einem Mantelvolumen zur Beheizung von 16 l. Die Beheizung des Mantels erfolgt mit Sattdampf (max. 8 bar), gesteuert über verschiedene Ventile und Messinstrumente (Abbildung 20). Das Ankerrührwerk sorgte bei ca. 40 U/min für eine homogene Durchmischung der Suspension während der Kalzinierung. Die Antriebsleistung betrug 750 Watt. Die Temperaturmessung erfolgte im Konus des Behälters, während der Druck im oberen, nicht produktberührten Bereich des Reaktionsraumes gemessen wurde. Zusätzlich wurde der Druck in der Zuleitung des Dampfes zum Mantel erfasst.



1. Ventil 1: Öffnen und Schließen der Dampfzufuhr
2. Regelventil: Regulierung des einzuleitenden Sattedampfdruckes
3. Ventil 2: Druckregulierung im Reaktorkessel
4. Manometer 1: Kesselinnendruck
5. Einfüll-Luke
6. Durchflussmesser
7. Schaltschrank: Hauptschalter und Schalter für Rührwerk, Temperatur- und Druckanzeige
8. Reaktorkessel
9. Ventil 3: Beheizung des Reaktormantels
10. Pumpe zur Materialumwälzung

Abbildung 20: Versuchsreaktor für die Umwandlung von gipshaltigen Bauabfällen zu α -HH-Suspension (eigene Aufnahme)

Der Ablauf der Kalzinierung startete mit der Dosierung des Wassers, gefolgt von der Zugabe des abgewogenen Gips-Faser-Gemischs und Bernsteinsäure bei laufendem Rührwerk. Anschließend wurde der Reaktor geschlossen und das Gemisch auf die Zieltemperatur von 125 °C erhitzt, um eine optimale Umwandlung zu α -HH bei gleichzeitig geringer spezifischer Oberfläche zu erzielen. Bei dieser Temperatur wird in diesem Verfahren der optimale Kompromiss zwischen einer raschen Umwandlung zu α -HH und einer geringen spezifischen Oberfläche erreicht.²³³ Nach dem Erreichen der Zieltemperatur von 125 °C (Zeit = 0 Minuten) begann die Haltezeit, in der alle 15 Minuten Proben entnommen wurden, bis die Umwandlung zu α -HH abgeschlossen war (Abbildung 21). Die Methodik zur Bestimmung des Umwandlungsfortschrittes ist im Anhang C beschrieben.

²³³ [Aschern, 2011], S. 61.

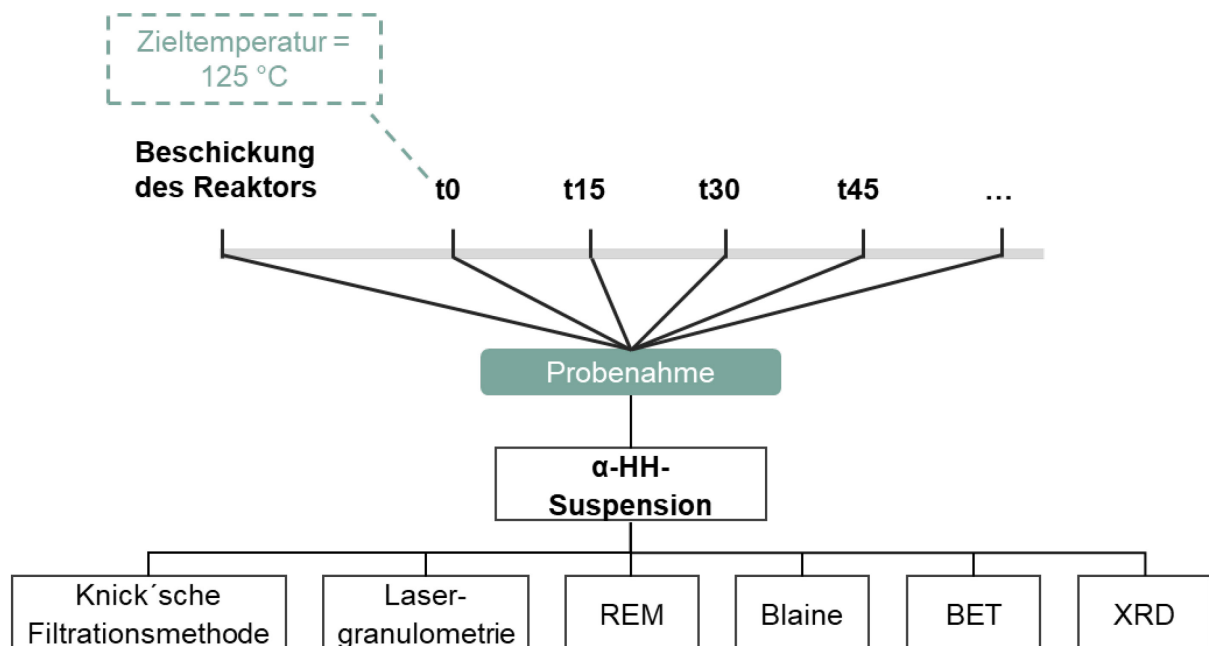


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Probenahme des Gips-Faser-Gemisches zur Bestimmung des Umwandlungsfortschrittes von Gips zu α -HH und die Analytik zur Charakterisierung der α -HH-Suspension (eigene Darstellung)

Nach Abschluss der Nasskalzinierung wurde die α -HH-Suspension abgelassen und mit definiertem Stuckgips, Papierfaserpulpe und einem proteinbasierten Verzögerer für 180 Sekunden in einem Technikumschargenmischer zu einer Gipsfasermischung verarbeitet. Die weiteren Prozessschritte (Pressen und Bruchlastprüfung) erfolgten analog zum Vorgehen zur Analyse der Armierungswirkung von Faserstoffen in Doppelbodenplatten (vgl. Kapitel 5.3.1).

Die Methodik ermöglichte die quantifizierte Analyse des Einflusses einzelner gipshaltiger Bauabfälle sowie deren qualitativer Zusammensetzung auf die Umwandlungsgeschwindigkeit des Gipses zu α -HH. Die systematische Variation der Stoffe lieferte entscheidende Einblicke in die Reaktionskinetik und die daraus resultierenden Materialeigenschaften.

Parallel wurden die Auswirkungen heterogener Materialeigenschaften der gipshaltigen Bauabfälle, einschließlich der Wirkung von Additiven wie hydrophoben Mitteln, mineralischen Nebenbestandteilen (z. B. Dolomit) oder unterschiedlicher Gipsquellen (REA-Gips versus Naturgips) auf die Substituierbarkeit der Ausgangsmaterialien in der Produktion mit Blick auf die zu erreichenden Produktfestigkeiten sowie die Einhaltung einer standardisierten Presszeit evaluiert.

5.3.3. Vorgehen zur modellbasierten Analyse des kombinierten Einflusses von Gips- und Faserstoffeigenschaften auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten

Im dritten Schritt wurde das prädiktive Regressionsmodell verwendet, um den Zusammenhang zwischen Fasereigenschaften, Gipseigenschaften sowie der Gips-Faser Interaktion und der Bruchlast von Doppelbodenplatten zu beschreiben.

Zunächst wurde das Regressionsmodell (vgl. Kapitel 7.3) genutzt, um spezifische Erkenntnisse zum Einfluss von Gipseigenschaften, insbesondere des Anteils von α -Halbhydrat (α -HH), sowie der komplexen Gips-Faser-Interaktion auf die Bruchlast vertieft zu analysieren. Hierfür wurden ausgewählte Versuche aus Kapitel 7 und 8 sowie zusätzliche Ergänzungsversuche (vgl. Anhang M, Tabelle M 1) ausgewertet. Die daraus berechneten Bruchlasten wurden mit den in den Versuchen gemessenen Bruchlasten verglichen. So ließ sich beurteilen, inwieweit sich die Produktfestigkeit bei wechselnden Gipsqualitäten allein auf Basis der Fasereigenschaften zuverlässig vorhersagen lassen. Zudem konnten durch die Kombination aus Modellrechnung und experimenteller Überprüfung sowohl die Einflüsse einzelner Parameter als auch Wechselwirkungen zwischen Gipsmatrix und Fasern identifiziert und quantifiziert werden. Auf dieser Grundlage wurden konkrete Empfehlungen für Rezeptur und Materialauswahl abgeleitet, die eine sichere Einhaltung der Festigkeitsanforderungen und eine stabile Produktqualität unterstützen.

6. Charakterisierung von Gips und Kartonummantelung sortenreiner GKP

Aufgrund der unterschiedlichen Rohstoffquellen kann die Qualität des gipshaltigen Materials in GKP erheblich variieren. Von besonderer Bedeutung ist dabei, ob REA-Gips oder Naturgips verwendet wurde sowie aus welchen Abbaugebieten der Naturgips stammt. Zusätzlich beeinflussen der Typ der GKP sowie die darin enthaltenen Additive die Materialeigenschaften maßgeblich. Diese Unterschiede führen dazu, dass Gipse verschiedener Produktionsstandorte und Hersteller hinsichtlich ihrer Phasenzusammensetzung, Verunreinigungen und weiteren Qualitätsparametern deutliche Schwankungen aufweisen können.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die ermittelten Phasenzusammensetzungen der GKP vorgestellt. Grundlage bilden 20 GKP-Proben der Typen A, DF und H2 aus acht Werken zweier Hersteller, deren Eigenschaften nach Plattentyp und Produktionsstandort ausgewertet wurden. Zusätzlich werden die Ergebnisse zur Kristallmorphologie sowie zu den Fasereigenschaften der GKP vorgestellt. Ziel dieser Analysen ist es, die erwartbaren Gips- und Faserstoffqualitäten, typischen Verunreinigungen und deren Variabilität in Abhängigkeit von Plattentyp und Produktionswerk zu erfassen. Diese Kenntnisse sind für eine gezielte Anpassung von Rezepturen und Prozessparametern sowie für die Sicherung einer konstanten Produktqualität in der nachgelagerten Fertigung unabdingbar. Die Probenvorbereitung ist im Anhang E detailliert dargestellt.

6.1. Phasenzusammensetzung von Gips aus GKP

Die Phasenzusammensetzung der untersuchten Gipse wurde mittels Röntgenbeugungsanalyse und Rietveld-Methode ermittelt und ist in Tabelle 12 dargestellt. Diffraktogramme ausgewählter Proben sind dem Anhang F (vgl. Abbildung F 2) zu entnehmen. In allen Proben konnten sowohl Halbhydrat und Anhydritphasen als auch geringe Mengen Quarz nachgewiesen werden. Mineralische Nebenbestandteile wie Dolomit, Magnesit und Calcit fanden sich in etwa 70 % der Proben mit Anteilen von bis zu 11 M.-% (SH1 – SH3; Werk Hartershofen). Diese können natürlichen Ursprungs²³⁴ sein oder als technische Additive (z. B. Tonminerale für Brandschutz²³⁵) eingesetzt werden. Für das Recycling sind diese Bestandteile relevant, da sie zu Beeinträchtigung der Produktfestigkeit²³⁶ und Produktionsprozesse sowie

²³⁴ [Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2013], S. 14.

²³⁵ [Pöllmann, 2017], S. 290.

²³⁶ [Schneider, 2010], S. 96.

durch ihren höheren Härtegrad²³⁷ zu erhöhtem Maschinenverschleiß²³⁸ führen können. In 60 % der untersuchten Proben wurden Glasfasern (vgl. Anhang F, Abbildung F 1) nachgewiesen. Da diese weder in Naturgips noch in REA-Gips vorkommen und typischerweise nur Feuerschutzplatten zugesetzt werden, deutet dies darauf hin, dass bei der GKP-Produktion RC-Gips oder Produktionsreste verwendet wurden. Weitere mögliche Ursachen können Chargenwechsel sein oder eine gezielte Zugabe von Glasfasern zur Verbesserung der Festigkeit bei geringer Gipsreinheit. Erhöhte Anteile von Halbhydrat, etwa in den Werken Iphofen 1 (6 bis 8 M.-%), Lauffen (7,5 bis 9,5 M.-%) und Rottleberode (6 bis 8,5 M.-%), deuten auf eine Ankalzinierung durch Trocknungsprozesse oder unvollständige Umwandlung im Abbindeprozess bei der GKP-Herstellung hin. Die erhöhten Anhydritanteile resultiert hingegen entweder aus der natürlichen Lagerstättenqualität oder aus zu hohen Temperaturen im vorangehenden Kalzinierungsprozess.

Tabelle 12: Phasenzusammensetzung von Gips aus verschiedenen GKP

Probe	Typ	Werk	DH ¹ M.-%	HH ² M.-%	Anhydrit M.-%	Quarz M.-%	Dolomit M.-%	Magnesit M.-%	Calcit M.-%
L1	A ³	Iphofen_1	82,83	7,93	5,37	0,40	3,47	0	0
L2	H2 ⁴	Iphofen_1	82,63	6,09	4,77	0,98	5,53	0	0
K1	H2	Iphofen_2	86,05	5,13	4,57	0,51	3,74	0	0
K4	DF ⁵	Iphofen_2	79,17	4,19	4,32	0,89	3,94	0	7,49
L3	DF	Weissenbach	84,72	5,54	2,77	0,79	4,52	1,66	0
K2	A	Lauffen	78,63	7,51	1,85	1,49	10,52	0	0
K3	H2	Lauffen	80,10	9,46	0,99	1,34	8,11	0	0
K5	DF	Lauffen	77,34	8,74	1,51	1,51	10,90	0	0
BM1	DF	Rottleberode	83,02	8,52	1,83	1,04	0	2,16	3,34
BM2	H2	Rottleberode	77,13	5,87	5,70	4,51	0	3,66	3,13
BM3	A	Rottleberode	81,41	6,57	5,02	1,16	0	3,26	2,58
SP1	A	Peitz	94,56	2,09	2,27	1,08	0	0	0
SP2	H2	Peitz	93,79	3,86	1,90	0,45	0	0	0
SP3	DF	Peitz	95,83	2,04	1,50	0,63	0	0	0
SL1	A	Lippendorf	98,1	1,10	0,44	0,36	0	0	0
SL2	H2	Lippendorf	97,64	1,38	0,50	0,48	0	0	0
SL3	DF	Lippendorf	96,52	2,21	0,56	0,71	0	0	0
SH1	A	Hartershofen	77,79	4,43	4,18	0,98	11,44	0	1,18
SH2	H2	Hartershofen	77,83	4,89	4,32	1,23	11,23	0	0,50
SH3	DF	Hartershofen	78,47	4,81	3,42	1,28	11,64	0	0,38

¹ Calciumsulfatdihydrat

² Calciumsulfathalbhydrat

³ GKP Bauplatte

⁴ GKP Bauplatte imprägniert

⁵ GKP Feuerschutzplatte

²³⁷ [Müller M., 2007], S. 65.

²³⁸ [Pöllmann, 2017], S. 290.

Der Dihydratgehalt ist ein zentraler Indikator für die Reinheit von Gips. In Abbildung 22 sind die Dihydratgehalte für die untersuchten GKP für die einzelnen Typen nach Produktionswerk gruppiert dargestellt. Zwischen den einzelnen Produktionswerken unterscheiden sich die Gipsgehalte deutlich. Während der Gipsgehalt der GKP aus den Werken Lippendorf (DH = ~97 %) und Peitz (DH = ~94%) auf die Verwendung von REA-Gips hinweist, deuten die Gipsgehalte (DH = 77 bis 86 %) in Kombination mit mineralischen Nebenbestandteilen und Glasfasern in den übrigen Werken auf die Verwendung von Naturgips²³⁹ oder RC-Gips hin. Zudem ist in Abbildung 22 zu erkennen, dass innerhalb eines Werkes die Zusammensetzung des Bindemittels meist unabhängig vom Plattentyp und weitgehend homogen ist. Die Zusammensetzung des Gipses wird folglich primär vom jeweiligen Produktionswerk und der dort verwendeten Gipse beeinflusst.

Etwa 35 % der Gipse der untersuchten GKP erfüllen nicht die Mindestanforderung des Bundesverbandes der Gipsindustrie hinsichtlich der Qualität für Recyclinggips (vgl. Tabelle 5) unter Beachtung werksspezifischer Abweichungen (DH $\geq$ 80 M.-%). Ohne werksspezifische Abweichungen (DH $\geq$ 85 M.-%) erfüllen 65 % der GKP die Anforderungen für die Reinheit des Gipses nicht.

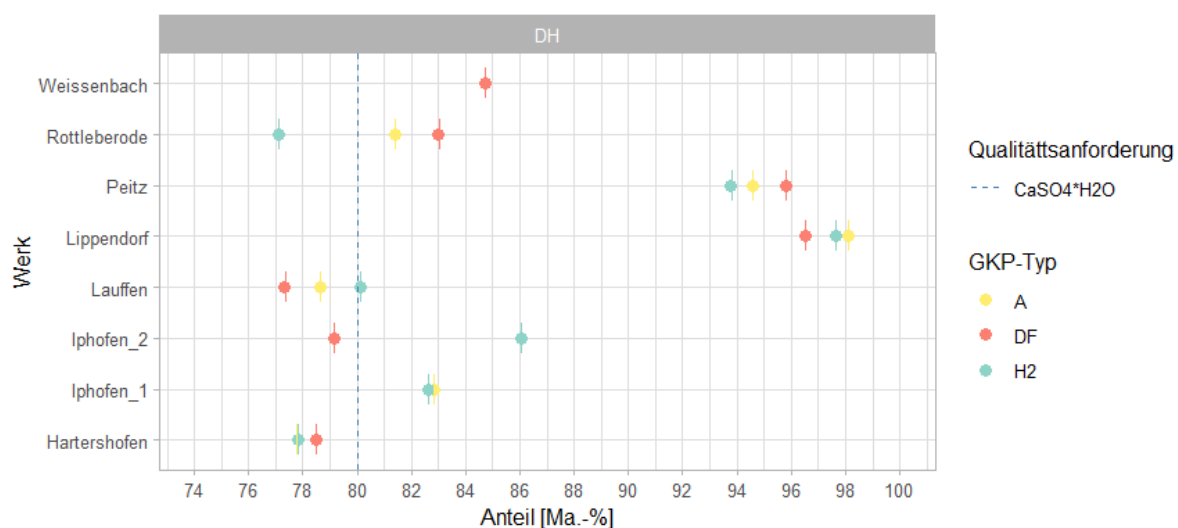


Abbildung 22: Dihydratgehalt von Gips aus GKP (Typ A, DF und H2) aus verschiedenen Produktionswerken (eigene Darstellung)

Für die Wiederverwendung von Gips in der Herstellung von GFP ist insbesondere der Anteil des rehydratisierbaren Gipses (entspricht der Summe aus DH und HH) aufgrund seines Einflusses auf die Festigkeitsentwicklung ein wichtiger Parameter. Im Suspensionsverfahren wird das vorhandene HH vollständig zu DH rehydratisiert und trägt damit wesentlich zur Festigkeitsbildung bei. Anhydrit II bleibt hingegen in Gegenwart abbindehemmender

²³⁹ [Henning, 2025].

Zusatzstoffe, beispielsweise organischer Fasern, weitgehend inert und leistet keinen Beitrag zur Endfestigkeit. Dies kann zu einer Verringerung der Produktfestigkeiten führen.

In Abbildung 23 werden die werkstofftypischen Schwankungen des rehydratisierbaren Anteils in den untersuchten Gipskernproben dargestellt. Diese liegen zwischen 82 und 99 M.-% (Median: 88 M.-%). Für den Einsatz dieser Sekundärgipse in der GFP-Herstellung können daher Rezepturanpassungen oder eine Begrenzung des Zumischungsanteils erforderlich sein.

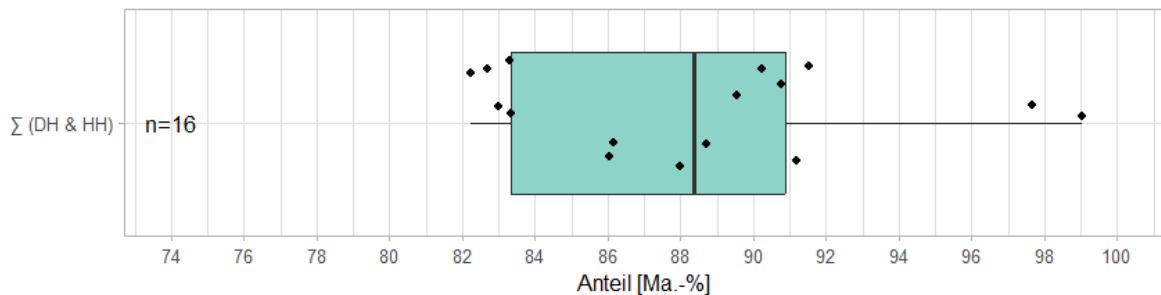


Abbildung 23: Rehydratisierbarer Anteil von Gips aus GKP (Typ A, DF und H2) aus verschiedenen Produktionswerken (eigene Darstellung)

Derzeit ist eine werksspezifische Rückverfolgung und Vorsortierung von Gipskartonplatten-Abfällen (GKP) technisch nicht realisierbar, weshalb die spezifischen Materialeigenschaften einzelner Plattenchargen bei der Verwertung nicht berücksichtigt werden können. Der absehbare Rückgang des REA-Gipses wird zu einem erhöhten Einsatz von Naturgips und Recyclinggips (RC-Gips) führen, wodurch sowohl eine Verringerung der Gesamtgipsreinheit als auch des rehydratisierbaren Anteils zu erwarten ist. Darüber hinaus können gipshaltige Bauabfälle aus dem Rückbau Anhaftungen mineralischer Störstoffe aus Haft- und Spachtelmassen aufweisen, was die Gipsqualität zusätzlich beeinträchtigen kann.

Die variablen Phasenzusammensetzungen von Natur- und Recyclinggips (RC-Gips) erschweren die Gewährleistung einer gleichbleibenden Gipsqualität im Recyclingprozess. Vor dem Hintergrund der ermittelten Materialqualitäten erscheinen die Qualitätsempfehlungen des Bundesverbands der Gipsindustrie nur schwer erreichbar. Eine Anpassung dieser Richtwerte an realitätsgerechte Zusammensetzungen sollte daher in Betracht gezogen werden.

Für den Einsatz dieser Gipse zur Herstellung neuer GFP sollte eine regelmäßige, chargenweise DH/HH-Bestimmung etabliert werden, um erforderliche Rezepturanpassungen vornehmen und stabile GFP-Endfestigkeiten sicherzustellen zu können. Mit zunehmendem RC-Gips-Anteil sollten die Qualitätsanforderungen fortlaufend überprüft und validiert werden.

6.2. Kristallmorphologie von Gips aus GKP

Die Kristallmorphologie wurde mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht. Da auf Grundlage der Ergebnisse zur Phasenzusammensetzung davon auszugehen ist, dass innerhalb eines Produktionswerks Gipse mit weitgehend homogener Zusammensetzung

verwendet werden, wurde auf eine vollständige Beprobung aller Materialien verzichtet. Stattdessen erfolgte eine Auswahl von insgesamt zwölf Proben²⁴⁰, die jeweils exemplarisch für die verschiedenen Werke und Materialtypen stehen. Durch diese Auswahl soll eine hinreichende Abdeckung der werksspezifischen Varianz gewährleistet werden.

In Abbildung 24 sind die typische Oberflächenstruktur, Kristallmorphologie sowie mineralische Nebenbestandteile von Gips aus GKP zu sehen. Die Kraterstruktur auf der Oberfläche (Abbildung 24, links) weist auf den Einsatz von Schaumbildnern hin, die Poren in der Gipsmatrix erzeugen und damit das Flächengewicht gezielt verringern und so den Material- und Ressourceneinsatz reduzieren. Zudem sind Glasfasern (rot) und Papierfasern (grün) sichtbar. In (Abbildung 24, rechts) ist die charakteristische Kristallmorphologie der GKP dargestellt. Sie zeichnet sich durch eng verzahnte nadelige bis plattige Kristalle mit einer Größe $< 8 \mu\text{m}$ und einem Längen-Breiten-Verhältnis von 1 bis 6 aus. Größere Partikel sind auf mineralische Nebenbestandteile (blau) zurückzuführen. Diese kristallmorphologische Ausprägung wurde über alle Proben beobachtet. Die Verteilung und Form der Kristalle beeinflussen maßgeblich die Verfestigung sowie die Verarbeitbarkeit²⁴¹ der Gipsplatten und sind für diese Arbeit von zentraler Bedeutung, da sie die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Doppelbodenplatten und deren Eignung für den Einsatz gipshaltiger Bauabfälle direkt mitbestimmen.

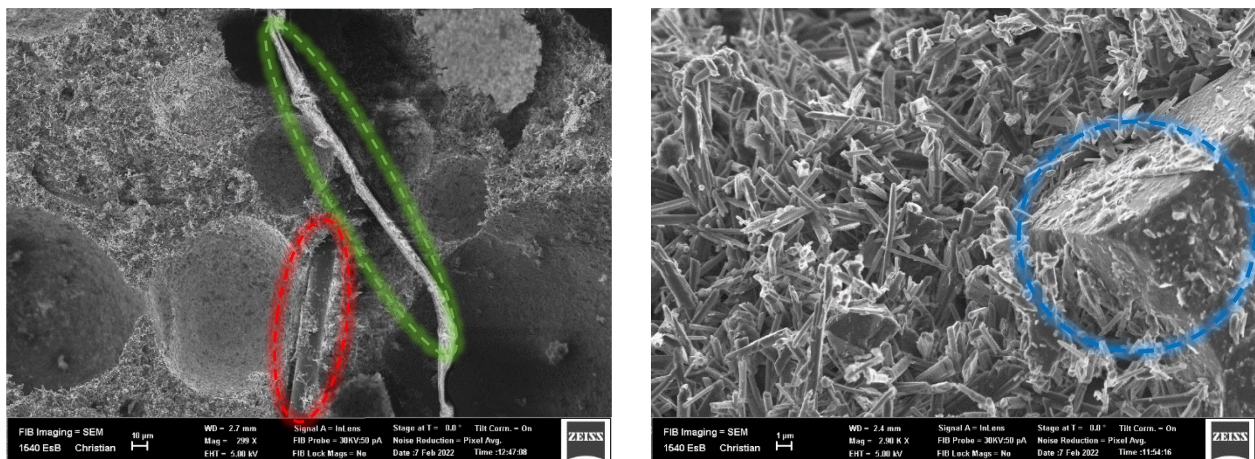


Abbildung 24: Aufnahme von GKP Typ DF (SH3) mit einem Rasterelektronenmikroskop in 300-facher Vergrößerung mit Glasfasern (rot) und Papierfaser (grün) (links) und 2900-facher Vergrößerung mit typischen nadeligen und plattigen Kristallmorphologien und mineralischen Nebenbestandteilen (blau) (rechts) (eigene Aufnahmen)

²⁴⁰ L1, L2, K1, K4, L3, K5, BM2, SP1, SL1, SH1, SH2, SH3 (vgl. Tabelle 12)

²⁴¹ [Pritzel et al., 2017], S. 291.

6.3. Faserstoffeigenschaften der Kartonummantelung von GKP

Die Kartonummantelung von Gipskartonplatten (GKP) besteht überwiegend aus Altpapierfasern pflanzlicher Herkunft, insbesondere von Nadel- und Laubhölzern. Diese Kartonalage ist maßgeblich für die mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften von GKP. Wichtige Auswahlkriterien für den Karton sind Festigkeit, Luftdurchlässigkeit, Dehnung und Flächengewicht. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kartonummantelung als Substitut für Altpapier in GFP eingesetzt. Für die mechanischen Eigenschaften von GFP sind jedoch spezifische Fasereigenschaften z. B. Faserlänge, Faserdicke, Feinanteil entscheidend.²⁴² Diese beeinflussen die Einbindung der Fasern in die Gipsmatrix und die Belastbarkeit des Verbundes. Die analytische Erfassung dieser Eigenschaften ist daher notwendig, um die Eignung der Kartonummantelung als Altpapierersatz qualitativ bewerten zu können.

Die Fasereigenschaften wurden mittels Valmet Fibre Analyzer an Kartonummantelungen der Vorder- und Rückseite von GKP Bauplatte Typ A und GKP Bauplatte imprägniert Typ H zweier Hersteller untersucht. In Tabelle 13 sind ausgewählte Parameter der GKP-Kartone dargestellt. Zur Einordnung wurden zusätzlich ein krafthaltiges Altpapier (Krafthaltige Sorte 8) und ein Altpapier einer unteren Sorte (Untere Sorte 2) berücksichtigt. Die Ergebnisse der Faserstoffanalyse zeigen geringe bis moderate Variationen in den Parametern Faserlänge, Mahlgrad, Feinanteil, Holzstoff- und Ascheanteil zwischen den untersuchten GKP-Kartonen. Damit können die GKP-Kartone qualitativ als weitgehend homogen und auf vergleichbarem Niveau liegend bewertet werden. Im Vergleich zu den standardisierten Altpapiersorten²⁴³, weisen die untersuchten Kartonummantelungen Eigenschaften auf, die den weniger reißfesten Sorten entsprechen. Diese sind typischerweise durch stark beanspruchte, verkürzte Fasern und einen erhöhten Holzstoffanteil charakterisiert.²⁴⁴ Dies deutet darauf hin, dass für die Herstellung der Kartonummantelung überwiegend Altpapiere der unteren bis mittleren Sorte gemäß der Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten²⁴⁵ eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu zeichnen sich kraftstoffhaltige, zellstoffreiche Sorten durch signifikant höhere Faserlängen und geringere Holzstoffanteile aus, wodurch sie im Ergebnis höhere Reißfestigkeiten aufweisen.

²⁴² [Coutts, 1991].

²⁴³. [DIN EN 643:2014-11, 2014].

²⁴⁴ [Gruber, E., 2011], S. 15.

²⁴⁵ [DIN EN 643, 2014].

Tabelle 13: Ausgewählte Parameter der Faserstoffqualität von GKP-Karton (Vorderseite und Rückseite) zweier Hersteller im Vergleich mit Altpapier der krafthaltigen und unteren Sorte

Hersteller	Bezeichnung	Faserlänge ¹ [mm]	Feinanteil [%]	Feinanteil B [%]	Mahlgrad [SR°]	Holzstoffanteil [M.-%]	Ascheanteil [M.-%]
Hamburger Containerboard	Vorderseite GKP Typ A	1,20	86,6	7,0	39	49,9	13,8
Hamburger Containerboard	Rückseite GKP Typ A	1,07	86,0	6,8	39	49,1	13,8
Hamburger Containerboard	Vorderseite GKP Typ H	1,09	87,3	9,8	39	52,8	11,2
Hamburger Containerboard	Rückseite GKP Typ H	1,12	83,6	6,8	39	51,9	11,1
WEIG	Vorderseite GKP Typ A	1,21	86,8	11,0	39	56,6	8,8
WEIG	Rückseite GKP Typ A	1,13	86,7	9,5	39	48,1	9,7
Mittelwert		1,14	86,2	8,5	39	51,4	11,4
Standardabweichung		0,05	1,2	1,7	0	2,81	1,9
Vergleichswerte							
Altpapier	Krafthaltige Sorte 8	1,96	81,2	4,8	17	3,1	1,7
Altpapier	Untere Sorte 2	0,94	89,2	16,2	54	58,1	20,8

¹Längengewichte mittlere Faserlänge nach ISO 16065.

7. Quantitative Bewertung der Faserstoffarmierung am Beispiel von Doppelbodenplatten

Im vorliegenden Kapitel erfolgt eine Analyse der Armierungswirkung von Faserstoffen in GFP am Beispiel von Doppelbodenplatten. Die Untersuchung zielt darauf ab, die Abhängigkeit zwischen Faserstoffeigenschaften und der Bruchlast zu ermitteln. Dazu wurden Doppelbodenplatten aus 100 % Stuckgips (β -HH) und diversen Faserstoffen mit unterschiedlichen Faserstoffeigenschaften hergestellt. Ziel ist, jene Fasereigenschaften zu identifizieren, die einen relevanten Einfluss auf die Bruchlast ausüben, sowie die jeweilige Stärke dieses Effekts zu quantifizieren. Zu diesem Zweck erfolgt eine statistische Auswertung mittels multipler linearer Regression. Die statistische Auswertung und Modellbildung wurden mit RStudio (Posit Software, 2024)²⁴⁶ durchgeführt.²⁴⁷ Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Prognosemodell entwickelt, mit dem die Bruchlast anhand von Faserstoffeigenschaften prognostiziert werden kann.

Im Folgenden wird zunächst der verwendete Datensatz näher erläutert. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Bruchlastmessungen vorgestellt und der lineare Zusammenhang zwischen diesem und den ermittelten Fasereigenschaften sowie des Fasergehaltes dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Regressionsanalyse beschrieben und interpretiert. Zum Abschluss wird die Modellgüte validiert.

7.1. Eingangsdaten für die statistische Analyse und das Regressionsmodell

Der Datensatz für die in diesem Kapitel durchgeführten statistischen Auswertungen und zur Entwicklung des Regressionsmodells ist in Tabelle 14 dargestellt. Mit insgesamt 35 Beobachtungen wird die Anforderung an die Stichprobengröße für eine statistisch belastbare Modellierung eingehalten.²⁴⁸ Das methodische Vorgehen sowie die Versuchsparameter und Rezepturen zur Erhebung der Eingangsdaten sind in Kapitel 5.3.1 beschrieben.

Die Parameter Holzstoffanteil, Ascheanteil sowie Feinanteil, Feinanteile A und Feinanteil B wurden an den jeweiligen Faserstoffen ermittelt. Für die Beschreibung der linearen Zusammenhänge sowie der Modellierung ist jedoch der jeweilige Anteil dieser Parameter innerhalb der Doppelbodenplatte relevant.

²⁴⁶ [Posit, 2024].

²⁴⁷ Die Berechnungen erfolgten in R (R Core Team, 2024) unter Verwendung der Funktion „lm()“ aus dem Paket „stats“.

²⁴⁸ [Stoetzer, 2017], S. 198.

Deshalb werden die Werte auf den Fasergehalt der Doppelbodenplatte bezogen und nach Gleichung (3) berechnet:

$$FE_{GFP} = FE_F \times FGH \quad (3)$$

FE_{GFP} : Anteil jeweilige Faserstoffeigenschaft in GFP

FE_F : Anteil jeweilige Faserstoffeigenschaft in Faserstoff

FGH : Fasergehalt der GFP

Dieses Vorgehen stellt sicher, dass bei unterschiedlichen Fasergehalten die Wirkung der einzelnen Faserstoffeigenschaften korrekt den entsprechenden Einflussgrößen zugeordnet und nicht fälschlicherweise dem Fasergehalt zugeschrieben wurden. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden sämtliche Faserstoffeigenschaften auf Basis der fertigen Doppelbodenplatte angegeben und entsprechend als Holzstoffanteil_GFP, Ascheanteil_GFP, Feinanteil_GFP, Feinanteil_A_GFP sowie Feinanteil_B_GFP bezeichnet.

Tabelle 14: Eingangsdaten zur Analyse der Armierungswirkung von Faserstoffeigenschaften auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten

Nr.	Faserstoff	Bruchlast [N]	Faser- gehalt_GFP [M.-%]	Faserlänge_I SO_I [mm]	Holzstoffanteil _GFP [%]	Feinanteil_A _GFP [%]	Feinanteil_B _GFP [%]	Feinanteil_ GFP [%]	Ascheanteil_ GFP [%]	Mahl- grad [SR°]	Faser- dicke [µm]	Faser- krümmung [%]	Faser- feinheit [mg/m]
V1	Untere Sorte 1.	5844	3,66	1,02	2,98	1,61	0,83	3,31	0,9	60	27,33	8,36	0,28
V2	Untere Sorte 2	5864	3,40	1,07	1,97	1,35	0,55	3,03	0,7	54	25,29	7,60	0,24
V3	Mittlere Sorte 1	5918	4,72	1,07	3,62	1,83	1,04	4,20	0,7	48	26,41	8,42	0,26
V4	Mittlere Sorte 2	6146	4,00	1,02	2,44	1,67	1,03	3,58	0,6	48	24,31	7,61	0,24
V5	Bessere Sorte 1	6000	4,46	0,79	2,79	1,09	0,05	3,36	0,9	32	22,41	6,31	0,19
V6	Bessere Sorte 2	7213	6,32	1,08	0,00	1,16	0,15	4,78	0,1	17	24,76	11,85	0,21
V7	Bessere Sorte 3	7396	5,57	1,06	0,25	1,20	0,10	4,39	0,7	21	20,73	7,83	0,14
V8	Krafthaltige Sorte 2	7657	4,50	1,10	0,17	0,76	0,03	3,39	0,9	22	24,11	8,30	0,21
V9	Krafthaltige Sorte 2	7020	6,61	1,10	0,25	1,12	0,04	4,97	1,4	22	24,11	8,30	0,21
V10	Krafthaltige Sorte 2	8037	3,19	1,10	0,12	0,54	0,02	2,40	0,7	22	24,11	8,30	0,21
V11	Krafthaltige Sorte 2	8055	4,08	1,10	0,16	0,69	0,02	3,07	0,8	22	24,11	8,30	0,21
V12	Krafthaltige Sorte 2	7996	4,84	1,10	0,18	0,82	0,03	3,64	1,0	22	24,11	8,30	0,21
V13	Krafthaltige Sorte 2	7462	5,87	1,10	0,22	1,00	0,03	4,42	1,2	22	24,11	8,30	0,21
V14	Krafthaltige Sorte 1	7416	5,23	1,81	0,83	1,42	0,55	4,62	0,4	19	30,16	9,90	0,30
V15	Krafthaltige Sorte 3	7556	5,23	1,35	0,00	1,05	0,15	4,05	0,3	21	23,00	9,98	0,18
V16	Krafthaltige Sorte 4	7807	5,17	1,52	2,02	1,29	0,20	4,43	0,3	29	31,03	8,38	0,34
V17	Krafthaltige Sorte 5	8339	4,71	1,69	0,09	0,70	0,17	3,50	0,0	19	28,87	9,10	0,27
V18	Krafthaltige Sorte 5	7966	5,44	1,69	0,10	0,81	0,20	4,04	0,0	19	28,87	9,10	0,27
V19	Krafthaltige Sorte 6	7907	4,53	1,94	0,29	1,04	0,30	3,92	0,1	14	32,23	8,16	0,34
V20	Krafthaltige Sorte 6	7586	5,40	1,94	0,35	1,24	0,36	4,67	0,1	14	32,23	8,16	0,34
V21	Krafthaltige Sorte 6	7448	6,43	1,94	0,42	1,48	0,43	5,56	0,2	14	32,23	8,16	0,34
V22	Krafthaltige Sorte 7	8057	4,43	1,29	0,62	1,01	0,15	3,61	0,3	25	23,35	7,31	0,19
V23	Krafthaltige Sorte 8	7884	7,09	1,96	0,21	1,41	0,34	5,76	0,1	17	29,25	10,04	0,27
V24	GKP H (vorne)	6567	5,04	1,09	2,66	1,78	0,49	4,40	0,6	39	25,23	7,53	0,24
V25	GKP H (hinten)	6829	4,79	1,12	2,49	1,56	0,33	4,12	0,5	39	25,59	7,19	0,24
V26	GKP A (vorne)	6773	4,77	1,20	2,38	1,51	0,33	4,13	0,7	39	26,40	7,44	0,26
V27	GKP A (vorne)	6017	5,89	1,20	2,94	1,86	0,41	5,10	0,8	39	26,40	7,44	0,26
V28	GKP A (vorne)	6996	3,68	1,20	1,84	1,16	0,26	3,19	0,5	39	26,40	7,44	0,26
V29	GKP A (vorne)	7318	4,42	1,20	2,21	1,40	0,31	3,83	0,6	39	26,40	7,44	0,26
V30	GKP A (hinten)	6459	4,87	1,07	2,39	1,39	0,24	4,19	0,7	39	24,21	7,94	0,22
V31	GKP A (hinten)	6223	4,81	1,07	2,36	1,93	0,41	4,14	0,7	39	24,21	7,94	0,22
V32	Papiermix	7627	5,88	1,46	1,23	1,68	0,37	4,95	0,4	14	27,77	8,80	0,26
V33	Papiermix	7757	3,96	1,46	0,83	1,13	0,25	3,33	0,3	14	27,77	8,80	0,26
V34	Papiermix	7469	5,72	1,46	1,19	1,63	0,36	4,81	0,4	14	27,77	8,80	0,26
V35	Papiermix	6361	8,29	1,46	1,73	2,36	0,52	6,98	0,5	14	27,77	8,80	0,26

7.2. Analyse der linearen Zusammenhänge zwischen Faserstoffeigenschaften und Bruchlast von Doppelbodenplatten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuchsreihe zur Analyse der Armierungswirkung von Faserstoffen in Doppelbodenplatten (vgl. Kapitel 5.3.1) dargestellt. Dabei wird die Bruchlast der Doppelbodenplatte in Abhängigkeit von der Papierart sowie den Faserstoffeigenschaften dargestellt und bewertet. Zudem wird der Zusammenhang zwischen den Faserstoffeigenschaften, dem Fasergehalt und der Bruchlast anhand einer Pearson-Korrelationsmatrix analysiert.

7.2.1. Analyse der Bruchlast von Doppelbodenplatten mit variierenden Faserstoffen und Fasergehalten

Für jeden Versuch wurden aus einer homogenen Nassmischung aus Stuckgips, definierten Faserstoffen und Faserstoffanteilen sowie Wasser zwei Doppelbodenplatten gefertigt. In Abbildung 25 sind die mittleren Bruchlasten der beiden Platten pro Versuch dargestellt, wobei die Schwankungen zwischen den Platten als Fehlerbalken (Whisker) visualisiert sind. Es zeigt sich, dass selbst bei identischen Ausgangsmaterialien vereinzelt deutliche Unterschiede zwischen den Bruchlasten der Platten eines Versuchs auftreten können, mit einer maximalen Differenz von 900 N (~15 %) und einer durchschnittlichen Abweichung von 290 N (~4 %). Diese Schwankungen sind auf prozessbedingte Einflussfaktoren zurückzuführen.

Die höchsten Bruchlasten werden von Doppelbodenplatten erzielt, die mit krafthaltigen Altpapiersorten²⁴⁹ armiert sind, was auf die besonders ausgeprägte Armierungswirkung dieser Faserstoffe hinweist. Doppelbodenplatten mit dem Faserstoff „Papiermix“, der zu 50% aus krafthaltigem Altpapier besteht, erreichen bei Fasergehalten zwischen 4 M.-% und 5,9 M.-% Bruchlasten auf einem vergleichbaren Niveau. Tendenziell sind für Doppelbodenplatten mit Faserstoffen aus niedrigeren Altpapierkategorien geringere Bruchlasten zu beobachten. Die aus Altpapier der Gruppe der „besseren Sorten“ hergestellten Doppelbodenplatten weisen Bruchlasten auf, die zwischen den Werten der Platten mit GKP-Papieren und kraftstoffhaltigen Sorten liegen. Eine Abweichung zeigen die Platten, die mit Altpapier der Kategorie „Bessere Sorte 1“ armiert wurden. Bei diesen Versuchsplatten (V5, Abbildung 26) treten Bruchlasten im Bereich der Doppelbodenplatten auf, die mit Faserstoffen aus unteren und mittleren Altpapiersortierungen gefertigt wurden. Die geringeren Bruchlastwerte sind vermutlich auf die stark verkürzte Faserlänge von 0,79 mm (vgl. Anhang D, Tabelle D 2) zurückzuführen. Die Bruchlasten der Doppelbodenplatten, die mit GKP-Kartonen armiert sind, liegen in einer engen Bandbreite und ordnen sich zwischen den Platten mit Faserstoffen aus besseren und solchen

²⁴⁹ Einteilung der Altpapiersorten vgl. Kapitel 5.1.2

aus mittleren Altpapiersorten ein. Der überwiegende Teil der hergestellten Doppelbodenplatten erreicht die Anforderungen der Elementklasse 2 nach DIN EN 12825 (vgl. Tabelle 2). Drei Platten unterschreiten die Anforderung für die Elementklasse 2, während vier Platten die Anforderungen der Elementklasse 3 erfüllen.

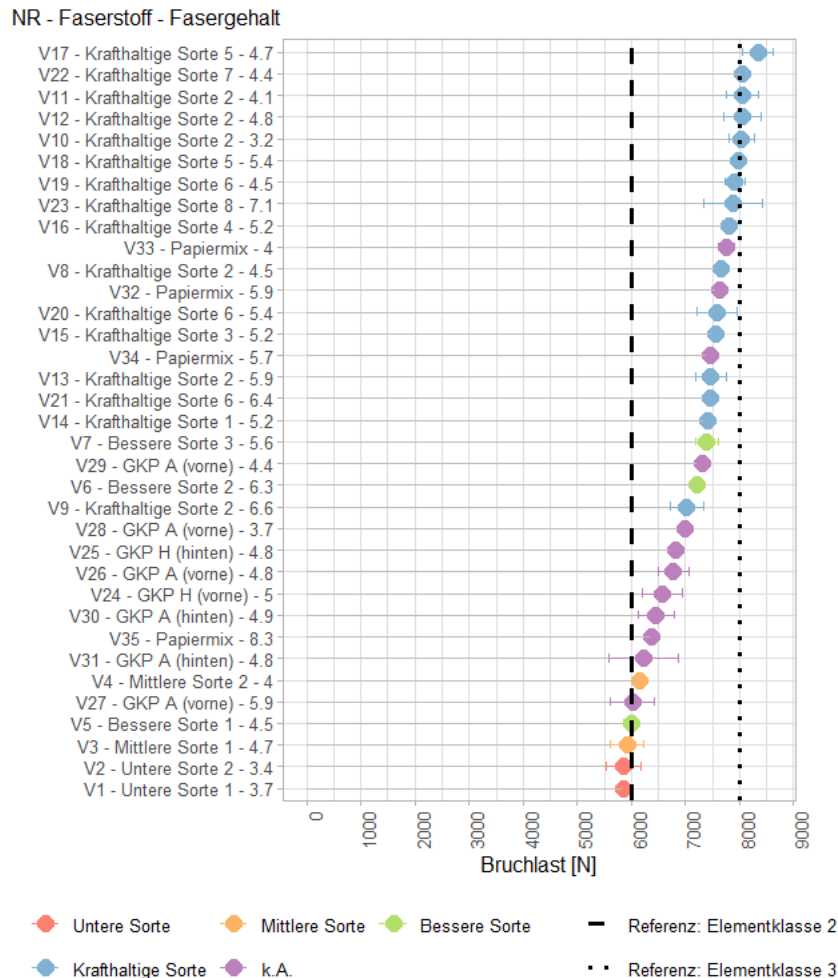


Abbildung 25: Übersicht der Bruchlast von GFP armiert mit diversen Faserstoffen und unterschiedlichen Fasergehalten (eigene Darstellung)

Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse wird die Komplexität des Einflusses der Faserstoffeigenschaften auf die Bruchlast der Doppelbodenplatten deutlich. Platten, die mit dem Altpapier „Krafthaltigen Sorte 2“ armiert sind weisen deutliche höhere Bruchlasten auf als diejenigen, die mit GKP-Karton armiert sind, obwohl beide Faserstoffe vergleichbare Faserlängen (Krafthaltige Sorte 2: 1,1 mm; GKP-Karton: 1,14 mm, vgl. Anhang D, Tabelle D 2) aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass neben der Faserlänge weitere Fasereigenschaften einen erheblichen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Platten haben können. Ein weiterer auffälliger Befund betrifft die Doppelbodenplatten mit dem Faserstoff „Papiermix“ bei einem erhöhten Fasergehalt von 8,3 M.-% (V 35, Abbildung 25). Hier wirkt sich der erhöhte Fasergehalt offenbar negativ auf die Armierungswirkung aus, sodass die Bruchlasten eher im Bereich der Platten mit mittleren und unteren Papiersorten liegen.

7.2.2. Pearson-Korrelationsanalyse zwischen Faserstoffparametern, Fasergehalt und Bruchlast

Im Folgenden werden anhand des generierten Datensatzes die linearen Zusammenhänge zwischen den Faserstoffeigenschaften, dem Fasergehalt und der Bruchlast von Doppelbodenplatten analysiert. Die Zusammenhänge werden als Pearson-Korrelation in einer Korrelationsmatrix visualisiert (Abbildung 26). Die Pearson-Korrelation misst die Stärke und Richtung einer linearen Beziehung zwischen zwei Variablen, mit einem Korrelationskoeffizienten r im Bereich von -1 (perfekt negativ) bis $+1$ (perfekt positiv). Ein Wert von $r = 1$ impliziert, dass beide Variablen gemeinsam steigen oder fallen, $r = -1$ zeigt einen gegenläufigen Verlauf, $r = 0$ steht für das Fehlen eines linearen Zusammenhangs.

In der Literatur werden die Korrelationskoeffizienten wie folgt interpretiert:

- $|r| \geq 0,7$: starke Korrelation
- $|r| \leq 0,3$: schwache Korrelation.²⁵⁰

Zwischen der Faserlänge der Faserstoffe (Faserlänge_ISO_I)²⁵¹ und der Bruchlast besteht eine mittlere positive Korrelation ($r = 0,53$). Mit zunehmender Faserlänge steigt die Bruchlast der Platten. Diese Beobachtung steht im Einklang mit Beobachtungen von Coutts, wonach längere Fasern für eine bessere Kraftübertragung und Verankerung in der Matrix sorgen.²⁵² Er konnte ebenfalls nachweisen, dass kurze Fasern beim Herausziehen aus der Matrix (z. B. beim Brechen einer Gipsfaserplatte) weniger Reibungswiderstand bieten, was zu einer Abnahme der Festigkeit führt.²⁵³ Die größere Kontaktfläche langer Fasern begünstigt eine stärkere mechanische Einbindung und trägt somit zu höheren Festigkeiten bei.

Signifikant negative Korrelationen zur Bruchlast zeigen vor allem:

- Holzstoffanteil_GFP: ($r = -0,83$)
- Feinanteil_A_GFP: ($r = -0,69$)
- Mahlgrad: ($r = -0,76$)
- Feinanteil_B_GFP: ($r = -0,63$).

Die negativen Auswirkungen lassen sich auf chemische und mechanische Effekte zurückführen. Holzstoff enthält Lignin, ist spröde und hydrophob, kann keine Zugkräfte aufnehmen und keine stabilen Wasserstoffbrücken zur Matrix ausbilden, was zu niedrigen Festigkeiten führt.²⁵⁴ Fasern, die durch mechanische Zerfaserung gewonnen wurden, weisen

²⁵⁰ [Backhaus et al., 2021], S. 29.

²⁵¹ Beschreibt die längengewichtete mittlere Faserlänge nach ISO 16065

²⁵² [Coutts, 1991], S. 78.

²⁵³ [Coutts, 1984], S. 143.

²⁵⁴ [Blechs Schmidt, 2010], S. 98f.

gekürzte und fibrillierte Strukturen auf.²⁵⁵ Die bei diesem Verfahren entstehenden Feinanteile manifestieren sich entweder als Faserbruchstücke bzw. als fibrillenartige Faserstrukturen, welche in dieser Arbeit als Feinanteil A (Faserbruchstücke) bzw. Feinanteil B (fibrillenartige Faserstrukturen) bezeichnet werden. Aufgrund der daraus resultierenden reduzierten Kontaktfläche zur umgebenden Gipsmatrix können diese Faserfragmente dem Faserauszug sowie der Rissfortschreitung nur einen geringen Widerstand entgegensetzen. Dies führt zu einer Schwächung der Armierungswirkung und äußert sich in einer verminderten Bruchlast.²⁵⁶

In der Fachliteratur wird dem Fasergehalt ein maßgeblicher Einfluss auf die Bruchlast von Faserverbundwerkstoffen zugeschrieben.²⁵⁷ Im vorliegenden Datensatz impliziert der Korrelationskoeffizient von 0,06 jedoch keinen signifikanten, linearen Zusammenhang zwischen Fasergehalt und Bruchlast. Eine nähere Analyse (vgl. Anhang H, Abbildung H 1) zeigt, dass der Einfluss des Fasergehalts durch weitere Materialparameter überlagert wird. Für die Variablen Rohdichte, Faserkrümmung, Faserdicke, Faserfeinheit lässt sich ein geringer linearer Zusammenhang mit der Bruchlast feststellen.

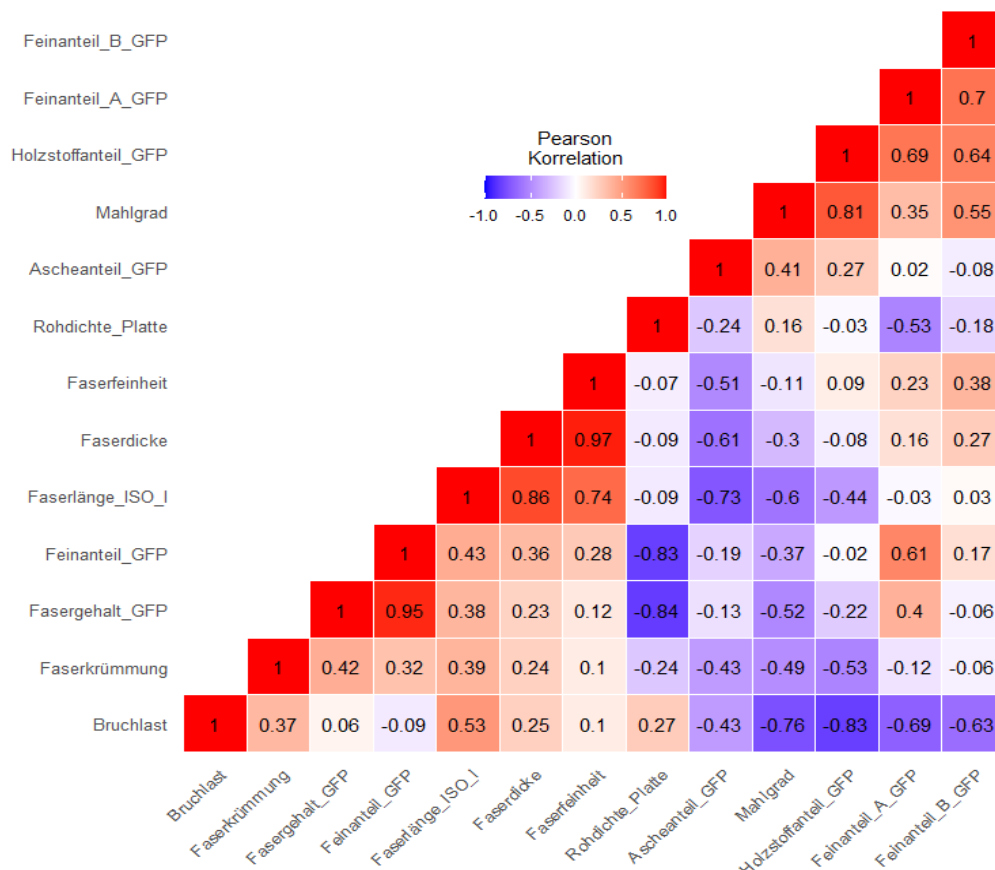


Abbildung 26: Pearson-Korrelationsmatrix zur Darstellung der linearen Beziehungen zwischen Faserstoffeigenschaften, Fasergehalt und Bruchlast in Doppelbodenplatten (eigene Darstellung)

²⁵⁵ [Coutts, 1984], S. 139.

²⁵⁶ [Coutts, 1991], S. 78.

²⁵⁷ [Coutts, 1991], S. 78.

Die dargelegten Ausführungen veranschaulichen die Komplexität und Signifikanz des Einflusses von Faserstoffeigenschaften auf die Armierungswirkung in GFP. Um den Beitrag der einzelnen Einflussgrößen sowie deren Wechselwirkungen quantitativ zu bestimmen, wird im folgenden Kapitel ein multiples lineares Regressionsmodell entwickelt. Dieses ermöglicht eine systematische, statistisch fundierte Bewertung der Haupteffekte und bildet damit die Grundlage für eine gezielte Optimierung der Produktfestigkeit durch die gezielte Auswahl von Faserstoffen.

7.3. Multivariate Modellierung der Armierungswirkung in Doppelbodenplatten

Die multiple lineare Regression ermöglicht es, den Einfluss mehrerer unabhängiger Variablen, wie z. B. Faserlänge, Holzstoffanteil und Fasergehalt, gleichzeitig auf die abhängige Variable, z. B. Bruchlast, zu untersuchen. Dabei werden auch Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Eigenschaften berücksichtigt, was eine umfassende Analyse der Einflussfaktoren erlaubt. Durch die statistische Auswertung der Regressionskoeffizienten und deren Signifikanzwerte (p-Werte) kann ermittelt werden, welche Faktoren die Bruchlast signifikant beeinflussen. Faktoren mit einem p-Wert unter dem festgelegten Signifikanzniveau (z. B. 0,05) gelten als bedeutsam für die Vorhersage der Bruchlast. Diese methodische Vorgehensweise liefert eine fundierte Basis, um gezielt die Materialzusammensetzung im Hinblick auf Faserstoffe zu optimieren und damit die Produktqualität nachhaltig zu verbessern.

7.3.1. Ergebnisse und Interpretation der multiplen linearen Regressionsanalyse zur Vorhersage der Bruchlast

Die Auswahl der unabhängigen Variablen für die multiple lineare Regression basiert auf theoretisch fundierten und logischen Überlegungen²⁵⁸, wie sie im Kapitel 7.2.2 erläutert sind. Für die vorliegende Analyse wurden die Variablen „Faserlänge_ISO_I“, „Fasergehalt_GFP“, „Holzstoffanteil_GFP“ und „Feinanteil_B_GFP“ ausgewählt, da diese in vorangehenden Untersuchungen und in der Literatur als potenziell einflussreich auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten identifiziert wurden. Die nachfolgende multiple lineare Regressionsanalyse gibt Aufschluss darüber, in welchem Ausmaß diese Variablen die Bruchlast erklären können. In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse dargestellt.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 beschreibt den Anteil, der durch das Modell erklärten Varianz der abhängigen Variable und dient als Kennwert für die Modellgüte. Das vorliegende

²⁵⁸ [Backhaus et al., 2021], S. 93.

Regressionsmodell weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,826$ auf. Damit kann das Modell 82,6 % der beobachteten Streuung der Bruchlast erklären. Dieses Ergebnis deutet auf eine hohe Modellgüte hin und zeigt, dass die im Modell berücksichtigten Einflussgrößen einen wesentlichen Beitrag zur Erklärung der Variabilität der Bruchlast leisten.

Die signifikante Gesamtmodellgüte wurde mittels F-Test überprüft ($F(4,30) = 35,5$; $p < 0,001$). Das Ergebnis belegt, dass das Modell als Ganzes statistisch hoch signifikant ist und die beobachteten Zusammenhänge zwischen den unabhängigen Variablen und der Bruchlast nicht zufällig zustande gekommen sind. Zudem unterschreiten alle unabhängigen Variablen die Signifikanzgrenze von $p < 0,05$, was ihre statistische Relevanz innerhalb des Modells bestätigt.

Tabelle 15: Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse zur Vorhersage der Bruchlast von GFP

Abhängige Variable: Bruchlast					
Unabhängige Variable	b	SE	β	t-Wert	p-Wert
Intercept	7406,6	386,4	-0,000	19,17	< 0,001
Faserlänge_ISO_I	994,6	237,9	0,418	4,18	< 0,001
Fasergehalt_GFP	-160,1	58,4	-0,227	-2,74	< 0,010
Holzstoffanteil_GFP	-322,2	83,1	-0,479	-3,88	< 0,001
Feinanteil_B_GFP	-1017,4	324,9	-0,347	-3,13	< 0,004
Anmerkungen: n = 35; $R^2 = 0,826$; korr. $R^2 = 0,802$; $F(4,30) = 35,5$; $p < 0,001$					
Intercept:	Y-Achsenabschnitt				
b:	Regressionskoeffizient				
SE:	Standardfehler der Regression				
β :	Standardisierter Regressionskoeffizient				

Mit den Regressionskoeffizienten b_i wird die Stärke und Richtung des Einflusses jeder unabhängigen Variable auf die Bruchlast quantifiziert. Für die **Faserlänge_ISO_I** ergab die Modellierung einen positiven Einfluss auf die Bruchlast ($b = 994,6$) und bestätigt damit frühere Untersuchungen²⁵⁹, denen zufolge größere Faserlängen die Lastübertragung verbessern, die Neigung zum Faserauszug reduzieren und sich insgesamt positiv auf die Produktfestigkeit auswirken.

Der **Fasergehalt_GFP** repräsentiert den Anteil an Fasermaterial im Gips-Faser-Verbund. Trotz seiner funktionellen Bedeutung für die Armierungswirkung wirkt sich ein überhöhter Faseranteil negativ auf die Bruchlast aus ($b = -160,1$). Nach Coutts²⁶⁰ wird dieser Effekt auf einen erhöhten Hohlraumgehalt sowie eine verstärkte Ausbildung von

²⁵⁹ [Coutts, 1991], S. 78.

²⁶⁰ [Coutts, 1984], S. 142.

Faser-Faser-Verbindungen zurückgeführt, wodurch die effektive Kontaktfläche zwischen Faser und Matrix sinkt und die Fähigkeit der einzelnen Fasern zur Ausbildung tragender Verbindungen mit der Gipsmatrix gemindert.

Der **Holzstoffanteil_GFP** steht für den Anteil ligninreicher Faserbestandteile. Der negative Regressionskoeffizient ($b = -322,2$) zeigt, dass steigende Holzstoffgehalte die Festigkeit des Verbundmaterials reduzieren und bestätigt damit Erkenntnisse von Blechschmidt²⁶¹, wonach hydrophobe Ligninanteile die Haftung zwischen Faser und Matrix schwächen und dadurch die Spannungsübertragung sowie die Rissbrückenwirkung der Fasern in der Gipsmatrix vermindern.

Der **Feinanteil_B_GFP** beschreibt den Anteil sehr kurzer Faserfragmente im Faserstoff. Der negative Regressionskoeffizient ($b = -1017,4$) bestätigt die Untersuchungen von Coutts²⁶², wonach hohe Feinanteile die Bruchlast reduzieren, da kurze Faserbruchstücke kaum zur Lastübertragung beitragen und die wirksame Armierung des Gips-Faser-Verbundes verringern.

Die standardisierten Koeffizienten (β) sind einheitenlos und auf eine gemeinsame Skala transformiert, sodass sich die Einflussstärke der einzelnen unabhängigen Variablen auf die Bruchlast direkt bewerten und miteinander vergleichen lässt. Die Faserlänge_ISO_I ($\beta = 0,418$) und der Holzstoffanteil_GFP ($\beta = -0,479$) zeigen entgegengesetzte, quantitativ ähnlich starke Effekte auf die Bruchlast. Der Feinanteil_B_GFP ($\beta = -0,347$) übt einen moderaten Einfluss aus, während der Fasergehalt_GFP ($\beta = -0,227$) den geringsten Einfluss auf die Bruchlast hat.

In Gleichung (4) ist die allgemeine Form der Regressionsgleichung für multiple lineare Modellierungen dargestellt. Sie bildet die mathematische Grundlage für die Analyse und Optimierung der Materialzusammensetzung im Gips-Faser-Verbund:

$$y = b_o + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i + \varepsilon \quad (4)$$

y : abhängige Variable – Bruchlast [N]

b_o : Regressionskonstante (Intercept, b)

$b_1, b_2, \dots, b_i$: Regressionskoeffizienten der unabhängigen Variablen

$x_1, x_2, \dots, x_i$: Ermittelte Messwerte der unabhängigen Variablen (z. B. Faserlänge, Holzstoffanteil etc.)

ε : Fehlerterm (nicht erklärte Abweichung)

²⁶¹ [Blechschmidt, 2010], S. 98f.

²⁶² [Coutts, 1991], S. 78.

Durch Einsetzen der ermittelten Regressionskoeffizienten (b_i) und der zugehörigen unabhängigen Variablen (x_i) lässt sich die Bruchlast somit für verschiedene Rezepturvarianten prognostizieren.

Die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse belegen, dass die zugrunde gelegten theoretischen Annahmen der Gips-Faser-Interaktion auch für im Taktpressverfahren hergestellte Doppelbodenplatten gültig sind. Für die Praxis bietet das Regressionsmodell den Vorteil, dass über die Bewertung der Einflussstärken der Fasereigenschaften die wirksamsten Stellgrößen gezielt für die Rezepturentwicklung und die Optimierung der Bruchlast genutzt werden können. Gleichzeitig erlaubt die Regressionsgleichung, die zu erwartende Bruchlast für beliebige Kombinationen relevanter Faserparameter im Voraus zu prognostizieren, sodass Materialanpassungen bereits in der Entwicklungsphase quantitativ bewertet und Rezepturanpassungen effizienter geplant werden können. Darüber hinaus unterstützt das Modell die Bewertung unterschiedlicher Altpapierqualitäten für den Einsatz in der GFP-Herstellung und damit die Entwicklung von Recyclingkonzepten, indem es den Einfluss der aus dem Altpapier resultierenden Fasermerkmale auf die Tragfähigkeit der Doppelbodenplatten quantitativ erfassbar macht.

7.3.2. Validierung des multiplen linearen Regressionsmodells

Die Validierung der Modellgüte ist ein zentraler Schritt in der multiplen linearen Regressionsanalyse für die Überprüfung der Verlässlichkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse. Eine sorgfältige Überprüfung der Modellgüte sichert, dass das Modell robuste Schätzungen liefert und auf neue Daten gut anwendbar ist.

Die Validierung wurde in zwei Schritten umgesetzt. Im ersten Schritt erfolgte die **Prüfung der statistischen Modellannahmen**, welche die Voraussetzungen für die Anwendung einer multiplen linearen Regression darstellen, um systematische Verzerrungen und Fehlinterpretationen der Regressionskoeffizienten zu vermeiden. Im Anschluss wurde eine **K-fache Kreuzvalidierung** vorgenommen, mit der die Generalisierbarkeit des Modells beurteilt werden kann, indem durch wiederholtes Aufteilen der Daten in Trainings- und Testdatensätze die Stabilität und Vorhersagegenauigkeit des Modells evaluiert wird.

i. Prüfung statistischer Modellannahmen

Statistische Modellannahmen bezogen auf die multiple lineare Regression sind grundsätzliche Bedingungen an die Daten und das Modell, die garantieren, dass die Schätzungen statistisch gültig und zuverlässig sind. Sie tragen dazu bei, Verzerrungen der Koeffizienten zu vermeiden und ermöglichen genaue Signifikanztests sowie belastbare Vorhersagen.

Im Folgenden sind die wesentlichen statistischen Modellannahmen der multiplen linearen Regression zusammengefasst:

- **Linearität:** Der Zusammenhang zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable ist linear.
- **Berücksichtigung aller relevanten Variablen:** Fehlende wichtige Variablen können zu verzerrten Ergebnissen führen.
- **Fehler der X-Werte:** Messfehler in den unabhängigen Variablen sollten möglichst gering gehalten werden.
- **Homoskedastizität:** Die Varianz der Residuen ist über den Bereich der unabhängigen Variablen konstant.
- **Normalverteilung der Residuen:** Die Residuen sollten normalverteilt sein, um statistische Tests zu validieren.
- **Multikollinearität:** Unabhängige Variablen sollten nicht stark miteinander korreliert sein, da sonst die Schätzgenauigkeit gemindert wird.²⁶³

In Tabelle 16 sind die zentralen Annahmen des multiplen linearen Regressionsmodells sowie die Ergebnisse der angewandten Testverfahren zusammengefasst dargestellt. Sie zeigen, welche theoretischen Voraussetzungen überprüft wurden, welche Konsequenzen bei einer möglichen Verletzung auftreten könnten, und inwieweit die einzelnen Annahmen im vorliegenden Modell bestätigt werden konnten.

²⁶³ [Backhaus et al., 2021].

Tabelle 16: Annahmen des Regressionsmodells und Ergebnisse der Überprüfung des zugrundeliegenden multiplen linearen Regressionsmodells mit den angewandten Testverfahren²⁶⁴

Annahmen	Konsequenz bei Verletzung	Test	Ergebnis
Linearität	Verzerrte Koeffizienten	Visualisierung	Bestätigt • Streudiagramm (vgl. Anhang H, Abbildung H 2)
Berücksichtigung aller relevanten Variablen	Verzerrte Koeffizienten	Iterativer Modellierungsprozess	• Logische und theoretische Überlegungen Bestätigt • Modellierungsprozess (vgl. Anhang H, Tabelle H 1)
Fehler der X-Werte	Verzerrte Koeffizienten	-	• Messunsicherheit der Analytik (Anhang C)
Homoskedastizität	Geringe Präzision	Rainbow-Test ²⁶⁵ ($p > 0,05$)	Bestätigt • $p = 0,33$
Normalverteilung der Störgrößen	Keine Gültigkeit der Signifikanz	Shapiro-Wilk-Test ²⁶⁶ ($p > 0,05$)	Bestätigt • $p = 0,61$
Keine perfekte Multikollinearität	Keine Lösung möglich / Geringe Präzision	Variance Inflation Factor ²⁶⁷ ($VIF < 5$)	Bestätigt • Faserlänge_ISO_I = 1.7 • Fasergehalt_GFP = 1.2 • Holzstoffanteil_GFP = 2.6 • Feinanteil_B_GFP = 2.1

Die Linearität konnte visuell über ein Streudiagramm (vgl. Anhang H, Abbildung H 2) bestätigt werden. Die Auswahl der relevanten Variablen stellt einen Balanceakt zwischen Einfachheit (zu wenige Variablen) und Komplexität (zu viele Variablen) des Modells dar. Eine zu hohe Komplexität kann zu einer Überanpassung des Modells und damit zu eingeschränkter Verallgemeinerungsfähigkeit führen, wohingegen eine zu starke Vereinfachung Verzerrungen der Modellparameter und systematische Prognosefehler begünstigt.²⁶⁸ Vor diesem Hintergrund konnte ergänzend zu den theoretischen Annahmen (vgl. Kapitel 7.2.2) in einem automatisierten, iterativen Prozess die Auswahl der unabhängigen Variablen zur Beschreibung der abhängigen Variable (Bruchlast) bestätigt werden. (vgl. Anhang H, Tabelle H 1)

Fehler der X-Werte (Ermittelte Messwerte der unabhängigen Variable) wurden durch den Einsatz standardisierter Messmethoden und etablierter Analytik auf ein möglichstes Minimum begrenzt. Fehler durch prozessbedingte Unregelmäßigkeiten, sowie Messunsicherheiten können nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Durch die Bestätigung der Homoskedastizität und der Normalverteilung sind größere systematische Fehler nicht zu erwarten. Zur Prüfung der Homoskedastizität, wurde der Rainbow-Test durchgeführt. Mit einem p-Wert von 0,33 konnte die Annahme der

²⁶⁴ [Backhaus et al., 2021].

²⁶⁵ [Utts, 1982].

²⁶⁶ [Backhaus et al., 2021], S. 119.

²⁶⁷ [Backhaus et al., 2021], S. 123.

²⁶⁸ [Backhaus et al., 2021], S. 93.

Homoskedastizität bestätigt werden, was auf eine gleichmäßige Präzision der Schätzungen im gesamten Wertebereich hinweist. Die Annahme der Normalverteilung der Störgrößen wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Ein p-Wert von 0,61 bestätigte die Normalverteilung der Residuen, was bedeutet, dass die Signifikanztests des Modells gültig sind.

Zuletzt wurde eine mögliche Beeinflussung der Modellgüte durch Multikollinearität geprüft, da diese die Genauigkeit der geschätzten Regressionskoeffizienten verringern kann.²⁶⁹ Für die Überprüfung wurde der Variance Inflation Factor (VIF) berechnet. In der Literatur wird ein Schwellenwert von $VIF_i = 5$ ²⁷⁰ angegeben. Alle VIF-Werte liegen unter dem Schwellenwert (Faserlänge_ISO_I = 1.7, Fasergehalt_GFP = 1.2, Holzstoffanteil_GFP = 2.6, Feinanteil_B_GFP = 2.1), was darauf hinweist, dass keine signifikante Multikollinearität vorliegt.

ii. K-Fache Kreuzvalidierung

Die k-fache Kreuzvalidierung ist eine robuste Methode zur Modellbewertung, die Überanpassung vermeidet und die Prognosefähigkeit des Modells auf unabhängigen Daten misst. Dabei wird der Datensatz in k Teilmengen aufgeteilt, wovon jeweils $k - 1$ für das Training genutzt werden und 1 Teilmenge für das Testen. Dieser Vorgang wird k-mal wiederholt, sodass jede Teilmenge einmal als Testsatz diente. (Abbildung 28)

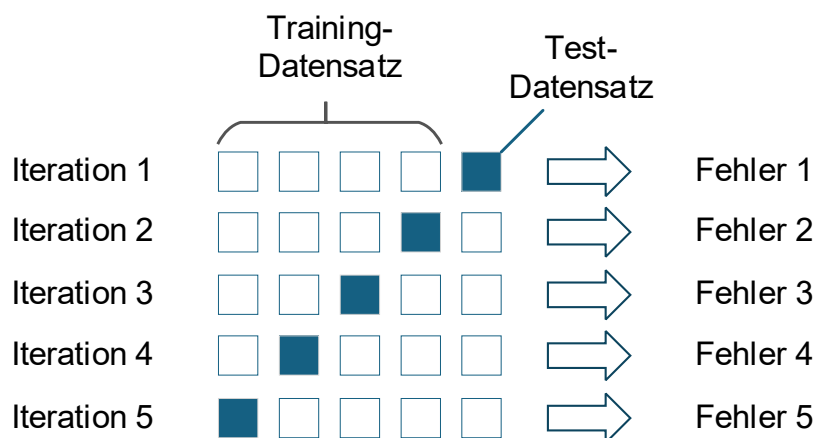


Abbildung 27: Prinzip der 5-fachen Kreuzvalidierung (eigene Darstellung nach²⁶³)

Im zugrunde liegenden Modell erfolgt eine 5-fache Kreuzvalidierung, um eine ausreichend große Datenmenge für das Training zu gewährleisten. Die Kreuzvalidierung wurde mit dem Paket „caret“ in RStudio²⁷² durchgeführt. Dabei wurden etwa 80 % der Daten zum Training verwendet und 20 % zum Testen. Für jede Iteration wurde der Root Mean Squared Error

²⁶⁹ [Backhaus et al., 2021], S. 102.

²⁷⁰ [Backhaus et al., 2021], S. 123.

²⁷¹ [Burger, 2018], S. 68.

²⁷² [Posit, 2024].

(RMSE) berechnet (4), der die durchschnittliche Abweichung zwischen beobachteten und vorhergesagten Werten angibt. Im Ergebnis wird der mittlere RMSE über alle Iterationen hinweg ermittelt, um eine allgemeine Einschätzung der Modellgüte zu erhalten.²⁷³

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

y_i : Tatsächlicher Wert des i-ten Datenpunktes

$\hat{y}_i$: Vorhergesagter Wert des i-ten Datenpunktes

N : Gesamtzahl der Datenpunkte (über alle Iterationen hinweg).

Die Größe der Trainings-Datensätze betrug zwischen 27 und 29 Beobachtungen. Der RMSE über alle Iterationen variiert zwischen etwa 271 und 534 (Tabelle 17). Der in Iteration 5 beobachtete höhere RMSE-Wert weist auf eine geringere Vorhersagegenauigkeit in dieser Teilstichprobe hin, vermutlich bedingt durch Ausreißer oder eine ungünstige Datenaufteilung. Der mittlere RMSE des Modells beträgt etwa 348, was einer durchschnittlichen Abweichung von etwa 5 % zwischen der berechneten und der tatsächlichen Bruchlast entspricht. Vor dem Hintergrund der mittleren Abweichung zwischen zwei Platten der gleichen Nassmischung (290 N bzw. ~4 %, vgl. Kapitel 7.2) ist diese Abweichung als gering zu bewerten, sodass insgesamt von einer guten Vorhersagegenauigkeit des Modells ausgegangen werden kann.

Tabelle 17: *Ergebnis der 5-fachen Kreuzvalidierung des multiplen linearen Regressionsmodells zur Vorhersage der Bruchlast anhand von Faserlänge_ISO_I, Fasergehalt_GFP, Holzstoffanteil_GFP und Feinanteil_B_GFP*

	Anzahl Beobachtungen		RSME
	Trainingsdatensatz	Testdatensatz	
Iteration 1	28	7	274,1
Iteration 2	27	8	335,4
Iteration 3	28	7	271,2
Iteration 4	29	6	324,6
Iteration 5	28	7	534,0
Mittelwert	-	-	347,9

7.4. Zwischenfazit: Modellierung der Armierungswirkung

Die multiple lineare Regressionsanalyse belegt, dass die theoretischen Annahmen der Armierungswirkung von Faserstoffen in Gips-Faser-Verbundwerkstoffen auch für im Taktpressverfahren hergestellte Doppelbodenplatten gelten. Zudem zeigt das entwickelte Regressionsmodell, dass sich die Armierungswirkung von Faserstoffen in Doppelbodenplatten aus 100 % Stuckgips zuverlässig und nachvollziehbar quantifizieren lässt. Die Bruchlast lässt sich anhand der Faserparameter Faserlänge, Holzstoffanteil, Feinanteil B und Fasergehalt

²⁷³ [Burger, 2018], S. 67.

prognostizieren, die als signifikante Einflussgrößen identifiziert wurden und etwa 83% ($R^2 = 0,826$) der Variation der gemessenen Bruchlasten erklären. Das Modell ermöglicht es, die wirksamsten Stellgrößen für die Rezepturentwicklung zu nutzen und unterschiedliche Altpapierqualitäten quantitativ zu bewerten.

Die Modellgüte wurde durch die Prüfung der statistischen Modellannahmen sowie eine 5-fache Kreuzvalidierung bestätigt. Das Regressionsmodell ist damit innerhalb der definierten Testbedingungen gültig, d. h. für Doppelbodenplatten aus Stuckgips bei konstanten Materialeigenschaften sowie vergleichbaren verfahrenstechnischen Prozessen, Produktionsparametern und Rezepturen. Abweichungen von diesen Rahmenbedingungen, etwa durch heterogene Gipseigenschaften oder variierenden Herstellungsprozessen können die Genauigkeit und Aussagekraft des Modells beeinträchtigen und eine erneute Anpassung des Modells auf Basis neuer Versuchsdaten erfordern.

8. Prozess- und Qualitätseinflüsse durch den Einsatz von gipshaltigen Bauabfällen für die Herstellung von Doppelbodenplatten

In der vorliegenden Versuchsreihe wurde die Eignung sortenreiner GKP sowie von Produktionsabfällen aus der GFP-Herstellung (GFP, Schleifstaub, Gipsschlamm) als Substitut für Primärrohstoffe (Gips und Altpapier) zur Herstellung neuer Doppelbodenplatten untersucht. Die ursprünglich verwendete Gipsmenge (Stuckgips) wurde dabei zu 50 M.-% durch die genannten Sekundärrohstoffe substituiert.

Die Untersuchungen umfassten zunächst eine Charakterisierung der Ausgangsrohstoffe, wobei die Gips- und Fasereigenschaften vor und nach der Nasskalzinierung analysiert wurden. Erfasst wurden dabei Parameter wie Kristallwasser, Fasergehalt, Kristallmorphologie und Korngrößenverteilung. Im Anschluss erfolgte eine Analyse der Nasskalzinierung hinsichtlich der Umwandlungsgeschwindigkeit der gipshaltigen Bauabfälle zu α -Halbhydrat-Suspensionen. Abschließend wurden die Prozessparameter (Presszeit) und Produktparameter (Bruchlast) der resultierenden Doppelbodenplatten bestimmt und bewertet. Die Ergebnisse sollen Aufschluss darüber geben, ob die heterogenen gipshaltigen Bauabfälle für eine zuverlässige Produktion hochwertiger Gipsfaserprodukte geeignet sind.

8.1. Stoffliche und fasertechnische Analyse der verwendeten Ausgangsmaterialien

In diesem Kapitel werden die eingesetzten Materialien charakterisiert. Dazu gehören:

- GKP auf Basis von Naturgips (SH1, SH2, SH3) und REA-Gips (SL1)
- Produktionsabfälle aus der GFP-Herstellung GFP (GFP2), Schleifstäube (S1 und S2) und Gipsschlamm (GS1)
- Stuckgips (SG1)

Ziel ist es zum einen, die Ausgangsmaterialien zu charakterisieren und zum anderen die Materialeigenschaften der für die Herstellung der Doppelbodenplatten verwendeten α -HH-Suspensionen zu ermitteln, da diese die Grundlage für das Verständnis der Zusammenhänge und die Ableitung belastbarer Rückschlüsse bilden.

8.1.1. Stoffliche und fasertechnische Charakterisierung der gipshaltigen Bauabfälle vor der Nasskalzinierung

Die Untersuchung der stofflichen Qualität sowie der Faserstoffqualität vor der Nasskalzinierung ermöglicht die Beschreibung der Ausgangsmaterialqualitäten und erlaubt,

Rückschlüsse auf den Einfluss der Aufbereitungsprozesse auf die verwendeten Sekundärrohstoffe zu ziehen. Das Vorgehen zur Ermittlung der Parameter Kristallwassergehalt, Reinheit und Fasergehalt ist in Anhang I beschrieben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Gipsreinheit aus dem Kristallwassergehalt abgeleitet wurde, da die Produktionsabfälle (GFP2, S1, S2, GS1) ausschließlich aus Stuckgips auf Basis von REA-Gips bestanden und daher keine nennenswerten mineralischen Nebenbestandteile zu erwarten waren. Weitere Untersuchungsergebnisse, z. B. Korngrößenverteilung und Kristallmorphologie sind dem Anhang J zu entnehmen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die stoffliche Qualität der untersuchten Materialien in erheblichem Maße durch prozesstechnische Bedingungen beeinflusst wird. Die Produktionsabfälle (GFP2, S1, S2, GS1) zeichnen sich durch eine hohe Gipsreinheit aus ($> 88\%$). Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der zugrundeliegenden GFP-Produktion ausschließlich Stuckgips auf Basis von REA-Gips als Ausgangsrohstoff eingesetzt wurde. Abweichungen der Gipsreinheiten in den anfallenden Produktionsrückständen resultieren im Wesentlichen aus der Ausbildung von Halbhydrat- oder Anhydritphasen., die infolge unvollständiger Hydratisierung oder durch thermische Belastungen während des Trocknungsprozesses auftreten. Die Reinheit der Gipse von GKP aus Lippendorf (SL1) und Hartershofen (SH1, SH2, SH3) stimmt mit den Resultaten der quantitativen Phasenanalyse in Kapitel 6.1 überein.

Die Faserstoffgehalte der Proben variieren zwischen $1,9\%$ und $8,0\%$. Schleifstaub aus Werk 2 (S2) stammt aus der mechanischen Bearbeitung der GFP aus Werk 2 (GFP2) und weist erwartungsgemäß einen ähnlichen Fasergehalt auf wie das Ausgangsprodukt. Die Abweichung des Fasergehaltes von Schleifstaub aus Werk 1 (S1) ist auf höhere Fasergehalte der in Werk 1 produzierten GFP zurückzuführen. Im Gegensatz dazu enthält der Gipsschlamm geringe Faseranteile ($1,9\%$) die während des Pressvorgangs gemeinsam mit dem gipshaltigen Prozesswasser ausgespült werden und sich anschließend im Filterkuchen, dem Gipsschlamm, anreichern. Bei den GKP liegt der Faserstoffanteil zwischen $3,2$ und $3,6\%$. Die Schwankungen resultieren hauptsächlich aus variierenden Plattendichten (vgl. Tabelle 1) von GKP sowie Unterschieden in den Flächengewichten der Kartonummantelung.

Tabelle 18: Kristallwasser, Reinheit und Fasergehalt von aufbereiteten GKP und GFP sowie von Schleifstaub aus den Werken 1 und 2 und Gipsschlamm

	Sekundärrohstoff	KW ¹ M.-%	Reinheit %	Faserstoffgehalt M.-%
GS1	Gipsschlamm	20,9	100	1,2
S1	Schleifstaub Werk 1	18,5	88	8,0
S2	Schleifstaub Werk 2	20,0	95	6,5
GFP2	GFP Werk 2	19,3	92	6,2
SL1	GKP Typ A	19,8	95	3,5
SH1	GKP Typ A	15,8	75	3,6
SH2	GKP Typ H2	15,8	76	3,5
SH3	GKP Typ DF	15,6	75	3,2

¹ KW = Kristallwassergehalt. Das Vorgehen zu Bestimmung des Kristallwassergehaltes, der Reinheit und des Faserstoffgehaltes ist in Anhang C beschrieben.

Die Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung zur morphologischen Analyse der Fasern sind im Anhang I beschrieben und die Ergebnisse in Tabelle 19 dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss der Prozessmechanismen auf die Strukturintegrität des Faserstoffs. Mit zunehmender mechanischer Beanspruchung nimmt die mittlere Faserlänge signifikant ab, während die Feinanteile deutlich ansteigen.

Dies zeigt sich insbesondere bei den Schleifstäuben, die mit Faserlängen von 0,41 mm (Werk 1) bzw. 0,50 mm (Werk 2) die niedrigsten mittleren Faserlängen aufweisen und mit Feinanteilen von über 95 % eine ausgeprägte Fragmentierung der Faserstruktur infolge des Schleifvorgangs erkennen lassen. Demgegenüber weist das GFP aus Werk 2 mit einer mittleren Faserlänge von 0,99 mm auf eine schonendere Aufbereitung und geringere Schädigung der Faserstrukturen hin. Der Gipsschlamm enthält vorwiegend kurze, dünne Fasern und feine Partikel, die während des Pressvorgangs mit dem Prozesswasser ausgetragen und im Filterkuchen angereichert werden. Die Faserstoffe aus dem Gips-Faser-Gemisch aus GPK zeigen im Vergleich zum reinen GKP-Karton eine leicht reduzierte mittlere Faserlänge (–0,14 mm) und Faserdicke (–2 µm) sowie einen moderat erhöhten Feinanteil (+4 %) (vgl. Anhang L, Tabelle L 1). Insgesamt deutet dies darauf hin, dass das Verfahren zur Nasszerkleinerung von GKP zu keiner nennenswerten Schädigung der Fasern führt.

Tabelle 19: Ausgewählte Fasereigenschaften aufbereiteter GKP (SL1), GFP aus Werk 2 (GFP2), Schleifstaub aus Werk 1 und 2 (S1, S2) sowie Gipsschlamm (GS1)

	Sekundärrohstoff	Faserlänge_ISO_I [mm]	Faserdicke [µm]	Feinanteil [%]
GS1	Gipsschlamm	0,6	19,7	98,4
S1	Schleifstaub Werk 1	0,4	28,1	96,8
S2	Schleifstaub Werk 2	0,5	28,6	95,1
GFP2	GFP Werk 2	1,0	26,2	91,2
SL1	GKP Typ A	1,0	24,4	91,1

Eine vollständige Abtrennung der Fasern aus dem Gipsmatrixmaterial war nicht möglich. Daher sind bei den ermittelten Fasereigenschaften der gipshaltigen Bauabfälle (GFP, Schleifstaub und Gipsschlamm) entsprechende Messunsicherheiten zu berücksichtigen (vgl. Anhang L). Zudem konnte aus diesem Grund keine differenzierte Bestimmung der Asche-, Faser- und Holzstoffgehalte sowie keine Bewertung des Mahlgrades mittels klassischer Verfahren wie dem Paper-Bale-Sensor oder dem Shopper-Riegler-Verfahren an diesen Proben durchgeführt werden. In den folgenden Kapiteln werden die Materialeigenschaften der nach der Nasskalzinierung vorliegenden Sekundärrohstoffe sowie des in den Versuchsreihen dieser Arbeit eingesetzten Stuckgipses beschrieben.

8.1.2. Untersuchung der physikalisch-chemischen Parameter von α -Halbhydrat-Suspensionen und Stuckgips

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die zuvor beschriebenen Sekundärrohstoffe, Stuckgips sowie ein Abfallmix (AM1) verwendet. Dieser setzt sich wie folgt zusammen:

- 25 % GKP TYP A (SH1)
- 10 % GFP (GFP2)
- 15 % Schleifstaub (S1).

Die Materialien wurden mit Wasser und Bernsteinsäure zu einer homogenen Suspension verarbeitet und anschließend einer Nasskalzinierung unterzogen. Die detaillierte Materialzusammensetzung der einzelnen Versuchsreihen ist in Tabelle 20 dargestellt. Der Feststoffgehalt wurde so eingestellt, dass die Suspension pumpfähig blieb und Verstopfungen vermieden wurden. Die Zugabe von Bernsteinsäure sorgte für einen prismatischen Kristallhabitus, der kürzere Presszeiten und höhere Produktfestigkeiten bewirkte.²⁷⁴

Tabelle 20: Materialzusammensetzung für die Umwandlung zu α -Halbhydrat-Suspensionen in der Nasskalzinierung

	Einheit	GS1	S1	S2	GFP2	SL1	SH1	SH2	SH3	AM1
Einwaage Sekundärrohstoff	[kg]	33	45	65	50	50	50	50	59	50
Einwaage Wasser	[kg]	45	55	100	69	58	58	58	58	58
Einwaage BS ¹	[%]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Feststoffgehalt ²	[%]	42,3	45	39,4	42	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3

¹ BS = Bernsteinsäure wird bei der Nasskalzinierung zur Beeinflussung der Kristallmorphologie eingesetzt und entspricht 0,1 % der Feststoffmenge.

² Der Feststoffgehalt beschreibt den Anteil der Feststoffe (Gips, Nebenbestandteile, Faserstoff, Additiv) auf die gesamte Einwaage im Reaktor.

²⁷⁴ [Aschern; Hartmann, 2011], S. 86.

8.1.2.1. Korngrößenverteilung von α -Halbhydrat-Suspensionen sowie von Stuckgips

Die Korngrößenverteilung der zu α -HH-Suspensionen umgewandelten Materialien sowie von Stuckgips als Referenz ist in Abbildung 28 dargestellt. Die Peaks²⁷⁵ der Korngrößen variieren zwischen etwa 5 μm (α -HH-SH1, -SH2, -SH3) und 16,4 μm (α -HH-S1). Nach der Umwandlung zeigt sich eine schärfere bimodale Verteilung, was auf die partielle Lösung von Agglomeraten hindeutet (Abbildung 28, im Vergleich die unschärfere, breit gefächerte Verteilung der Ausgangsstoffe vor der Nassskalzinierung vgl. Anhang J, Abbildung J 1). GKP auf Basis von Naturgips (SH1, -SH2 und -SH3) sowie GFP (GFP2) weisen eine linksseitige Verschiebung der Maxima auf, womit kleinere Kristalle dominieren. Die breiten Verteilungen der zweiten und dritten Maxima, waren bereits vor der Nassskalzinierung sichtbar (vgl. Anhang J, Abbildung J 1) und sind durch die mechanischen Beanspruchungen bedingt, die ein vielfältiges Partikelspektrum aus Kristallen, Agglomeraten, Fasern und mineralischen Nebenbestandteilen erzeugen. Gipsschlamm (GS1) zeigt einen charakteristischen, scharfen Hauptpeak bei etwa 14 μm sowie einen kleineren bei 60 μm , verursacht durch Fasern und Agglomerate.

Der Stuckgips (SG1) hebt sich mit einem deutlich schmalen und rechtsseitig verschobenen Hauptpeak im Bereich von etwa 70–100 μm ab. Die Korngrößenverteilung des Schleifstaubs S2 wurde dagegen mit einem anderen Analysegerät²⁷⁶ bestimmt, das auf einem abweichenden Messprinzip basiert und eine geringere Anzahl von Größenklassen erfasst. Aus diesem Grund sind die Verteilungen für den Schleifstaub S2 vor und nach der Nassskalzinierung in einer separaten Abbildung im Anhang J (vgl. Abbildung J 2) dargestellt.

²⁷⁵ Peaks in der Korngrößenverteilung sind lokale Maxima, die die am häufigsten vorkommenden Korngrößenbereiche im Material kennzeichnen.

²⁷⁶ Coulter LS230

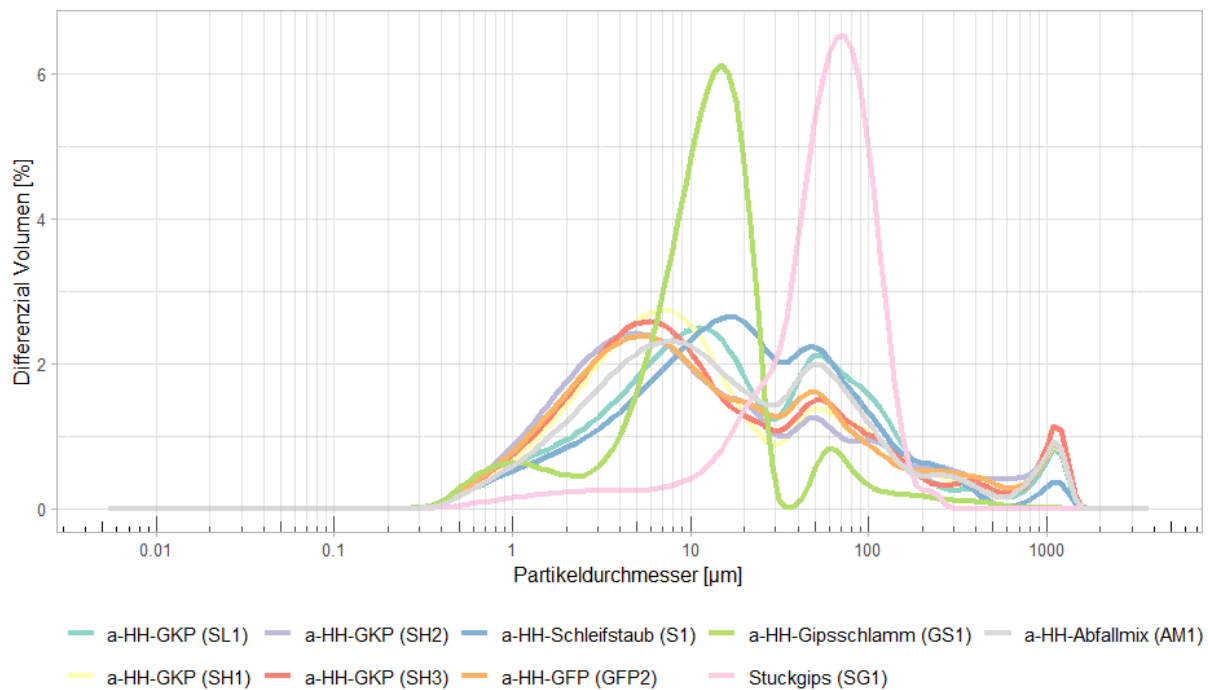


Abbildung 28: Korngrößenverteilung von verschiedenen α -HH-Suspensionen sowie von Stuckgips (eigene Darstellung)

8.1.2.2. Kristallmorphologie von α -Halbhydrat-Suspensionen und Stuckgips

Die in Abbildung 29 dargestellten REM-Aufnahmen bieten einen detaillierten Blick auf die Kristallmorphologien der α -HH-Suspensionen. Besonders deutlich erkennbar ist der Einfluss der Bernsteinsäure, die bereits zu Beginn des Kalzinierungsprozesses in die Suspension eingemischt wurde. Ihre Zugabe steuert das Kristallwachstum und begünstigt die Ausbildung kurzer, prismatischer Kristalle mit einen niedrigen L/D von 1 bis 2 und führt insgesamt zu einer homogenen Kristallmorphologie.²⁷⁷ Dieser morphologische Effekt ist bei Proben mit höherer Gipsreinheit und größeren Kristallen besonders stark ausgeprägt (Abbildung 29; a bis d).

Umgewandelter Gipsschlamm (α -HH-GS1) und Schleifstaub (α -HH-S1) zeigen deutlich ausgeprägte Kristalle mit scharfen Kanten. Bei α -HH-GS1 sind die Kristallgrößen homogen verteilt (Abbildung 29, a) während α -HH-S1 eine heterogene Kristallgrößenverteilung mit hohem Anteil feiner Partikel aufweist (Abbildung 29; b). Diese feinen Partikel neigen zur Agglomeration oder haften an größeren Kristallen. Auch die α -HH-Suspensionen aus aufbereitetem GFP zeigen gut ausgeprägte Kristallformen, allerdings bei insgesamt kleineren Kristallen mit einem L/D von 1 bis 2 (Abbildung 29, c), was die Ergebnisse der Korngrößenverteilung stützt (vgl. Abbildung 28).

²⁷⁷ [Guan et al., 2019].

Für α -HH aus GKP ist ein deutlicher Unterschied zwischen REA-Gips und Naturgips zu sehen. Bei Gips mit hoher Reinheit (SL1) dominieren regelmäßig ausgebildete, prismatische Kristalle, während bei α -HH auf Basis von Naturgips mit niedrigerer Gipsreinheit (SH1, SH2, SH3) kürzere Kristalle mit einem L/D von 0,5 bis 1 entstehen was exemplarisch für die Probe SH3 in Abbildung 29 e dargestellt ist. Mineralische Nebenbestandteile im Naturgips (z. B. Dolomit) können das Kristallwachstum in der Nasskalzinierung verlangsamen und die Ausbildung kompakterer Kristallformen fördern. Ähnliche Effekte wurden auch in Studien zum Einfluss von Metallionen und Flotationsmitteln nachgewiesen.²⁷⁸

In der α -HH-Suspension des Abfallgemisches (AM1) sind sowohl gut ausgebildete Kristalle als auch ein hoher Anteil feiner Partikel zu beobachten. In (Abbildung 30) ist die typische Oberflächenstruktur von Stuckgips zu erkennen. Die Ergebnisse der REM-Aufnahmen bestätigen die in der Korngrößenverteilung ermittelten Kristallgrößen und -verteilungen. Die Daten belegen, dass die Nasskalzinierung die Kristallmorphologie zwar modifiziert und Agglomeration reduziert, die grundsätzlichen Strukturen und die quantitative Verteilung der Kristallgrößen aber maßgeblich von den Eigenschaften und der Zusammensetzung der Ausgangsrohstoffe determiniert werden.

²⁷⁸ [Muryanto, 2002].

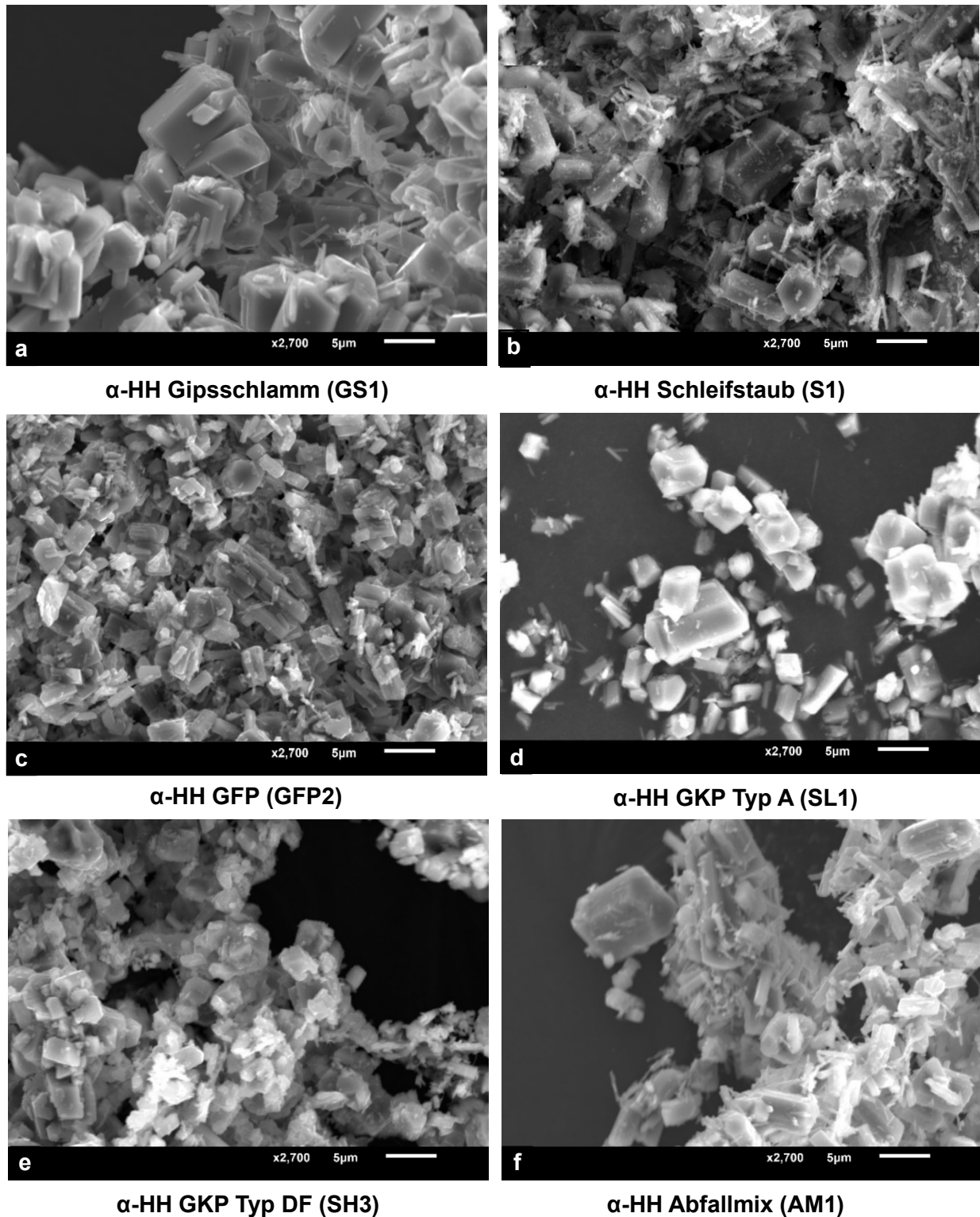
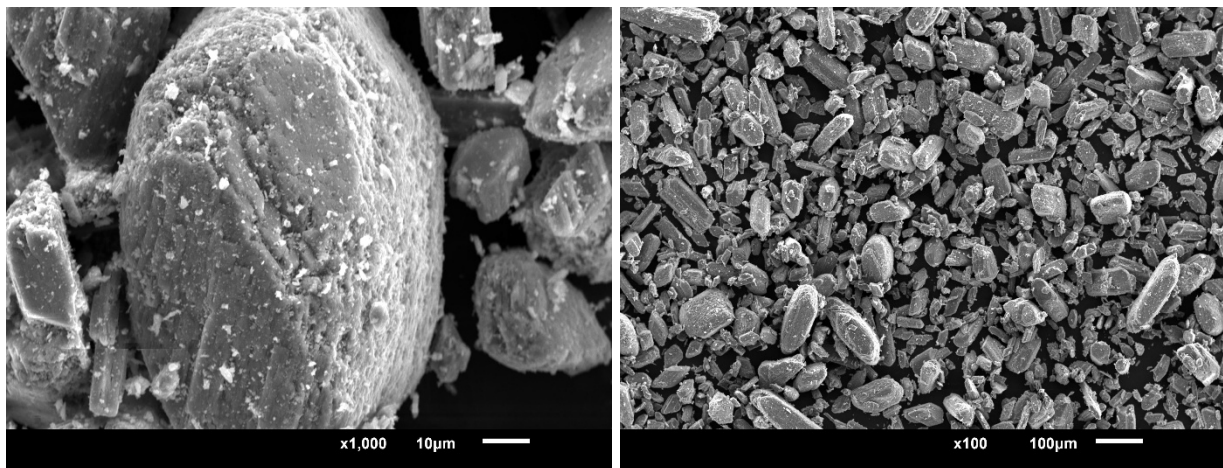


Abbildung 29: REM-Aufnahmen von verschiedenen α -HH-Suspensionen aus Gipsschlamm (GS1; a), Schleifstaub Werk 1 (S1; b) aufbereiteten GFP (GFP2; c) und GKP (SL1; d & SH3; e) sowie Abfallgemisch (AM1; f) nach der Nasskalzinierung bei 2.700-facher Vergrößerung (eigene Aufnahmen)



Stuckgips (SG1)

Abbildung 30: REM-Aufnahmen von Stuckgips (SG1) mit 1.000-facher (links) und 100-facher Vergrößerung (rechts) (eigene Aufnahmen)

8.1.2.3. Spezifische Oberfläche und Phasenzusammensetzung vor und nach der Nasskalzinierung

Im Folgenden werden die Eigenschaften der verschiedenen α -Halbhydrat-Suspensionen sowie des Stuckgipses anhand der Kristallmorphologie der Korngrößenverteilung, der spezifischen Oberfläche sowie der Phasenzusammensetzung dargestellt und analysiert. Da die Messungen an Gips-Faser-Gemischen durchgeführt wurden, können die ermittelten Messwerte aufgrund der Faseranteile gewissen Messunsicherheiten unterliegen.

In Tabelle 21 sind die spezifische Oberfläche nach Blaine und BET sowie die dominierende Korngröße (X_{mod})²⁷⁹ für die verwendeten gipshaltigen Bauabfällen vor und nach der Umwandlung zu α -Halbhydrat und für den Stuckgips dargestellt. Bei den Proben ist erkennbar, dass die Umwandlung tendenziell zu einer Reduzierung der spezifischen Oberfläche und einer Zunahme der Kristallgröße führte. Die Abnahme der Blaine-Werte und Vergrößerung der Kristalle weist auf eine Reduktion des Feinanteils hin. Verantwortlich hierfür ist die während der Nasskalzinierung ablaufende Kristallumwandlung, bei der sehr feine Partikel zunächst ganz oder teilweise in Lösung gehen und anschließend bevorzugt das Wachstum größerer Kristalle begünstigen²⁸⁰.

Die Daten zeigen eine Korrelation zwischen den Halbhydratanteilen der α -HH-Suspensionen und den Reinheiten der jeweiligen gipshaltigen Bauabfälle (vgl. Tabelle 18). Abfälle mit geringerer Reinheit (SH1, SH2, SH3) enthalten Halbhydratanteile von 63 bis 71 M.-% und Anhydritwerte bis zu 7,1 M.-%. Hochreine GKP (SL1) sowie Produktionsabfälle aus der GFP-

²⁷⁹ Gleichbedeutend mit Peaks in der Korngrößenverteilung

²⁸⁰ [Nowak S., 2012], S. 8.

Herstellung weisen höhere Halbhydratanteile von 86 bis 97 M.-% und niedrigere Anhydritgehalte bis zu 5,4 M.-% auf. Weitere Phasenanteile der α -HH-Suspensionen sind im Anhang K (vgl. Tabelle K 1) aufgeführt.

Die Unterschiede in den Eigenschaften von α - und β ²⁸¹-Calciumsulfathalbhydrat sind deutlich erkennbar und bestätigen die Erkenntnisse aus der Literatur (vgl. Kapitel 3.1). Im Vergleich zu α -HH weist β -HH einen signifikant höheren BET-Wert auf. Da mit zunehmendem BET-Wert der Wasseranspruch steigt²⁸², führt dies zu längeren Entwässerungszeiten, was die Wirtschaftlichkeit durch verlängerte Presszeiten beeinträchtigen kann. Die dominierende Korngröße von β -HH (72,94 μm) in Kombination mit einem niedrigen Blaine-Wert (1.173 cm^2/g) lässt auf eine grobkörnige Materialbeschaffenheit schließen, was auf die Ausgangskorngröße des REA-Gipses zurückzuführen ist. (Tabelle 21)

Tabelle 21: Spezifische Oberfläche, häufigste Kristallgröße, HH- und Anhydrit-Gehalte von α -HH-Suspensionen aus aufbereiteten GKP und GFP sowie Gipsschlamm, Schleifstaub und Abfallmix

Nr. ¹	Sekundärrohstoff	Blaine		BET		Xmod ²		HH ³	Anhydrit
		Vor Umwandlung	Nach Umwandlung	Vor Umwandlung	Nach Umwandlung	Vor Umwandlung	Nach Umwandlung	[M.-%]	[M.-%]
		[cm^2/g]		[m^2/g]		[μm]			
VG1; VG11	Gipsschlamm (GS1)	9.658	3.906	2,0	1,8	10,3	13,7	97,2	<1
VG2	Schleifstaub Werk 1 (S1)	8.455	6.707	3,7	3,2	17,2	16,4	86,1	5,4
VG3	Schleifstaub Werk 2 (S2)	14.451	5.375	-	-	6	15	-	-
VG4	GFP Werk 2 (GFP2)	9.064	8.158	2,5	2,4	4,4	5,4	93,0	2,9
VG5; VG10; VG12	GKP Typ A (SL1)	9.046	5.045	2,6	1,9	153,4	11,3	93,0	<1
VG6	GKP Typ A (SH1)	8.051	6.786	3,4	3,5	4,4	7,1	71,0	2,6
VG7	GKP Typ H2 (SH2)	12.581	6.289	4,2	3,6	4,9	4,9	62,8	7,1
VG8	GKP Typ DF (SH3)	9.242	5.732	3,3	3,5	4,9	5,9	69,3	5,5
VG9	Abfallmix (AM1)	10.739	7.649	2,8	2,7	4,4	7,8	90,5	2,1
	Stuckgips (SG1)	-	1.173		13,4		72,9	91,7	3,1

¹ Versuch, in dem die jeweilige α -HH-Suspension eingesetzt wurde

² Xmod: Partikelgröße, die am häufigsten vorhanden ist

³ HH = Calciumsulfathalbhydrat

Zusammenfassend zeigt die stoffliche und fasertechnische Charakterisierung der gipshaltigen Bauabfälle, dass diese eine gewisse Schwankungsbreite hinsichtlich Reinheit, Fasergehalt und morphologischen Eigenschaften aufweisen, die maßgeblich durch die Herkunft und die vorgelagerten Prozesse geprägt sind. Besonders prägnant sind die längeren, weniger fragmentierten Fasern in GKP und GFP gegenüber den stark zerkleinerten und feineren Fasern der Schleifstäube, was auf unterschiedliche mechanische Beanspruchungsgrade

²⁸¹ β -HH = Stuckgips

²⁸² [Abdussaljamov, 2003], S. 23.

während der Verarbeitung zurückzuführen ist. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für die weiteren Versuche, in denen die Zusammenhänge zwischen den Produktionsprozessen und der Produktqualität untersucht werden.

8.2. Umwandlungsgeschwindigkeit von gipshaltigen Bauabfällen in der Nasskalzinierung

Die Umwandlung von Calciumsulfatdihydrat zu Calciumsulfathalbhydrat ist ein entscheidender Prozessschritt bei der Herstellung von GFP. Die Umwandlungsdauer hat unmittelbaren Einfluss auf die Produktionsgeschwindigkeit und damit auf die Gesamtproduktivität. Eine genaue Kenntnis der Umwandlungsgeschwindigkeit ist wichtig, um die Prozesse effizient zu steuern und damit Verzögerungen oder Einbußen in der Produktivität zu vermeiden.

Während der Umwandlung wird Kristallwasser (KW) aus dem Gips ausgetrieben. Das entstehende Halbhydrat weist einen stöchiometrischen Kristallwassergehalt von 6,2% auf. Der Umwandlungsprozess gilt als abgeschlossen, sobald dieser Wert in der Suspension erreicht ist. Anhand des Kristallwassergehaltes kann demnach der Reaktionsfortschritt beschrieben werden.

Die unterschiedlichen Startwerte des Kristallwassergehalts in den Graphen verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Kristallwasser und Gipsreinheit (Abbildung 31). Je höher der Anteil an Calciumsulfatdihydrat im Rohstoff, desto mehr Kristallwasser ist chemisch im Kristallgitter gebunden und desto höher ist der gemessene Kristallwassergehalt auf der y-Achse (Abbildung 31), was direkt auf einen hohen Gipsreinheitsgrad schließen lässt (vgl. Tabelle 18).²⁸³ Die Werte auf der x-Achse geben die Umwandlungszeit in Minuten an. Dabei ist "t0" der Moment, bei dem die Zieltemperatur von 125 °C im Reaktor erstmals erreicht ist, alle weiteren Zeitangaben (z. B. t30, t45, t75) beschreiben die Minuten nach Erreichen dieser Zieltemperatur (vgl. Abbildung 21).

Für gipshaltige Abfälle auf Basis von REA- Gips und hoher Reinheit GKP (SL1), Schleifstaub (S1), Gipsschlamm (GS1) und Abfallmix (R1) ist die Umwandlung unmittelbar nach t0 bzw. spätestens 30 Minuten (t30) nach Erreichen der Zieltemperatur abgeschlossen. Bei GFP 2 war die Umwandlung bereits bei Erreichen der Starttemperatur vollständig abgeschlossen.

GKP auf Basis von Naturgips und niedrigeren Gipsreinheiten (SH1, SH2, SH3) zeigen hingegen signifikant verlängerte Umwandlungszeiten. In diesen Fällen setzt die Umwandlung, trotz konstanter Temperatur von 125 °C, zunächst nicht ein. Erst durch eine gezielte Temperaturerhöhung (für SH3 bei t45, für SH2 bei t75 und für SH1 bei t45 und t60) auf bis zu

²⁸³ [Müller M., 2007], S. 8.

140 °C wird die Umwandlungsreaktion ausgelöst, was sich im plötzlichen Absinken des Kristallwassergehalts zeigt. Erhöhte Temperaturen fördern zudem eine verstärkte Entwässerung und können die Bildung von Anhydrit zusätzlich begünstigen, wie insbesondere bei SH2 und SH3 zu beobachten ist. (vgl. Anhang K, Tabelle K 1).

Der Versuch mit Schleifstaub aus Werk 2 (S2) wurde nicht ausgewertet, da es durch eine fehlerhafte Temperaturregung zu abweichenden Versuchsbedingungen kam und die Umwandlungszeit somit nicht repräsentativ ist.

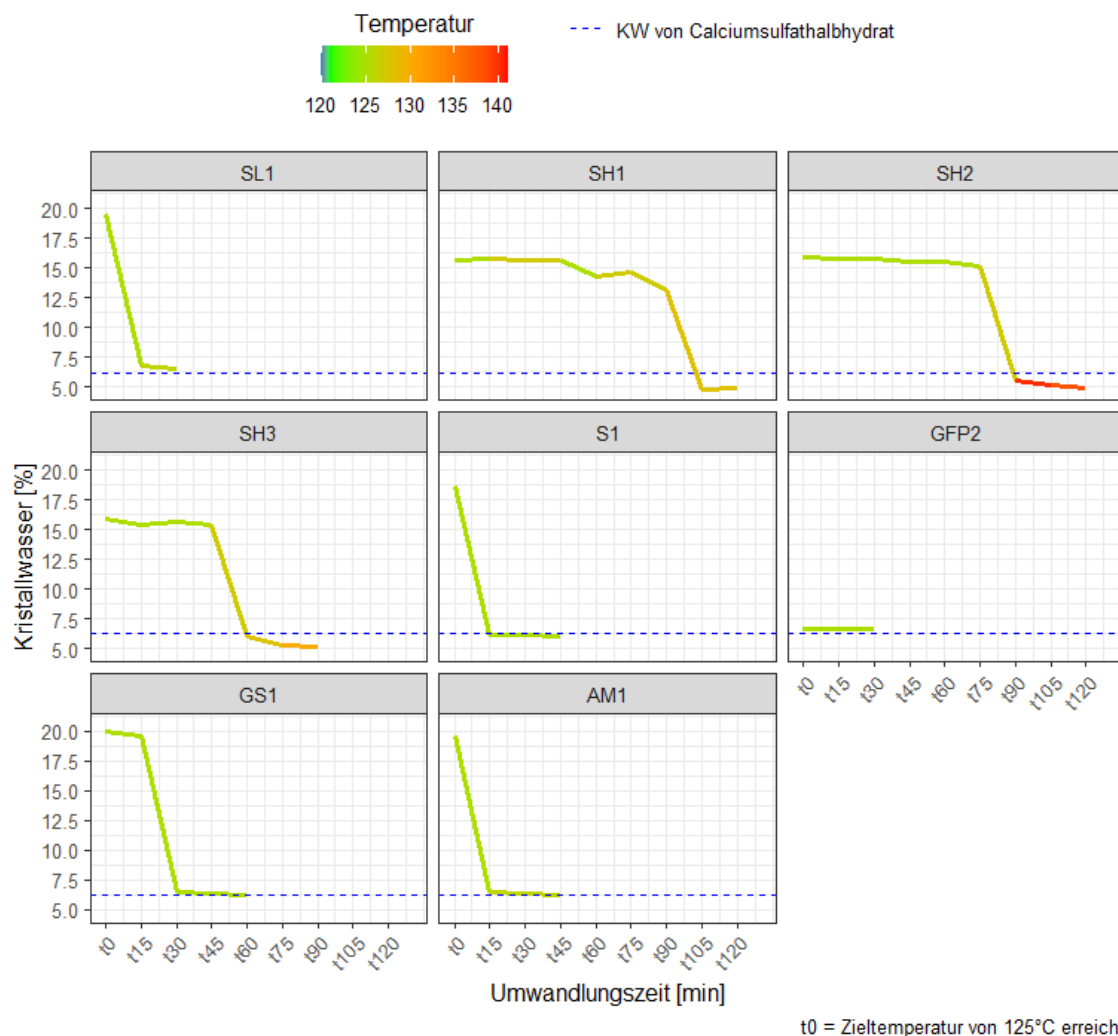


Abbildung 31: Umwandlungsgeschwindigkeit von aufbereiteten GKP auf Basis von REA-Gips (SL1), Naturgips (SH1, SH2, SH3), GFP (GFP2), Schleifstaub (S1), Gipsschlamm (GS1) und einem Abfallmix (AM1) in der Nasskalzinierung in einem mit Mantelbeheizung betriebenen Reaktor (eigene Darstellung)

8.3. Einfluss von gipshaltigen Bauabfällen auf Presszeit und Bruchlast von Doppelbodenplatten

In diesem Kapitel erfolgt eine Untersuchung des Einflusses gipshaltiger Abfälle auf die Presszeit und die Bruchlast bei der Herstellung von Doppelbodenplatten.

8.3.1. Parameterdefinition und Probenzusammensetzung

Für die Untersuchung wurden neun Versuche (VG1 bis VG9) gemäß der Versuchsbeschreibung (vgl. Kapitel 5.3.2) durchgeführt. In Bezug auf die Ausgangsrohstoffe wurden gipshaltige Sekundärrohstoffe zu einem Anteil von 50 M.-% eingesetzt. Die Produktqualität wurde anhand der Elementklassen nach DIN EN 12825 bewertet. Als Rohstoffe kamen die in Kapitel 8.1.2 charakterisierten α -HH-Suspensionen sowie Stuckgips zum Einsatz. Die Zusammensetzung der Ausgangsrohstoffe für die jeweiligen Versuche ist in Tabelle 22 dargestellt. Es wurde ein Feststoffgehalt (FstGH) von etwa 40 M.-% und eine Faserstoffgehalt (PGH) zwischen 8,6 % und 9,8 % eingestellt.

Das Verhältnis zwischen dem Faserstoff aus den gipshaltigen Abfällen (RC-Papier) und dem Altpapier orientiert sich am jeweiligen eingebrachten Faserstoffanteil des Sekundärrohstoffes. Unter Berücksichtigung des eingebrachten Faserstoffgehaltes wurde der jeweiligen Nassmischung die fehlende Faserstoffmenge durch die Zugabe eines krafthaltigen Papiers „Krafthaltige Sorte 2“ (vgl. Anhang D, Tabelle D 2) ergänzt.

Die Versuche wurden im halbindustriellen Maßstab durchgeführt, was zu prozessbedingten Schwankungen des Feststoffgehaltes bzw. des Fasergehaltes führte. Die Schwankungen der Fasergehalte (FGH) sind auf wechselnde Aschegehalte sowie die Ausschleusung von Fasern mit dem ausgepressten Wasser während des Pressvorgangs zurückzuführen.

Tabelle 22: Zusammensetzung der Nassmischungen zur Herstellung von Gipsfaserplatten mit diversen gipshaltigen Bauabfällen als α -HH-Suspension

Nr.	Sek. ¹	Menge [kg]	Gips Stuck- gips ² [%]	α -HH ³ [%]	Menge [kg]	Faserstoff		FstGH ⁶ [M.-%]	PGH ⁷ [M.-%]	FGH ⁸ [M.-%]
						Alt- papier ⁴ [%]	RC- Papier ⁵ [%]			
VG1	(GS1)	42	50	50	3,9	89	11	38,85	8,6	5,3
VG2	(S1)	42	50	50	4,2	48	52	38,30	9,0	6,4
VG3	(S2)	42	50	50	4,6	62	38	36,91	9,8	5,5
VG4	(GFP2)	42	50	50	4,1	60	50	40,26	9,0	5,2
VG5	(SL1)	44	50	50	4,5	76	25	41,96	9,3	5,7
VG6	(SH1)	44	50	50	4,4	77	23	41,06	9,2	5,3
VG7	(SH2)	44	50	50	4,4	75	25	41,86	9,2	6,1
VG8	(SH3)	44	50	50	4,4	81	19	41,52	9,1	6,1
VG9	(AM1)	44	50	50	4,4	65	35	40,53	9,0	5,6

¹ Sekundärrohstoff.

² β -HH aus REA-Gips.

³ Reines Calciumsulfat aus der α -HH- Suspension.

⁴ Anteil des Altpapiers „Krafthaltige Sorte 2“ am gesamten Faserstoff.

⁵ Anteil des RC-Papiers am gesamten Faserstoff.

⁶ FstGH = Feststoffgehalt, gibt den Anteil von Gips und Faserstoffen in der Nassmischung an.

⁷ PGH = Faserstoffgehalt, gibt den Anteil von Faserstoffen in der Nassmischung an.

⁸ FGH = Fasergehalt, gibt den Anteil von Fasern in der trockenen abgebundenen GFP an.

8.3.2. Einfluss gipshaltiger Bauabfälle auf die Presszeit von Doppelbodenplatten

Die Presszeit ist ein wesentlicher Faktor für die Produktivität bei der Herstellung von Gipsfaserplatten. Eine längere Presszeit verringert den Produktionsdurchsatz, weshalb die gezielte Auswahl und Zusammensetzung der Rohstoffe von großer Bedeutung ist. Die Eigenschaften des Gipses, insbesondere Kristallgröße und spezifische Oberfläche, beeinflussen die Presszeit maßgeblich. Größere Kristalle und eine geringere spezifische Oberfläche (Blaine, BET) beschleunigen die Presszeit von Doppelbodenplatten im Einzeltaktpressverfahren.²⁸⁴ In Abbildung 32 werden die Presszeiten der Versuche VG1 bis VG9 im Vergleich zum Referenzwert²⁸⁵ angegeben (gestrichelte Linie), welcher als Standard bei der Produktion von Doppelbodenplatten (Firma Lindner Norit GmbH) gilt. Die Säulen geben die Abweichung in Prozent vom Referenzwert wieder, wobei negative Werte eine Beschleunigung und positive eine Verlängerung der Presszeit bedeuten.

Die Zugabe von α -HH-Gipsschlamm (VG1, -20 %) und α -HH-Schleifstaub aus Werk 2 (VG3, -30 %) ergibt deutlich kürzere Presszeit. Dieses Ergebnis ist die für diese Materialien typischen großen Kristallen, niedrigen spezifischen Oberflächen und hohen Reinheiten zurückzuführen. Auch α -HH aus GKP mit hoher Reinheit (VG5, -5 %) zeigt eine geringfügig beschleunigte Presszeit. Dagegen sind für α -HH-GFP (VG4), das Abfallgemisch (VG9) und α -HH-Schleifstaub aus Werk 1 (VG2) jeweils geringfügig erhöhte Presszeiten (+5 %) gegenüber dem Referenzwert zu verzeichnen. Dieses Verhalten resultiert aus kleineren Kristallen, höheren spezifischen Oberflächen sowie geringerer Reinheit mit erhöhten Anhydritgehalten (vgl. Kapitel 8.1.2). Diese Kombinationen neigen zur stärkeren Bindung von Wasser und einer dichteren Packung des Materials, was zu verlängerten Presszeiten führt. Auffällig ist die verkürzte Presszeit bei Schleifstaub aus Werk 2 gegenüber Werk 1. Grund dafür ist die deutlich längere Aufheiz- und Lagerungsdauer während der Nasskalzinierung im Versuch mit Schleifstaub aus Werk 2. Mit zunehmender Lagerungsdauer von Bindemitteln in wässriger Suspension nimmt die spezifische Oberfläche ab, was die Filtrierbarkeit erhöht und die Presszeit verkürzt.²⁸⁶ Bei den Proben VG6 bis VG8 mit α -HH aus GKP auf Basis von Naturgips mit niedriger Reinheit ist eine deutliche Verlängerung der Presszeit (+25 bis 85 %) zu erkennen. Diese Verzögerung ist auf die mineralischen Nebenbestandteile und damit einhergehende Beeinflussung der Gipseigenschaften in Form von geringer Kristallgröße, hoher spezifischer Oberfläche und niedriger Gipsreinheit mit Anhydritgehalten von 2,6 bis 7,1 M.-% zurückzuführen.

²⁸⁴ [Aschern, 2012], S. 66ff.

²⁸⁵ Der Referenzwert liegt bei < 1 Minute und die Abweichungen im Sekundenbereich.

²⁸⁶ [Aschern, 2010], S. 92.

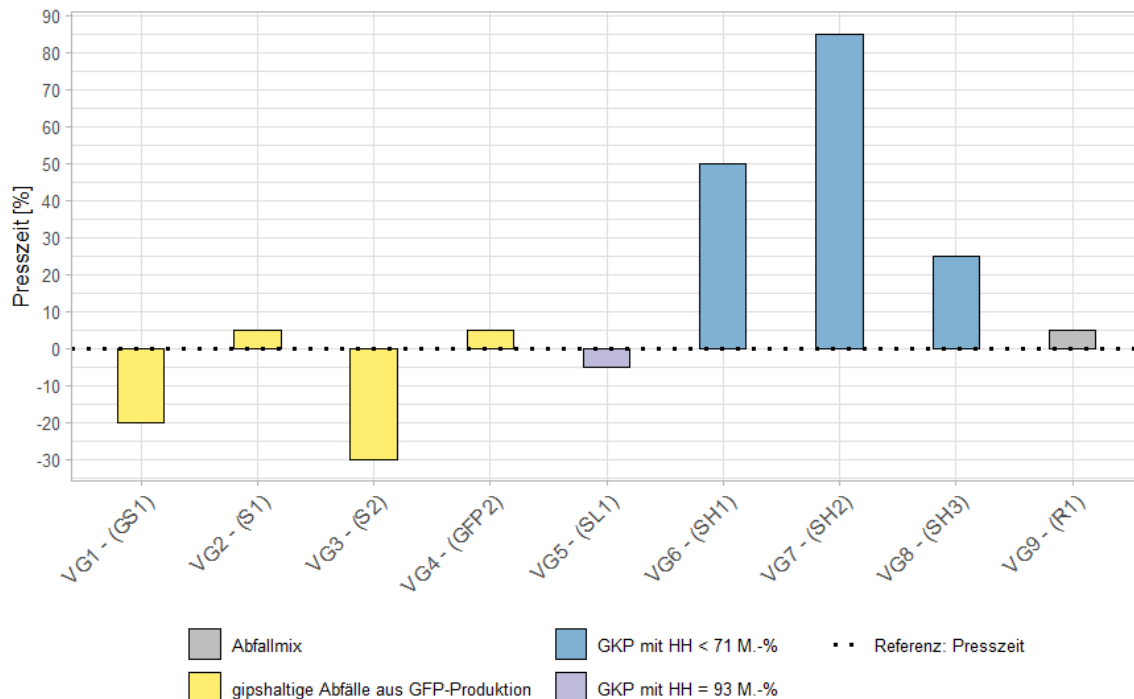


Abbildung 32: Abweichung der Presszeiten von GFP aus 50 % Stuckgips und 50 % α -HH-Suspension aus gipshaltigen Bauabfällen zum Referenzwert (eigene Darstellung)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass gipshaltige Bauabfälle ohne mineralische Nebenbestandteilen zu Anteilen von 50 M.-% eingesetzt werden können, ohne die Produktivität negativ zu beeinflussen. Bei der Verwendung von gipshaltigen Bauabfällen mit hohen Anteilen an mineralischen Verunreinigungen, ist jedoch zu beachten, dass diese zu verlängerten Presszeiten führen und die Produktivität reduzieren können.

8.3.3. Einfluss der Rohstoffeigenschaften auf die Bruchlast und Einsatzgebiete von Doppelbodenplatten

Die Bruchlast stellt das zentrale Qualitätsmerkmal von Doppelbodenplatten dar und ist entscheidend dafür, in welchen Einsatzbereichen und Elementklassen nach DIN EN 12825²⁸⁷ die Platten verwendet werden können. Höhere Bruchlasten erlauben den Einsatz in Bereichen mit anspruchsvollen, statischen Belastungen (vgl. Tabelle 2).

In Abbildung 33 sind die mittleren Bruchlasten aller Versuche dargestellt. Die angegebenen Werte entsprechen dem Mittelwert aus jeweils zwei Platten, die aus derselben Nassmischung gefertigt wurden. Die Analyse der Versuchsreihe zeigt, dass die überwiegende Mehrzahl der untersuchten Platten Bruchlasten ≥ 8 kN erreichen (entspricht Elementklasse 3) und somit für Bereiche mit erhöhter statischer Belastung²⁸⁸ geeignet sind. Platten mit Schleifstaub aus Werk 1 (VG2) erreichen mit etwa 7,6 kN lediglich die Anforderungen für die Elementklasse 2. Die im

²⁸⁷ [Europäische Norm EN 12825, 2001].

²⁸⁸ z. B. Konstruktionsbüros, Werkstätten oder Ausstellungsflächen.

Vergleich niedrigere Bruchlast ist maßgeblich auf den hohen Anteil (53 M.-%, vgl. Tabelle 22) an stark gekürzten Fasern (0,41 mm, vgl. Tabelle 18) im Schleifstaub Werk 1 (S1) zurückzuführen. Wird der Schleifstaub dagegen gemeinsam mit anderen gipshaltigen Bauabfällen eingesetzt (AM1), können Bruchlasten der Elementklasse 3 erreicht werden.

Den Bruchlasten von Platten mit α -HH-Suspension auf Basis von REA-Gips (VG5: 8,8 kN) und auf Naturgips (VG6: 8,9 kN; VG7: 9 kN; VG8: 8,9 kN) weisen vergleichbare Bruchlasten auf. Da bei diesen Platten die gleichen Faserstoffe zum Einsatz kamen und von nahezu identischen Faserstoffeigenschaften ausgegangen werden kann, lässt sich daraus schließen, dass α -HH-Suspensionen mit HH-Anteilen von 60 bis 70 % und mineralischen Nebenbestandteilen von 11 M.-% (z. B. Dolomit) im Naturgips kein messbarer Einfluss auf die Festigkeit hochverdichteten Doppelbodenplatten besteht. Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu den von Schneider²⁸⁹, gewonnenen Erkenntnissen, die einen Rückgang der Festigkeit durch Anteile von Dolomit im Gips feststellen konnte. Allerdings beziehen sich die Beobachtung dieser Studie auf die Biege- und Druckfestigkeit von nicht verdichteten Gipskörpern. Ebenso zeigen hydrophobe Mittel aus Feuchtraumplatten keinen negativen Einfluss auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten. Demnach sind GKP der Typen A²⁹⁰, H2²⁹¹ und DF²⁹² sowohl auf Naturgips- als auch REA-Gipsbasis als auch GFP, Gipsschlamm und Schleifstäube als Sekundärrohstoffe für Doppelbodenplatten bis zu einem Anteil von 50 M.-% gut geeignet und ermöglichen die Herstellung von Platten, die selbst für anspruchsvolle Anwendungen die Anforderungen an die jeweiligen Elementklassen DIN EN 12825 sicher erfüllen.

Die vorliegenden Ergebnisse unterstreichen die Komplexität der Festigkeitsbildung von Doppelbodenplatten. So zeigen die Versuche VG4 und VG9, dass trotz nahezu identischer Gipseigenschaften der jeweiligen α -HH-Suspensionen (vgl. Tabelle 21) die Bruchlast von VG4 um ca. 1 kN höher ausfällt. Ebenso liegt die Bruchlast von VG1 bei 9,4 kN und die von VG4 bei 9,9 kN, obwohl die in VG4 eingesetzte α -HH-Suspensionen eine kleinere Korngröße aufweist (vgl. Tabelle 21). Dabei zeigen mehrere Studien, dass eine geringere Korngröße des Bindemittels in der Regel mit einer Zunahme der Festigkeit von Gipsfaserplatten verbunden ist.^{293, 294, 295} Dies deutet darauf hin, dass die Fasereigenschaften bei heterogenen gipshaltigen Bauabfällen einen maßgeblichen Einfluss auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten ausüben.

²⁸⁹ [Schneider J., 2010], S. 97.

²⁹⁰ GKP Bauplatte.

²⁹¹ GKP Bauplatte imprägniert.

²⁹² GKP Feuerschutzplatte.

²⁹³ [Schneider, 2010], S. 19.

²⁹⁴ [Singh & Middendorf, 2007].

²⁹⁵ [Aschern; Hartmann, 2011], S. 3.

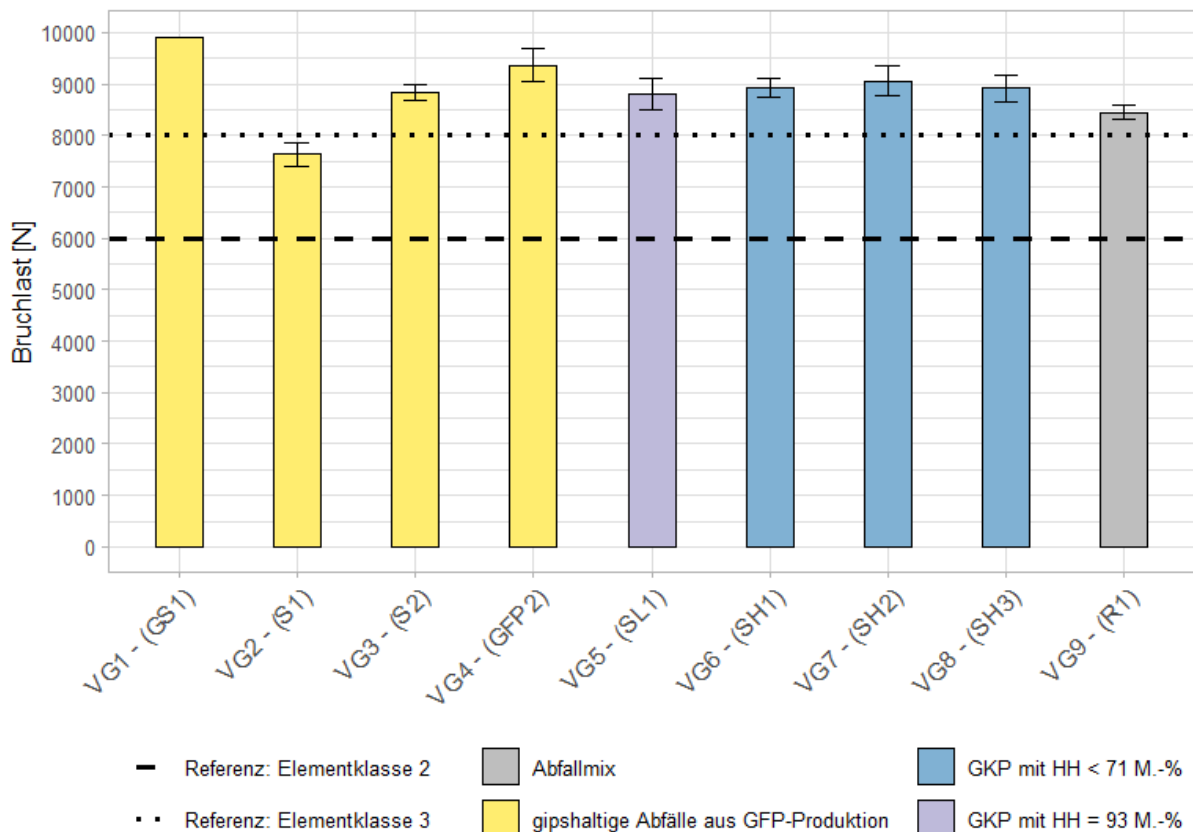


Abbildung 33: Vergleich der Bruchlasten von GFP aus 50 M.-% Stuckgips und 50 M.-% α -HH-Suspension aus gipshaltigen Bauabfällen. Die gestrichelten Linien stellen die Mindestanforderungen an die Bruchlast von Doppelbodenplatten für die Elementklassen 2 & 3 nach DIN EN 12825 dar (eigene Darstellung)

8.4. Zwischenfazit: Bewertung der Verwertbarkeit von gipshaltigen Bauabfällen in Doppelbodenplatten

Die durchgeführte Charakterisierung und Verarbeitung gipshaltiger Bauabfälle zeigt ein hohes Einsatzpotential für die Produktion von Gipsfaser-Doppelbodenplatten. Die Untersuchungen belegen, dass GKP auf Basis von Naturgips und REA-Gips, GFP, Schleifstäube sowie Gipsschlamm zu einem Anteil von bis zu 50 M.-% ohne signifikante Qualitätseinbußen eingesetzt werden können. Die überwiegende Mehrzahl der entwickelten Mischungen (VG1–VG9) erreicht Bruchlasten von mindestens 8,0 kN (vgl. Abbildung 33), womit diese für anspruchsvolle statische Anwendungen geeignet sind.

Allerdings verdeutlichen die Ergebnisse auch, dass die Produktqualität, gemessen an Bruchlast und Presszeit stark von den Materialparametern der gipshaltigen Bauabfälle abhängt. Materialien mit längeren, weniger fragmentierten Fasern (GFP und GKP mit ca. 1,0 mm Faserlänge, vgl. Tabelle 19) und höherer Reinheit führen zu hohen Festigkeitswerten ($\geq 8,8$ kN) und Presszeiten nahe des Referenzwertes. Im Gegensatz dazu zeigen gipshaltige

Bauabfälle mit geringerer Gipsreinheit um 25 bis 85 % längerer Presszeiten (vgl. Abbildung 32) bei vergleichbaren Bruchlasten.

Für die Kreislaufwirtschaft besonders relevant ist die Erkenntnis, dass hydrophobe Mittel aus Feuchtraumplatten (GKP Typ H2) sowie mineralische Nebenbestandteile wie Dolomit im Naturgips keinen messbaren negativen Einfluss auf die Bruchlast verdichteter Doppelbodenplatten zeigten. Dies eröffnet die Möglichkeit, GKP mit hydrophoben Zusätzen und mineralischen Nebenbestandteilen, sicher und ohne Qualitätseinbußen für die Herstellung von Doppelbodenplatten zu Anteilen von 50 M.-% einzusetzen. Somit kann das Spektrum an verwertbaren gipshaltigen Bauabfällen erweitert werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass gipshaltige Bauabfälle ein großes Potential für die Kreislaufwirtschaft bieten und für die Herstellung technisch hochwertiger Produkte verwertet werden können. Für eine optimale Steuerung der Produktqualität ist jedoch ein differenziertes Verständnis der Material- und Wechselwirkungseffekte erforderlich. Die folgenden Kapitel widmen sich daher einer detaillierten Analyse dieser Zusammenhänge, die als wissenschaftliche Grundlage für eine optimierte Rohstoffauswahl und -zusammensetzung dienen.

9. Bewertung von Gips- und Fasereigenschaften zur Steuerung der Bruchlast von Doppelbodenplatten

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Fasereigenschaften als auch die Gipseigenschaften und deren Wechselwirkungen maßgeblich die Bruchlast von Doppelbodenplatten beeinflussen. Bei heterogenen Gips- und Fasereigenschaften überlagern sich diese Einflüsse, sodass einzelne Effekte der Gipseigenschaften sowie der Gips-Faser-Interaktionen aus den bisherigen Ergebnissen nicht eindeutig beschrieben werden können.

Dieses Kapitel widmet sich daher der systematischen Beschreibung der Effekte von Gipseigenschaften, α -HH-Suspensionen und Gips-Faser-Interaktionen auf die Produktfestigkeit von Doppelbodenplatten. Dazu werden ausgewählte Versuche aus den Versuchsreihen in Kapitel 7 und Kapitel 8 herangezogen sowie ergänzende Versuche durchgeführt. Mit den ergänzenden Versuchen sowie der Anwendung des entwickelten Regressionsmodells wird ermöglicht, Variationen von Gipseigenschaften und Fasereigenschaften gezielt gegenüberzustellen, um die oben genannten Effekte zu quantifizieren.

Abschließend werden die Chancen sowie Grenzen der Steuerung sowie der Vorhersage der Produktfestigkeit anhand von Rohstoffeigenschaften und ihrer Wechselwirkungen beschrieben.

9.1. Bewertung der Effekte von Gipseigenschaften und Gips-Faser-Interaktionen auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten

Die systematische Beschreibung der Auswirkungen von Gipseigenschaften, α -HH-Suspensionen und Gips-Faser-Interaktionen auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten erfordert die gezielte Isolierung einzelner Effekte. Dafür waren ergänzende Versuche notwendig VG10, VG11 und VG12, die gemäß der Versuchsbeschreibung in Kapitel 5.3.2 durchgeführt wurden. Die Anwendung des Regressionsmodells ermöglicht es dabei, Abweichungen zwischen Modellprognosen und experimentellen Ergebnissen systematisch zu quantifizieren und damit bisher nicht erfasste Effekte nachzuweisen. Im Folgenden werden drei zentrale Einflussfaktoren auf die Produktfestigkeit von Doppelbodenplatten analysiert:

- Auswirkungen der Gipseigenschaften gipshaltiger Bauabfälle
- Effekt von α -HH-Suspensionen
- Quantifizierung des Einflusses von Gips-Faser-Interaktionen.

9.1.1. Einfluss von Gipseigenschaften auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten

Zur Analyse des Einflusses der Gipseigenschaften der verwendeten gipshaltigen Bauabfälle auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten wurden beispielhaft zwei Versuche (VG10 und VG11) gegenübergestellt. Beide Versuche weisen vergleichbare Faserstoffeigenschaften auf (Tabelle 23), unterscheiden sich jedoch in den Gipseigenschaften der eingesetzten Materialien (vgl. Kapitel 8.1).

In Versuch VG10 wurde eine α -HH-Suspension aus GKP Typ A (SL1) eingesetzt, während in Versuch VG11 eine α -HH-Suspension aus Gipsschlamm (GS1) verwendet wurde. In beiden Fällen betrug der Anteil der α -HH-Suspension und des β -HH jeweils 50 M.-% bezogen auf die Gesamtgipsmenge.

Sowohl GKP als auch Gipsschlämme bringen aus ihrer vorherigen Funktion bzw. Herkunft gewisse Faseranteile mit (vgl. Tabelle 18). Die von GKP Typ A eingebrachte Faserstoffqualität sowie Ihre Armierungswirkung entspricht der von GKP-Karton, während bei Gipsschlamm der geringe Fasergehalt die resultierenden Faserstoffeigenschaft und damit die Armierungswirkung nur marginale beeinflusst und vernachlässigt wird. In beiden Versuchen wurde ergänzend GKP-Karton unter Berücksichtigung der jeweiligen Fasergehalte zugesetzt, um die Faserstoffqualitäten anzugleichen. Dadurch kann von einer vergleichbaren Armierungswirkung ausgegangen werden, was durch die mit dem Regressionsmodell berechneten Bruchlasten bestätigt wird (VG10: 6,5 kN und VG11: 6,6 kN, Tabelle 23). Dies ermöglicht eine isolierte Bewertung des Einflusses der Gipseigenschaften auf die Produktfestigkeit.

Tabelle 23: Zusammensetzung, Fasereigenschaften, berechnete und beobachtete Bruchlast von Doppelbodenplatten mit GKP-Karton und 50 M.-% α -HH auf Basis von GKP Typ A (SL1) und Gipsschlamm (GS1)

Parameter		VG10	VG11
Gipsrohstoff	-	GKP Typ A (SL1)	Gipsschlamm (GS1)
Anteil α -HH / β -HH	[M.-%]	50 / 50	50 / 50
Faserstoff Altpapier	-	GKP Typ A	GKP Typ A
Anteil Altpapier / RC-Faserstoff	[M.-%]	71 / 29	91 / 9
Faserlänge_ISO_I	[mm]	1,14	1,09
Holzstoffanteil_GFP	[%]	2,65	2,23
Feinanteil_B_GFP	[%]	0,37	0,34
Fasergehalt_GFP	[M.-%]	5,32	4,95
Feststoffgehalt	[M.-%]	40,77	38,35
Rohdichte	[kg/m ³]	1.602	1.620
Bruchlast berechnet	[N]	6.446	6.631
Bruchlast beobachtet	[N]	7.636	7.639

Die ermittelten Bruchlasten beider Versuche weisen identische Werte auf (7,6 kN und 7,6 kN). Aufgrund der vergleichbaren Faserstoffeigenschaften und berechneten Bruchlasten lässt sich ableiten, dass die Gipseigenschaften der α -HH-Suspension von Gipsschlamm und GKP unter den gewählten Bedingungen ähnliche Auswirkungen auf die Bruchlast haben. Dies deutet darauf hin, dass die Unterschiede in den Gipseigenschaften bei einem Anteil der gipshaltigen Bauabfälle von 50 M.-% bezogen auf die Gesamtgipsmenge gegenüber anderen Einflussfaktoren untergeordnet sind.

9.1.2. Einfluss von α -HH auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten

Zur Validierung des positiven Einflusses von α -HH auf die Bruchlast werden vier Versuche herangezogen. VG1 (vgl. Kapitel 8.3.1) und VG10 mit 50 M.-% α -HH-Suspension (vgl. Anhang M, Tabelle M 1) sowie V12 und V24 (vgl. Tabelle 14) mit 100% Stuckgips (β -HH). Für die Versuche VG1 und V12 wurde ein krafthaltiges Papier „Krafthaltige Sorte 2“ als Faserstoff verwendet, während für VG10 und V24 GKP-Karton eingesetzt wurde. Auf dieser Basis ergeben sich zwei Vergleichspaare mit jeweils ähnlichen Fasereigenschaften (VG1–VG10 sowie VG12–VG24). Innerhalb dieser Paare sind die berechneten Bruchlasten vergleichbar, sodass Abweichungen der Bruchlast primär auf den Einsatz von α -HH zurückgeführt werden können. (Tabelle 24)

Tabelle 24: Materialzusammensetzung und Faserstoffeigenschaften von Doppelbodenplatten mit Zugabe von 50 M.-% α -HH-Suspension (VG1 auf Basis von Gipsschlamm (GS1) und VG10 auf Basis von GKP(SL1)) sowie ohne α -HH-Zusatz (V12 und V24 mit 100 M.-% Stuckgips). Alle Angaben beziehen sich auf die Gesamtgipsmenge

Parameter		VG1	V12	VG10	V24
α -HH-Suspension	-	Gipsschlamm (GS1)	-	GKP Typ A (SL1)	-
β -HH		Stuckgips (SG1)	Stuckgips (SG1)	Stuckgips (SG1)	Stuckgips (SG1)
Anteil α -HH / β -HH	[M.-%]	50 / 50	0 / 100	50 / 50	0 / 100
Faserstoff Altpapier	-	Krafthaltige Sorte 2	Krafthaltige Sorte 2	GKP Typ A	GKP Typ H
Anteil Altpapier / RC-Faserstoff	[M.-%]	89 / 11	100 / 0	71 / 29	100 / 0
Faserlänge_ISO_I	[mm]	1,06	1,10	1,14	1,09
Holzstoffanteil_GFP	[%]	0,18	0,18	2,65	2,66
Feinanteil_B_GFP	[%]	0,06	0,03	0,37	0,49
Fasergehalt_GFP	[M.-%]	5,29	4,84	5,36	5,04
Feststoffgehalt	[M.-%]	38,35	40,93	40,77	41,50
Bruchlast_berechnet	[N]	7.487	7.638	6.446	6.331
Rohdichte	[kg/m ³]	1.597	1.494	1.602	1.502

Insgesamt zeigt der Einsatz von α -HH einen erkennbar positiven Einfluss auf die Bruchlast (Abbildung 34). Das α -HH weist eine dichtere Kristallstruktur auf, die bei der Hydratation zu einer kompakten Kristallstruktur mit geringerer Porenanzahl und höherer Rohdichte führt.

Diese dichte Struktur fördert interkristalline Verbindungen und verbessert damit signifikant die mechanischen Eigenschaften von Gipsprodukten.^{296, 297} Die experimentellen Ergebnisse bestätigen somit die Erkenntnisse aus der Literatur²⁹⁸ und unterstreichen die festigkeitsrelevante Überlegenheit des α -Halbhydrats gegenüber dem β -Halbhydrat bei der Herstellung von Gipsfaserprodukten.

Allerdings deutet die Abweichung der Festigkeitssteigerung auf eine Abhängigkeit vom eingesetzten Faserstoff an. Bei den Doppelbodenplatten, die mit der „Krafthaltige Sorte 2“ armiert sind, beträgt die Abweichung zwischen α -HH und β -HH etwa 1,9 kN, während sie bei Platten aus GKP-Karton bei etwa 1,1 kN liegt. Dies verdeutlicht, dass der positive Effekt des α -HH auf die Produktfestigkeit durch die Faserqualität beeinflusst wird und nicht pauschal quantifiziert werden kann. Der stärkere Effekt bei Kraftpapier deutet darauf hin, dass Gips-Faser-Interaktionen einen signifikanten Einfluss auf die Produktfestigkeit ausüben.

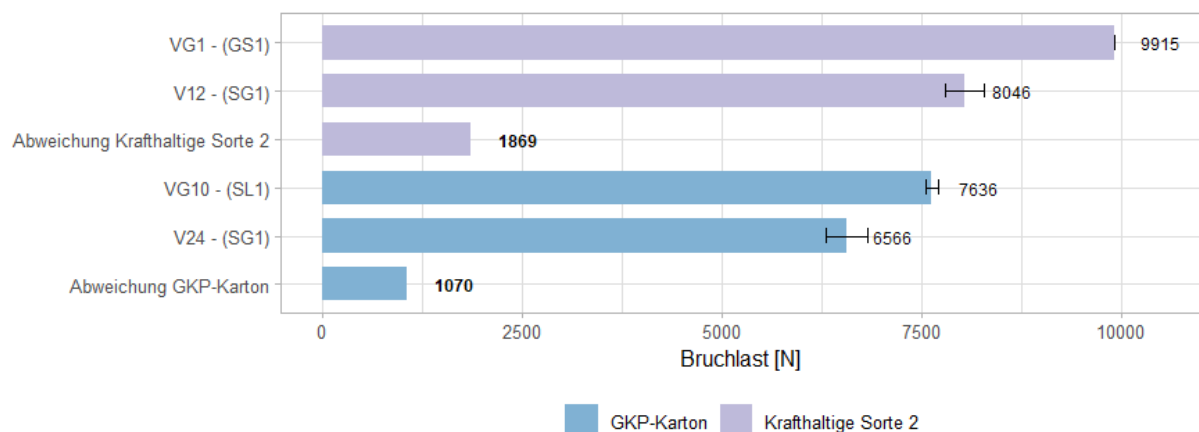


Abbildung 34: Vergleich der Bruchlast von Doppelbodenplatten mit den Faserstoffen „Krafthaltiger Sorte 2“ und „GKP-Karton“ und Zugabe von 50 M.-% α -HH auf Grundlage von Gipsschlamm (VG1) und GKP (VG10) sowie 100 M.-% Stuckgips (V12 und V24) (eigene Darstellung)

9.1.3. Einfluss von Gips-Faser-Interaktionen auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten

Zur Validierung des Einflusses der Gips-Faser-Wechselwirkungen auf die Bruchlast wurden drei Versuche (VG5, VG10, VG12) gegenübergestellt, die identische Gipseigenschaften (50 M.-% Stuckgips und 50 M.-% α -HH auf Basis von GKP (SL1)), bei unterschiedlichen Faserqualitäten aufweisen (Tabelle 25). Als Faserstoffe wurden GKP-Karton (VG10), Krafthaltige Sorte 2 (VG5) und Krafthaltige Sorte 8 (VG12) eingesetzt. Durch die Gegenüberstellung der beobachteten Bruchlasten mit den auf Basis der jeweiligen Fasereigenschaften berechneten

²⁹⁶ [Singh & Middendorf, 2007].

²⁹⁷ [Tesch, 2006], S. 6.

²⁹⁸ [Förthner, 2011], S. 4.

Bruchlasten konnte der Effekt der Gips-Faser-Wechselwirkungen nachgewiesen werden.

Tabelle 25: Materialzusammensetzung und Faserstoffeigenschaften von Doppelbodenplatten mit Zugabe von 50 M.-% α -HH auf Basis von Gipsschlamm (VG11) und GKP (VG10, VG5 und VG12)

Parameter		VG10	VG5	VG12
Gipsrohstoff	-	GKP Typ A (SL1)	GKP Typ A (SL1)	GKP Typ A (SL1)
Anteil α -HH / β -HH	[M.-%]	50 / 50	50 / 50	50 / 50
Faserstoff Altpapier	-	GKP Typ A	Krafthaltige Sorte 2	Krafthaltige Sorte 8
Anteil Altpapier / RC-Faserstoff	[M.-%]	71 / 29	74 / 26	72 / 28
Faserlänge_ISO_I	[mm]	1,14	1,11	1,73
Holzstoffanteil_GFP	[%]	2,65	0,90	0,95
Feinanteil_B_GFP	[%]	0,37	0,13	0,32
Fasergehalt_GFP	[M.-%]	5,32	5,79	6,25
Feststoffgehalt	[M.-%]	40,77	41,96	41,19
Rohdichte	[kg/m ³]	1602	1553	1574

In Abbildung 35 werden in der linken Grafik die beobachteten Bruchlasten (farbige Balken) und die mit dem Regressionsmodell berechneten Bruchlasten (rote Kreise) dargestellt. Mit der rechten Grafik wird die absolute Abweichung zwischen berechneten und beobachteten Bruchlasten visualisiert. Das entwickelte Regressionsmodell prognostiziert die Bruchlast auf Basis von Fasereigenschaften und Stuckgips. Werden nun Platten mit Zusatz von α -HH hergestellt, ist nach den Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel eine Bruchlaststeigerung zu erwarten. Ohne Gips-Faser-Wechselwirkungen sollten die berechneten und beobachteten Bruchlasten bei unterschiedlichen Faserqualitäten und identischen Gipseigenschaften eine vergleichbare, lineare Festigkeitssteigerung zeigen.

Die Ergebnisse jedoch zeigen, dass mit höherer Faserqualität²⁹⁹ (GKP-Karton → GKP Karton & Krafthaltige Sorte 2 → GKP-Karton & Krafthaltige Sorte 8) die Bruchlast deutlich ansteigt. Dabei zeigt sich eine charakteristische und progressive Diskrepanz zwischen den mit dem Regressionsmodell berechneten und den experimentell beobachteten Bruchlasten. Während das Modell einen moderaten Anstieg von VG10 (6,4 kN) über VG5 (7,1 kN) zu VG12 (7,5 kN) prognostiziert, ist der tatsächliche Festigkeitszuwachs mit steigender Faserqualität (7,6 kN → 8,8 kN → 10,8 kN) erheblich stärker ausgeprägt.

²⁹⁹ Höhere Faserqualität sind basierend auf den Erkenntnissen der Modellierung der Armierungswirkung durch längere Fasern, geringere Holzstoffanteile, niedrigeren Feinanteil charakterisiert.

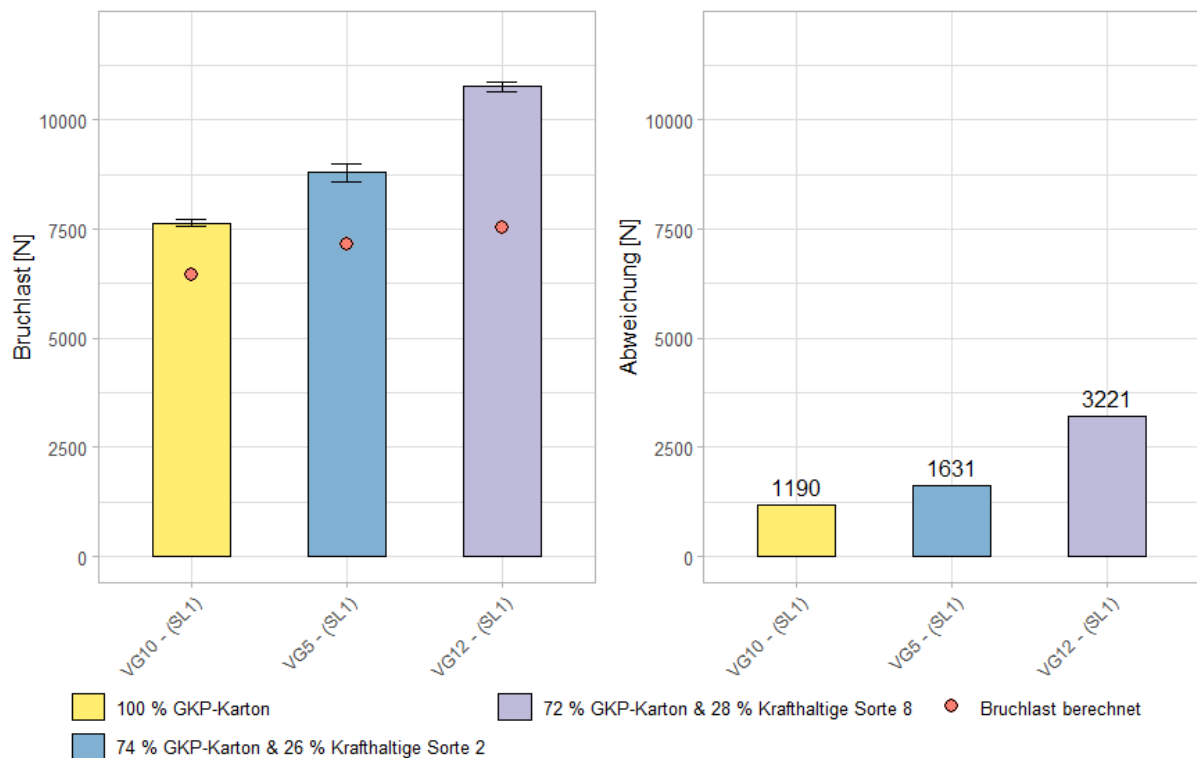


Abbildung 35: Vergleich der beobachteten und berechneten Bruchlasten von Doppelbodenplatten mit Zusatz von 50 M.-% alpha-HH auf Grundlage von GKP mit Faserstoffen GKP-Karton (VG10), GKP-Karton & Krafthaltiges Papier 2 (VG5) sowie GKP-Karton & Krafthaltiges Papier 8 (VG12) (links) sowie die Abweichung der beobachteten und berechneten Bruchlasten (rechts) (eigene Darstellung)

Aus den zunehmenden Abweichungen lässt sich schlussfolgern, dass synergistische Gips-Faser-Wechselwirkungen die Produktfestigkeit mit zunehmender Faserqualität progressiv verstärken. Zellulosefasern weisen eine höhere Zugfestigkeit auf als Holzstoff, gehen Wasserstoffbrückenbindungen ein und ermöglichen eine bessere Kraftübertragung zur Gipsmatrix. In Kombination mit der dichteren Kristallstruktur des α -HH wird das Armierungspotenzial dieser Fasern vollständiger ausgeschöpft. Dies führt zu erhöhtem Widerstand gegen Faserauszug und resultiert in deutlich höheren Bruchlasten.

Das Potenzial des α -HH zur Festigkeitssteigerung wird insbesondere bei hochwertigen Fasern mit großer Faserlänge, niedrigem Holzstoffgehalt und geringem Feinanteil vollständig ausgeschöpft. Dies wird besonders bei VG12 mit dem Faserstoff „Krafthaltige Sorte 8“ deutlich, bei dem die gemessene Bruchlast um rund 42 % über der modellbasierten Prognose liegt. Mit abnehmender Faserqualität wird das Potential des α -Halbhydrats gegenüber dem β -Halbhydrat verringert, weil die synergistischen Gips-Faser-Wechselwirkungen zunehmend nicht mobilisiert werden können. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das Armierungspotenzial nur durch das abgestimmte Zusammenwirken hochwertiger Gipse und geeigneter Faserstoffe vollständig ausgeschöpft werden kann.

9.2. Anwendung des Regressionsmodells auf Doppelbodenplatten mit gipshaltigen Bauabfällen

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Regressionsmodell erfasst die Armierungswirkung von Fasereigenschaften in Doppelbodenplatten auf Basis homogener Gipseigenschaften (Stuckgips – SG1). Die Versuche VG1 bis VG12 weisen durch die Zugabe von α -HH-Suspensionen hingegen deutlich heterogene Gipseigenschaften auf. Basierend auf den zuvor ermittelten Effekten der Gipseigenschaften und Gips-Faser-Interaktionen auf die Produktfestigkeit sind bei der Anwendung des Regressionsmodells auf Doppelbodenplatten mit gipshaltigen Bauabfällen Abweichungen zwischen berechneten und beobachteten Bruchlasten zu erwarten. Die Analyse dieser Abweichungen dient der Beschreibung fehlender Modellannahmen und der Ableitung des Forschungsbedarfs, um prädiktive Modelle zu entwickeln, die eine gezielte Vorhersage und Steuerung der Bruchlast von GFP ermöglichen.

Da die Faserstoffe aus Gipsschlamm, Schleifstäuben und zerkleinerter GFP nicht isoliert werden konnten, konnte deren Holzstoffanteil und Ascheanteil nicht ermittelt werden (vgl. Kapitel 8.1.1). Für die Berechnung der Bruchlast wurde daher ein Holzstoff- und Ascheanteil von 0 angenommen, was bei den berechneten Bruchlasten für (VG1 – VG4 sowie VG11) zu berücksichtigen ist. Eine Auflistung der Zusammensetzung sowie aller relevanter Parameter zur Berechnung der Bruchlast ist im Anhang M (vgl. Tabelle M 1) hinterlegt.

In Abbildung 36 werden die experimentell gemessenen Bruchlasten (Balken) der Versuche VG1 bis VG12 den modellierten Vorhersagewerten (rote Punkte) gegenübergestellt. Darin zeigt sich, dass das Regressionsmodell die Bruchlast systematisch unterschätzt. Die mittlere berechnete Bruchlast ($\sim 7,2$ kN) liegt deutlich unter der beobachteten ($\sim 8,8$ kN), was den positiven Effekt der α -HH-Suspensionen widerspiegelt, der vom Modell nicht ausreichend erfasst wird (vgl. Anhang M, Abbildung M 1). Zudem reichen die Abweichungen von etwa 0,6 kN (VG2) bis 3,2 kN (VG12) und verdeutlichen, dass nichtlineare Wechselwirkungen zwischen Gips und Fasern (Gips-Faser-Interaktion) vom Regressionsmodell nicht abgebildet werden.

Der signifikante Unterschied in der Bruchlast zwischen Schleifstaub aus Werk 1 (VG2) und Werk 2 (VG3) ist nicht auf unterschiedliche Gipseigenschaften zurückzuführen, da diese vergleichbar sind (vgl. Tabelle 21). Vielmehr scheint der Anteil an Kurzfasern in VG2 (58 M.-%) und VG3 (43 M.-%) und die Gips-Faser-Interaktion die Differenz der Produktfestigkeit zu prägen. Eine abschließende Bestätigung dieser These ist auf Basis der vorliegenden Daten sowie vor dem Hintergrund der Messunsicherheit bei der Ermittlung der Faserstoffqualitäten bei Produktionsabfällen aus der GFP-Produktion zurzeit nicht möglich.

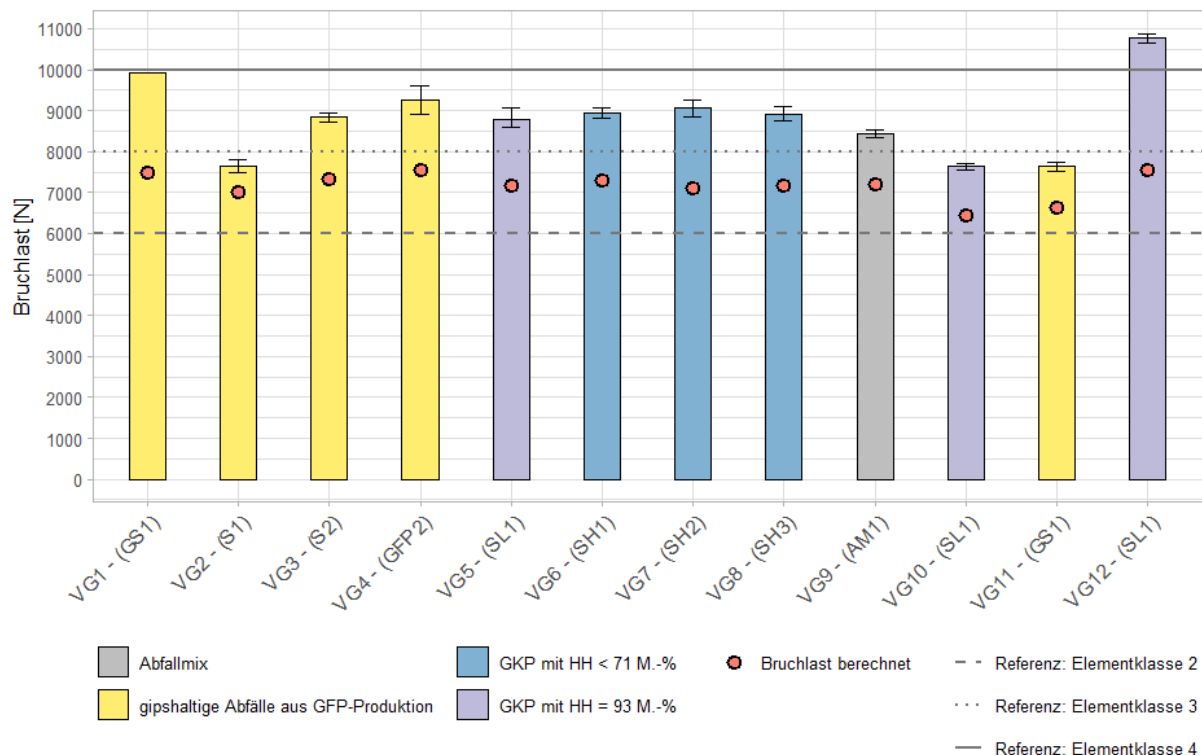


Abbildung 36: Vergleich der beobachteten Bruchlasten und der auf Grundlage der Regressionsgleichung berechneten Bruchlasten von GFP mit gipshaltigen Bauabfällen (eigene Darstellung)

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Regressionsmodell demonstriert eine hohe Modellgüte und Vorhersagekraft bei homogenen Gipsmischungen auf Basis von Stuckgips. Allerdings zeigt es strukturelle Limitationen zur gezielten Vorhersage der Bruchlast für GFP mit α -HH-Suspensionen auf Basis gipshaltiger Bauabfälle, da es komplexe nichtlineare Wechselwirkungen zwischen Materialkomponenten und Interaktionseffekte nicht abbilden kann.

Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass die entscheidenden Einflussfaktoren auf die Produktfestigkeit eindeutig quantifizierbar und nachweisbar sind. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Bruchlast von Doppelbodenplatten durch eine gezielte Anpassung der Rezeptur und der Rohstoffauswahl, insbesondere durch Optimierung der Gips-Faser-Interaktionen und der α -HH-Dosierung zu steigern. Dies zeigt sich exemplarisch am Versuch VG12, bei dem mit der gewählte Rezeptur Bruchlasten erzielt wurden, die eine Einstufung in die Elementklasse 4 ermöglichen.

10. Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

Die Ergebnisse dieser Arbeit demonstrieren, dass der Einsatz gipshaltiger Bauabfälle zur Herstellung von Doppelbodenplatten technisch realisierbar ist und zu Produkten mit hoher mechanischer Leistungsfähigkeit führt. Bei einer Substitution von 50 M.-% der Gipsmenge durch gipshaltige Bauabfälle wie GKP, GFP, Gipsschlamm und Schleifstaub werden Bruchlasten zwischen 7,6 und 10,7 kN erreicht (vgl. Kapitel 9.2). Diese Festigkeitswerte entsprechen den Anforderungen der Elementklassen 2–4 nach DIN EN 12825 und ermöglichen den Einsatz in einem breiten Spektrum von Anwendungen, die von Bürobereichen mit mittleren Belastungen bis hin zu statisch anspruchsvollen Einsatzgebieten wie Ausstellungsflächen und Serverräumen reichen.

Eine zentrale Herausforderung bei der Verwertung von gipshaltigen Bauabfällen in der GFP-Produktion, ist das Einbringen heterogener Materialeigenschaften, die maßgeblichen Einfluss auf die Produktfestigkeit und Produktionsprozesse haben. Basierend auf den Untersuchungen am Beispiel von Doppelbodenplatten konnten in dieser Arbeit Faser- und Gipseigenschaften sowie deren Wechselwirkung als maßgebliche Einflussfaktoren auf die Produktfestigkeit nachgewiesen und quantifiziert werden.

Faserstoffeigenschaften: Mit der multivariaten Regressionsanalyse (vgl. Kapitel 7.3) wurden vier zentrale Faserkennwerte für die Armierungswirkung in Doppelbodenplatten identifiziert. Längere Fasern führen zu höheren Bruchlasten (Effektstärke: $\beta = 0,418$), während höhere Holzstoff- (Effektstärke: $\beta = -0,479$) und Feinanteile (Effektstärke: $\beta = -0,347$) die Produktfestigkeit reduzieren. Der Fasergehalt in Doppelbodenplatten für Anteile zwischen 3,7–8,3 M.-% zeigte den geringsten Effekt (Effektstärke: $\beta = -0,227$) mit steigender Produktfestigkeit bei sinkenden Fasergehalten.

Gipseigenschaften: Bei der Bewertung des Einflusses von Gipseigenschaften muss die Betrachtungsebene unterschieden werden. Unterschiede zwischen verschiedenen Gipsarten, etwa zwischen Stuckgips (β -Halbhydrat) und α -Halbhydrat, weisen deutliche Unterschiede hinsichtlich der spezifischen Oberfläche, Korngrößenverteilung und Kristallmorphologie auf (vgl. Kapitel 8.1). Der höhere Verdichtungsgrad, die kompaktere Kristallmorphologie, die niedrige BET-Oberfläche und Korngröße des α -Halbhydrats führen zu signifikant höheren Bruchlasten, wie der Vergleich der Bruchlasten von Platten aus reinem Stuckgips mit 7,2 kN im Mittel (max. 8,3 kN) (vgl. Kapitel 7) und Mischungen mit 50 % α -Halbhydrat mit 8,8 kN im Mittel (max. 10,7 kN) (vgl. Kapitel 9.2) zeigt. Erfolgt der Vergleich innerhalb der α -Halbhydrat-basierten Rezepturen unter Verwendung von GKP, GFP, Gipsschlamm und Schleifstaub zeigt sich ein anderes Bild. Die Qualitätsunterschiede innerhalb der verwendeten gipshaltigen Abfälle sind deutlich geringer (vgl. Kapitel 8.1.2). Doppelbodenplatten, in denen GKP (SL1)

und Gipsschlamm (GS1) zu 50 M.-% als Sekundärrohstoffe verwertet wurden, erreichten identische Bruchlasten von 7,6 kN (vgl. Kapitel 9.1.1). Der Einfluss der Gipseigenschaften, der durch die Herkunft und Aufbereitung der gipshaltigen Bauabfälle bedingt ist, wirkt sich demnach untergeordnet auf die Festigkeit aus. Platten, mit Zusätzen von GFP und Schleifstaub wurden nicht in den Vergleich einbezogen, da aufgrund fehlender standardisierter Verfahren zur Bestimmung der Faserstoffeigenschaften in Gips-Faser-Gemischen messbedingte Unsicherheiten nicht ausgeschlossen werden konnten.

α -Halbhydrat: Die Umwandlung der gipshaltigen Bauabfälle zu α -Halbhydrat-Suspensionen durch die Nasskalzinierung bewirkt eine signifikante Qualitätsverbesserung. Gipskristalle werden vollständig gelöst und zu kompakten, gut ausgebildeten Kristallen umgewandelt. Mit dem Einsatz von α -HH konnte eine Steigerung der Bruchlast um 1–2 kN (vgl. Kapitel 9.1.2) nachgewiesen werden. Aus der Abweichung lässt sich schlussfolgern, dass der festigkeitssteigernde Effekt von α -HH nicht pauschal angenommen werden kann, sondern maßgeblich mit der Qualität der Fasereigenschaften sowie der Gips-Faser-Wechselwirkung zusammenhängt.

Gips-Faser-Wechselwirkungen: Mit dem Ansatz der experimentell-modellbasierten Analyse konnte der Einfluss synergistischer Gips-Faser-Wechselwirkungen nachgewiesen werden (vgl. Kapitel 9.1.3). Das durch α -Halbhydrat eingebrachte Festigkeitssteigerungspotential wird durch hochwertige Fasereigenschaften vollständig ausgeschöpft und führt zu nichtlinearen Festigkeitssteigerungen. Anhand der Diskrepanz zwischen berechneter und beobachteter Bruchlast 1,2 kN $\rightarrow$ 1,6 kN $\rightarrow$ 3,2 kN konnte der progressive Anstieg gezeigt werden. Demnach erfasst das aufgestellte Modell den Effekt der Gips-Faser-Wechselwirkung mit zunehmender Faserqualität immer unzureichender. Das lässt den Schluss zu, dass hochwertige Fasern in Kombination mit der dichteren Kristallstruktur des α -Halbhydrats eine bessere Kraftübertragung zur Gipsmatrix ermöglichen und damit das Armierungspotential vollständiger ausgeschöpft wird, was zu erhöhtem Faserauszugwiderstand und damit deutlich höheren Bruchlasten führt.

Bei der Verwendung von imprägnierten GKP (VG7: 9,1 kN) sowie von GKP (Typ A und DF) auf Naturgipsbasis (VG6 & VG8: 8,9 kN) werden vergleichbare Bruchlasten zu GKP auf REA-Gipsbasis (VG5: 8,8 kN) erreicht (vgl. Kapitel 8.3.3). Demnach können mit dem in dieser Arbeit verwendeten Verwertungsverfahren bestehend aus Nassrecycling, Nasskalzinierung und Taktpressverfahren GKP aller Typen ganzheitlich für die Herstellung von Doppelbodenplatten eingesetzt werden. Dies ist kreislaufwirtschaftlich von großer Relevanz, da damit ein neuer vielversprechender Verwertungsweg für diese Materialien eröffnet wird. Bisher war die Verwertung von imprägnierten GKP aufgrund der darin enthaltenen hydrophoben Additive für die aktuellen Verwertungswege nicht oder nur in geringen Anteilen möglich (vgl. Kapitel 2.5.1).

Die Verwertung von GKP auf Naturgipsbasis, welcher im Vergleich zu REA-Gips naturgemäß mineralische Nebenbestandteile und niedrigere Gipsreinheit aufweist, gewinnt vor dem Hintergrund der zukünftigen Rohstoffverfügbarkeit zusätzliche Bedeutung. Die durchgeführte Charakterisierung sortenreiner GKP (vgl. Kapitel 6) zeigte, dass die Gipsreinheit primär vom Produktionswerk und der dort eingesetzten Gipsart abhängt, nicht vom GKP-Typ selbst. Die gemessenen Gipsreinheiten³⁰⁰ schwankten zwischen 77 % und 98 %, (vgl. Kapitel 6.1) wobei die niedrigsten Werte auf den Einsatz von Naturgips und die höchsten auf den Einsatz von REA-Gips zurückzuführen waren. Mit dem Ausstieg aus der Kohleverstromung und dem damit verbundenen Wegfall des hochreinen REA-Gipses ist zukünftig mit weiter sinkenden Gipsreinheiten bei Gipsprodukten zu rechnen. Bei der Herstellung von GKP verlangen die Hersteller die Einhaltung der vom Gipsverband für die Gipsindustrie definierten Reinheitsanforderungen an RC-Gips ($\geq 80\%$), um negative Auswirkungen auf Produktionsprozesse und Produktqualitäten zu vermeiden. Vor dem Hintergrund der zukünftig voraussichtlich sinkenden Gipsreinheiten ist zu befürchten, dass RC-Gipse künftig nur noch in eingeschränktem Umfang als Sekundärrohstoff für die Herstellung neuer GKP eingesetzt werden können.

Die vorliegende Arbeit zeigt jedoch, dass diese Materialien für die Herstellung von GFP vollwertig verwertet werden können. Dies eröffnet einen bedeutsamen alternativen Verwertungsweg für gipshaltige Abfälle und damit großes Potenzial für eine Ressourcenschonung und die Vermeidung der Beseitigung gipshaltiger Abfälle bietet. Ein einschränkender Aspekt könnte jedoch sein, dass gipshaltige Bauabfälle mit niedrigen Reinheiten einen negativen Effekt auf die Produktionsprozesse ausüben. Gegenüber hochreinen Materialien weisen sie eine deutlich längere Umwandlungsgeschwindigkeit von 30 bis 60 Minuten (vgl. Kapitel 8.2) sowie eine deutlich verlängerte Presszeit von + 25 % bis + 85 % auf (vgl. Kapitel 8.3.2). Dies könnte Produktivitätsverluste bei der GFP-Herstellung zur Folge haben. Ein wesentlicher Befund ist jedoch, dass für verdichtete GFP-Produkte auch RC-Gipse mit niedrigeren Reinheitsanforderungen eingesetzt werden können, ohne die erzielte Produktqualität nachteilig zu beeinflussen.

Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen grundlegende qualitative Annahmen für die Rohstoffauswahl und Rezepturentwicklung, um eine hohe Produktqualität bei variierenden Ausgangsrohstoffen zu sichern. Entscheidend ist die Abstimmung von Gips- und Faserqualität, denn hochwertige α -HH-Suspensionen entfalten ihr volles Festigkeitspotenzial erst in Kombination mit langen, hochwertigen Fasern. Mögliche Rohstoffeinsparungen ergeben sich perspektivisch dann, wenn durch optimierte Rezepturen so hohe Produktfestigkeiten erzielt

³⁰⁰ Die Reinheit des Gipses wird durch seinen Dihydratgehalt bestimmt

werden, dass die geforderten Festigkeitsanforderungen auch bei reduzierten Plattendicken sicher eingehalten werden können.

Mit der Nasskalzinierung wird die Materialqualität der RC-Gipse positiv beeinflusst und ermöglicht damit mehrfache Recyclingzyklen. Mit Trockenkalzinierungsverfahren hergestelltes β -HH würde bei wiederholten Recyclingzyklen hingegen zu einer progressiven Qualitätsverschlechterung und schlechteren Verarbeitbarkeit führen, bis der Gips nicht mehr einsetzbar ist. Das in dieser Arbeit verwendete Recyclingverfahren bietet damit nicht nur die Möglichkeit eines geschlossenen Gipskreislaufs, sondern führt sogar zu einer Verbesserung der RC-Gipsqualitäten.

Das in Kapitel 7.3 entwickelte Regressionsmodell ermöglicht eine zuverlässige Prognose der Produktfestigkeit anhand von Fasereigenschaften bei definierten, konstanten Eigenschaften von Stuckgips (SG1). Unter diesen Bedingungen quantifiziert das Modell die Armierungswirkung verschiedener Faserstoffeigenschaften und liefert belastbare Vorhersagen für Doppelbodenplatten ($R^2 = 0,826$). Der mit der 5-fachen Kreuzvalidierung ermittelte mittlere RMSE (Root Mean Squared Error) von etwa 0,4 kN beschreibt die durchschnittliche Abweichung zwischen beobachteter und modellhaft berechneter Bruchlast und entspricht einer relativen Abweichung von rund 5 %. Dies verdeutlicht, dass lineare prädiktive Modelle gut geeignet sind, eine gezielte und präzise Vorhersage der Bruchlast von Doppelbodenplatten bei konstanten Gipseigenschaften und variierenden Faserstoffeigenschaften zu ermöglichen. Das Modell liefert wertvolle Erkenntnisse, indem es die Haupteinflussfaktoren und Trends quantifiziert, die als handlungsleitende Grundlagen für Rezepturentwicklung und Rohstoffauswahl dienen und damit praktische Optimierungsmöglichkeiten eröffnen. Eine Übertragung des Modells auf Gipsfaserplatten (GFP) anderer Herstellungsverfahren ist nicht gewährleistet, da der Herstellungsprozess einen maßgeblichen Einfluss auf die Produktfestigkeit hat und somit die Vorhersagegenauigkeit des Modells einschränken kann.

Bei heterogenen Gipseigenschaften, wie sie durch α -HH-Suspensionen aus gipshaltigen Bauabfällen eingebracht werden, weist das Modell Limitationen auf. Es setzt die tatsächliche Bruchlast systematisch zu niedrig an (mittlere Abweichung 1,6 kN; maximale Abweichung 3,2 kN; vgl. Kapitel 9.2). Die Abweichungen sind nicht zufällig, sondern folgen einem Muster. Die Diskrepanz wächst mit zunehmender Faserqualität. Dies deutet darauf hin, dass das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell insbesondere α -HH-Effekte und nichtlineare Gips-Faser-Wechselwirkungen nicht vollständig erfasst. Die Ergebnisse belegen, dass die Festigkeit aus einem komplexen Zusammenspiel von Faserqualität, Gipseigenschaften und ihren gegenseitigen Wechselwirkungen resultiert. Eine zuverlässige, rein modellbasierte Vorhersage der Bruchlast von Doppelbodenplatten mit heterogenen Gips- und Fasereigenschaften ist mit den derzeit vorliegenden Modellansätzen nicht realisierbar.

Auf Grundlage dieser Erkenntnis leitet sich der weitere Forschungsbedarf ab. Um die identifizierten, nichtlinearen Wechselwirkungen in einem Modell abzubilden, ist eine Erweiterung der Systemgrenzen erforderlich. Dazu sind weiterführende systematische Versuchsreihen notwendig. Diese sollten im Schwerpunkt die kombinierte Variation von Gips- und Fasereigenschaften sowie die Variation von Gipseigenschaften bei konstanten Fasereigenschaften umfassen. Auf der erweiterten Datengrundlage sollten komplexe nichtlineare Modellierungsverfahren angewandt werden, um die komplexen Wechselwirkungen besser abzubilden und die Vorhersagekraft zu verbessern. Darüber hinaus ist die essenzielle Voraussetzung, eine standardisierte Methodik zur Ermittlung von Fasereigenschaften in Gips-Faser-Gemischen zu entwickeln. Die in dieser Arbeit eingesetzte Methodik konnte Faserstoffeigenschaften aus Gipsschlamm, Schleifstäuben und zerkleinerter GFP nicht zuverlässig isolieren, was zu Verzerrungen der Parameterschätzungen führen und die Modellvorhersage beeinträchtigen kann. Dies ist insbesondere bei der Anwendung des Modells auf Gips-Fasergemische mit Produktionsabfällen aus der GFP-Produktion zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 9.2). Eine verbesserte Methodik würde die Datengüte steigern und dadurch die Genauigkeit und Zuverlässigkeit zukünftiger Modellvorhersagen optimieren.

Die in der Arbeit beschriebene Methodik demonstriert die technische Machbarkeit der Nutzung gipshaltiger Bauabfälle für die Herstellung von GFP und ermöglicht eine systematische Untersuchung der Einflüsse von Rohstoffeigenschaften auf die Produktfestigkeit im Technikumsmaßstab. Dies erlaubt eine Bewertung des Verwertungspotenzials gipshaltiger Bauabfälle für die GFP-Produktion sowie die Optimierung der Rohstoffzusammensetzung für Produktionsprozesse und Produktqualitäten. Angesichts des künftig steigenden Aufkommens von GKP und GFP aus dem Rückbau bietet der Verwertungsweg großes Potenzial, wertvolle Ressourcen im Kreislauf zu halten, die Versorgungssicherheit zu stärken und der Gipsverknappung entgegenzuwirken. Besonders hervorzuheben ist, dass dieser Weg erstmals die gleichzeitige Rückführung und Nutzung von Gips und Faserstoffen aus Bauabfällen ermöglicht, was einen bedeutenden Fortschritt für die Kreislaufführung von Gipsprodukten darstellt.

11. Zusammenfassung

Deutschland verbraucht jährlich etwa 10 Millionen Tonnen Gips, wobei der Bedarf zu gleichen Teilen durch Naturgips und Rauchgasentschwefelungsgips (REA-Gips) gedeckt wird. Mit dem bis 2038 geplanten Kohleausstieg ist ein signifikanter Rückgang der REA-Gips-Verfügbarkeit zu erwarten, was eine zunehmende Ressourcenverknappung zur Folge hat. Obwohl Gips mehrfach recycelbar ist, werden gegenwärtig nur etwa 13 % der jährlich anfallenden 700.000 Mg gipshaltiger Bauabfälle recycelt. Das Recycling beschränkt sich überwiegend auf sortenreine Gipskartonplatten ohne Zusätze (Typ A). GFP oder imprägnierte GKP (Typ H) sind aufgrund ihres hohen Fasergehalts bzw. hydrophober Additive für etablierte Verwertungswege nicht oder nur in geringen Anteilen geeignet. In Anbetracht des zukünftig steigenden Aufkommens an gipshaltigen Bauabfällen ist eine konsequente Kreislaufwirtschaft mit innovativen Verwertungswegen daher unabdingbar, um das vorhandene Ressourcenpotential zu nutzen und Primärrohstoffe zu schonen.

Ein möglicher Verwertungsweg ist die ganzheitliche Verwertung gipshaltiger Bauabfälle z. B. GKP und GFP zur Herstellung von GFP. Die Verstärkung der Gipsmatrix durch Fasern ist entscheidend für die Festigkeit von GFP. Dies ermöglicht es, sowohl die Gips- als auch die Papierfraktion gipshaltiger Bauabfälle als Substitutionsmaterial zu nutzen. Materialqualitäten von Gipsbaustoffen unterliegen aufgrund vielfältiger Einsatzmöglichkeiten Schwankungen, was eine Herausforderung für die Herstellung von GFP und die entsprechende Produktqualität darstellt, da Prozesssteuerung und Rezepturen auf konstante Materialeigenschaften ausgerichtet sind.

Eine effektive Verwertung heterogener gipshaltiger Bauabfälle in der GFP-Herstellung erfordert ein umfassendes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Materialeigenschaften, Produktionsprozessen und Produktqualität. In dieser Arbeit wurden die Zusammenhänge anhand von sortenreinen Gipskartonplatten (Typ A, H, DF) und Produktionsabfällen (GFP-Ausschuss, Schleifstäube, Gipsschlämme) am Beispiel von Doppelbodenplatten untersucht.

Zunächst wurden die zu erwartenden Materialqualitäten der gipshaltigen Bauabfälle anhand von 20 Gipskartonplattenproben aus sieben Werken zweier Hersteller sowie von Produktionsabfällen aus einer GFP-Produktion mittels Röntgendiffraktometrie mit Rietveld-Verfeinerung, Laserbeugung, Rasterelektronenmikroskopie, Blaine- und BET-Verfahren analysiert. Fasereigenschaften wurden mit dem Valmet Image Analyzer und Paper Bale Sensor bestimmt. In einem dreistufigen Ansatz wurden zunächst die maßbeglichen Fasereigenschaften für die Armierungswirkung in Doppelbodenplatten identifiziert und deren Effektstärke quantifiziert. Dafür wurden Platten aus reinem Stuckgips mit variierenden

Faserstoffen mittels multivariater Modellierung analysiert. Im zweiten Schritt wurden die gipshaltigen Bauabfälle nassskalziniert, zu α -Halbhydrat-Suspensionen aufbereitet und im Verhältnis 1:1 mit Stuckgips sowie einem krafthaltigen Altpapier zu Doppelbodenplatten verarbeitet, um deren Einfluss auf Umwandlungszeit, Presszeit und Bruchlast zu bewerten. Im letzten Schritt wurde das entwickelte Modell auf die Versuchsplatten mit α -Halbhydrat-Zusatz angewandt, um die Effekte der Gips- und Gips-Faser-Wechselwirkungen auf die Produktfestigkeit zu analysieren und die Möglichkeit der prädiktiven Steuerung zu bewerten.

Die Charakterisierung von GKP zeigte, dass die Reinheit der untersuchten Gipse zwischen 77 % und 98 % schwankte und etwa ein Drittel der Gipse die Mindestanforderung des Bundesverbandes der Gipsindustrie für die Reinheit von RC-Gips ($DH \leq 80$ %) unterschritten. Es wurde zudem festgestellt, dass die Qualität des Gipses nicht vom GKP-Typ abhängt, sondern vielmehr vom jeweiligen Produktionswerk und des dort eingesetzten Gipses. Die Reinheit der untersuchten Produktionsabfälle aus der GFP-Herstellung lag bei etwa 88 % bis 100 %. Die Kristallgrößenverteilungen der aufbereiteten GKP, und GFP sowie von Schleifstaub und Gipsschlamm lag trotz der mechanischen Beanspruchung durch den Aufbereitungsprozess in einer engen Bandbreite. Der Kristallhabitus unterschied sich zwischen Bruchstücken und Agglomeraten bei Schleifstäuben sowie prismatischen und nadeligen Kristallen bei GFP, Gipsschlamm und GKP. Die Faserstoffeigenschaften von GKP lagen in einer engen Schwankungsbreite und wiesen Faserlängen von etwa 1,1 mm, Holzstoffanteile von etwa 50 % sowie Feinanteile von etwa 8 % auf. Damit ist GKP-Karton eher den unteren und mittleren Altpapiersorten gemäß der Europäischen Zuordnung der Altpapiersorten zuzuordnen. Faserstoffe aus aufbereiteten GFP weisen vergleichbare Faserlängen (etwa 1 mm) auf, während Fasern aus Schleifstäuben (etwa 0,4 mm) durch den Schleifprozess stark gekürzt wurden.

Mit dem aufgestellten multivariaten Modell konnte der Holzstoffanteil als dominantester Einflussfaktor auf die Produktfestigkeit, gefolgt von Faserlänge, Feinanteil und Fasergehalt identifiziert werden, die gemeinsam etwa 83 % der Varianz erklärten. Dabei wirkt eine erhöhte Faserlänge festigkeitssteigernd, während höhere Holzstoff- und Feinanteile sowie Fasergehalte zu einer Reduktion der Produktfestigkeit führen.

Doppelbodenplatten mit 50 M.-% Sekundärrohstoffanteil erreichten Bruchlasten von 7,7 bis 10,7 kN (Elementklassen 2–4 nach DIN EN 12825) und damit tendenziell höhere Festigkeiten als Referenzplatten aus 100 M.-% Stuckgips (5,8 bis 8,3 kN). Die Zusammensetzung der gipshaltigen Bauabfälle, beispielweise mineralische Nebenbestandteile und hydrophobe Zusatzstoffe, hatten keinen erkennbaren Einfluss auf die Produktfestigkeit. Schleifstäube mit niedrigem Faseranteil erreichten vergleichbare Tragfähigkeiten, während erhöhte Kurzfaserteile zu Festigkeitsreduktionen führten. Zudem beeinträchtigten mineralische

Nebenbestandteile die Produktionsprozesse. Die Umwandlungszeiten für Gips mit mineralischen Nebenbestandteilen verdoppelte bis verdreifachte sich gegenüber GKP mit hoher Reinheit, während Presszeiten um 25 % bis 85 % über dem Referenzwert lagen. Die übrigen Bauabfälle wiesen eine vergleichbare bis beschleunigte Presszeit auf.

Die Anwendung des entwickelten Modells auf Versuche mit und ohne Zugabe von gipshaltigen Bauabfällen konnte die Gipseigenschaften sowie die Gips-Faser Wechselwirkung als zentrale Einflussgrößen auf die Festigkeit von Doppelbodenplatten quantifizieren. Die Nassskalzinierung der Bauabfälle zu α -HH führt zu verbesserten Gipseigenschaften. Bei einer Substitution von Stuckgips durch α -Halbhydrat um 50 M.-% stieg die Bruchlast um 1–2 kN (16 bis 23 %). Die Effektstärke wird maßgeblich von Gips-Faser-Wechselwirkungen bestimmt. Die Validierung der Gips-Faser-Wechselwirkungen durch den Vergleich berechneter und beobachteter Bruchlasten offenbarte eine progressive Abweichung mit zunehmender Faserqualität, die synergistische Effekte belegt. Der Einsatz hochwertiger Zellulosefasern in Kombination mit der dichten Kristallstruktur des α -Halbhydrats schöpfen das Armierungspotenzial vollständig aus und ermöglichen deutlich höhere Bruchlasten. Bei minderwertigen Faserstoffen mit kurzer Faserlänge und hohem Holzstoffgehalt verpufft dieses Potential, was dazu führt, dass die α -Halbhydrat-Zugabe nur marginale Festigkeitssteigerungen bewirkt. Innerhalb der verwendeten gipshaltigen Bauabfälle (GKP, GFP, Gipsschlamm, Schleifstaub), zeigt die Gipsqualität nur untergeordneten Einfluss auf die Produktfestigkeit und führt zu vergleichbaren Bruchlasten.

Das entwickelte Regressionsmodell zeigte bei Anwendung auf heterogene Gipseigenschaften Limitationen auf und setzte die tatsächliche Bruchlast systematisch zu niedrig an (mittlere Abweichung: 1,6 kN, Maximum: 3,2 kN). Die Ergebnisse zeigen, dass die Produktfestigkeit aus komplexen Wechselwirkungen zwischen Faserqualität, Gipseigenschaften und deren gegenseitigen Beeinflussungen resultiert. Eine robuste, rein modellbasierte Vorhersage der Bruchlast für Doppelbodenplatten mit heterogenen Materialeigenschaften war mit dem entwickelten Modellansatz nicht realisierbar.

Dennoch wurde die Verwertung von GKP verschiedener Typen sowie von faserreichen GFP-Abfällen in Doppelbodenplatten erfolgreich demonstriert. Gipshaltige Bauabfälle sind zur Herstellung hochwertiger GFP geeignet und erschließen dabei bislang kaum verwertete Fraktionen wie imprägnierte GKP oder Fasern. Die nachgewiesenen Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften und Produktqualität bieten eine solide Grundlage für die zukünftige Rezepturenentwicklung und Qualitätsoptimierung von GFP.

Literaturverzeichnis

Abdussaljamov, B. (2003): Untersuchungen zur hygro-mechanischen Stabilität von kristallinem Calciumsulfat-Halbhydrat, Dissertation, Bauhaus – Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Weimar, 4. April 2003, URL: https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00035574?lang=en, Zugriff: 12.03.2026

Allmann, R. (2003): Röntgenpulverdiffraktometrie - Rechnergestützte Auswertung, Phasenanalyse und Strukturbestimmung, 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003; ISBN: 3-540-43967-6

Amtsblatt der Europäischen Union (2006): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission, 18.12.2006 (Amtsblatt der Europäischen Union, L 396 vom 30.12.2006, S. 1–849.)

Arendt, M. (2001): Kreislaufwirtschaft im Baubereich: Steuerung zukünftiger Stoffströme am Beispiel von Gips, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Institut für Technische Chemie, Heidelberg, 2001, URL: <https://silo.tips/download/forschungszentrum-karlsruhe-kreislaufwirtschaft-im-baubereich-steuerung-zuknftig>, Zugriff: 16.12.2024

Arens, P. (2002): Untersuchung und Entwicklung von Gipsmörteln für den Außenbereich unter besonderer Berücksichtigung der Wasserresistenz, Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, Siegen, Februar 2002, URL: <https://www.ub.uni-siegen.de/epub/diss/arens.htm>, Zugriff: 24.04.2024

Aschern, W. (2010): Ressourcen- und Energieeffizienzsteigerung bei der Herstellung von Gipsfaserplatten (Phase 1) - Abschlussbericht DBU-Projekt 27776-22:, Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.), Lindner GFT GmbH; F.A. Fingerinstitut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 12.12.2010, URL: <https://www.dbu.de/en/projektdatenbank/27776-01/>, Zugriff: 23.04.2024

Aschern, W. (2011): Verfahren zur Herstellung von alpha-Calciumsulfat-Halbhydrat EP 2 418 184 A215.02.2012, URL: <https://patents.google.com/patent/EP2418184A2/de?q=>

(Verfahren+zur+Herstellung+von+alpha-Calciumsulfat-Halbhydrat)&oq=Verfahren+zur+Herstellung+von+alpha-Calciumsulfat-Halbhydrat, Zugriff: 20.03.2024

Aschern, W. (2012): Ressourcen- und Energieeffizienzsteigerung bei der Herstellung von Gipsfaserplatten (Phase 3) - Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 27776/03, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.), Lindner GFT GmbH und F.A. Finger Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 3 27776/03, Dettelbach, Oktober 2012, URL: https://www.dbu.de/projekt_27776/03_db_2409.html, Zugriff: 21.05.2024

Aschern, W.; Hartmann, M. (2011): Ressourcen- und Energieeffizienzsteigerung bei der Herstellung von Gipsfaserplatten (Phase 2) - Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 27776/03, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.), Lindner GFT GmbH und F.A. Finger Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2, Dettelbach, August 2011, URL: https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-27776_02.pdf, Zugriff: 21.05.2024

Backhaus, K.; Erichson, B.; Gensler, S.; Weiber, R. (2021): Multivariate Analysemethoden, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2021; ISBN: 978-3-658-32424-7

Basten, M. (2022): Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine--Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland, Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg.), Berlin, Februar 2022, URL: https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Bilder/Aktuelles/2022-04-20_BBS_Rohstoffstudie_01_ONLINE.pdf, Zugriff: 14.05.2024

Henning, S.; Wilken, H.; Franken, G.; Steinbach, V.; Behrendt, S.; Buchholz, P.; Elsner, H.; Homberg, C.; Huy, D.; Kuhn, K.; Lutter, S.; Röhling, S.; Schauer, M.; Schütte, P.; Sievers, H.; Sonnenberg, M.; Stelter, M.; Tonn, S.; Wittenberg, A. (2023): Deutschland - Rohstoffsituation 2022, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.), Dezember 2023, URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=7, Zugriff: 27.02.2024

Blechtschmidt, J. (2010): Taschenbuch der Papiertechnik, 1. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2010; ISBN: 978-3-446-41967-4

BNB (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), BNB, URL: <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>, Zugriff: 14.12.2025

Bold, J. (1991): Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Faserverstärkten Gipsplatten und dergleichen. DE4127932A125.02.1993, URL: <https://patents.google.com/patent/DE4127932A1/de>, Zugriff: 06.10.2025

Bookhagen, B.; Mähltitz, P.; Akinic, S.; Ortleb, H.; Ruff, A. (2023): 58 DERA Rohstoffinformationen - Dialogplattform Recyclingrohstoffe - Steckbrief Gips, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (Hrsg.), Berlin, August 2023, URL: https://www.bgr.bund.de/Recyclingrohstoffe/DE/Downloads/Dialogplattform%20Steckbrief-Gips.pdf?__blob=publicationFile&v=2, Zugriff: 08.04.2024

Buchert, M.; Sutter, J.; Alwast, H.; Schütz, N.; Weimann, K. (2017): Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten, Umweltbundesamt (Hrsg.), Projektkoordination (Öko-Institut e.V.); Prognos AG; Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), 33/2017, Dessau-Roßlau, April 2017, URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24_texte_33-2017_gipsrecycling.pdf, Zugriff: 20.03.2024

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2023): Vollzugshilfe zur Entsorgung asbesthaltiger Abfälle, 08.05.2023, URL: <https://www.asbest-akademie.de/start/die-neue-laga-m-23-fassung-2023-kompakte-zusammenfassung/>, Zugriff: 01.02.2026

Bundeskanzleramt Republik Österreich (2024): Verordnung der Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie über die Behandlung von Gipsabfällen und die Herstellung und das Abfallende von Recyclinggips, 30. Dezember 2024 (Recyclinggips-Verordnung, BGBl. II Nr. 415/2024.)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit – BMU (Bundesregierung) (2019): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Judith Skudelny, Frank Sitta, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/13831 – Gips – Rohstoffe sichern, Recycling fördern, Bauen ermöglichen, Deutscher Bundestag (Hrsg.), 23. Oktober 2019, URL: https://www.judith-skudelny.de/sites/default/files/2020-06/1914464_0.pdf, Zugriff: 08.04.2024

Bundesregierung (D) (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung- DepV), 27.04.2009 (Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225) geändert worden ist.)

Bundesregierung (D) (2023): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), Erstveröffentlichung: 24.02.2012 (BGBl. I S. 212), Fassung: 02.03.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56.)

Bundesregierung (D) (2021b): Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, 9. Juli 2021 (Mantelverordnung ErsatzbaustoffV/BBodSchV/DepV/GewAbfV, BGBl. I 2021, S. 2598.)

Bundesverband der Gipsindustrie e. V. (2013): Gips-Datenbuch, 1. Aufl., Berlin, Mai 2013, URL: https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/gipsdatenbuch_2013.pdf, Zugriff: 24.06.2021

Bundesverband der Gipsindustrie e. V. (2020): Umgang mit Gipsplattenabfällen aus dem Rückbau zum Ausschluss von Querkontaminationen mit Asbestfasern - Anlage zu den Qualitätsempfehlungen an RC-Gips, 2020, URL: <https://www.gips.de/aktuelles/detail/qualitaetsempfehlungen-fuer-recyclinggips/>, Zugriff: 21.12.2024

Bundesverband Systemböden e.V. (2005): Anwendungsrichtlinie zu DIN EN 12825 Doppelböden, 3. Aufl., Düsseldorf, Mai 2005, URL: <https://www.systemboden.de/wp-content/uploads/awedoboausgabe30-05-2005-1.pdf>, Zugriff: 15.08.2023

Bunzel J. (2020): Gipsrecycling und Verwertung - Erfahrungen aus der ersten Gipsrecyclinganlage in Deutschland, Vortrag zu: Online Fachdialog "Recycling von Gipsplatten", Online, 26.11.2020

Bunzel J.; Wilczek M. (Hrsg.) (2016): Industrielles Recycling von gipshaltigen Abfällen - Betriebserfahrungen und Produktqualität der Aufbereitungsanlage in Großpösna / Störmthal, Juni 2016, Berlin, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3, Band 3, 3. Aufl., TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, 2016; ISBN: 978-3-944310-28-2

Bunzel, J.-M.; Farago, P. (Hrsg.) (2023): Technische und logistische Konzepte zum Recycling von Gipskartonplatten, Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, 2023, Berlin, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 10, Band 10, 10. Aufl., Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin, 2023; ISBN: 978-3-944310-72-5

Burger, S. V. (2018): Introduction to Machine Learning with R, 1. Aufl., O'Reilly Media Inc., Sebastopol, 2018; ISBN: 978-1-491-97644-9

Colliers International (2024): Steigende Vertragslaufzeiten bei Bürovermietungen. Analyse 45.000 Anmietungen Top-7-Städte 2010–2023., Colliers International, URL: <https://>

www.colliers.de/blog/steigende-vertragslaufzeiten-bei-buerovermietungen/, Zugriff: 07.02.2026

Coutts, R. S. (1983): Wood fibres in inorganic matrices, In: Chemistry in Australia 50, S. 143–148, Nr. 5/1983, URL: https://www.researchgate.net/profile/Robert-Coutts/publication/275276598_Wood_fibres_in_inorganic_matrices/links/57031ab308aedbac126f434e/Wood-fibres-in-inorganic-matrices.pdf, Zugriff: 08.05.2024

Coutts, R. S. (1984): Autoclaved beaten wood fibre-reinforced cement composites, In: Composites, S. 139–143, Nr. 15/1984; DOI: 10.1016/0010-4361(84)90726-2, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0010436184907262>, Zugriff: 16.05.2024

Coutts, R. S. (1986): Wood-fibre reinforced plaster, In: Journal of Materials Science, S. 1959–2964, Nr. 21/1986; DOI: 10.1007/BF00551516, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00551516>, Zugriff: 07.05.2024

Coutts, R. S. (1991): Wastepaper fibres in plaster products, In: Journal of Materials Science Letters 10, S. 77–78, Nr. 2/1991; DOI: 10.1007/BF00721913, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00721913#author-information>, Zugriff: 14.12.2025

Demmich J. (Hrsg.) (2015): Gips-Recycling - Ein Beitrag zur Ressourceneffizienz, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2, 2. Aufl., TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, 2015; ISBN: 978-3-944310-21-3

DIN 54370 (2020): Prüfung von Papier und Pappe – Bestimmung des Glührückstandes, Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2020; ICS: 85.060, URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-54370/321384097>, Zugriff: 23.06.2025

DIN EN 13279-2:2014-03 (2014): Gipsbinder und Gips-Trockenmörtel – Teil 2: Prüfverfahren, Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014, URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-13279-2/197811210>, Zugriff: 02.06.2025

DIN EN 15148:2010-03 (2010): Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Gehaltes an flüchtigen Substanzen, Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010, URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-15148/123007253>, Zugriff: 02.06.2025

DIN EN 520:2009-12 (2009): Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 520:2004+A1:2009, (Hrsg.), DIN Media, 2009-12; ICS: 01.040.91, 91.100.10, URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-520/121015950>, Zugriff: 12.04.2025

DIN EN 643 (2014): DIN EN 643 - Papier, Karton und Pappe - Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten; Deutsche Fassung EN 643:2014, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, 2014-11; ICS: 85.060, URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-643/223947791>, Zugriff: 05.03.2024

DIN EN 643:2014-11 (2014): Papier, Karton und Pappe - Europäische Liste der Altpapier-Standardsorten; Deutsche Fassung EN 643:2014, (Hrsg.), DIN Media, 2014-11; ICS: 85.060, URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-643/223947791>, Zugriff: 19.08.2024

DIN EN ISO 5267-1 (2000): Faserstoffe – Bestimmung des Entwässerungsverhaltens – Teil 1: Schopper-Riegler-Verfahren, Deutsches Institut für Normung (DIN) (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000; ICS: 85.040, URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-5267-1/34240507>, Zugriff: 01.06.2025

EUROGYPSUM (2012): REA-Gips - Qualitätskriterien und Analysemethoden, 03/2012, URL: <http://www.eurogypsum.org/wp-content/uploads/2015/04/EUROGYPSUMBD2.pdf>, Zugriff: 08.03.2024

EUROGYPSUM (2024): Recyclinggips Eurogypsum - Qualitätskriterien, März 2024, URL: <https://eurogypsum.org/wp-content/uploads/2024/09/DE-Eurogypsum-Quality-Criteria-for-Recycled-Gypsum.pdf>, Zugriff: 25.05.2025

Europäische Kommission (2019): Der europäische Grüne Deal - Erster klimaneutraler Kontinent werden, URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de, Zugriff: 06.03.2024

Europäische Kommission (2020a): Delegierte Verordnung (EU) 2020/2174 der Kommission vom 19. Oktober 2020 zur Änderung der Anhänge IC, III, IIA, IV, V, VII und VIII der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Verbringung von Abfällen, 22.12.2020 (Delegierte Verordnung (EU) 2020/2174, ABl. L 433 vom 22.12.2020, S. 11–19.)

Europäische Kommission (2020b): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen - Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa, COM(2020) 98 final, Brüssel, 11.03.2020

Europäische Norm EN 12825 (2001): Doppelböden, Rev.Nr.: DIN EN 12825:2002-04, EUROPÄISCHE NORM (Hrsg.), August 2001; ICS: ICS 91.060.30, URL: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-12825/44698210>, Zugriff: 10.10.2025

Europäischer Rat (1993): Beschluss des Rates vom 1. Februar 1993 zum Abschluß - im Namen der Gemeinschaft - des Übereinkommens über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung von gefährlichen Abfällen und ihrer Entsorgung (Basler Übereinkommen), 16.02.1993 (Beschluss des Rates vom 1.2.1993 (Basler Übereinkommen), ABl. L 39 vom 16.02.1993, S. 1–3.)

Europäisches Parlament und europäischer Rat (2006): Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom (14. Juni 2006) über die Verbringung von Abfällen, 12.07.2006 (Verordnung (EG) Nr. 1013/2006, ABl. L 190 vom 12.07.2006, S. 1–98.)

Europäisches Parlament und europäischer Rat (2018): Richtlinie (EU) 2018/851 des europäischen Parlamentes und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, 14.06.2018 (Richtlinie (EU) 2018/851, ABl. L 150 vom 14.06.2018, S. 109–140.)

Europäisches Parlament und europäischer Rat (2021): Verordnung (EU) 2021/1119 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“), 9.7.2021 (Verordnung (EU) 2021/1119 („Europäisches Klimagesetz“), ABl. L 243 vom 09.07.2021, S. 1–17.)

Eurostat (2024): Sold production, exports and imports, Eurostat, URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ds-056120__custom_14463189/default/table?lang=en, Zugriff: 17.12.2024

Förthner, S. (2011): Untersuchungen zur Kristallisation und zur Kristallmorphologiebeeinflussung von Gipsen zur Steuerung der makro-physikalischen Kenngrößen, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Department Chemie und Pharmazie, Erlangen-Nürnberg, 11.08.2011, URL: <https://open.fau.de/server/api/core/bitstreams/9dec72ea-6240-4e2d-953e-f68cdfe2d9d7/content>, Zugriff: 29.04.2024

Franke, W. (Hrsg.) (1993): Prüfung von Papier, Pappe, Zellstoff und Holzstoff - Mikroskopische und photometrische Verfahren, Mikroskopische und photometrische Verfahren, Band 2, Springer-Verlag, Berlin, 1993; ISBN: 978-3-642-51106-6

Freyer D. (2000): Untersuchungen zur Phasenbildung und -stabilität im System Na₂SO₄ - CaSO₄ - H₂O, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie, Freiberg, 14.07.2000, URL: <https://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/diss/2003/tu-freiberg/archiv/html/ChemieFreyerDaniela760688.pdf>, Zugriff: 02.03.2025

Görtz, M. (2008): Holz- und Fasereigenschaften von Fichte (*Picea abies* (L.) Karst) - Auswirkungen auf die Qualität von Steinschliff und holzhaltigen Grafischen Papieren, Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften, Freiburg im Breisgau, Februar 2008, URL: <https://docplayer.org/42520502-Holz-und-fasereigenschaften-von-fichte-picea-abies-l-karst-auswirkungen-auf-die-qualitaet-von-steinschliff-und-holzhaltigen-grafischen-papieren.html>, Zugriff: 03.03.2022

Gruber, E. (2011): Grundlagen der Zellstofftechnologie - Vorlesungsskriptum zum Lehrgang „Papiertechnik“ an der Dualen Hochschule Karlsruhe, URL: http://www.gruberscript.net/21Zellstoffanalyse_physikalisch.pdf, Zugriff: 12.10.2025

Guan, Q.; Sun, W.; Hu, Y.; Yin, Z.; Zhang, C.; Guan, C.; Zhu, X.; Khoso, S. A. (2019): Simultaneous Control of Particle Size and Morphology of α -CaSO₄·½H₂O with Organic Additives, In: Journal of the American Ceramic Society, S. 2440–2450, Nr. 102/2019; DOI: 10.1111/jace.16177, URL: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jace.16177>, Zugriff: 11.06.2024

Hamm, H.; Kersten, H.-J.; Hueller, R. (2004): 25 Jahre Betriebserfahrung mit der Verwendung von REA-Gips in der europäischen Gipsindustrie, In: Cement International 2004, S. 92–102, Nr. 4/2004, URL: https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/download/publikationen/allgemeine_publikationen/merkblatt_25jahre_betriebserfahrung_rea-gips.pdf, Zugriff: 08.03.2024

Henning, S. (2025): Gips und Anhydrit - Gipsrohstoffe in Deutschland, BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.), Hannover, Januar 2025, URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Rohstoffe/Downloads/Downloads-MR/studie_gips.pdf?__blob=publicationFile&v=4, Zugriff: 20.11.2025

Höding, T.; Szurlies, M.; Kimmig, B.; Poschlod, K.; Fritsche, G.; Börner, A.; Mandl, J.; Schäfer, I.; Grubert, A.; Bornhöft, E.; Lehmann, U.; Gauert, C.; Nestler, A.; Bock, H.; Liedmann, L.; Martini, N.; Poser, C.; Schumann, A. (2021): Bestandsaufnahme der Gipsvorkommen in Deutschland - AG Rohstoffe1 des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste, 2021, URL: https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/Downloads/AG_rohstoffe_bestandsaufnahme_gipsvorkommen_deutschland_2021.pdf?__blob=publicationFile&v=1/&v=1, Zugriff: 15.10.2025

Hohmann, U.; Papp, G.; Amon, M. (2017): Verschleiß von SiC-Werkstoffen in Müllverbrennungsanlagen, In: Keramische Zeitschrift, S. 168–173, Nr. 69/2017; DOI:

10.1007/BF03400335, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03400335>, Zugriff: 31.01.202

Hoyer, J.; Lucas, G; Neusinger; H. (1973): Verfahren zur Herstellung von Gipsfaserplatten sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens DE2365161A103.07.1975, URL: <https://patents.google.com/patent/DE2365161A1/de>, Zugriff: 15.04.2024

ISO 16065-1:2014 (2014): Pulps — Determination of fibre length by automated optical analysis — Part 1: Polarized light method, International Organization for Standardization (ISO) (Hrsg.), ISO, Geneva, 2014, URL: <https://www.iso.org/standard/60368.html>, Zugriff: 02.06.2025

Jäger, R.; Brosig, A. (2008): Verfahren zur Herstellung von Alpha-Calciumsulfat-halbhydrat aus Calciumsulfat-dihydrat WO 2008/141627 A127.11.2008, URL: <https://patents.google.com/patent/WO2008141627A1/de>, Zugriff: 20.03.2024

James Hardie Europe GmbH (2016): Fermacell Gipsfaser_Platten Verarbeitungsanleitung, fermacell GmbH, URL: https://forumholzbau.com/pfd_down_docs/fermacell_GipsfaserPlatten_Verarbeitungsanleitung.pdf, Zugriff: 17.12.2024

Kersten, H. (2020): Recyclinggips (RC-Gips) - Erstprüfung für Recyclinganlagen, Qualitätsmanagement, Qualitätsempfehlungen und Analyseverfahren, Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (Hrsg.), Juni 2020, URL: https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/aktuelles/Qualitaetsempfehlungen_Gipsrecycling_Analyseverfahren_Stand_Juni_2020.pdf, Zugriff: 22.03.2024

Klöpper, D. (2024): Entwicklung eines BIM-basierten Bewertungstools zur ökonomischen Beurteilung kreislaufgerechter Bauweisen im Innenausbau, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Bochum, 12.04.2024, URL: <https://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/12361/file/diss.pdf>, Zugriff: 07.02.2026

Knauf, A. (1957): Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Baukörpern DE1104419B06.04.1961, URL: <https://patents.google.com/patent/DE1104419B/de>, Zugriff: 18.04.2024

Koch, P.; Michel, A.; Aschern, W.; Kang, N. (2020): Verfahren zum Recycling von Gipskartonmaterial EP 3 984 977 A120.04.2022, URL: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=menu&content=treffer&action=pdf&docid=EP000003984977A1&Cl=13&Bi=1&Ab=1&De=3&Dr=15&Pts=&Pa=&We=&Sr=18&Eam=&>

Cor=&Aa=&so=desc&sf=vn&firstdoc=0&NrFaxPages=23&pdfpage=1&xxxfull=1, Zugriff:
04.07.2024

König, S. (2023): BUND-Schwarzbuch Gips Thüringen 2023 - Raubbau in der Südharzer Gipskarstlandschaft Thüringens, BUND für Umwelt und Naturschutz Deutschland Landesverband Thüringen e.V. (Hrsg.), Erfurt, 2023, URL: https://www.bund-thueringen.de/fileadmin/thueringen/Gipskarst_Suedharz/Schwarzbuch-Gips_Bildschirmversion_niedrigste_Aufloesung.pdf, Zugriff: 12.10.2025

Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (2022): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2022; ISBN: 978-3-658-36261-4

Länderoffenen Arbeitsgruppe Ressourceneffizienz (2022): Möglichkeiten der Einsparung, der Substitution und des Recyclings von Gips, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (Hrsg.), 01.07.2022, URL: https://www.laga-online.de/documents/moeglichkeiten-der-einsparung,-der-substitution-und-des-recyclings-von-gips-stand-2022_1656660896.pdf, Zugriff: 12.10.2025

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2018): Steckbrief "Gipshaltige Abfälle", Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 35 Kreislaufwirtschaft, Chemikaliensicherheit (Hrsg.), 17.08.2018, URL: https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/documents/10184/151537/Steckbrief+25-5_Gipshaltige+Abfalle_18-08-17_mit+Link+Grundsatzpapier.pdf/419cc8b5-bb04-4fc4-ab81-5cece82b35b0, Zugriff: 12.10.2025

Miatto, A.; Schandl, H; Tanikawa, H. (2017): How important are realistic building lifespan assumptions for material stock and demolition waste accounts?, In: Resources Conservation and Recycling, S. 143–154, 2017; DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.01.015, URL: https://www.researchgate.net/publication/314091755_How_important_are_realistic_building_lifespan_assumptions_for_material_stock_and_demolition_waste_accounts, Zugriff: 21.12.2024

Ministerium des Innern des Landes Nordrhein-Westfalen (2023): Kreislaufwirtschaftsgesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (Landeskreislaufwirtschaftsgesetz – LKrWG), Erstveröffentlichung: 21. Juni 1988, Fassung: 12.07.2023 (Landeskreislaufwirtschaftsgesetz Nordrhein-Westfalen (LKrWG) vom 21.06.1988 (GV. NRW. S. 250).)

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz (2022):

Abfallwirtschaftsplan Rheinland-Pfalz 2022 - Teilplan Siedlungsabfälle und andere nicht gefährliche Abfälle, November 2022, URL: https://mkuem.rlp.de/fileadmin/14/Themen/Abfall_und_Boden/Kreislaufwirtschaft__Produktionsintegrierter_Umweltschutz__

Produktverantwortung/Abfallwirtschaftsplan/Abfallwirtschaftsplan_Rheinland_Pfalz_Teilplan_Siedlungsabfaelle_2022_Endversion_19.01.2023_Hohe_Qualitaet.pdf_Umweltschutz__

Produktverantwortung/Abfallwirtschaftsplan/Abfallwirtschaftsplan_Rheinland_Pfalz_Teilplan_Siedlungsabfaelle_2022_Endversion_19.01.2023_Hohe_Qualitaet.pdf, Zugriff: 17.04.2025

Ministerstvo životního prostředí (2021): Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady, 12. Juli 2021 (Vyhláška č. 78/2022 Sb., kterou se mění vyhláška č. 273/2021 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.)

Mohammed, M. M.; Rasidi, MSM; Mohammed, A.-M.; Rahman, R.; Osman, A.-F.; Adam, T.; Betar, B.; Dahham, O.-S. (2022): Interfacial bonding mechanisms of natural fibre-matrix composites: An overview, In: BioResources, S. 7031–7090, Nr. 17/2022; DOI: 10.15376/biores.17.4.Mohammed, URL: <https://www.proquest.com/openview/8eb2c4c80f97a827f843f068e104fd69/1?pq-origsite=gscholar&cbl=5038271>, Zugriff: 15.05.2024

MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH (2024): Gipsabfälle / AVV, URL: <https://mueg.de/leistungen/gipsrecycling#entry-444>, Zugriff: 08.03.2024

Müller, A. (2012): Das Sulfatproblem, RECYCLING magazin (Hrsg.), 2012, URL: <https://www.recyclingmagazin.de/ausgabe/recycling-magazin-22-2012/>, Zugriff: 18.09.2022

Müller, F. (2019): Gips - Factsheet, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau, 15.05.2019, URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_gips_fi_barrierefrei.pdf, Zugriff: 21.03.2024

Müller M. (2007): Die Abbindebeschleunigung von Stuckgips durch Calciumsulfatdihydrat, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar, 5 Juli 2007, URL: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-328-1.volltext.frei.pdf>, Zugriff: 24.06.2021

Münstermann, M. (2025): „Weißes Gold“: Verscharrt statt recycelt, CORRECTIV, URL: <https://correctiv.org/aktuelles/europa-aktuelles/2025/11/17/weisses-gold-verscharrt-statt-recycelt/>, Zugriff: 31.01.2026

Muryanto, S. (2002): The role of impurities and additives in the crystallisation of gypsum, Dissertation, Curtin University of Technology, Department of Chemical Engineering, Dezember 2002, URL: <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/2038>, Zugriff: 1.10.2024

Neroth, G.; Vollenschaar D. (2011): Wendehorst Baustoffkunde - Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz, 26. Aufl., Vincentz Verlag, Hannover, 2011; ISBN: 978-3-8351-0225-5

Nindiyasari, F.; Griesshaber, E.; Zimmermann, T.; Manian, A. P.; Randow, C.; Zehbe, R.; Diaz, L. F.; Ziegler, A.; Fleck, C.; Schmahl, W. (2015): Characterization and mechanical properties investigation of the cellulose/gypsum composite, In: Journal of Composite Materials, S. 657–672, Nr. 50/2015; DOI: 10.1177/0021998315580826, URL: https://epub.ub.uni-muenchen.de/48877/1/Nindiyasari_Characterization.pdf, Zugriff: 08.05.2024

Nowak S. (2012): Alterung von Calciumsulfatphasen - Physiko-chemisch bedingte Feuchtaufnahme und Einfluss auf die Reaktivität, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar, 09.11.2012, URL: https://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/1873/file/Nowak_Alterung+Calciumsulfatphasen_FIB+Weimar+Dissertation_pdfa.pdf, Zugriff: 24.06.2021

Nürnberg, R. (2009): Gipsfaserplatte DE 10 2009 039 517 A1, Deutschland 03.03.2011, URL: <https://patents.google.com/patent/DE102009039517A1/de>, Zugriff: 20.03.2024

OECD-Rat (2001): Beschluss des Rates C(2001)107/Endgültig über die Kontrolle von grenzüberschreitenden Verbringungen von Abfällen zur Verwertung, 2001 (OECD-Ratsbeschluss C(2001)107/FINAL vom 22.05.2001 über die Kontrolle von grenzüberschreitenden Verbringungen von Abfällen zur Verwertung), URL: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/378/dokumente/oecd-2001_107_de.pdf, Zugriff: 12.06.2025

Papiertechnische Stiftung (2014): Bedienungsanleitung - Paper Bale Sensor - Schnelle Vor-Ort-Kontrolle von Altpapierballen, Juli 2014, URL: <https://www.ptspaper.de/de/industrielle-loesungen/produkte/manuelle-altpapier-ballenpruefung-paperbalesensor/>, Zugriff: 05.09.2024

Pavel, F.; Otto, S.; Frenz, W.; Pielow, J. (2022): Genehmigungsverfahren zum Rohstoffabbau in Deutschland - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Genehmigungsverfahren zum Rohstoffabbau in Deutschland, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hrsg.), 10. Oktober 2022, URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/ey-gutachten-genehmigungsverfahren-zum-rohstoffabbau-in-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=4, Zugriff: 04.03.2024

Pöllmann, H. (2017): Cementitious Materials - Cementitious Materials Composition, Properties, Application, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2017; ISBN: 978-3-11-047373-5

Posit, P. B. (2024): RStudio - Integrated Development Environment for R, 2024

Pritzel, Christian; Kowald, Torsten; Sakalli, Yilmaz; Trettin, Reinhard (2017): 9. Binding materials based on calcium sulphates, In: Pöllmann, H. (Hrsg.): Cementitious Materials, S. 285–310. De Gruyter, 2017, ISBN: 9783110473728, URL: https://www.researchgate.net/publication/322018179_9_Binding_materials_based_on_calcium_sulphates_Composition_Properties_Application, Zugriff: 02.02.2025

Pritzel, C.; Trettin, R. (2012): Influencing the Morphology of Gypsum, In: Broekmans, M. A. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM), S. 541–548. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-642-27681-1, URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-27682-8_64, Zugriff: 05.03.2025

Reibnitz, A.; Geiger G. (2023): DIE PAPIERINDUSTRIE - Leistungsbericht PAPIER 2023, DIE PAPIERINDUSTRIE e. V. (Hrsg.), Mai 2023, URL: <https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik>, Zugriff: 05.03.2024

Rigo, E.; Unterderweide K. (2021): Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton, Die Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Oktober 2021, URL: <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/2567/file/S160+BA+Gesamtversion.pdf>, Zugriff: 18.09.2022

Ruff, A.; Samtleben, J. (2022): Sicherung der Gips-Rohstoffversorgung in Deutschland – aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze, Vortrag zu: 4. BGR-Rohstoffkonferenz, Hannover, 5.-6. Juli 2022, URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Veranstaltungen/Rohstoffkonferenz_2022_Rohstoffversorgung_Deutschlands/Ruff.pdf?__blob=publicationFile&v=3, Zugriff: 26.02.2024

Savastano, H.; Warden, P. G.; Coutts, R.S.P. (2005): Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites, In: Cement and Concrete Composites 27, S. 583–592, Nr. 5/2005; DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.009, URL: https://www.researchgate.net/publication/223650109_Microstructure_and_mechanical_properties_of_waste_fibre-cement_composites, Zugriff: 14.03.2025

Schäfer, B.; Basten, M. (2023): Kreislaufwirtschaft Bau - Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020, Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. (Hrsg.), Januar 2023, URL: <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-13.pdf>, Zugriff: 14.12.2025

Schlöglhofer, H. (2008): Recycling von Gipskartonplatten aus gemischten Bauabfällen - Recyclingkonzept für die Gipskartonplattenindustrie, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik, Leoben, 25.02.2008, URL: <https://pure.unileoben.ac.at/files/1861532/AC06703353n01vt.pdf>, Zugriff: 09.04.2024

Schneider J. (2010): Beitrag zur Wirkungsweise on Verzögerern beim Abbinden von Stuckgipsen, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Chemie und Physik, Freiberg, 26.02.2010, URL: <https://tubaf.qucosa.de/api/qucosa%3A22717/attachment/ATT-0/>, Zugriff: 24.06.2021

Schneider, J. (2010): Beitrag zur Wirkungsweise von Verzögerern beim Abbinden von Stuckgipsen, Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Chemie und Physik, Freiberg, 26.02.2010, URL: <https://tubaf.qucosa.de/api/qucosa%3A22717/attachment/ATT-0/>, Zugriff: 24.04.2024

Singh, N. B.; Middendorf, B. (2007): Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization, In: Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 53, S. 57–77, Nr. 1/2007; DOI: 10.1016/j.pcrysgrow.2007.01.002, URL: https://www.researchgate.net/publication/229407454_Calcium_Sulphate_Hemihydrate_Hydration_Leading_to_Gypsum_Crystallization, Zugriff: 03.05.2024

SPD; Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen - Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit - Koalitionsvertrag 2021-2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), Bündnis 90 / Die Grünen und den Freien Demokraten (FDP), SPD; Bündnis 90 / Die Grünen / FDP (Hrsg.), Berlin, 07.01.2021, URL: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf, Zugriff: 28.02.2024

Ständiger LANA-Ausschuss Eingriffsregelung und Landschaftsplanung (2021): Bericht der LANA zu den Möglichkeiten und Folgen eines vermehrten Abbaus von Naturgips, 2021, URL: https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlaufBericht2021_14.pdf, Zugriff: 18.03.2024

Stark, J.; Wicht, B. (2013): Dauerhaftigkeit von Beton, 2., aktualisierte und erw. Aufl., Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013; ISBN: 978-3-642-35277-5

Statistisches Bundesamt (destatis) (1997 - 2018): Produzierendes Gewerbe - Fachserie 4 Reihe 3.1 1997 - 2018, 1997 - 2018, URL: https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-4.html?nn=206136#268980, Zugriff: 11.12.2024

Stoetzer, M. W. (Hrsg.) (2017): Regressionsanalyse in der empirischen Wirtschafts- und Sozialforschung Band 1, Band 1, Springer Gabler, Berlin, 2017; ISBN: 978-3-662-53823-4

TAPPI T 271 (2023): TAPPI T 271 - Fiber length of pulp and paper by automated optical analyzer using polarized light, Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI) (Hrsg.), TAPPI Press / TAPPI, Atlanta, GA (USA), Atlanta, GA, January 2023, URL: <https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/01/T/0104T271.aspx>, Zugriff: 02.06.2025

Tesch, V. (2006): Gefügeoptimierte Instandsetzungsmörtel auf Calciumsulfat-Basis für die Anwendung im Außenbereich, Dissertation, Universität Kassel, Fachbereich Bauingenieurwesen, Kassel, 13. Oktober 2006, URL: <https://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-333-5.volltext.frei.pdf>, Zugriff: 22.05.2024

Tichelmann, K. (2019): Tragverhalten von hybriden Systemen in Leichtbauweise mit Gipswerkstoffplatten - Unter Berücksichtigung des Verbundverhaltens stiftförmiger Verbindungsmittel, Springer Gabler, Wiesbaden, 2019; ISBN: 9783658246648

Utts, J. (1982): The Rainbow Test for Lack of Fit in Regression, In: Communication in Statistics- Theory and Methods 11, S. 2801–2815, 1982; DOI: 10.1080/03610928208828423, URL: https://www.researchgate.net/publication/232819080_The_Rainbow_Test_for_Lack_of_Fit_in_Regression/link/59708a720f7e9b44173e03f9/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19, Zugriff: 03.02.2025

VDI-Richtlinie 3866 Bl. 5 (2017): Bestimmung von Asbest in technischen Produkten - Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren, VDI-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, 2017-06, URL: <https://www.vdi.de/mitgliedschaft/vdi-richtlinien/details/vdi-3866-blatt-5-bestimmung-von-asbest-in-technischen-produkten-rasterelektronenmikroskopisches-verfahren>, Zugriff: 01.02.2026

VDI-Richtlinie 3876 (2018): Messen von Asbest in Bau- und Abbruchabfällen sowie daraus gewonnenen Recyclingmaterialien - Probenaufbereitung und Analyse, VDI-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, 2018-11, URL: <https://www.vdi.de/mitgliedschaft/vdi-richtlinien/details/vdi-3876-messen-von-asbest-in-bau-und-abbruchabfaellen-sowie-daraus-gewonnenen-recyclingmaterialien-probenaufbereitung-und-analyse>, Zugriff: 01.02.2026

VDI-Richtlinie 6202 Bl. 3 (2021): Schadstoffbelastete bauliche und technische Anlagen - Asbest - Erkundung und Bewertung, VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG) (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, 2021-09, URL: <https://www.vdi.de/mitgliedschaft/vdi-richtlinien/details/vdi-6202-blatt-3-schadstoffbelastete-bauliche-und-technische-anlagen-asbest-erkundung-und-bewertung>, Zugriff: 01.02.2026

VGB PowerTech (2008): Merkblatt Analyse von REA-Gips, VGB PowerTech e.V. (Hrsg.), 2. Aufl., 2008, URL: <https://shop.vgbe.energy/m701-ebook.html>, Zugriff: 01.02.2026

Wilke, K.-D.; Westerhausen, K.-H; Bold, J. (25.01.85): Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung von Formkörpern, insbesondere von Platten, aus einer Mischung von Gips- und Faserstoff sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens 20.04.1994, URL: <https://patents.google.com/patent/EP0153588B2/de>, Zugriff: 15.11.2025

Winkler, H. (1986): Verfahren zum Herstellen von faserhaltigen Bauteilen wie Platten, Formteile oder dergleichen EP 0 260 342 A1, URL: <https://patents.google.com/patent/EP0260342A1/en>, Zugriff: 16.04.2024

Zhu, C.; Zhang, J.; Yi, W.; Cao, W.; Peng, J.; Liu, J. (2018): Research on degradation mechanisms of recycled building gypsum, In: Construction and Building Materials 173, S. 540–549, 2018; DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.060, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818308584?via%3Dihub>, Zugriff: 04.06.2024

Anhang

A. Grundlagen zur Prognose der Rücklaufmengen von GFP und GKP

Die Weibull-Verteilung ist ein bewährtes Modell zur Beschreibung von Lebensdauerdaten und kann effektiv zur Prognose von Produktausfällen verwendet werden. Im Folgenden wird die Datengrundlage sowie die Dichte- und Verteilungsfunktionen für 3 Szenarien dargestellt. Anhand dieser Szenarien wird die Rücklaufmenge von GKP und GFP bis 2050 prognostiziert.

Tabelle A 1: Datengrundlage zur Berechnung der Rücklaufquote von GKP und GFP bis 2050

Abfallart	Jahr	Produzierte Menge	Produzierte Menge mit	Verbrauch	Verschnitt		
		DE	Außenhandel	Inland	Verbrauch Inland	Export	Import
		[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
GKP & GFP	1995	1.820.842	2.301.110	2.186.054	115.055	149.533	629.802
GKP & GFP	1996	1.911.494	2.261.122	2.148.066	113.056	197.911	547.539
GKP & GFP	1997	2.011.845	1.989.990	1.890.491	99.500	276.015	254.160
GKP & GFP	1998	2.532.929	2.448.460	2.326.037	122.423	331.379	246.909
GKP & GFP	1999	2.690.834	2.633.937	2.502.241	131.697	413.727	356.831
GKP & GFP	2000	2.355.572	2.233.666	2.121.983	111.683	474.817	352.910
GKP & GFP	2001	2.383.958	2.249.493	2.137.018	112.475	349.153	214.688
GKP & GFP	2002	2.442.947	2.112.527	2.006.900	105.626	475.123	144.703
GKP & GFP	2003	2.347.645	2.132.273	2.025.659	106.614	410.930	195.558
GKP & GFP	2004	2.656.096	2.122.960	2.016.812	106.148	661.840	128.704
GKP & GFP	2005	2.670.249	1.915.144	1.819.387	95.757	755.105	0
GKP & GFP	2006	3.023.307	1.965.659	1.867.376	98.283	1.057.648	0
GKP & GFP	2007	3.153.438	2.010.292	1.909.777	100.515	1.158.474	15.329
GKP & GFP	2008	2.833.009	2.019.209	1.918.248	100.960	842.411	28.611
GKP & GFP	2009	2.360.657	1.967.813	1.869.423	98.391	447.349	54.505
GKP & GFP	2010	2.432.764	2.064.161	1.960.953	103.208	423.242	54.639
GKP & GFP	2011	2.533.290	2.174.985	2.066.236	108.749	424.132	65.827
GKP & GFP	2012	2.435.794	2.135.030	2.028.279	106.752	379.626	78.862
GKP & GFP	2013	2.285.091	2.041.557	1.939.479	102.078	315.523	71.989
GKP & GFP	2014	2.309.468	2.085.132	1.980.876	104.257	295.186	70.850
GKP & GFP	2015	2.366.028	2.174.348	2.065.631	108.717	281.317	89.638
GKP & GFP	2016	2.360.688	2.217.031	2.106.179	110.852	242.643	98.986
GKP & GFP	2017	2.398.292	2.225.614	2.114.333	111.281	266.635	93.957
GKP & GFP	2018	2.429.486	2.245.344	2.133.077	112.267	269.693	85.552
GKP & GFP	2019	2.485.545	2.309.155	2.193.697	115.458	265.929	89.539
GKP & GFP	2020	2.465.198	2.311.353	2.195.785	115.568	250.761	96.915
GKP & GFP	2021	2.651.230	2.456.202	2.333.392	122.810	274.370	79.343
GKP & GFP	2022	2.503.486	2.221.236	2.110.174	111.062	330.651	48.402
GKP & GFP	2023	2.121.261	1.865.909	1.772.613	93.295	292.835	37.483
GKP & GFP	2024	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2025	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2026	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2027	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2028	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2029	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2030	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2031	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939

Abfallart	Jahr	Produzierte Menge DE [Mg]	Produzierte Menge mit Außenhandel [Mg]	Verbrauch Inland [Mg]	Verschnitt Verbrauch Inland [Mg]	Export [Mg]	Import [Mg]
GKP & GFP	2033	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2034	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2035	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2036	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2037	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2038	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2039	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2040	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2041	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2042	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2043	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2044	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2045	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2046	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2047	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2048	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2049	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939
GKP & GFP	2050	2.447.326	2.168.645	2.046.279	122.366	424.619	145.939

In der Wissenschaft werden die Eignungen unterschiedlicher Verteilungen zur Beschreibung der Rückbauaktivität und Lebenserwartung von Gebäuden und Produkten diskutiert. Die Weibull-Verteilung wird häufig zur Modellierung der Lebensdauern von Gebäuden eingesetzt, da sie eine flexible Anpassung an unterschiedliche Ausfallmechanismen ermöglicht. Dabei wird die charakteristische Lebensdauer (η , auch Skalenparameter genannt) verwendet. Sie beschreibt den Zeitpunkt, zu dem 63,2 % aller Produkte ausgefallen sind. Die Umrechnung aus der mittleren Lebensdauer (μ) erfolgt mit Hilfe der Gammafunktion (Γ) und des Weibull-Faktors (β) gemäß Formel 1.

$$\eta = \frac{\mu}{\Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (1)$$

Die Weibull-Verteilung beschreibt den Ausfallprozess mit den Funktion (2) und (3). Die Dichtefunktion (2) gibt die jährliche Rückbaurrate an, während die Verteilungsfunktion (3) den kumulierten Anteil der bereits ausgefallenen Produkte zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreibt.

- **Dichtefunktion (jährliche Rückbaurrate):**

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (2)$$

x : Zufallsvariable [-]

- **Verteilungsfunktion (kumulative Ausfallwahrscheinlichkeit / ausgefallener Anteil):**

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

In Abbildung A 1 sind die Dichte-sowie Verteilungsfunktionen für die in Kapitel 2.6 betrachteten Szenarien dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei einer mittleren Lebensdauer von 25 Jahren (Szenario 1) die Rückbaurrate nach knapp 20 Jahren ihren Höhepunkt erreicht. Dies deutet auf ein frühzeitiges Versagen der Bauteile hin, etwa durch Schäden, Umnutzungen oder frühzeitiger Sanierung. In diesem Szenario sind die GKP und GFP nach 70 Jahren nahezu vollständig ausgefallen. Mit steigender, mittlerer Lebensdauer verläuft der Anstieg der Rückbaurrate moderater und die Lebensdauervertelung zeigt einen langgezogenen Verlauf. Der vollständige Rückbau in den Szenarien 2 und 3 erfolgt erst nach über 100 Jahren.

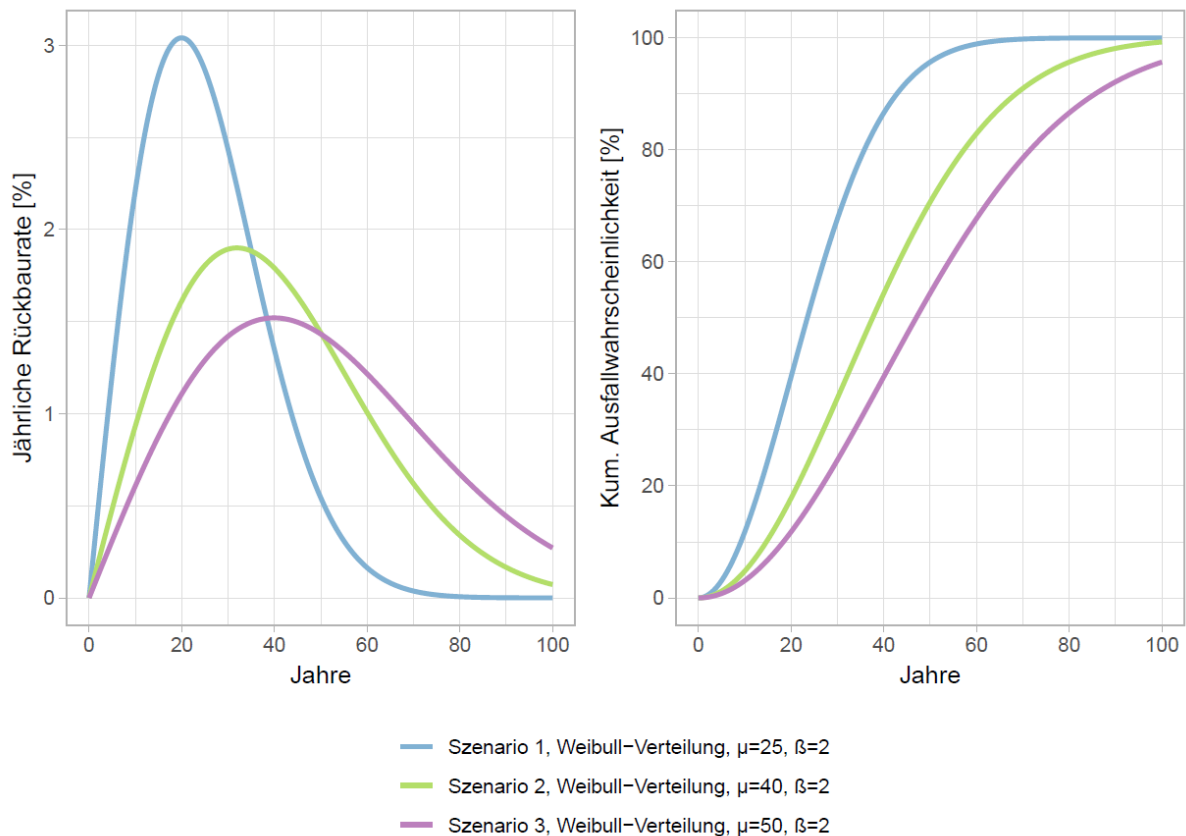


Abbildung A 1: Verlauf der Dichtefunktionen (links) und Verteilungsfunktionen (rechts) der Weibull-Verteilung für die Szenarien 1, 2 und 3 mit μ = mittlere Lebensdauer und β = Weibull-Faktor. Die Dichtefunktion stellt die jährliche Rückbaurrate dar, die Verteilungsfunktion den kumulierten zurückgebauten Anteil (eigene Darstellung)

B. Einordnung gipshaltiger Abfälle nach ASN

Aufgrund der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten von Baustoffen auf Gipsbasis oder einer nicht sortenreinen Erfassung, können diese unter verschiedene ASN fallen. In Tabelle B 1 sind beispielhaft einige gipshaltige Abfälle mit den entsprechenden ASN aufgelistet, die von der Gipsrecyclinganlage der Firma MUEG am Standort in Großpösna angenommen werden.

Tabelle B 1: Annahme von gipshaltigen Abfällen der Fa. MUEG nach Abfallschlüsselnummer (ASN) ³⁰¹

ASN	Abfallbezeichnung
10 01 05	Reaktionsabfälle auf Calciumbasis aus Rauchgasentschwefelungen in fester Form
10 12 06	verworfenen Formen, hier aus Gips bestehend
10 12 08	Abfälle aus Keramikerzeugnissen, Ziegeln, Fliesen und Steinzeug (nach dem Brennen), hier aus Gips bestehend
10 13 99	Abfälle anders nicht genannt, hier Formgipse, Gipskartonplatten und -verschnitt sowie Fehlchargen gipshaltiger Abfälle
11 01 10	Schlämme und Filterkuchen mit Ausnahme derjenigen, die unter 11 01 09 fallen
17 08 02	Baustoffe auf Gipsbasis mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 08 01 fallen, hier Gipskartonplatten und andere Gipsabfälle aus dem Rückbau
17 09 04	gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen, hier Gipskartonplatten und andere Gipsabfälle aus dem Rückbau
18 01 04	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektions-präventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (hier: ausschließlich Dental-Gipse aus der Zahnmedizin)
19 12 09	Mineralien, hier vorbehandelte Gipsabfälle

³⁰¹ [MUEG Mitteldeutsche Umwelt- und Entsorgung GmbH, 2024].

C. Methodik zur Charakterisierung von Faserstoffen und Gipsen

Im Folgenden werden die Methoden zur Ermittlung zentraler Kenngrößen von Faserstoffen und Gipsen vorgestellt. Neben den Messprinzipien und verwendeten Geräten werden auch die relevanten Normen und Definitionsgrundlagen erläutert.

Methodik zur Charakterisierung von Faserstoffen

- **Holzstoffanteil**

Der Holzstoffanteil wird mit dem Paper Bale Sensor (PBS) ermittelt. Der PBS ist ein von der Papiertechnischen Stiftung entwickeltes Messgerät. Es nutzt den nahen Infrarotbereich zur Prüfung des Holzstoffanteils in Faserstoffen. Die Messgenauigkeit liegt bei 8 % für Holzstoff bei einem Feuchtegehalt < 10 %.³⁰²

- **Ascheanteil**

Der Ascheanteil beschreibt den Anteil an anorganischen, nicht verbrennbaren Anteilen wie Füllstoffe oder Pigmente im Faserstoff. Er wird über den Glühverlust nach der DIN 54370³⁰³ ermittelt.

- **Mahlgrad (Shopper Riegler)**

Der Mahlgrad (Shopper Riegler) ist ein Maß für die Entwässerungsfähigkeit von Faserstoffen, insbesondere in der Papierindustrie. Er gibt an, wie stark Zellstoff oder Papierfasern gemahlen oder bearbeitet wurden, und ist ein Indikator für den Bearbeitungszustand des Faserstoffes. In dieser Arbeit wurde das Schopper-Riegler-Verfahren gemäß DIN-ISO 5267-1³⁰⁴ angewandt.

- **Fasermorphologie**

Der Valmet Fibre Image Analyzer ist ein Messgerät, das u. a. zur Charakterisierung von Fasereigenschaften eingesetzt wird. Das Messprinzip basiert auf einer hochauflösenden Bildgebungstechnologie und Bildverarbeitung, womit Fasereigenschaften analysiert werden können. Die Messung erfolgte im „fibers Run Mode“, wobei die standardisierten Messeinstellungen für Faseranalysen zum Einsatz kamen (minimale Faserlänge: 0,10 mm; minimale Breite: 10 µm).

³⁰² [Papiertechnische Stiftung, 2014].

³⁰³ [DIN 54370, 2020].

³⁰⁴ [DIN EN ISO 5267-1, 2000].

• Faserlänge

Die Angabe der Faserlänge (mm) erfolgt gemäß den Richtlinien des Tappi T271³⁰⁵ sowie der ISO 16065.³⁰⁶ Die Definitionen von Faser in diesen Normen werden unterschiedlich interpretiert und ist von der betrachteten Faserlänge abhängig:

- Tappi T271: Fasern mit einer Länge von 0,01 – 7,60 mm
- ISO 16065: Fasern mit einer Länge von 0,2 – 7,0 mm

Die Faserlänge wird nach Tappi T271 und ISO 16065 als arithmetisches Mittel (Faserlänge_n), längengewichtete mittlere Faserlänge (Faserlänge_l) angegeben. Der Unterschied zwischen den beiden Parametern liegt in der Gewichtung der Faserlängen für die Mittelwertbildung:

- Die **arithmetische mittlere Faserlänge** (Faserlänge_n) ist das einfache Mittel aller gemessenen Faserlängen und beschreibt den Durchschnitt ohne Berücksichtigung der individuellen Länge einer jeden Faser:

$$Faserlänge_n = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N li \quad (1)$$

- Die **längengewichtete mittlere Faserlänge** (Faserlänge_l) gewichtet längere Fasern stärker, da sie eine größere Bedeutung für das Materialverhalten besitzen. Sie wird nach folgender Formel berechnet:

$$Faserlänge_n = \frac{\sum_{i=1}^N li^2}{\sum_{i=1}^N li} \quad (2)$$

Dadurch spiegelt *Faserlänge_l* die Dominanz langer Fasern im Fasergemisch wider, während die *Faserlänge_n* alle Fasern gleich behandelt.

• Faserdicke

Die Faserdicke (µm) wird als längengewichtete mittlere Faserdicke angegeben.

• Feinanteil (A und B)

Als Feinanteil werden kurze faserartige Partikel bezeichnet. Diese werden je nach Abmessungen in drei Formen angegeben, als Feinanteil, Feinanteil A und Feinanteil B. Die jeweiligen Feinanteile werden wie folgt definiert:

- Feinanteil: Arithmetisches Mittel. Breite > 10 µm, Länge < 0,2 mm
- Feinanteil A: Beschreibt den Anteil an der gesamten, gemessenen Faserfläche. Partikel mit einer Länge von < 0,2 mm.

³⁰⁵ [TAPPI T 271, 2023].

³⁰⁶ [ISO 16065-1:2014, 2014].

- **Feinanteil B:** Beschreibt den Anteil an der gesamten, gemessenen Faserlänge. Partikel mit einer Breite von $< 10 \mu\text{m}$ und einer Länge von $> 0,2 \text{ mm}$.

- **Faserfeinheit (Coarseness)**

Die Faserfeinheit ist definiert als Gewicht einer Faser pro Längeneinheit und wird in mg/m angegeben. Das Gewicht einer Faser steht in direktem Zusammenhang mit der Zellwandstärke der Faser.³⁰⁷

- **Faserkrümmung**

Die Faserkrümmung gibt den Verformungsgrad von Fasern infolge von Kräuselungen, Verdrehen oder Knicken an. Sie wird als Verhältnis zwischen der tatsächlichen Faserlänge und dem linearen Abstand der Faserendpunkte angegeben.³⁰⁸

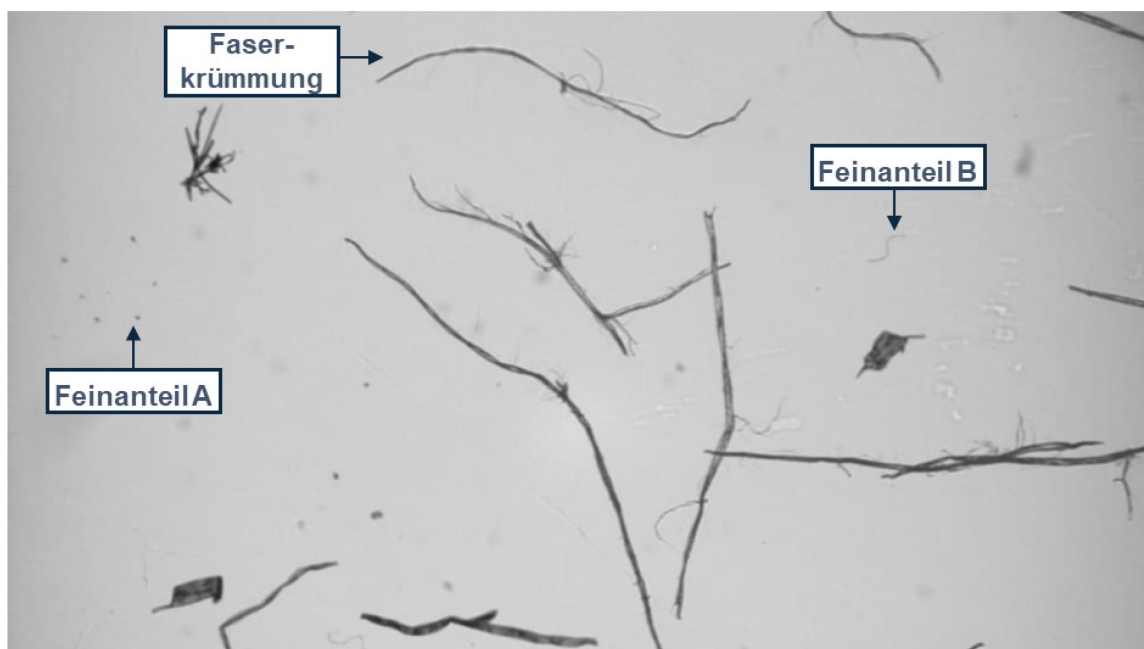


Abbildung C 1: Beispielhafte Aufnahme einer Faserprobe zur optischen Messung von Fasereigenschaften mit dem Valmet Fibre Analyzer (eigene Aufnahme)

- **Ermittlung des Fasergehalts in Anlehnung an DIN 54370**

Der Fasergehalt von GFP oder gipshaltigen Bauabfällen wurde in Anlehnung an die DIN 54370³⁰⁹ ermittelt. Dazu wurden etwa $\geq 20 \text{ g}$ des Gips-Faser-Gemisches (abgebundene GFP oder gipshaltiger Sekundärrohstoff) in einem Tiegel für 24 h bei $175 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zur Massenkonstanz getrocknet (m_e). Anschließend wurde die Probe für 1 h bei $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gegläht

³⁰⁷ [Görtz, 2008], S. 12.

³⁰⁸ [Franke, 1993], S. 125.

³⁰⁹ [DIN 54370, 2020].

(m_a), wobei die organischen Fasern verglühen. Die Berechnung des Fasergehaltes erfolgte nach Gleichung (3):

$$FGH (\%) = \frac{m_e - m_a}{m_e} \times 100 - A_F \quad (3)$$

FGH :	Fasergehalt
m_e :	Masse nach Trocknung
m_a :	Masse nach Glühen
A_F :	Ascheanteil des Faserstoffes

Methodik zur Charakterisierung von Gips

• Röntgenbeugungsanalyse (XRD) und Rietveld-Verfeinerung

Die Röntgenbeugungsanalyse (XRD) ist eine etablierte Methode zur Charakterisierung kristalliner Calciumsulfatphasen.³¹⁰ Dabei ermöglicht die Rietveld-Verfeinerung eine quantifizierende Auswertung der vorhandenen kristallinen Phasen durch Profilanpassung.³¹¹

Im Rahmen dieser Arbeit kamen zwei Diffraktometer zum Einsatz: das X'Pert PW430 am Institut für Mineralogie der WWU Münster sowie das Bruker D8 Discover an der Professur Werkstoffe des Bauens der Bauhaus-Universität Weimar.

Die Untersuchungen in des Gipses aus GKP erfolgten am Philips X'Pert PW 4030 Pulverdiffraktometer mit Cu K α 1-Strahlung (45 kV, 40 mA), einer Schrittweite von 0,02° in 2Theta und einer Messzeit von 1 s pro Schritt bei einer Detektor-Blende von 0,4 mm. Die Proben wurden mittels „Front loading“ auf den Probhalter aufgebracht. Zur quantitativen Phasenbestimmung wurde die Software „FullProf“ verwendet.

Die Analysen am Bruker D8 Discover wurden an pulverisierten Proben mit 40 kV, 25 mA und Cu-Anode durchgeführt. Die qualitative Phasenanalyse erfolgte mit EVA-Software gegen die PDF-2-Datenbank, gefolgt von quantitativer Phasenbestimmung mittels Rietveld-Verfeinerung mit Profex 5.2.4. Zur Minimierung von Orientierungseffekten wurden die Proben per Backloading vorbereitet, und ein interner Standard (ZnO) zur Bestimmung röntgenamorpher Anteile beigemischt.

Die Röntgenbeugungsuntersuchungen der α -HH-Suspensionen aus Kapitel 8.3 wurden am Bruker D8 Discover an pulverisierten Proben mit 40 kV, 25 mA und Cu-Anode durchgeführt. Die qualitative Phasenanalyse erfolgte mit EVA-Software gegen die PDF-2-Datenbank, gefolgt von quantitativer Phasenbestimmung mittels Rietveld-Verfeinerung mit Profex 5.2.4. Zur

³¹⁰ [Müller M., 2007], S. 31.

³¹¹ [Allmann, 2003], S. 217.

Minimierung von Orientierungseffekten wurden die Proben per Backloading vorbereitet, und ein interner Standard (ZnO) zur Bestimmung röntgenamorpher Anteile beigemischt.

- **Lasergranulometrie**

Die Lasergranulometrie ist eine optische Analyse, die eine volumenbezogene Korngrößenverteilung liefert. Die Messung erfolgt an einem Coulter LS 13320XR mit PIDS in einem Messbereich von 0,04 bis 2000 µm mit insgesamt 116 Größenklassen. Die Dispergierung erfolgte in Isopropanol bei einer Behandlung von 2 min im internen Ultraschall.

Neben dem Coulter LS 13320XR wurde auch der Coulter LS230 verwendet, der einen ähnlichen Messbereich von 0,04 bis 2000 µm abdeckt, jedoch mit 32 Größenklassen arbeitet.

- **Rasterelektronenmikroskopie (REM)**

Zur detaillierten Abbildung der Mikro- und Nanostruktur wurde ein Rasterelektronenmikroskop verwendet. Bei dem verwendeten Gerät handelt es sich um ein JEOL 6610 Rasterelektronenmikroskop (REM). Die Proben wurden vor der Untersuchung mit einer dünnen Kohlenstoffschicht (10...30nm) bedampft, um eine leitfähige Oberfläche zu erhalten und damit die Bildqualität zu steigern.

Zudem wurden ausgewählte Proben mit einem Zeiss LIBRA Transmissions-elektronenmikroskop untersucht.

- **Spezifische Oberfläche nach Blaine und BET**

Bei der Bestimmung der spezifischen Oberfläche wird zwischen der „äußeren“ und der „inneren“ Oberfläche unterschieden.

Die „äußere“ Oberfläche wurde durch das Luftdurchlässigkeitsverfahren nach Blaine untersucht. Bei diesem Verfahren wird über den Strömungswiderstand die volumenbezogene Oberfläche berechnet. Dies berücksichtigt weder Poren noch Rauigkeiten, weshalb von der „äußeren“ Oberfläche gesprochen wird. Es stellt ein Maß für die Feinheit des Materials dar. Die Durchführung des Messverfahrens erfolgte in Anlehnung an DIN EN 196-6.³¹²

Die „inneren“ Oberfläche wurde mit der BET-Methode gemessen. Dabei werden neben der „äußeren“ Oberfläche auch die Rauigkeiten und Poren berücksichtigt. Bei der Bestimmung der Oberfläche nach dem BET-Methode wurde das Gerät SA3100 der Firma COULTIER Electronics GmbH verwendet.³¹³

³¹² [Müller M., 2007], S. 33.

³¹³ [Müller M., 2007], S. 33.

- **Wasser/Bindemittel-Wert & Einstreumenge nach DIN EN 13279-2**

Der Wasser-Bindemittel-Wert bei Stuckgipsen wurde nach dem Einstreumenge-Verfahren gemäß DIN EN 13279-2³¹⁴ ermittelt. Dabei ergibt sich die Einstreumenge aus der Bindemittelmenge, die 100 g Wasser durchfeuchten kann. Der Wasser-Bindemittel-Wert berechnet sich aus dem Verhältnis der Wassermasse zur eingestreuten Bindemittelmasse.

- **Knick'sche Filtrationsmethode**

Zur Prüfung der Filtrationsgeschwindigkeit wird die Knick'sche Filtrationsmethode verwendet. Dabei wird ein Gips-Wasser-Gemisch (50 g des zu untersuchenden Gipses mit 500 g Wasser „mild“ gemischt) in einen Filtrationsbehälter gefüllt und mit Unterstützung von Druckluft über eine Kombination aus 2 Filtern mit definiertem Filtermittelwiderstand, der geringer ist als der Filterwiderstand der Mischung, nach unten entwässert.

Das Filtrat wird in einer Saugflasche aufgefangen. Die Saugflasche steht auf einer Waage. Mit Hilfe eines Messdaten Erfassungssystems wird der zeitliche Verlauf der Filtratmenge aufgezeichnet. Für die Darstellung und Auswertung der Werte wird die Filtratmenge gegen die Wurzel der Zeit aufgetragen. Die Steigung der Geraden ergibt eine Aussage über die Filtrierbarkeit des Bindemittels.

- **Feuchte / Kristallwasser**

Die Feuchte wird mit dem Sartorius MA 150 und der Kristallwassergehalt mit dem Ohaus MB 120 ermittelt.

Über den Kristallwassergehalt lässt sich die Reinheit nach Gleichung (4) bestimmen.

$$R (\%) = \frac{KW}{20,927175} \times 100 \quad (4)$$

R: Reinheit

KW: Kristallwassergehalt

Das stöchiometrische Kristallwasser von Calciumsulfat-Dihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) beträgt 20,92 %, was einem Dihydratgehalt von 100 % entspricht und auf eine hohe Materialreinheit hinweist. Niedrigere Kristallwassergehalte deuten auf eine niedrigere Reinheit durch mineralische Nebenbestandteile wie Dolomit oder andere Gipsphasen wie Halbhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) oder Anhydrit (CaSO_4) hin.

³¹⁴ [DIN EN 13279-2:2014-03, 2014].

Beurteilung des Abbindeverhaltens

- **Schnelltest: Umwandlungsfortschritt zu α -HH**

Zur Bestimmung des Umwandlungsfortschritts von Calciumsulfat-Dihydrat (DH) zu α -Calciumsulfat-Halbhydrat (α -HH) wurde ein Schnelltestverfahren der Firma Lindner Norit GmbH eingesetzt. Dieses Verfahren beruht auf der kontinuierlichen Messung der Reaktionszeit eines standardisierten Testgemisches. Zunächst werden 80 g Wasser und 200 g α -HH vermischt. Anschließend werden 50 g der zu prüfenden Suspension zu diesem Gemisch gegeben. Die Messung erfolgt durch Aufzeichnung des Temperatur-Zeit-Verlaufs.

Die Reaktionszeit wird mit zuvor separat nach DIN EN 13279-2³¹⁵ ermittelten Referenzwerten des reinen α -HH verglichen. Eine verkürzte Reaktionszeit im Vergleich zum Referenzwert gibt an, dass die Umwandlung von DH zu HH unvollständig ist und noch reaktionsfähige DH-Reste in der Suspension vorhanden sind. Entspricht die gemessene Reaktionszeit dem Referenzwert oder übersteigt diesen, gilt die Umwandlung als abgeschlossen.

- **Abstoppen mit Spiritus**

Für die Verifizierung der Messergebnisse des Schnelltests Umwandlungsgrad (α -Halbhydrat) erfolgte die Kristallwasserbestimmung. Hierfür wurden etwa 10 g der heißen Suspension sofort filtriert, um eine Umwandlung des erzeugten α -HH zurück zum Dihydrat (DH) zu verhindern. Das Abstoppen des Filterkuchens erfolgte, bis die Oberfläche des Filterkuchens trocken erschien. Anschließend wurde der Filterkuchen zweimal mit Spiritus gespült und abschließend mit Aceton gespült. Danach erfolgte die Trocknung des Filterkuchens bei 40°C. Der so erzeugte Filterkuchen wurde für die analytische Untersuchungen verwendet.

Die Filtration erfolgte in einer Nutsche mit einem Durchmesser von 200 mm. Der Filterdurchmesser betrug 185 mm mit einer Rückhaltung von 5 bis 13 μ m (Qualitativer Filter 413, European Kategorie Nr. 516-0818). Die Menge der Suspension, die immer auf den Filter aufgegeben wurde, entspricht einem Filterkuchen mit einer Dicke von etwa 2 bis 3 mm, maximal 6 mm.

Anschließend erfolgte eine thermogravimetrische Analyse (TGA) nach DIN EN 15148³¹⁶ zur Bestimmung des Kristallwassergehalts, der als Indikator für den Umwandlungsgrad diente.

Diese zweistufige Methodik gewährleistet eine schnelle, präzise und verlässliche Quantifizierung des Umwandlungsfortschritts von Calciumsulfatphasen in Baustoffproben.

³¹⁵ [DIN EN 13279-2:2014-03, 2014].

³¹⁶ [DIN EN 15148:2010-03, 2010].

D. Altpapiersorten nach DIN EN 643 und Faserstoffeigenschaften ausgewählter Sorten

Das Altpapier in Deutschland kommt als getrennt erfasster Stoffstrom zu 47 % aus Haushalten oder zu 53 % aus dem gewerblichen Bereich.³¹⁷ Es wird gemäß der Altpapiersortenliste DIN EN 643³¹⁸ in fünf Hauptgruppen und 95 Qualitäten eingeteilt, um eine Standardisierung zu erreichen und die inhomogene Zusammensetzung von Altpapier auf ein technologisch beherrschbares Minimum zu reduzieren.

In Tabelle D 1 wird die angefallene Altpapiermenge nach Gruppen gelistet. 80 % des Altpapiers lassen sich den unteren Sorten zuordnen. Der Rest setzt sich aus mittleren Sorten (~ 6 %), besseren Sorten (~ 4 %) krafthaltigen Sorten (~ 11 %), sowie Sondersorten (~ 2 %) zusammen.³¹⁹

Tabelle D 1: Gruppenzuordnung von Altpapieren nach DIN EN 643^{320, 321}

Gruppe	Bezeichnung	Beispiele
1	Untere Sorten	Gemischtes Altpapier, Verpackungen aus Papier und Karton, Illustrierte
2	Mittlere Sorten	Zeitungen, Büropapier, Weiße Bücher
3	Bessere Sorten	Weißer, mehrlagiger Karton, weißes Zeitungspapier, weiße Späne, unbedrucktes Tissue
4	Krafthaltige Sorten	Unbenutzte Pappe, Kraftwellpappe, Kraftpapiersäcke
5	Sondersorten	Mischungen aus Gruppen 1-5, gemischte Verpackungen, Getränkekarton, Etiketten, Kraftpapiersäcke etc.

³¹⁷ [Kurth et al., 2022], S. 416.

³¹⁸ [DIN EN 643:2014-11, 2014].

³¹⁹ [Reibnitz; Geiger G., 2023], S. 32.

³²⁰ [DIN EN 643, 2014].

³²¹ [Reibnitz; Geiger G., 2023], S. 32.

Die Tabelle D 2 zeigt die wesentlichen Fasereigenschaften der in dieser Arbeit verwendeten Faserstoffe aus verschiedenen Altpapiersorten sowie des GKP-Kartons und eines Papiermixes.

Tabelle D 2: Fasereigenschaften diverser Altpapiersorten sowie von GKP-Karton und Papiermix

Bezeichnung	Altpapiersorte	Mahl- grad [SR°]	Asche- anteil [%]	Holzstoff- anteil [%]	Faser- länge_ISO_I [mm]	Faser- dicke [µm]	Faser- krümmung [%]	Faser- feinheit [mg/m]	Fein- anteil_A [%]	Fein- anteil_B [%]	Fein- anteil [%]
Untere Sorte 1	Untere Sorte	60	25,3	81,5	1,02	27,3	8,4	0,28	43,9	22,64	90,5
Untere Sorte 2	Untere Sorte	54	20,8	58,1	1,07	25,3	7,6	0,24	39,7	16,19	89,2
Mittlere Sorte 1	Mittlere Sorte	48	15,3	76,6	1,07	26,4	8,4	0,26	38,7	22,02	88,9
Mittlere Sorte 2	Mittlere Sorte	48	14,6	61,1	1,02	24,3	7,6	0,24	41,8	25,72	89,5
Bessere Sorte 1	Bessere Sorte	32	20,9	62,5	0,79	22,4	6,3	0,19	24,4	1,21	75,4
Bessere Sorte 2	Bessere Sorte	17	1,8	0,0	1,08	24,8	11,6	0,21	18,4	2,4	75,6
Bessere Sorte 3	Bessere Sorte	21	12,2	4,6	1,06	20,7	7,8	0,14	21,6	1,76	78,8
Krafthaltige Sorte 1	Krafthaltige Sorte	19	8,6	15,9	1,81	30,2	9,9	0,30	27,1	10,50	88,4
Krafthaltige Sorte 2	Krafthaltige Sorte	14	20,6	3,8	1,10	24,1	8,3	0,21	17,0	0,47	75,3
Krafthaltige Sorte 3	Krafthaltige Sorte	21	6,3	0,0	1,35	23,0	10,0	0,18	20,1	2,87	77,4
Krafthaltige Sorte 4	Krafthaltige Sorte	29	4,9	39,0	1,52	31,0	8,4	0,34	25,0	3,85	85,6
Krafthaltige Sorte 5	Krafthaltige Sorte	19	0,9	1,9	1,69	28,9	9,1	0,27	14,9	3,6	74,2
Krafthaltige Sorte 6	Krafthaltige Sorte	14	2,6	6,5	1,94	32,2	8,2	0,34	22,9	6,71	86,6
Krafthaltige Sorte 7	Krafthaltige Sorte	25	5,7	14,1	1,29	23,4	7,3	0,19	22,7	3,34	81,4
Krafthaltige Sorte 8	Krafthaltige Sorte	17	1,7	2,9	1,96	29,3	10,0	0,27	19,8	4,79	81,2
Vorderseite GKP Typ A ³²²	k. A.	39	13,8	49,9	1,20	26,4	7,4	0,26	31,7	6,97	86,6
Rückseite GKP Typ A ²⁹²	k. A.	39	13,8	49,1	1,07	24,2	7,9	0,22	34,3	6,77	86,0
Vorderseite GKP Typ H ²⁹²	k. A.	39	11,3	52,8	1,09	25,2	7,5	0,24	35,2	9,75	87,3
Rückseite GKP Typ H ²⁹²	k. A.	39	11,2	52,0	1,12	25,6	7,2	0,24	32,7	6,83	86,1
Vorderseite GKP Typ A ³²³	k. A.	-	8,8	56,6	1,21	27,0	5,53	0,27	32,5	11,01	86,7
Rückseite GKP Typ A ²⁹³	k. A.	-	9,7	48,1	1,13	24,7	5,48	0,23	33,8	9,50	86,7
Papiermix	k. A.	14	6,5	20,9	1,46	27,8	8,8	0,26	28,5	6,27	84,2

³²² Hersteller Hamburger Containerboard

³²³ Hersteller WEIG

E. Probenvorbereitung zur Charakterisierung von GKP

Zunächst wird die Probenvorbereitung für die Charakterisierung des Gipskerns sowie der Kartonummantelung von GKP beschrieben. Dazu wurde der Gipskern zunächst mittels einer Säge freigelegt (Abbildung E 1, links). Anschließend wurde der freigelegte Kern in kleine Plättchen zerkleinert und in einer Scheibenschwingmühle (Firma Siebtechnik, Modell T1000) für 30 Sekunden bei 970 Umdrehungen pro Minute zu feinem Pulver mit einer Korngröße unter $63\text{ }\mu\text{m}$ gemahlen (Abbildung E 1, mitte). Das entstandene Pulver diente als Ausgangsmaterial für die Röntgenbeugungsanalyse (XRD). Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden an unzerkleinerten Bruchstücken durchgeführt (Abbildung E 1, rechts).



Abbildung E 1: Probenvorbereitung von Gips aus GKP zur Analyse der Phasenzusammensetzung. Freilegung des Gipskerns von GKP (links), gemahlener Gips (mitte), Gipsbruchstücke mit Kohlestoff bedampft auf Probehalter (rechts) (eigene Aufnahmen)

Die Kartonummantelung wurde als Rohware angeliefert, auf DIN A4-Format händisch vorzerkleinert und anschließend in einem Pulper mit Rührwerk und Zugabe von Wasser bei einer Wassertemperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufgelöst (Abbildung E 2) Die Verweildauer der Fasern im Pulper betrug 40 Minuten. Nach dem Pulpen wurde das Fasergemisch durch einen qualitativen Filter (Typ 413, European Category No. 516-0818) entwässert und anschließend im Trockenschrank für 12 Stunden bei $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ getrocknet. Die getrockneten Proben wurden mittels Valmet Fibre Image Analyzer (Faserlänge, -dicke, -krümmung, -feinheit und Feinanteil) und Paper Bale Sensor (Holzstoffanteil & Feuchte) analysiert. Die Bestimmung des Mahlgrades erfolgte nach dem Schopper-Riegler-Verfahren.



Abbildung E 2: Faserstoff im Pulper (links), Schneidwerkzeug des Pulpers (mitte) und aufgelöster Faserstoff „Pulpe“ (rechts) (eigene Aufnahmen)

F. Charakterisierung der Materialeigenschaften von GKP

Im Folgenden sind ergänzende Nachweise zu den im Haupttext (vgl. Kapitel 6) beschriebenen Ergebnissen dargestellt.

In Abbildung F 1 sind die Bruchkanten von Gipskartonplatten (GKP) der Typen A, H2 und DF aus dem Werk Hartershofen in 20x- facher Vergrößerung dargestellt. In allen Proben sind deutlich Glasfasern erkennbar mit deutlich größerer Anzahl in der Feuerschutzplatte (DF). Während ihr Einsatz in Feuerschutzplatten (DF) branchenüblich ist, galt dies bislang nicht für die Bauplatte Typ A und die imprägnierte Platte Typ H2.



Abbildung F 1: 20x- fache Vergrößerung der Bruchkante von GKP aus dem Werk Hartershofen der Typen A, H2 und DF (von links nach rechts) mit sichtbar eingelagerten Glasfasern

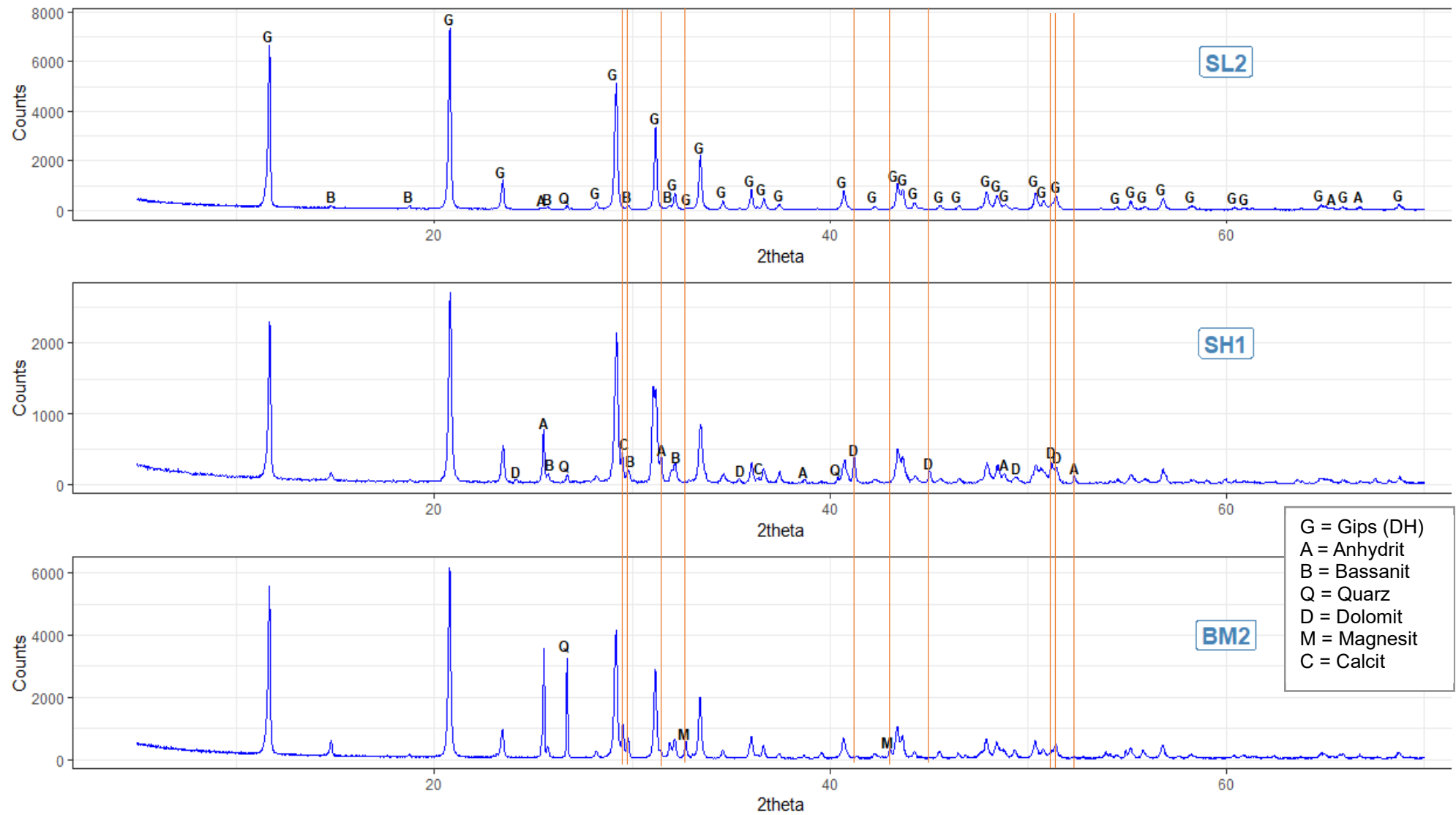


Abbildung F 2: Diffraktogramme des Gipses aus GKP von SL2, SH1, BM2 mit Kennzeichnung der jeweiligen Phasen

G. Rezepturen und Versuchparameter zur Ermittlung der Armierungswirkung

Zur Ermittlung der Armierungswirkung von Faserstoffen in Doppelbodenplatten wurden fünf festgelegte Rezepturen verwendet (Tabelle G 1). Je nach Versuchsansatz wurde ein Faserstoffgehalt zwischen 5,3 und 9,3 M.-% sowie ein Feststoffgehalt zwischen 40,2 und 41,5 M.-% eingestellt. Der Faserstoffgehalt beschreibt den Anteil reiner, wasserfreier Fasern in der Nassmischung, während der Feststoffgehalt das Verhältnis der Anteile aus Faserstoff und Bindemittel zur gesamten Nassmischung kennzeichnet. Durch diese gezielte Definition der Mischungsverhältnisse konnte einerseits eine gleichbleibende Verarbeitbarkeit der Rezepturen gewährleistet werden, andererseits wurde eine reproduzierbare Variation des Faserstoffgehalts ermöglicht, um dessen Einfluss auf die Festigkeit der Platten gezielt untersuchen zu können.

Tabelle G 1: Rezepturen zur Herstellung von GFP mit variierendem Faserstoffgehalt

Parameter	Einheit	R1	R2	R3	R4	R5
Faserstoff ¹	[kg]	3,6	2,5	2,9	4,1	3,8
Wasser	[kg]	64,1	67,2	64,8	65,5	64,5
Abbindeverzögerer	[%]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Stuckgips (Bindemittel)	[kg]	42,0	45,0	42,0	40,0	42,0
Faserstoffgehalt ² Nassmischung	[M.-%]	7,9	5,3	6,6	9,3	7,0
Feststoffgehalt ³ Nassmischung	[M.-%]	41,5	41,4	40,9	40,2	41,2

¹ Beschreibt die Menge des reinen Faserstoffes abzüglich Feuchte in der Nassmischung.

² Beschreibt das Verhältnis von Faserstoff zu Bindemittel in der Nassmischung.

³ Beschreibt das Verhältnis von Faserstoff und Bindemittel zur gesamten Nassmischung.

In Tabelle G 2 sind die detaillierten Versuchparameter der experimentellen Untersuchungen zusammengefasst. Darin sind die relevanten Mess- und Prozessdaten der insgesamt 35 durchgeführten Einzelversuche dargestellt. Neben der Zuordnung der eingesetzten Faserstoffe zu den jeweiligen Altpapiersorten und den entsprechenden Rezepturen sind die experimentell ermittelten Kennwerte wie Bruchlast, Bruchlastdifferenz (Δ -Bruchlast), Rohdichte, Faserstoffgehalt und Feststoffgehalt aufgeführt. Darüber hinaus wird die Bruchlastdifferenz (Δ -Bruchlast) zwischen den beiden Platten einer Nassmischung angegeben.

Tabelle G 2: Versuchsparmeter zur Ermittlung der Armierungswirkung von Faserstoffen in Doppelbodenplatten

Nr.	Papierart	CEPI	Rezeptur -	Bruchlast [N]	Δ -Bruchlast ¹ [N]	Rohdichte [kg/m³]	Faserstoffgehalt [M.-%]	Fasergehalt_GFP [M.-%]	Feststoffgehalt [M.-%]
V1	Untere Sorte 1	Untere Sorte	R1	5844	27	1504	7,9	3,66	41,54
V2	Untere Sorte 2	Untere Sorte	R1	5864	457	1575	7,9	3,40	41,54
V3	Mittlere Sorte 1	Mittlere Sorte	R1	5918	435	1493	7,9	4,72	41,54
V4	Mittlere Sorte 2	Mittlere Sorte	R2	6146	15	1494	5,3	4,00	41,39
V5	Bessere Sorte 1	Bessere Sorte	R1	6000	187	1546	7,9	4,46	41,54
V6	Bessere Sorte 2	Bessere Sorte	R1	7213	37	1472	7,9	6,32	41,54
V7	Bessere Sorte 3	Bessere Sorte	R1	7396	283	1486	7,9	5,57	41,54
V8	Krafthaltige Sorte 2	Krafthaltige Sorte	R1	7657	145	1500	7,9	4,50	41,54
V9	Krafthaltige Sorte 2	Krafthaltige Sorte	R1	7020	432	1412	7,9	6,61	41,54
V10	Krafthaltige Sorte 2	Krafthaltige Sorte	R2	8037	324	1598	5,3	3,19	41,39
V11	Krafthaltige Sorte 2	Krafthaltige Sorte	R3	8055	429	1567	6,6	4,08	40,93
V12	Krafthaltige Sorte 2	Krafthaltige Sorte	R3	8046	484	1494	6,6	4,84	40,93
V13	Krafthaltige Sorte 2	Krafthaltige Sorte	R5	7462	400	1430	7,0	5,87	41,16
V14	Krafthaltige Sorte 1	Krafthaltige Sorte	R1	7416	122	1480	7,9	5,23	41,54
V15	Krafthaltige Sorte 3	Krafthaltige Sorte	R1	7556	115	1507	7,9	5,23	41,54
V16	Krafthaltige Sorte 4	Krafthaltige Sorte	R3	7807	185	1504	6,6	5,17	40,93
V17	Krafthaltige Sorte 5	Krafthaltige Sorte	R2	8339	393	1582	5,3	4,71	41,39
V18	Krafthaltige Sorte 5	Krafthaltige Sorte	R3	7966	162	1490	6,6	5,44	40,93
V19	Krafthaltige Sorte 6	Krafthaltige Sorte	R2	7907	259	1541	5,3	4,53	41,39
V20	Krafthaltige Sorte 6	Krafthaltige Sorte	R3	7586	532	1504	6,6	5,40	40,93
V21	Krafthaltige Sorte 6	Krafthaltige Sorte	R1	7448	159	1453	7,9	6,43	41,54
V22	Krafthaltige Sorte 7	Krafthaltige Sorte	R2	8057	31	1584	5,3	4,43	41,39
V23	Krafthaltige Sorte 8	Krafthaltige Sorte	R1	7884	777	1471	7,9	7,09	41,54
V24	GKP H (vorne)	k. A.	R1	6567	521	1502	7,9	5,04	41,54
V25	GKP H (hinten)	k. A.	R1	6829	165	1509	7,9	4,79	41,54
V26	GKP A (vorne)	k. A.	R1	6773	400	1512	7,9	4,77	41,54
V27	GKP A (vorne)	k. A.	R1	6017	577	1428	7,9	5,89	41,54
V28	GKP A (vorne)	k. A.	R2	6996	176	1590	5,3	3,68	41,39
V29	GKP A (vorne)	k. A.	R3	7318	135	1555	6,6	4,42	40,93
V30	GKP A (hinten)	k. A.	R1	6459	460	1510	7,9	4,87	41,54
V31	GKP Ah (hinten)	k. A.	R1	6223	900	1489	7,9	4,81	41,54
V32	Papiermix	k. A.	R1	7627	88	1479	7,9	5,88	41,54
V33	Papiermix	k. A.	R2	7757	217	1596	5,2	3,96	41,39
V34	Papiermix	k. A.	R3	7469	124	1509	6,6	5,72	40,93
V35	Papiermix	k. A.	R4	6361	32	1362	9,3	8,29	40,20

¹Differenz der Bruchlast zweier Platten einer Nassmischung

H. Evaluierung von Modellannahmen für das Regressionsmodell

Die vorgebrachte These einer linearen Korrelation direkten zwischen dem Fasergehalt und der Bruchlast von Doppelbodenplatten (vgl. Kapitel 7.2.2) wurde mit einer isolierten Betrachtung des Fasergehaltes belegt. Hierzu wurden Versuche betrachtet, in denen identische Faserstoffe in unterschiedlichen Anteilen in Doppelbodenplatten eingesetzt wurden (Abbildung H 1). Es zeigt sich, dass bei sämtlichen analysierten Faserstoffen mit steigendem Fasergehalt typischerweise eine tendenzielle Abnahme der Bruchlast auftritt. Wie bereits Coutts darlegt, ist dieser Effekt auf einen erhöhten Hohlraumgehalt und eine stärkere Ausbildung von Faser-Faser-Verbindungen bei hohen Fasergehalten zurückzuführen.³²⁴ Die zunehmende Faser-Faser-Bindung verringert die Kontaktfläche zwischen Faser und Matrix, sodass die Fähigkeit der einzelnen Faser zur Ausbildung tragender Verbindungen mit der Gipsmatrix gemindert wird.³²⁵

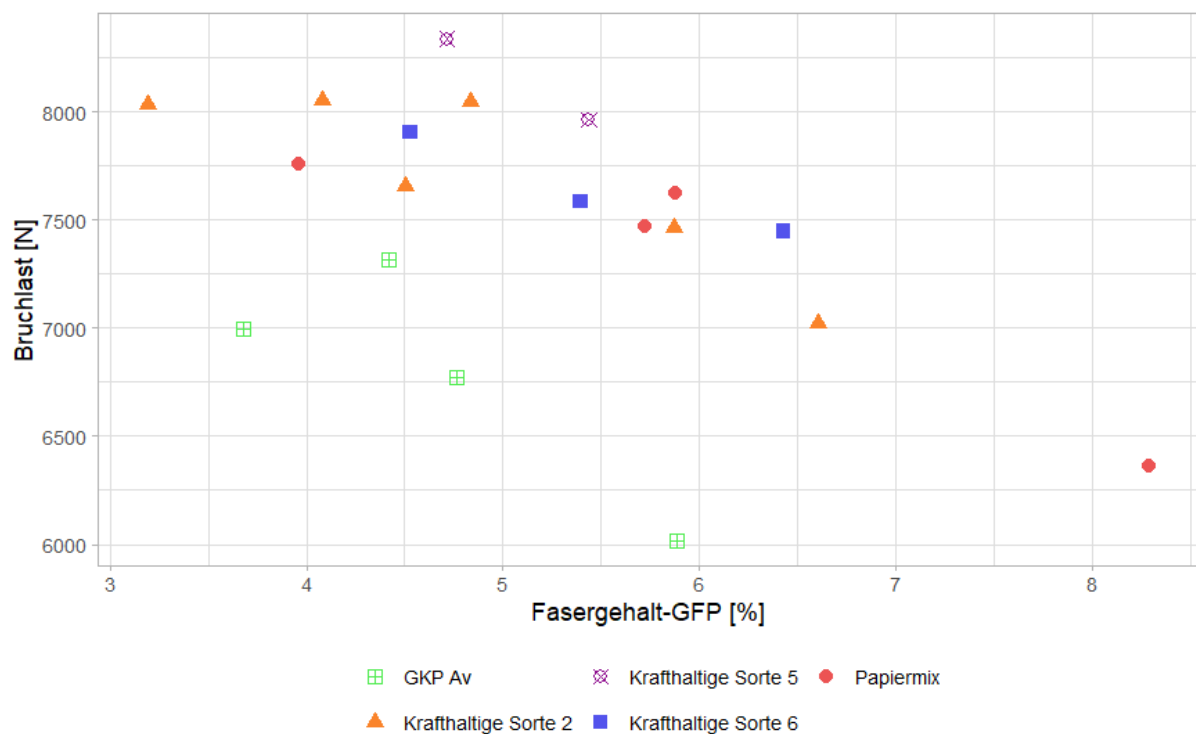


Abbildung H 1: Darstellung des isolierten Einflusses des Fasergehaltes auf die Bruchlast von GFP anhand von Kraftpapieren (Krafthaltige Sorte 2, Krafthaltige Sorte 5, Krafthaltige Sorte 6, GKP-Karton und Papiermix) (eigene Darstellung)

³²⁴ [Coutts, 1984].

³²⁵ [Coutts, 1984], S. 142.

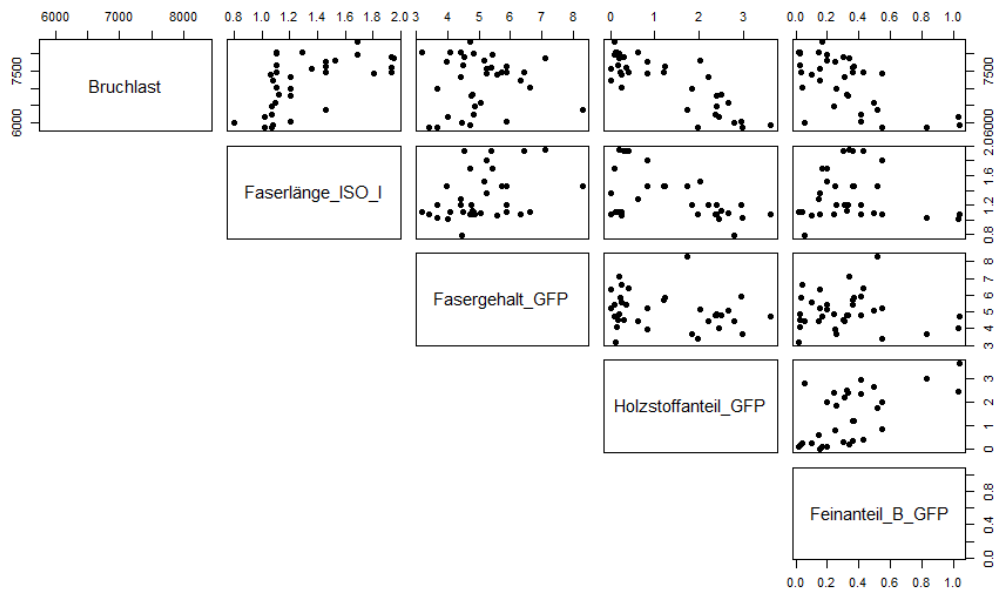


Abbildung H 2: Lineare Beziehungen zwischen abhängiger Variable und unabhängigen Variablen Regressoren im Regressionsmodell (eigene Darstellung)

Zur Validierung und Auswahl der unabhängigen Variablen für die Vorhersage der Bruchlast wurde ergänzend zu den theoretischen Überlegungen (vgl. Kapitel 7.2) ein automatisierter, iterativer Regressionsprozess in R-Studio durchgeführt (Abbildung H 3). In diesem Auswahlverfahren wurden systematisch alle möglichen Kombinationen der unabhängigen Variablen getestet. Eine Berücksichtigung fand nur statt, wenn zwei Kriterien erfüllt waren:

- Alle Prädiktoren mussten statistisch signifikant sein ($p < 0,05$)
- keine problematische Multikollinearität ($VIF^{326} < 5$)

Modelle, die gegen eines dieser Gütekriterien verstießen, wurden ausgeschlossen. Dies dient der Minimierung von Verzerrungen und verhindert geschätzte Koeffizienten mit hoher Unsicherheit. Die fünf Modelle mit dem höchsten bereinigten Bestimmtheitsmaßes sind in Tabelle H 1 dargestellt. Dieser objektive Auswahlprozess stellt sicher, dass die endgültigen Modelle sowohl theoretisch fundiert als auch statistisch robust sind.

Tabelle H 1: Modelle mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß zur Vorhersage der Bruchlast unter der Bedingung des höchsten Bestimmtheitsmaßes und keiner Multikollinearität ($VIF < 5$)

	Model #1	Model #2	Model #3	Model #4	Model #5
UV ¹ 1	Mahlgrad	Faserlänge_ISO_I	Faserlänge_ISO_I	Mahlgrad	Mahlgrad
UV 2	Faserlänge_ISO_I	Fasergehalt_GFP	Holzstoffanteil_GFP	Faserlänge_ISO_I	Ascheanteil_GFP
UV 3	Feinanteil_A_GFP	Holzstoffanteil_GFP	Feinanteil_B_GFP	Feinanteil_B_GFP	Feinanteil_A_GFP
UV 4	-	Feinanteil_B_GFP	Feinanteil_GFP	Feinanteil_GFP	
R ²	0,828	0,826	0,826	0,825	0,825

¹mit UV = Unabhängige Variable

³²⁶ Variance Inflation Factor

```

456 # erforderliche Pakete laden
457 library(car) # Für VIF (Variance Inflation Factor)
458 library(tidyverse) # Für Datenverarbeitung und Modellierung
459
460 # Daten laden (ersetze den Pfad mit deinem eigenen)
461 data <- read_xlsx("C:/users/Wojtek/Desktop/Promotion/R-Studio/Armierungswirkung/Armierungswirkung_data_neu.xlsx", na="NA", sheet = "data")
462
463 # unabhängige und abhängige Variablen definieren
464 abhängige_var <- "Bruchlast" # Setze deine abhängige Variable
465
466 # Liste der unabhängigen Variablen (ohne die abhängige Variable)
467 unabhängige_vars <- c("Mahlgrad", "Ascheanteil_GFP", "Holzstoffanteil_GFP", "Fasergehalt_GFP",
468 "Faserlänge_ISO_1", "Faserdicke", "Faserfeinheit", "Faserkrümmung",
469 "Feinanteil_A_GFP", "Feinanteil_B_GFP", "Feinanteil_GFP")
470
471 # Funktion, um Modelle zu bewerten
472 evaluate_model <- function(formula, data) {
473   model <- lm(formula, data = data)
474
475   # Berechne den VIF-Wert für Multikollinearität
476   vif_values <- vif(model)
477   if (any(vif_values > 5)) { # Multikollinearität prüfen
478     return(NULL) # Wenn VIF-Werte zu hoch sind, verwirfe das Modell
479   }
480
481   # Prüfe die Signifikanz der unabhängigen Variablen (p-Werte < 0.05)
482   p_values <- summary(model)$coefficients[, 4]
483   if (any(p_values[-1] > 0.05)) { # Den Intercept auslassen ([-1])
484     return(NULL) # Verwerfe das Modell, wenn eine Variable nicht signifikant ist
485   }
486
487   # Modellgüte berechnen
488   r_squared <- summary(model)$r.squared
489   adj_r_squared <- summary(model)$adj.r.squared
490
491   return(list(model = model, r_squared = r_squared, adj_r_squared = adj_r_squared))
492 }
493
494 # Modelle für alle möglichen Kombinationen der unabhängigen Variablen
495 results <- list()
496 for (i in 2:length(unabhängige_vars)) { # Beginne bei 2 Variablen bis zur maximalen Anzahl
497   combs <- combn(unabhängige_vars, i, simplify = FALSE)
498
499   for (combo in combs) {
500     formula <- as.formula(paste(abhängige_var, "~", paste(combo, collapse = " + ")))
501     result <- evaluate_model(formula, data)
502
503     if (!is.null(result)) {
504       results <- append(results, list(result))
505     }
506   }
507 }
508
509 # Überprüfen, ob es gültige Modelle gibt
510 if (length(results) > 0) {
511   # Sortiere die Modelle nach Adjusted R² und wähle die besten 5
512   top_results <- head(results[order(sapply(results, function(x) x$adj_r_squared), decreasing = TRUE)], 5)
513
514   # Zeige die fünf besten Modelle
515   for (i in 1:length(top_results)) {
516     cat("\n\nBestes Modell Nr.", i, ":\n")
517     print(summary(top_results[[i]]$model))
518   }
519 } else {
520   print("Kein Modell erfüllt die Anforderungen (Multikollinearität und Signifikanz).")
521 }

```

Abbildung H 3: R-Code zur Ausgabe von fünf Regressionsmodellen unter den Bedingungen des höchsten Bestimmtheitsmaßes und keiner Multikollinearität ($VIF < 5$) (eigene Darstellung)

I. Probenvorbereitung zur Charakterisierung von Gips-Faser-Gemischen

Für die Charakterisierung der Gips-Faser-Gemische in Kapitel 8 wurden die Proben bei der Beschickung des Reaktors entnommen (vgl. Abbildung 19). In Abbildung I 1 (links) ist beispielhaft eine unbehandelte Probe dargestellt. Für die Untersuchung der Korngrößenverteilung sowie der Kristallmorphologie mittels Lasergranulometrie bzw. REM wurden die Proben bei einem Siebschnitt von 1 mm gesiebt. Die REM-Aufnahme (Abbildung I 1, rechts) demonstriert, dass trotz Siebung eine signifikante Anzahl an Fasern erhalten blieb.

Die Faserstoffe der Produktionsabfälle wurden mit dem Valmet Fibre Image Analyzer (Valmet FS5) analysiert. Die Analyse erfolgte direkt an den Gips-Faser-Gemischen. Eine vollständige Abtrennung der Fasern aus dem Gipsmatrixmaterial war nicht möglich. Daher konnte eine differenzierte Bestimmung von Asche-, Faser- und Holzstoffgehalten sowie eine Einschätzung des Mahlgrades mittels klassischer Verfahren wie dem Paper-Bale-Sensor oder dem Shopper-Riegler-Verfahren für diese Proben nicht durchgeführt werden.

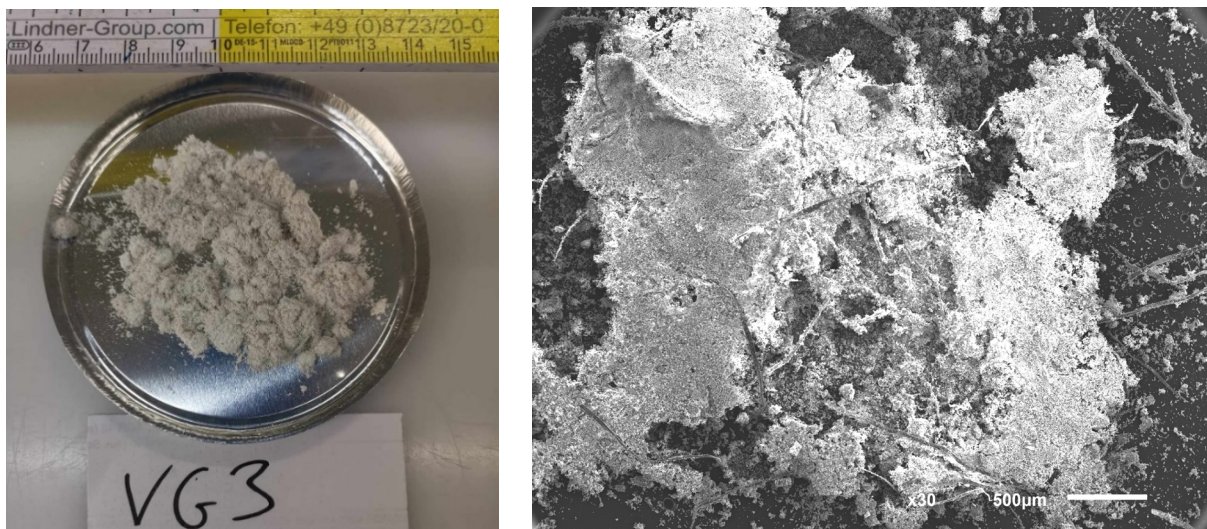


Abbildung I 1: Unbehandelte Probe (VG3) einer Gipsfaserplatte aus dem Reaktor „Bei Beschickung“ (links) und nach Siebung bei Siebschnitt von 1mm bei 30x-facher Vergrößerung (eigene Aufnahmen)

J. Charakterisierung aufbereiteter GKP, Produktionsabfälle aus der GFP-Herstellung sowie von Stuckgips

Die Korngrößenverteilung der aufbereiteten GKP und Produktionsabfällen aus der GFP-Herstellung vor der Nasskalzinierung wurde mittels Lasergranulometrie bestimmt, während die Kristallmorphologie durch Rasterelektronenmikroskopie (REM) erfasst wurde. Die Ergebnisse der Korngrößenverteilung sind in Tabelle J 1 aufgelistet bzw. in Abbildung J 1 und Abbildung J 2 visualisiert.

Tabelle J 1: Korngrößen aufbereiteter GKP und GFP sowie von Schleifstaub, Gipsschlamm vor der Nasskalzinierung sowie von Stuckgips

Probe	Bezeichnung	X_{10}^1 [µm]	X_{50}^2 [µm]	X_{90}^3	X_m^4 [µm]	X_{mod}^5
GS1	Gipsschlamm	2,28	8,99	35,98	15,80	10,29
S1	Schleifstaub Werk 1	2,15	15,84	121,30	55,75	17,20
S2	Schleifstaub Werk 2	1,49	7,1	39,87	-	6
GFP2	GFP Werk 2	1,87	8,48	127,00	74,08	4,44
SL1	GKP Typ A	2,23	45,49	448,1	195,9	153,38
SH1	GKP Typ A	2,15	31,95	879,6	222,7	4,44
SH2	GKP Typ H2	1,85	12,90	456,9	130,2	4,88
SH3	GKP Typ DF	1,81	14,69	282,2	112,0	4,88
SG1	Stuckgips	16,13	59,43	112,8	63,37	72,94

¹ Partikelgröße bei 10 % Durchgang

² Partikelgröße bei 50 % Durchgang

³ Partikelgröße bei 90 % Durchgang

⁴ mittlere Partikelgröße berechnet als gewogenes arithmetisches Mittel

⁵ Partikelgröße, die am häufigsten vorhanden ist

Die Visualisierung der Korngrößenverteilung muss in zwei unterschiedlichen Grafiken dargestellt werden, da die beiden verwendeten Lasergranulometriegeräte eine unterschiedliche Anzahl an Größenklassen liefern. Das Gerät Coulter LS 13320XR liefert mit 116 Größenklassen eine wesentlich feinere Auflösung und detailliertere Partikelgrößenverteilung als das Coulter LS230. Die faserfreien Proben Stuckgips (SG1) und Gipsschlamm (GP1) zeigen jeweils eine unimodale Partikelgrößenverteilung mit Maxima bei etwa 73 µm bzw. 10 µm, wobei der Gipsschlamm eine größere Bandbreite aufweist. Die GKP- und GFP-Proben besitzen hingegen eine bimodale Verteilung: Ein Peak bei etwa 5 µm repräsentiert die Einzelkristallgröße, ein zweiter, verbreiteter Peak zwischen 50 und 150 µm wird Agglomeraten, mineralischen Fremdpartikeln und Fasern zugeschrieben. Schleifstäube zeigen eine geglättete bimodale Verteilung mit schwach ausgeprägten Peaks bei etwa 17 µm und 50 µm, was auf eine vergleichsweise gleichmäßige Partikelverteilung hinweist. In Proben mit hohem Faseranteil (GKP, GFP, Schleifstaub) tritt zudem ein drittes Maximum bei etwa 1000 µm am Siebschnitt auf, das den Siebschnitt der Siebung zurückzuführen ist.

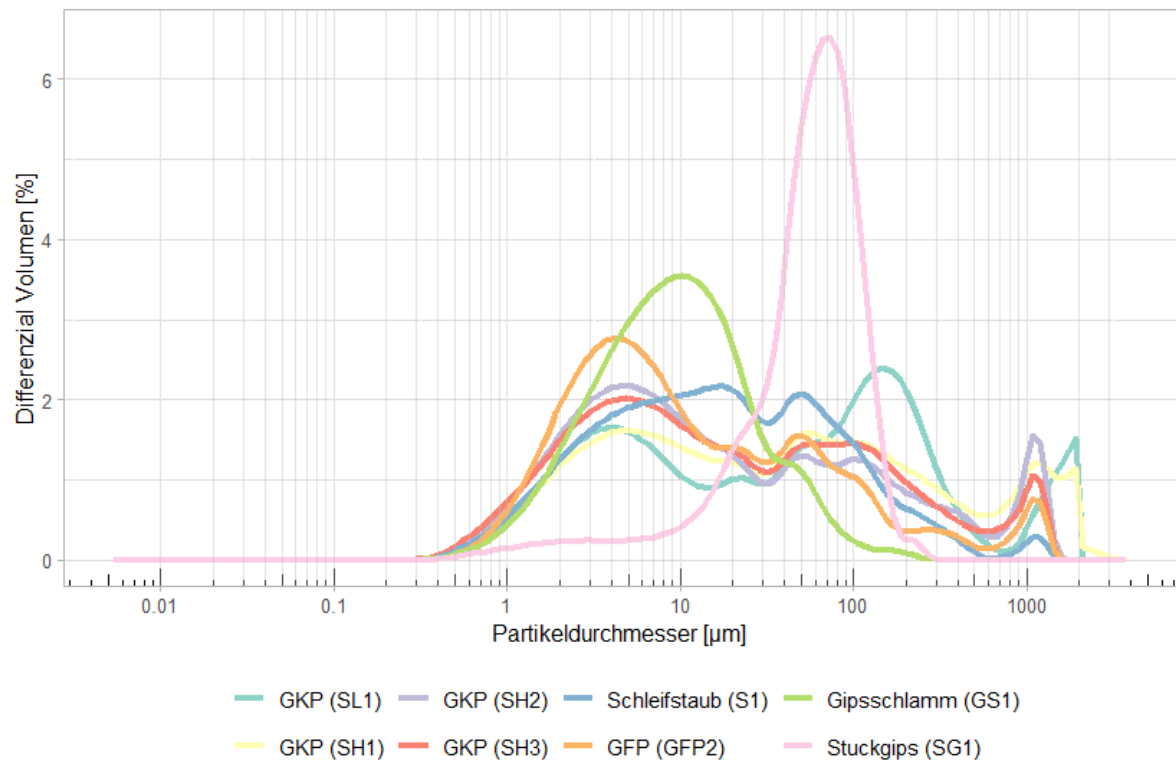


Abbildung J 1: REM-Bilder von aufbereiteten GKP (SL1; a) und GFP (GFP2; b) sowie Gipsschlamm, (GS1; c), Schleifstaub Werk 1 (S1; d)

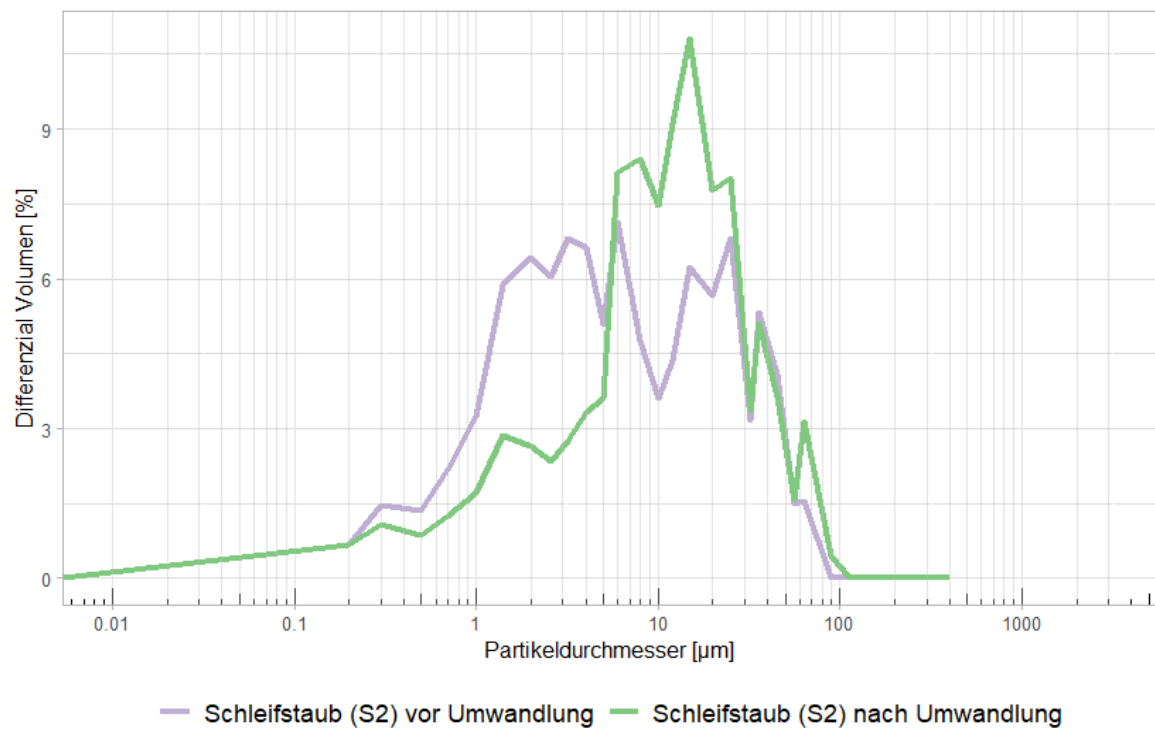


Abbildung J 2: Korngrößenverteilung vor und nach der Umwandlung von Schleifstaub (S2) mit Coulter LS230 in der Nassskalzinierung

Die Abbildung J 3 zeigt die Kristallmorphologie von aufbereiteten GKP und GFP sowie von Schleifstaub aus dem Werk 1 und Gipsschlamm. Die nadelige Kristallmorphologie von GKP bleibt auch nach dem Aufbereitungsprozess erhalten (Abbildung J 3, a). Gipsschlamm ist durch gut ausgeprägte nadelig bis tafelige Kristalle mit einem L/D von 3 bis 4 ohne Feinanteil gekennzeichnet (Abbildung J 3, c). Die mechanische Beanspruchung von GFP und Schleifstaub durch Zerkleinern (Abbildung J 3, b) bzw. Schleifen (Abbildung J 3, d) führt zu einem reduzierten L/D-Verhältnis von 1 und 3 und einer Zunahme des Feinanteils. Die feinsten Partikel bilden Partikelhaufen oder haften an der Oberfläche größerer Partikel. Der Schleifstaub weist hingegen eine abweichende Kristallstruktur auf. Er besteht aus Bruchstücken, deren Kristallmorphologie nicht eindeutig definierbar ist (Abbildung J 3, d).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kristallgrößenverteilungen von aufbereiteten GKP, und GFP sowie von Schleifstaub und Gipsschlamm nach der mechanischen Beanspruchung in einer engen Bandbreite liegen.

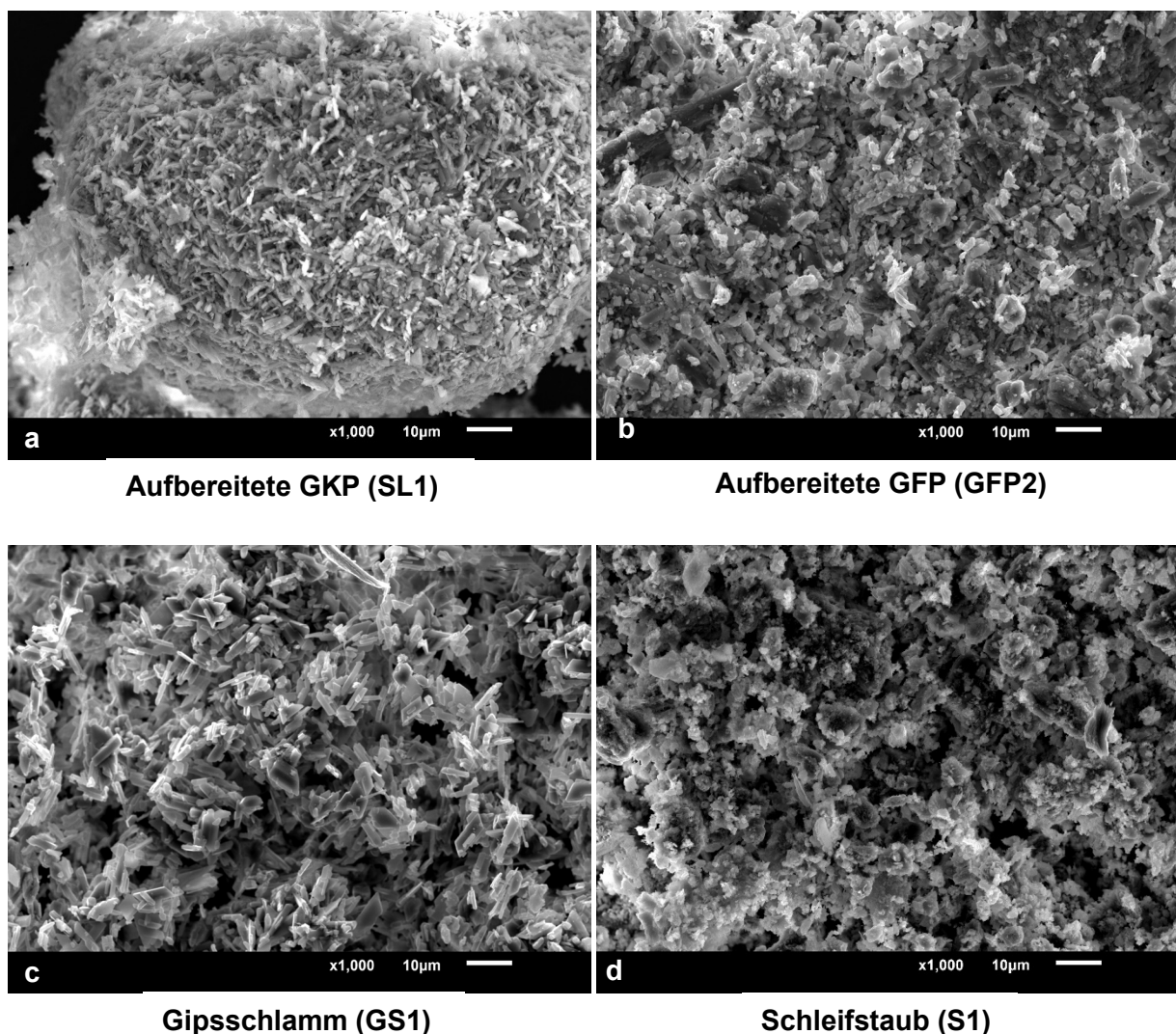


Abbildung J 3: REM- Aufnahmen von aufbereiteten GKP (SL1, a) und GFP (GFP2, b) sowie Gipsschlamm (GS1, c) und Schleifstaub aus Werk 1 (S1, d)

K. Phasenzusammensetzung der α -HH-Suspensionen

Tabelle K 1 zeigt die Phasenzusammensetzung von α -HH-Suspensionen aus verschiedenen gipshaltigen Bauabfällen sowie des Abfallmixes und Stuckgipses. Die untersuchten Proben wurden zweifach mittels eines Siebschnitts von < 1 mm gesiebt. Dabei wurden das Gips-Faser-Gemisch mit einem Pinsel vorsichtig über das Sieb gestrichen, um Faserstrukturen aufzuwickeln und als Siebrückstand zu separieren. Beim herkömmlichen Sieben passieren Fasern aufgrund ihrer länglichen Form unbeabsichtigt die Sieböffnungen. Um Analyse mittels Lasergranulometrie durchführen zu können ist es essentiell, dass die Proben möglichst frei von Fasern sind.

Tabelle K 1: Phasenzusammensetzung von α -HH-Suspensionen aus gipshaltigen Bauabfällen, Abfallgemischen und Stuckgips gemessen mittels RBA

Nr.	Bezeichnung	Anhydrit [M.-%]	DH [M.-%]	HH [M.-%]	Dolomit [M.-%]	Quarz [M.-%]	Calcit [M.-%]	amorph [M.-%]
VG1	α -HH Gipsschlamm (GS1)	$<< 1$	$<< 1$	97,2	< 1	n.b.	1,2	n.b.
VG2	α -HH Schleifstaub Werk 1 (S1)	5,4	< 1	86,1	n.b.	n.b.	1,4	7
VG4	α -HH GFP (GFP2)	2,9	$<< 1$	93	n.b.	n.b.	1	< 5
VG5	α -HH GKP (SL1)	$<< 1$	1	93	n.b.	n.b.	1,3	< 5
VG6	α -HH GKP (SH1)	2,6	< 1	71	15,4	1,5	1,4	8
VG7	α -HH GKP (SH2)	7,1	< 1	62,8	11,3	1,5	< 1	< 5
VG8	α -HH GKP (SH3)	5,5	< 1	69,3	13,6	1,7	1,1	8
VG9	α -HH Abfallmix (AM1)	2,1	$<< 1$	90,5	n.b.	n.b.	1,4	6
	Stuckgips (β -HH)	3,1	n.b.	91,7	n.b.	n.b.	1,9	< 5

Die hier erfassten Gehalte an röntgenamorphen Anteilen sind methodenbedingt mit größeren Unsicherheiten behaftet. Eine intensive Übersicht hierzu ist in Westphal (2007) gegeben. Danach nehmen Fehler $> \pm 1$ M.-% bei der Bestimmung bereits ab Gehalten von weniger als 30 M.-% röntgenamorphen Anteile deutlich zu, unterhalb 10 M.-% sind keine gesicherten Aussagen sinnvoll. Aus diesem Grund werden hier Gehalte < 5 M.-% nicht mehr angegeben.

L. Messunsicherheit bei der Charakterisierung von Fasereigenschaften in Gips-Faser-Gemischen

Die Analyse der Fasereigenschaften von gipsgebundenen Materialien mittels bildanalytischer Verfahren (Valmet Image Analyzer) ist mit einer systematischen Messunsicherheit verbunden, die auf die optische Beeinflussung durch im Material enthaltene Gipspartikel zurückzuführen ist. Aufgrund ihrer Größe und Plastizität werden diese Partikel teilweise als kurze Fasern interpretiert, was zu einer unterschätzten Faserlänge und -dicke sowie zu überschätzten Feinanteilen führt.

Ein Vergleich zwischen der Referenzprobe „Test“ (reine Kartonummantelung, GKP Bauplatte Typ A, bestehend aus 50 % Vorder- und 50 % Rückseitenkarton) und der Probe „SL1“ (GKP Bauplatte Typ A), die ein Gips-Faser-Gemisch enthält, verdeutlicht die Auswirkungen dieser Beeinflussung. Die mittlere Faserlänge nimmt gegenüber der Referenzprobe um ca. 15 % ab, die Faserdicke verringert sich um ca. 8 %. Im Gegensatz dazu steigen die Feinanteile A und B signifikant um rund 30 % bzw. 43 %, während sich der Feinanteil um etwa 3 Prozentpunkte erhöht (vgl. Tabelle L 1).

Die ermittelten Werte der Fasereigenschaften bei Gips-Faser-Gemischen sind somit als Näherungsgrößen zu interpretieren, welche Aufschluss über die Faserstruktur und die relative Belastung durch vorhergehende Prozessschritte geben. Für eine weitergehende und präzise Charakterisierung der Fasereigenschaften ist daher die Entwicklung und Etablierung einer geeigneten Methodik erforderlich, die eine vollständige chemische oder physikalische Trennung von Gips und Fasermaterial ermöglicht.

Tabelle L 1: Vergleich der Fasereigenschaften zwischen Referenzkarton (Test) und Gips-Faser-Gemisch (SL1)

Probe	Bezeichnung	Faser- länge_ISO_I [mm]	Faser- dicke [µm]	Fein- anteil_A [%]	Fein- anteil_B [%]	Fein- anteil [%]
Test	GKP Typ A 50Av/50Ah	1,14	24,40	35,08	7,51	87,85
SL1	GKP Typ A	1,04	22,20	50,02	13,19	91,11
Abweichung „SL1“ zu „Test“		-15 %	-8 %	+ 30 %	+43 %	+ 3 %

M. Gips- und Fasereigenschaften von Doppelbodenplatten mit Sekundärrohstoffen

Tabelle M 1: Zusammensetzung, Fasereigenschaften und Festigkeit von Gipsfaserplatten mit jeweils 50 M.-% Anteil an gipshaltigen Abfällen (bezogen auf die Gipsmenge)

Nr.	α -HH- Suspension	β -HH	Anteil α -HH / β -HH	Faserstoff Altpapier	¹ Anteil PGH _{Alt} / PGH _{RC} [M.-%]	² Anteil FGH _{Alt} / FGH _{RC} [M.-%]	Feststoff- gehalt [%]	Roh- dichte [kg/m ³]	Faser- gehalt _GFP [M.-%]	Faser- länge_ISO _I [mm]	Holzstoff- anteil_ _GFP [%]	Feinanteil _B_GFP [%]	Bruchlast berechnet [N]	Bruchlast beobachtet [N]
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VG1	Gipsschlamm (GS1)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 2	89 / 11	86 / 14	38,35	1597	5,32	1,03	0,18	0,080	7446	9916
VG2	Schleifstaub Werk 1 (S1)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 2	48 / 52	42 / 58	38,30	1579	6,31	0,70	0,10	0,026	7034	7639
VG3	Schleifstaub Werk 2 (S2)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 2	62 / 38	57 / 43	36,91	1620	5,46	0,84	0,12	0,028	7303	8836
VG4	GFP (GFP2)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 2	60 / 40	55 / 45	40,26	1638	5,46	1,05	0,11	0,042	7549	9257
VG5	GKP Typ A (SL1)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 2	76 / 25	74 / 26	41,96	1553	5,79	1,11	0,90	0,128	7163	8795
VG6	GKP Typ A (SH1)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 2	74 / 27	77 / 23	41,06	1543	5,29	1,11	0,77	0,110	7303	8938
VG7	GKP Typ H (SH2)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 2	77 / 23	75 / 25	41,86	1541	6,04	1,10	0,96	0,152	7112	9061
VG8	GKP Typ DF (SH3)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 2	81 / 19	79 / 21	41,52	1569	6,04	1,11	0,81	0,116	7164	8919
VG9	Abfallmix (AM1)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 2	65 / 35	60 / 40	40,53	1573	5,57	1,02	0,68	0,104	7200	8447
VG10	GKP Typ A (SL1)	Stuck gips	50 / 50	GKP Typ A	71 / 29	71 / 29	39,81	1602	5,57	1,14	2,65	0,371	6446	7636
VG11	Gipsschlamm (GS1)	Stuck gips	50 / 50	GKP Typ A	87 / 13	87 / 13	38,50	1620	4,98	1,07	2,13	0,346	6631	7639
VG12	GKP Typ A (SL1)	Stuck gips	50 / 50	Krafthaltige Sorte 8	70 / 30	72 / 28	41,19	1574	6,25	1,73	0,94	0,319	7550	10772

¹ Faserstoffgehalt in der GFP nach Anteilen des Altpapiers (PGH_{Alt}) und des Faserstoffs aus dem jeweiligen gipshaltigen Abfall (PGH_{RC})

² Fasergehalt in der GFP nach Anteilen des Altpapiers (FGH_{Alt}) und des Faserstoffes aus dem jeweiligen gipshaltigen Abfall (FGH_{RC})

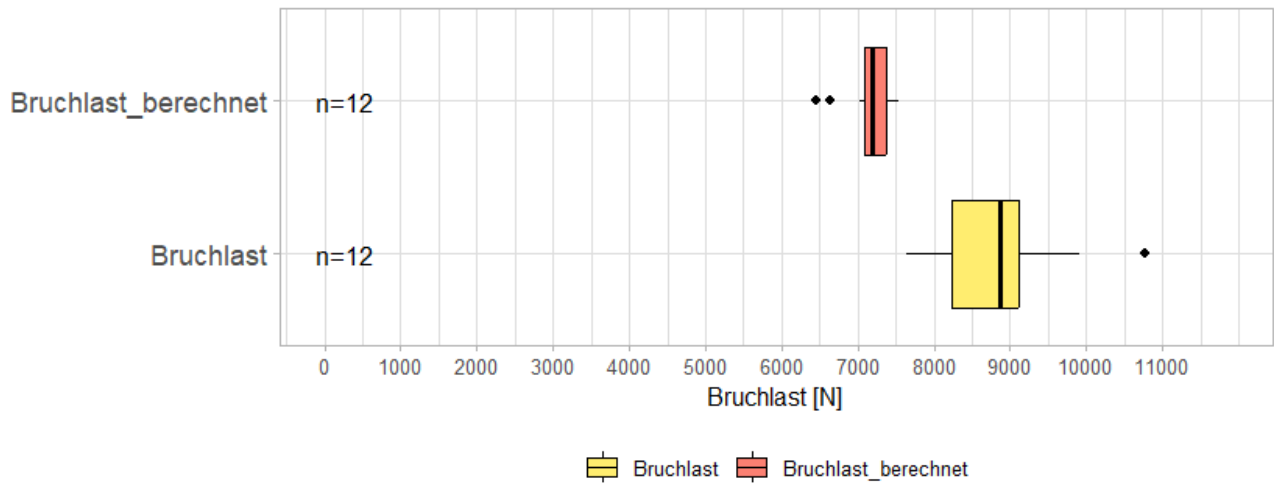


Abbildung M 1: Vergleich zwischen gemessener Bruchlast und der mit dem entwickelten Regressionsmodell berechneter Bruchlast für Doppelbodenplatten mit Anteilen von 50 M.-% gipshaltigen Bauabfällen

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der stofflichen Verwertung gipshaltiger Bauabfälle zur Herstellung von Gipsfaserplatten (GFP) vor dem Hintergrund einer künftig zunehmenden Ressourcenknappheit im Gipssektor. In Deutschland werden jährlich rund 10 Mio. t Gips verbraucht, die derzeit jeweils zur Hälfte aus Naturgips und Rauchgasentschwefelungsgips (REA-Gips) stammen. Mit dem geplanten Kohleausstieg bis 2038 ist jedoch ein deutlicher Rückgang der REA-Gips-Verfügbarkeit zu erwarten, wodurch die Bedeutung von Recyclingstrategien erheblich zunimmt. Obwohl Gips grundsätzlich mehrfach recycelbar ist, werden bislang nur etwa 13 % der jährlich anfallenden rund 700.000 Mg gipshaltiger Bauabfälle stofflich verwertet. Das bestehende Recycling konzentriert sich überwiegend auf sortenreine, nicht imprägnierte Gipskartonplatten (GKP, Typ A), während imprägnierte GKP (Typ H) oder faserreiche Gipsprodukte wie Gipsfaserplatten (GFP) aufgrund ihrer Materialzusammensetzung mit den aktuellen Recyclingmethoden nicht oder nur in geringen Anteilen verwertet werden können.

Ziel der Arbeit ist es, die Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften heterogener gipshaltiger Bauabfälle, relevanten Prozessparametern und der mechanischen Leistungsfähigkeit von Gipsfaserplatten systematisch zu untersuchen. Im Fokus steht die Bewertung der Eignung verschiedener gipshaltiger Bauabfälle, insbesondere unterschiedlicher GKP-Typen (A, H, DF) sowie Produktionsabfälle aus der GFP-Herstellung (Ausschussplatten, Schleifstäube, Gipsschlämme), für die Herstellung von Doppelbodenplatten nach DIN EN 12825.

In einem dreistufigen experimentell-modellbasiertem Ansatz wurden die Einflüsse der Gips- und Fasereigenschaften der genannten gipshaltigen Bauabfälle auf die Produktionsprozesse sowie die Festigkeit von Doppelbodenplatten untersucht. Zunächst wurden Modellplatten aus reinem Stuckgips mit variierenden Faserstoffen hergestellt. Mittels multivariater Regressionsanalyse wurde die Armierungswirkung von Faserstoffeigenschaften auf die Bruchlast von Doppelbodenplatten analysiert. Dabei konnte der Holzstoffanteil als dominierender Einflussfaktor auf die Bruchlast identifiziert werden, gefolgt von Faserlänge, Feinanteil und Fasergehalt. Diese Parameter erklären gemeinsam etwa 83 % der beobachteten Varianz. Während längere Fasern die Festigkeit erhöhen, wirken sich hohe Holzstoff- und Feinanteile sowie steigende Fasergehalte negativ auf die Produktfestigkeit aus.

Im zweiten Schritt wurden die gipshaltigen Bauabfälle nasskalziniert, zu α -Halbhydrat-Suspensionen aufbereitet und im Verhältnis 1:1 mit Stuckgips sowie einem krafthaltigen Altpapier zu Doppelbodenplatten verarbeitet. Platten mit einem Sekundärrohstoffanteil von 50 M.-% erreichen Bruchlasten von 7,7 bis 10,7 kN und erfüllen

damit die Anforderungen der Elementklassen 2 bis 4 nach DIN EN 12825. Sie übertreffen somit die Festigkeiten von Referenzplatten aus reinem Stuckgips deutlich. Mineralische Nebenbestandteile und hydrophobe Additive zeigen innerhalb der untersuchten Bandbreite keinen signifikanten Einfluss auf die Produktfestigkeit, beeinflussen jedoch die Prozessführung. Höhere Anteile an mineralischen Nebenbestandteilen führen zu verlängerten Umwandlungszeiten sowie erhöhten Presszeiten. Materialien mit erhöhten Kurzfasernanteilen, wie sie beispielsweise bei Schleifstäuben auftreten, reduzieren hingegen die Festigkeit der Doppelbodenplatten.

Im dritten Schritt wurde das entwickelte Regressionsmodell auf Systeme mit α -Halbhydrat angewandt. Dabei konnte gezeigt werden, dass α -Halbhydrat-Suspensionen die Gipseigenschaften signifikant verbessern und bei einem Substitutionsanteil von 50 M.-% zu einer Erhöhung der Bruchlast um 1 bis 2 kN (16–23 %) führen. Es zeigt sich, dass die Festigkeitsentwicklung maßgeblich durch die Wechselwirkungen zwischen Gipsmatrix und Faserqualität bestimmt wird. Insbesondere bei hochwertigen Fasern treten synergistische Effekte auf, die zu einer deutlichen Festigkeitssteigerung der Doppelbodenplatten führen und das festigkeitssteigernde Potenzial des α -Halbhydrats weitgehend ausschöpfen. Bei minderwertigen Fasern hingegen bleibt dieses Potenzial weitgehend ungenutzt, sodass die Festigkeitssteigerung deutlich geringer ausfällt.

Insgesamt belegt die Arbeit, dass die Bruchlast von Gipsfaserplatten aus komplexen, teilweise nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen Faser- und Gipseigenschaften resultiert. Eine rein modellbasierte Vorhersage ist mit dem entwickelten Modell lediglich für Doppelbodenplatten auf Basis von 100 % Stuckgips zuverlässig möglich. Für Doppelbodenplatten mit einem Anteil von 50 % gipshaltiger Sekundärrohstoffe ist aufgrund der genannten Einflussfaktoren keine belastbare Vorhersage der Bruchlast möglich, sodass eine Anpassung der Modellparameter erforderlich ist. Gleichzeitig wird gezeigt, dass auch bislang wenig genutzte Bauabfallfraktionen, einschließlich imprägnierter GKP und faserreicher GFP-Abfälle, erfolgreich zur Herstellung hochwertiger Gipsfaserplatten eingesetzt werden können.

Die Ergebnisse liefern eine fundierte Grundlage für die Entwicklung neuer Recyclingstrategien, die Optimierung industrieller Prozesse sowie die gezielte Steuerung von Produktqualitäten. Damit leistet die Arbeit einen wesentlichen Beitrag zur Etablierung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft im Gipssektor und zur Reduzierung des Einsatzes primärer Rohstoffe.

Abstract

This dissertation investigates the material recycling of gypsum-containing construction waste for the production of gypsum fiberboards (GFB) against the backdrop of increasing resource scarcity in the gypsum sector. In Germany, approximately 10 million tonnes of gypsum are used annually, currently sourced in roughly equal parts from natural gypsum and flue gas desulfurization gypsum (FGD gypsum). With the planned Coal Phase-Out by 2038, a significant decline in FGD gypsum availability is expected, thereby increasing the importance of recycling strategies. Although gypsum is inherently recyclable multiple times, only about 13 % of the approximately 700,000 Mg of gypsum-containing construction waste generated annually is currently recycled. Existing recycling processes primarily focus on pure, non-impregnated gypsum plasterboards (GPB, Type A), while or impregnated GPB (type H) and fiber-rich gypsum products such as gypsum fiberboards (GFB) are hardly recycled due to their material composition.

The aim of this work is to systematically investigate the relationships between material properties of heterogeneous gypsum-containing construction waste, relevant process parameters, and the mechanical performance of gypsum fiberboards. The focus lies on evaluating the suitability of various waste fractions, particularly different GPB types (A, H, DF) and production residues from GFB manufacturing (reject boards, sanding dusts, gypsum slurries), for the production of raised floor panels in accordance with DIN EN 12825.

A three-stage experimental and model-based approach was applied to analyze the influence of gypsum and fiber properties on processing behavior and mechanical strength. In the first step, model boards based on pure stucco gypsum with varying fiber materials were produced. A multivariate regression analysis was used to evaluate the reinforcing effect of fiber properties on bending strength. The lignin content was identified as the dominant influencing factor, followed by fiber length, fines content, and fiber content. Together, these parameters explain approximately 83% of the observed variance. While longer fibers increase strength, higher lignin and fines contents as well as increasing fiber content have a negative effect on mechanical performance.

In the second step, gypsum-containing construction wastes were wet-calcined, processed into α -hemihydrate suspensions, and combined in a 1:1 ratio with stucco gypsum and a high-strength recycled paper to produce raised floor panels. Panels containing 50 wt.% secondary raw materials achieved breaking loads of 7.7 to 10.7 kN, meeting the requirements of classes 2 to 4 according to DIN EN 12825. These values significantly exceed those of reference panels made from 100 wt.% stucco gypsum. Mineral impurities and hydrophobic additives showed no significant influence on mechanical strength within the investigated range but affected

processing conditions. Higher amounts of mineral impurities led to prolonged conversion and pressing times. Materials with increased short fiber content, such as grinding dusts, resulted in reduced panel strength.

In the third step, the developed regression model was applied to systems containing α -hemihydrate. The results demonstrate that α -hemihydrate suspensions significantly improve gypsum properties and increase breaking load by 1 to 2 kN (16–23%) at a substitution rate of 50 wt.%. The strength development is strongly governed by interactions between the gypsum matrix and fiber quality. In particular, high-quality fibers exhibit synergistic effects, leading to a substantial increase in panel strength and enabling the full utilization of the strengthening potential of α -hemihydrate. In contrast, this potential remains largely unused when low-quality fibers are applied, resulting in significantly lower strength improvements.

Overall, the study shows that the mechanical performance of gypsum fiberboards results from complex and partly nonlinear interactions between fiber and gypsum properties. A purely model-based prediction of breaking load is only reliable for boards made from 100% stucco gypsum. For boards containing 50% recycled gypsum, accurate prediction is not feasible without adapting the model parameters due to the increased material heterogeneity. At the same time, the study demonstrates that previously underutilized waste fractions, including impregnated GPB and fiber-rich GFB waste, can be successfully used to produce high-performance gypsum fiberboards.

The findings provide a solid basis for the development of new recycling strategies, optimization of industrial processes, and targeted control of product quality. Thus, this work contributes significantly to establishing a resource-efficient circular economy in the gypsum sector and reducing the use of primary raw materials.