

BBSR-
Online-Publikation
29/2023

Recycling von Mineralwolle, die im Schmelzwannenverfahren hergestellt wurde

von

Tanja Broszies
Dr. Andrea Paul
Zoe Liestmann
Falk Schaudienst
Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt

Recycling von Mineralwolle, die im Schmelzwannenverfahren hergestellt wurde

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.23

Projektlaufzeit: 01.2021 bis 04.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Daniel Wöffen
daniel.woeffen@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität Berlin
Prof. Frank U. Vogdt (Projektleitung)
bauphysik@tu-berlin.de

Tanja Broszies
tanja.broszies@tu-berlin.de

Falk Schaudienst
falk.schaudienst@tu-berlin.de

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
Dr. Andrea Paul
andrea.paul@bam.de

Zoe Liestmann
zoe.liestmann@bam.de

Redaktion

Technische Universität Berlin
Tanja Broszies

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
Dr. Andrea Paul

Stand

April 2023

Gestaltung

Technische Universität Berlin
Tanja Broszies

Bildnachweis

Titelbild: Tanja Broszies

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Broszies, Tanja; Paul, Andrea; Liestmann, Zoe; Schaudienst, Falk; Vogdt, Frank U., 2023: Recycling von Mineralwolle, die im Schmelzwannenverfahren hergestellt wurde. BBSR-Online-Publikation 29/2023, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	6
1. Einführung	7
2. Grundlagen zu Mineralwollämmstoffen	8
2.1 Übersicht über den deutschen und europäischen Mineralwollmarkt	8
2.2 Eigenschaften von Mineralwolle	10
2.2.1 Einordnung und chemische Zusammensetzung	11
2.2.2 Gesundheitliche Aspekte	12
2.3 Herstellprozess für Mineralwolle im Schmelzwannenverfahren	15
2.3.1 Rohstofflager und Gemenge	15
2.3.2 Schmelzwanne	18
2.3.3 Zerkleinerung	18
2.3.4 Binde- und Schmelzmittel	20
2.3.5 Härteofen und Kaschierung	21
3. Mineralwollrecycling und aktuelle Hindernisse	23
3.1 Aktuelles End of Life von Mineralwolle	23
3.2 Hindernisse im Mineralwollrecycling	29
3.3 Übersicht über bestehende Recyclingkonzepte im offenen Kreislauf	30
3.4 Übersicht über bestehende Recyclingkonzepte im geschlossenen Kreislauf	36
4. Störstoffe, Aufbereitungsverfahren und Logistikaspekte	40
4.1 Störstoffe und Grenzwerte	40
4.2 Konstruktive Lösungen zur Reduzierung von Störstoffen	49
4.3 Aufbereitungsmaßnahmen	60
4.4 Logistikaspekte	66
5. Spektroskopische Untersuchungen an Mineralwolle	70
5.1 Material und Methoden	71
5.1.1 Material	71
5.1.2 Methoden	74
5.2 Ergebnisse	82
6. Nachhaltigkeitsbewertung ausgewählter Recyclingstrategien	104
6.1 Ökologische Betrachtung	105
6.1.1 Auswertung bestehender Umweltproduktdeklarationen	105
6.1.2 Ökobilanz ausgewählter Recyclingstrategien	114
6.2 Ökonomische Betrachtung	118

7. Fazit	126
Mitwirkende	128
Danksagung	129
Literaturverzeichnis	130
Abbildungsverzeichnis	138
Tabellenverzeichnis	142
Anlagen	144

Kurzfassung

Zurzeit befindet sich die EU Kommission in einem Sondierungsverfahren zur Aktualisierung der Abfallrahmenrichtlinie. Ziel soll es sein, das Abfallaufkommen und insbesondere gemischte Abfälle zu verringern. In der Abfallbewirtschaftung von Dämmstoffen wird aber in den nächsten Jahren ein gegenläufiger Trend erwartet, da die Verschärfungen des Wärmeschutzes von Gebäuden der letzten dreißig Jahre bei der Instandsetzung, Modernisierung und dem Rückbau von Gebäuden zu einem erhöhten Abfallstrom führen werden. Im Bereich des Dämmstoffmarktes haben Mineralwollprodukte aufgrund ihrer besonderen bautechnischen Eigenschaften für den Wärme-, Feuchte-, Schall- und Brandschutz mit ca. 50% Marktanteil eine herausgehobene Stellung. Deshalb ist es notwendig zielgerichtet Strategien, Verfahren und Lebenszyklusabschnitte zu analysieren und zu bewerten, um die Grundlage zu schaffen, dass eine Recyclingfähigkeit im volumenrelevanten Maßstab für Mineralwollprodukte, hergestellt im Schmelzwannenverfahren, besteht.

Zu diesem Zweck wird in dem Forschungsbericht auf die derzeitigen Hindernisse mit einem kurzen Abriss über den derzeitigen Entsorgungsstand eingegangen. Von den Hindernissen aus wird das ökologische und ökonomische Potential eines Recyclings von Mineralwolle analysiert und verschiedene Einzelaspekte zur Überwindung der Hindernisse vertieft. Insbesondere handelt es sich dabei um die Frage nach der Sortenreinheit und nach Verunreinigungen, wozu auch die Entwicklung von messtechnischen Analyseverfahren vorangetrieben wurden.

Mit der ökologischen Analyse von verschiedenen Recyclingstrategien konnte durch die Substitution von Ausgangsstoffen des Herstellungsprozesses durch rückgeführte Mineralwolle keine Verbesserung der globalen Umweltfaktoren erreicht werden. Ökonomisch hat der Transport einen maßgeblichen Einfluss; hier konkurriert das dezentrale Entsorgungssystem über Deponien mit einem zentralen Entsorgungssystem über die Rückführung in den Herstellprozess. Mittels weiterer Optimierungen in den Prozessketten und durch Kostenverteilung auf die verschiedenen Akteure wird die Rückführung von Mineralwolle wirtschaftlich.

Abstract

The EU Commission is currently engaged in an exploratory procedure to update the EU Framework Directive. The aim is to reduce waste generation, especially mixed waste. In the waste management of insulation materials, however, a contrary trend is expected in the next few years, since the tightening of thermal protection of buildings in the last 30 years will lead to an increased flow of waste during the rehabilitation, modernisation and deconstruction of buildings. In the insulation market, mineral wool products have a prominent position with a market share of approximated 50% due to their special structural properties for heat, moisture, acoustic and fire protection. Therefore, it is necessary to analyse and evaluate strategies, processes and life cycle stages in order to create the basis for a recycling capability on a volume-relevant scale for mineral wool products produced in the melting tank process.

To this end, the research report addresses the current barriers with a brief outline of the current disposal status. From the obstacles, the ecological and economic potential of a recycling of mineral wool is analysed and various individual aspects for overcoming the obstacles are dealt with in depth, in particular the question of grade purity and impurities, for which the development of metrological analysis methods was also advanced.

With the ecological analysis of different recycling strategies, no improvement of the global environmental factors could be achieved by substituting raw materials of the manufacturing process with recycled mineral wool. Economically, transport has a significant influence; here, the decentralised disposal system via landfills competes with a centralised disposal system via recycling into the manufacturing process. By means of further optimisations in the process chains and by distributing costs among the various actors, the recycling of mineral wool becomes economical.

1. Einführung

Um das Klima zu schützen, ist es zunehmend von Bedeutung Energie einzusparen. Im Gebäudesektor können signifikante Einsparungen nur durch die Verringerung der Wärmeabgabe unter Zuhilfenahme von Dämmstoffen erzielt werden. Entsprechend wurden in den letzten Jahren die Anforderungen zur Reduzierung des Energiebedarfs stetig erhöht. Flankierend zu diesen Maßnahmen wendet die Bundesregierung erhebliche Mittel zur Sanierung und energetischen Optimierung der Gebäude auf. Diese Entwicklung fördert die Massenströme von Dämmmaterial. Berücksichtigt man den Umstand, dass Gebäude erst seit ca. 70 Jahren gedämmt werden und die Anforderungen an den Brand- und Schallschutz stetig steigen, dann ist in den kommenden Jahren mit einem rasanten Anstieg der anfallenden Dämmstoffabbruchmassen zu rechnen.

Mineralwolle ist in Deutschland der meistverbaute Dämmstoff im Bausektor. Aktuell wird jedoch nur ein kleiner Volumenanteil von Mineralwolle aus Verschnitt oder Produktion bei der Herstellung von Glas- und Steinwolle stofflich wiederverwertet. Fremde, unbekannte oder rückgebaute Mineralwolle wird fast ausschließlich deponiert und dem Stoffkreislauf entzogen. Verschiedene Forschungsvorhaben in der Europäischen Union beschäftigen sich mit der Frage, ob und in welchem Umfang es technisch möglich ist, Mineralwolle dem Herstellprozess wieder zuzuführen.

Im Rahmen dieses Zukunft Bau-Forschungsvorhabens wird analysiert, ob das Recycling von Mineralwolle unter Nutzung des Schmelzwannenverfahrens im volumenrelevanten Umfang wirtschaftlich sowie ökologisch sinnvoll und umsetzbar ist. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, einen Baustein zu liefern, damit der Lebenszyklus im großen Umfang für einen der meist verwendeten Dämmstoffe im Bauwesen geschlossen wird.

Dazu wird auf die derzeitige Entsorgungspraxis und das Herstellverfahren eingegangen, die verschiedenen Hindernisse analysiert, produktionstechnische Systemgrenzen und limitierende Produktionsprozesse ermittelt und verschiedene Einzelaspekte zur Überwindung der Hindernisse vertieft. Insbesondere handelt es sich dabei um die Frage nach der Sortenreinheit und nach Verunreinigungen. In diesen Zusammenhang wird die als wirtschaftlich angesehene in-situ-Identifikation unbekannter Mineralwolle weiterentwickelt. Die ökologische und ökonomische Analyse verschiedener Recyclingszenarien dient dazu das Potential für ein Recycling bewerten zu können.

2. Grundlagen zu Mineralwollämmstoffen

2.1 Übersicht über den deutschen und europäischen Mineralwollmarkt

Die Betrachtungen dieses Berichts beziehen sich überwiegend auf im deutschen und europäischen Mineralwollmarkt produzierte Mineralwollprodukte. Nach [75] produzieren vornehmlich folgende fünf Hersteller innerhalb der Europäischen Union.

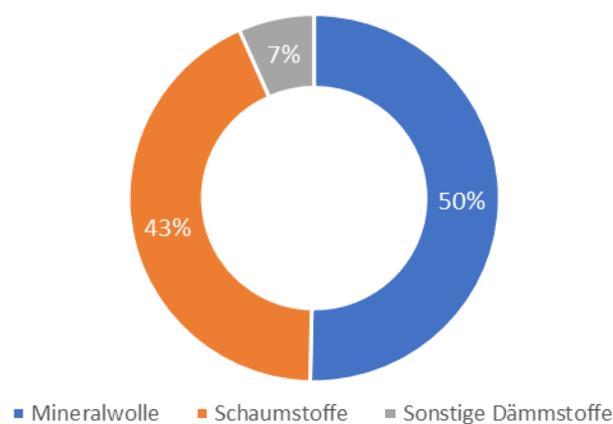
Tabelle 1
Übersicht über die größten Hersteller von Mineralwolle innerhalb der EU, Stand: 2005

Hersteller	Anzahl an Werken	Anzahl der Standorte bezogen auf Mitgliedstaaten
Saint Gobain	21	13
Rockwool	15	10
Paroc	7	4
Ursa	7	7
Kauf / Heraklith	10	6

Quelle: BAT [75]

Weiterhin gibt [75] an, dass sich der produzierte Output massebezogen innerhalb von ca. 10 Jahren (1996-2005) um den Faktor 1,8 auf 3,6 Mio. Tonnen vergrößert hat. Wie sich diese produzierte Menge auf die einzelnen Mitgliedsstaaten der EU verteilt, wurde in Abbildung 2 grafisch aufgearbeitet. Aktuellere Zahlen aus dem Jahr 2021 [21] belegen, dass das in Europa insgesamt produzierte Volumen bei ca. 152 Mio. Kubikmeter Mineralwollämmstoff liegt. Unter der Annahme einer durchschnittlichen Mineralwollendichte von 20-80 kg/m³ entspricht dies 3,0-12,2 Mio. Tonnen Mineralwolle. Innerhalb von Deutschland teilt sich der Dämmstoffmarkt im Jahr 2021 gemäß des Dena Gebäudereports 2022 [31]¹ wie folgt auf.

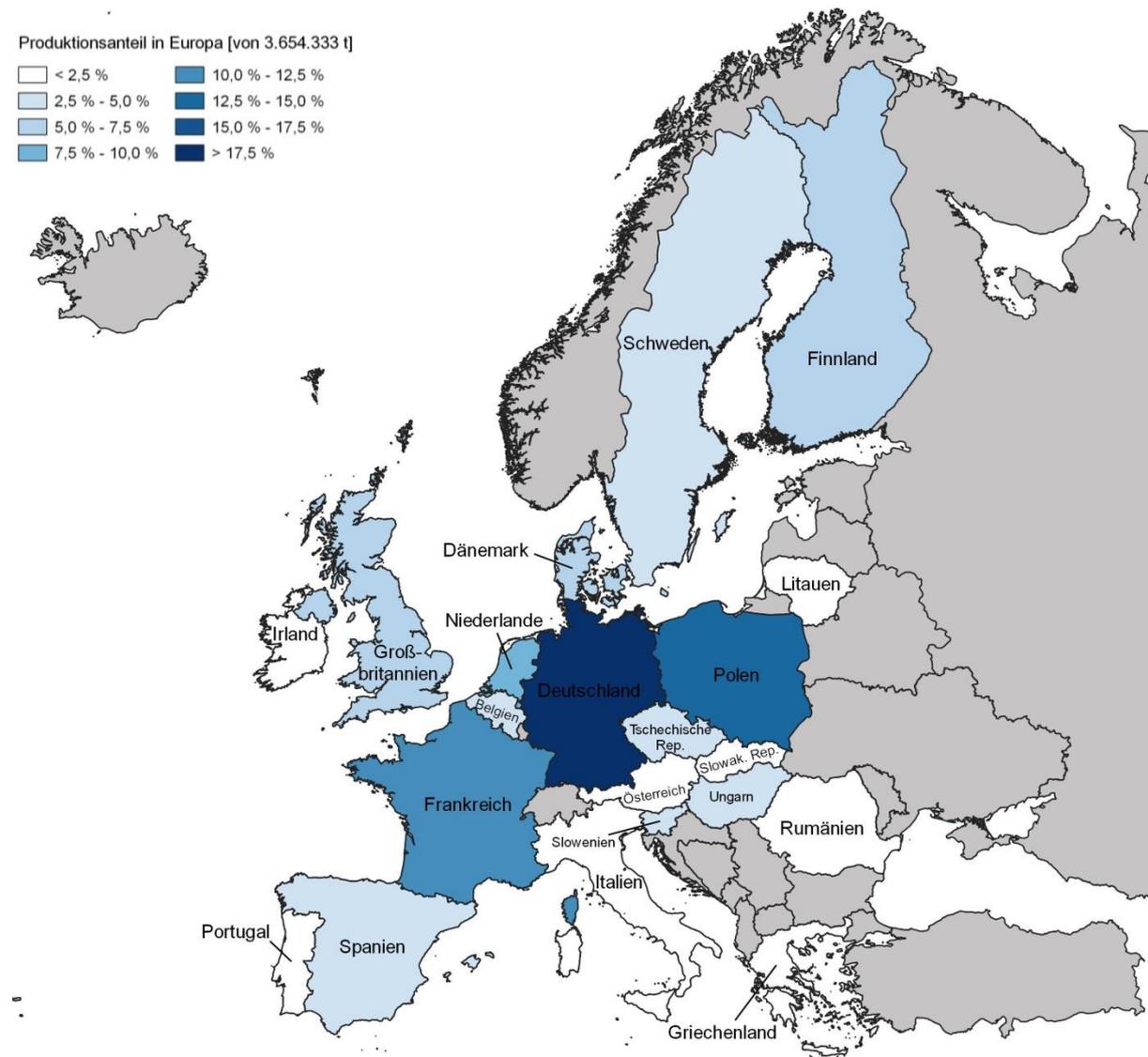
Abbildung 1
geschätzter Anteil am Dämmstoffabsatz in Deutschland für das Jahr 2023



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: Dena Gebäudereport [31]¹

¹ Hierbei handelt es sich um eine Sekundärquelle, die den Branchenradar 2021 zitiert. Dieser ist nur kostenpflichtig zugänglich und wurde im Rahmen der Studie nicht geprüft.

Abbildung 2
 Geschätzter prozentualer Anteil der EU Produktion nach Mitgliedsstaaten, Stand 2005



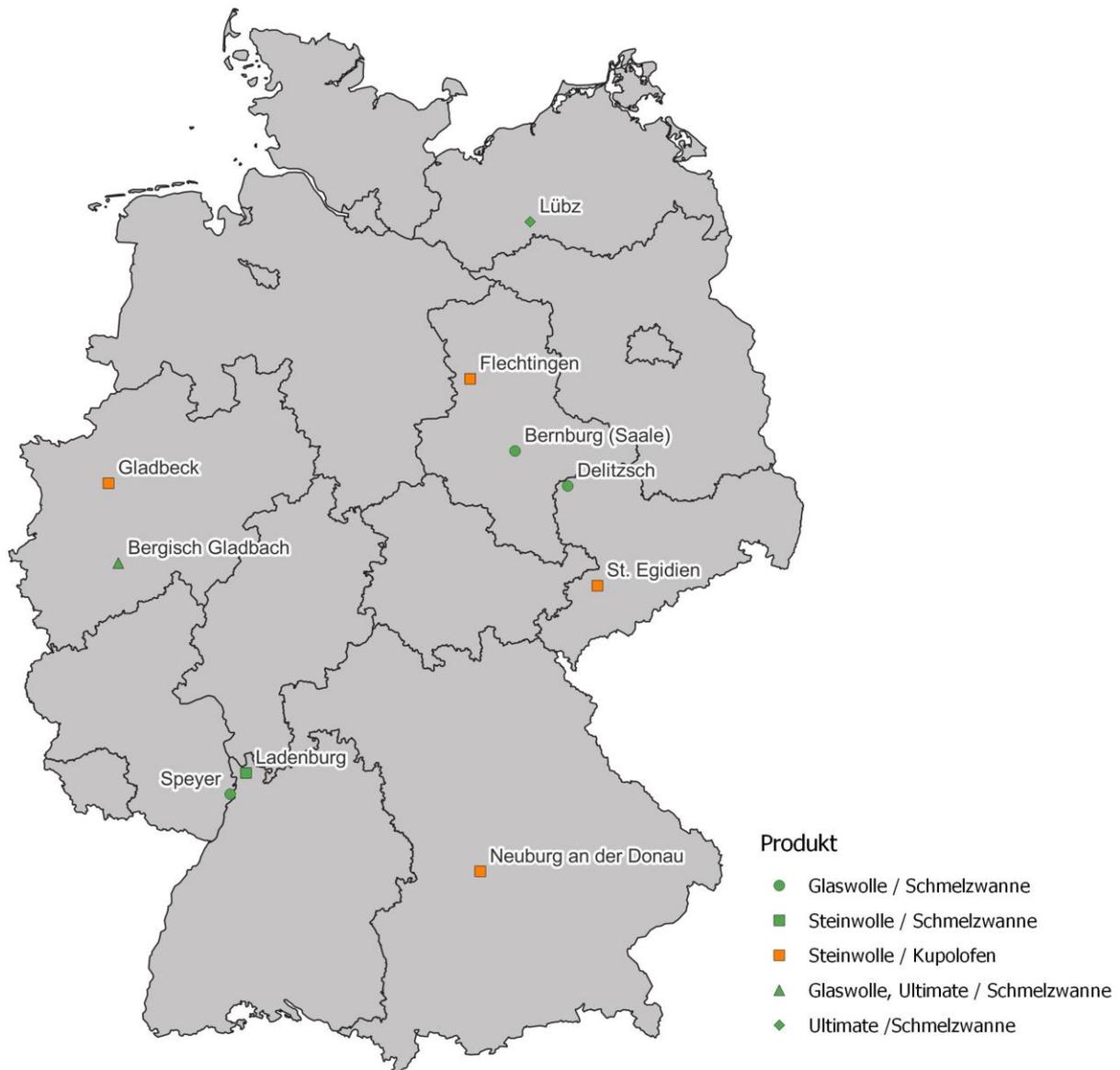
Quelle: BAT [75]

Die Lage der produzierenden Anlagen kann Abbildung 3 entnommen werden. Hier wurde unterschieden in Werke die Mineralwolle in der Schmelzwanne herstellen und Mineralwolle, die diese im Kupolofen produzieren. Die Information zur Lage der Standorte und den dort hergestellten Produkten ist vor allem für die logistischen Herausforderungen im Recycling von Bedeutung.

Mineralwolle wird aufgrund seiner wärme- und schalldämmenden Eigenschaften und der Nichtbrennbarkeit in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt, wobei die Bauindustrie der größte Verwender dieses Produktes ist [75].

Abbildung 3

Standorte von Mineralwollfertigungsanlagen in Deutschland nach Angaben der Hersteller (SG Isover in Speyer, Bergisch Gladbach, Ladenburg und Lüz, Ursa in Delitzsch, Rockwool in Gladbeck, Flechtingen und Neuburg und Knauf Insulations in Bernburg und St. Egidien), "Ultimate" ist eine Produktbezeichnung der Firma ISOVER für eine Mineralwolle, die von den Rohstoffen her einer Steinwolle ähnelt, aber prozesstechnisch wie eine Glaswolle hergestellt wird, Grün: Werke mit Schmelzwannen, Orange: Werke mit Kupolofen, Stand Mai 2022



Quelle: Eigene Darstellung

2.2 Eigenschaften von Mineralwolle

Im Vorgängerprojekt „LifeCycle KMF“ [126], welches sich schwerpunktmäßig mit dem Recycling im Kupolofen beschäftigt hat, wurden bereits eine allgemeine Einordnung zur Definition und den Eigenschaften von Mineralwolle durch das Forscherteam angestellt. Die wichtigsten Aspekte sollen zum Verständnis der Arbeit hier noch einmal dargestellt und ergänzt werden.

2.2.1 Einordnung und chemische Zusammensetzung

Mineralwolle gehört stofflich in die Gruppe der „künstlichen Mineralfasern“ (KMF). Unter diesem Begriff wird die Gruppe der auf anorganischer Basis synthetisch hergestellten Fasern zusammengefasst. Unterteilt wird diese in kristalline, einkristalline, polykristalline und glasartige (amorphe) Fasern, wobei Mineralwolle zu letzteren gehört. [15]

Mineralwolle wird unterschieden in Glas-, Stein- und Schlackenwolle. Schlackenwolle spielt jedoch seit vielen Jahren auf dem deutschen Dämmstoffmarkt keine Rolle mehr und wird daher im weiteren Verlauf dieses Berichts vernachlässigt. Der wesentliche Unterschied zwischen diesen Unterkategorien liegt in den eingesetzten Ausgangs- und Rohstoffen und der daraus resultierenden unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung. Während für Steinwolle vor allem Natursteine u.a. Basalt, Diabas oder Dolomit verwendet werden, sind es für Glaswollen Altglas und Glasrohstoffe wie Quarzsand, Feldspat, Kalk etc. Aus den Rohstoffen ergeben sich typische chemische Oxidzusammensetzung innerhalb einer bestimmten Range. Diese sind nicht zwingend festgelegt. Eine mögliche Definition liefert die VDI 3492.

Tabelle 2
Hauptbestandteile der mineralischen Fasern von Steinwolle, Glaswolle und Schlackenwolle

Bestandteil	Anteil in Masse-% an							
	Steinwolle bis ca. 1996		Steinwolle ab ca. 1996 ¹⁾		Glaswolle		Schlackenwolle	
SiO ₂	40	- 53	33	- 43	48	- 70	34	- 52
Al ₂ O ₃	6	- 18	18	- 24	0	- 9	5	- 16
CaO	10	- 40	23	- 33	5	- 28	20	- 43
MgO	0,5	- 16			0	- 5	4	- 14
Fe ₂ O ₃	0,5	- 12			0	- 5	0	- 15
FeO	3	- 8	3	- 9				
Na ₂ O	0,1	- 4,5	1	- 10	4	- 18	0	- 1
K ₂ O	0,3	- 5			0	- 3,6	0,3	- 2
TiO ₂	0,5	- 3,5	0,5	- 3,0	0	- 0,5	0,30	- 1
MnO	0,06	- 0,5			0	- 0,1		< 0,5
B ₂ O ₃	< 1				0	- 12		< 1
P ₂ O ₅	< 1							- 0,5
BaO					0	- 3		
F					0	- 1,5		
S							0	- 2
SO ₃					0	- 0,5		
Li ₂ O					0	- 0,5		

¹⁾ Neue Steinwolle mit Herstellung ab Mitte der 1990er Jahre (hochaluminiumhaltige Steinwolle)

Quelle: VDI 3492, 2013 [124]

In den Unterschieden der chemischen Zusammensetzung zwischen Steinwolle und Glaswolle sind zwei Aspekte von besonderer Bedeutung:

- Steinwolle – vor allem neue - weist einen vergleichsweise hohen Al₂O₃-Anteil auf.
- Neben höheren SiO₂- und Na₂O-Anteilen kann Glaswolle aufgrund der verwendeten Ausgangsstoffe auch einen vergleichsweise hohen B₂O₃-Anteil aufweisen. Bor beeinflusst positiv das Wärmeleitverhalten der Glaswolle [86] und ist zudem Bestandteil der Altglasscherben (Borsilikatgläser). Es ist dahingegen kein Bestandteil von Steinwolle.

Neben der chemisch-mineralogischen Unterschiede, werden Glas- und Steinwolle auch in unterschiedlichen Prozessen gefertigt. Im Detail beschreibt dies Kapitel 2.3.

Resultierend aus diesen Unterschieden ergeben sich für Glas- und Steinwolle im Detail leicht unterschiedliche Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten.

Tabelle 3
Physikalisch-chemische Unterschiede zwischen Glas- und Steinwolle

Eigenschaft	Einheit	Mineralwolle	
		Glaswolle	Steinwolle
Rohdichte	kg/m ³	13 - 100	60 - 250
Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)	0,032 - 0,041	0,035 - 0,049
Druckspannung	kPa	0 - 10	0,5 - 70
Feuerwiderstandsklasse	[-]	A1	A1
Schmelzpunkt	°C	> 600	> 1000
Spezifische Wärmekapazität	J/(kgK)	850	1030
Anwendungsgebiete	[-]	DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAA, WZ, WH, WI, WTH, WTR	DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAP, WAA, WZ, WH, WI, WTH, WTR +WDVS

Quelle: DIN EN 13162; DIN 4108-4; DIN EN 14303; DIN EN 1602; DIN EN 826; DIN 4108-10

2.2.2 Gesundheitliche Aspekte

Im Zusammenhang mit einer gegebenenfalls gesundheitsschädlichen Wirkung von Mineralwolleprodukten wird in der Regel die Klassifizierung einer potentiell krebserzeugenden Wirkung der Fasern thematisiert, die aus der Produktmatrix austreten können. Dabei sind zwei Eigenschaften maßgeblich, die nach aktuellem Stand der Kenntnis zusammenwirken müssen, um eine Gesundheitsgefährdung hervorzurufen:

- Lungengängigkeit der Fasern: Kann eine Faser aufgrund ihrer Geometrie in den Alveolarbereich der Lunge eindringen, kann sie dort die Lungenbläschen schädigen. Auf Grundlage der Definition der **World Health Organisation (WHO) werden Fasern mit der folgenden Geometrie als diesbezüglich „kritische Fasern“ oder auch als „WHO-Fasern“ beschrieben** [133], [4]: Faserlänge > 5 µm, Faserdurchmesser < 3 µm, Verhältnis Faserlänge : Faserdurchmesser > 3.
- Beständigkeit der Fasern im Lungengewebe: Die kanzerogene Wirkung einer in die Lunge eingedrungenen Faser hängt von ihrer Biopersistenz bzw. ihrer Biolöslichkeit ab. Als Biopersistenz wird die Zeit verstanden, in der eine Faser innerhalb der Lunge intakt bleibt. Im Sinne der Gesundheitsvorsorge wird für die Unbedenklichkeit derzeit von einer Biopersistenz als Halbwertszeit der Fasern im Lungengewebe von maximal 40 Tagen ausgegangen.

Verbot des Inverkehrbringens sowie Herstellungs- und Verwendungsverbot

Mineralwolle wird hinsichtlich der Krebsgefährdung durch die Fasern zunächst in der tabellarischen Zusammenstellung der EU-VO 1272 2008/2022 [125] in der *Kategorie 2 (Carc. 2): Verdacht auf karzinogene Wirkung beim Menschen* geführt. Vor dem Hintergrund dieser Einstufung ist für Mineralwollprodukte in Deutschland das Inverkehrbringen nach Anlage 1 Eintrag 4 ChemVerbotsV 2020 [23] sowie die Herstellung und Verwendung nach GefStoffV 2021 Anhang II Nr.5 [40] grundlegend verboten. Dieses Verbot gilt jeweils nicht, wenn die gesundheitliche Unbedenklichkeit explizit nachgewiesen werden.

Test der Kanzerogenität

Aufgrund der oben genannten Einstufung muss in Deutschland nach der ChemVerbotsV 2020 [23] für das Inverkehrbringen von Mineralwolleprodukten die gesundheitliche Unbedenklichkeit explizit nachgewiesen werden. Für diesen Nachweis werden alternativ die beiden folgenden Verfahren genannt:

a) Intraperitonealtest

Im Test mit intraperitonealer Injektion dürfen sich keine Anzeichen für eine übermäßige Karzinogenität ergeben.

b) Intratrachealtest

Nach intratrachealer Instillation einer Fasersuspension darf die Halbwertszeit der WHO-Fasern im Körpergewebe höchstens 40 Tage betragen.

Die GefStoffV 2021 [40] beinhaltet in Ergänzung auch den möglichen Nachweis der Unbedenklichkeit über die Bestimmung des Kanzerogenitätsindex KI, mit dem die chemische Zusammensetzung der Fasern hinsichtlich ihrer Biolöslichkeit bewertet wird:

c) Kanzerogenitätsindex KI

Der Kanzerogenitätsindex KI als Differenz zwischen der Summe der Anteile (in Masse-%) der Oxide von Calcium, Natrium, Magnesium, Kalium, Bor sowie Barium und dem doppelten Anteil (in Masse-%) von Aluminiumoxid muss mindestens 40 betragen:

$$KI = \sum (\text{Ca-, Na-, Mg-, K-, B-, Ba-Oxide}) - 2 \cdot \text{Al-Oxid} \geq 40$$

Für den Kanzerogenitätsindex KI gibt es Bedenken hinsichtlich der Eindeutigkeit der Bewertung insbesondere bei Werten $KI < 40$. Er wird zudem in der aktuellen ChemVerbotsV 2020 [23] nicht mehr erwähnt und in den Güte- und Prüfbestimmungen der GGM - Gütegemeinschaft Mineralwolle e.V. [41] **nur noch als „ergänzendes“** Verfahren aufgeführt. Da es sich jedoch vor allem in Deutschland um den bekanntesten Nachweis der Kanzerogenität handelt und dieser vor allem auf Baustellen und von Ingenieurbüros oftmals noch verwendet wird, wird er hier dennoch aufgeführt.

In der [EU-VO 1272 2008/2022 [125] werden mit der „Anmerkung Q“ für Mineralwolle neben dem Intraperitonealtest nach a) drei weitere alternative Verfahren angegeben:

d) Kurzzeit-Intratrachealbiopersistenztest (Fasern mit einer Faserlänge $> 20 \mu\text{m}$)

Anders als im Intratrachealtest nach b) muss hier nachgewiesen werden, dass die bewertete **Halbwertszeit von Fasern mit einer Faserlänge von mehr als $20 \mu\text{m}$ weniger als 40 Tage beträgt.**

e) Kurzzeit-Inhalationsbiopersistenztest

Im Kurzzeit- Inhalationsbiopersistenztest muss die bewertete Halbwertszeit von Fasern mit einer **Faserlänge von mehr als $20 \mu\text{m}$ weniger als 10 Tage betragen.**

f) Langzeit-Inhalationstest

Im Langzeit-Inhalationstest muss die Abwesenheit von relevanter Pathogenität oder von neoplastischen Veränderungen festgestellt werden.

In Deutschland werden die Regelungen der ChemVerbotsV 2020 [23] und der EU-VO 1272 2008/2022 [125] kumulativ angewendet.

Nachweis der Unbedenklichkeit in Deutschland

Der Nachweis der Unbedenklichkeit eines Mineralwolle-Produktes erfolgt in Deutschland über die Güte- und Prüfbestimmungen der Gütegemeinschaft Mineralwolle e.V. (GGM) [41]:

- Für den Freizeichnungsnachweis wird durch die genannten biologischen Tests explizit die kanzerogene Unbedenklichkeit eines Fasertyps mit definierter und bei der GGM hinterlegter chemischer Zusammensetzung einmalig nachgewiesen. Die Nachweise müssen in von der GGM festgelegten Prüflaboren stattfinden. Der Nachweis erfolgt, wenn b) in Kombination mit einem der Tests d) bis f) bestanden wird oder durch Bestehen des Tests a).
- Mit dem Konformitätsnachweis wird im Rahmen der Erstprüfung und der Eigen- und Fremdüberwachung die Übereinstimmung der chemischen Zusammensetzung der produzierten Fasern mit der hinterlegten chemischen Zusammensetzung des freigezeichneten Fasertyps nachgewiesen.

Gegenstand der chemischen Analyse der Fasern ist auf dieser Basis die Ermittlung der Anteile der folgenden Oxide SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , MnO , B_2O_3 , P_2O_5 , BaO und SO_3 sowie SrO , Cr_2O_3 , PbO , ZnO und ZrO_2 .

Die Summe der Anteile dieser Oxide an den Fasern muss nach [41] zwischen 98 Masse-% und 101 Masse-% (inkl. Toleranzbereich) betragen. Die für den erforderlichen Konformitätsnachweis entsprechend zulässigen Toleranzen für die einzelnen Anteile der Oxide betragen

- +/- 2,0 % bei einem Anteil ≥ 19 Masse-%,
- +/- 1,5 % bei einem Anteil ≥ 2 Masse-% und < 19 Masse-% sowie
- +/- 1,0 % bei einem Anteil < 2 Masse-%.

Die Kennzeichnung von Mineralwolle-Produkten mit auf diese Art nachgewiesener kanzerogener Unbedenklichkeit erfolgt national durch ein RAL-Gütezeichen (RAL-GZ 388)

Nachweis der Unbedenklichkeit in Europa

Die Anforderungen in großen Teilen des europäischen Marktes weichen geringfügig von denen in Deutschland ab, weswegen sie hier kurz gesondert erwähnt werden. Auf europäischer Ebene erfolgt die Zertifizierung und Kennzeichnung von Mineralwolle-Produkten über die *EUCEB - European Certification Board for Mineral Wool Products*. Grundlage ist ein erfolgreicher biologischer Test mit einem der in der „Anmerkung Q“ der EU-VO 1272/2008/2022 [125] genannten Verfahren und wiederum der anschließende Nachweis der Konformität der chemischen Zusammensetzung von produzierter Faser und freigezeichneter Faser. Die für den erforderlichen Konformitätsnachweis entsprechend zulässigen Toleranzen für die einzelnen Anteile der Oxide betragen hier nach [9]

- +/- 2,5 % bei einem Anteil ≥ 15 Masse-%,
- +/- 1,5 % bei einem Anteil ≥ 2 Masse-% und < 15 Masse-% sowie
- +/- 1,0 % bei einem Anteil < 2 Masse-%.

„Alte“ und „neue“ Mineralwolle

Im Jahr 2000 erfolgte die Aufnahme der unter a), b) und c) genannten Tests in die Chemikalien-Verbotsverordnung und zusammen mit der Anpassung der Gefahrstoffverordnung das ab 01.06.2000 geltende Verbot der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung von künstlichen Mineralfasern, für die nicht explizit die gesundheitliche Unbedenklichkeit durch die genannten Tests nachgewiesen ist. Dieses Jahr dient als grundlegende Grenze der Unterscheidung in „alte“ und „neue“ Mineralwolle. Aufgrund der Übergangsregeln, welche zwischen 1996 und 2000 galten, wurden teilweise sowohl neue als auch alte Mineralwollen verbaut. Mineralwollen aus Jahren vor 1996 sind definitiv als alte Mineralwollen zu bezeichnen. Wobei damit nicht sicher gesagt ist, dass diese nicht die genannten Tests bestehen würden. Solange ein solcher Test jedoch nicht bestanden wurde, ist die Mineralwolle als potentiell kanzerogen zu bewerten. Im

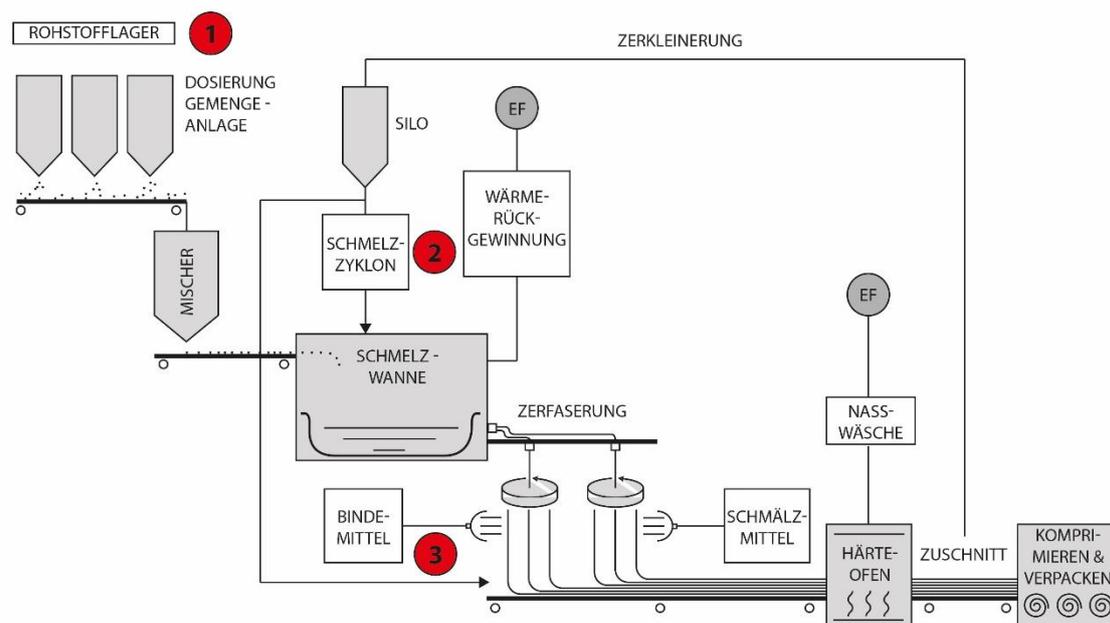
Umgang mit Mineralwollprodukten gilt generell für neue und für alte Mineralwollprodukte die TRGS905 [4] für alte Mineralwolle zusätzlich die TRGS521 [5].

2.3 Herstellprozess für Mineralwolle im Schmelzwannenverfahren

Der Fokus dieses Forschungsberichts liegt auf Mineralwollämmstoffen, die im sogenannten Schmelzwannenverfahren hergestellt wurden. Im Schmelzwannenverfahren können sowohl Stein- als auch Glaswollämmstoffe hergestellt werden, gleichwohl es in der Regel mit der Glaswolleproduktion in **Verbindung gebracht wird. Der Herstellprozess im Kupulofen wurde im Vorgängerprojekt „LifeCycle KMF“** bereits ausführlich behandelt [126]. Das Verfahren mit Kupulofen wird soweit bekannt ausschließlich für die Steinwollproduktion verwendet. Als Grundlage für potenzielle Recyclingoptionen wird der Herstellprozess in der Schmelzwanne nachfolgend detailliert skizziert. Dabei werden die einzelnen Herstellschritte prozesschronologisch beschrieben, wie Sie in Abbildung 4 auch dargestellt sind. Es werden die Stellen aufgezeigt, die für ein mögliches Recycling im Rahmen des Projekts erforscht wurden (①②③, vgl. in Abbildung 4). Die Rückführung von Mineralwolle aus dem Zuschnitt Prozess kann je nach Hersteller variieren.

Abbildung 4

Schematische Darstellung des Herstellprozesses von Glaswolle der Fa. SG Isover im Schmelzwannenverfahren; EF = Elektrofilter, in rot dargestellt 3 Stellen im Prozess, an denen Mineralwolle als Sekundärrohstoff hinzugefügt werden könnte. Die Rückführung von Mineralwolle aus dem Zuschnitt-Prozess kann je nach Hersteller variieren



Quelle: Eigene Darstellung; Daten: SG Isover

2.3.1 Rohstofflager und Gemenge

Die Produktion von Mineralwolle fängt mit der Lieferung der Rohstoffe an. Mineralwolle besteht im Allgemeinen aus den Rohstoffen: Alt- bzw. Recyclingglas, Quarzsand, und Gesteinen wie bspw. Dolomit, Kalkstein und Basalt. In der Glaswolleherstellung werden darüber hinaus Flussmittel wie beispielsweise Soda eingesetzt. Ein weiterer Bestandteil ist Bor. Die Rohstoffe werden durch die Hersteller in der Regel bereits in der gewünschten Ausgangsqualität bestellt und dann von Externen geliefert. Da es sich bei den Rohstoffen um Materialien handelt, die Qualitätsschwankungen ausgesetzt sind, spielt die Qualitätskontrolle eine

wichtige Rolle. Die bestellte Zusammensetzung wird vor Ort ein weiteres Mal durch den Hersteller überprüft. Prüfmethoden reichen dabei von visuellen Überprüfungen über Konformitätserklärungen und Kontrolle des Lieferscheins bis hin zu labortechnischen Verfahren.[75] [86] [130]

Recyclingglas wird in Deutschland bereits zermahlen geliefert. Seit ca. den 1980er Jahren ist es technisch möglich bis 80% Recyclingglas in der Herstellung von Glaswollgedämmstoffen zu verwenden. Obwohl Mineralwollhersteller relativ geringe Anforderungen an die Recyclingglasqualität stellen müssen, wird dieser Wert aktuell jedoch häufig deutlich unterschritten, da nicht ausreichend geeignetes Recyclingglas auf dem Markt verfügbar ist. [86]

An dieser Stelle könnte ein extern aufbereitetes Recyclingprodukt mit homogener Zusammensetzung ebenso wie beispielsweise das Recyclingglas als weiterer Sekundärrohstoff eingesetzt werden (siehe Option 1 in Abbildung 4)

Die exakte Zusammensetzung der Rohstoffe einer Mineralwolle obliegt der Geheimhaltung. Um ein Verständnis dafür zu entwickeln, welche Roh- und Zusatzstoffe innerhalb welcher Grenzen potentiell enthalten sein können, wurde durch eine Literaturrecherche von Herstellerangaben und Umweltproduktdeklarationen (EPDs) eine Übersicht erstellt, die in Tabelle 4 dargestellt ist. Das Gemenge wird vollautomatisiert und kontinuierlich in die Schmelzwanne oberhalb des Glasspiegels beispielsweise mit Hilfe eines Schubförderers eingelegt. Dieser erweist sich vorteilhaft für das Schüttgut mit geringer Korngröße. [86] Aus Gründen einer kürzeren Aufheizzeit der Rohstoffe wird zumeist mit Dünnschichteinlagen gearbeitet [80].

In Tabelle 4 ist ersichtlich, dass sich Stein- und Glaswolle trotz der ähnlichen Ausgangsstoffe doch unterscheiden. Wesentliche Unterschiede bestehen erwartungsgemäß darin, dass Glaswolle im Vergleich zu Steinwolle einen höheren Anteil an Altglasscherben verwendet und dafür wenige Gesteine, zudem werden Flussmittel eingesetzt und Bor verwendet. Bor ist ein Ausgangsstoff, der aufgrund der Zielchemie des Produkts nicht in Steinwolle vorkommt. Die unterschiedlichen Ausgangsmaterialien führen später zu der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung anhand welcher Stein- und Glaswolle differenziert werden können und die zuvor vorgestellt wurde.

Die Einzelsubstanzen bzw. Rohstoffe werden im Werk entsprechend der gewünschten Rezeptur zu einem trockenen Gemenge eingewogen. Die chemische Zusammensetzung der Eingangsstoffe wurde berechnet und das Gemenge zur freigezeichneten chemischen Zusammensetzung hin automatisch dosiert. [79] Für ein Mineralwollgemenge werden Rohstoffe im Umsatz mehrerer Tonnen eingewogen und die Wiegegenauigkeit liegt dabei maximal im Grammbereich, was aber im Verhältnis zur eingewogenen Masse hinreichend genau ist. [86] Nach der Dosierung werden die Proben durchmischt, je homogener das Gemenge ist desto geringer muss die Homogenisierungsleistung im Schmelzprozess ausfallen. Die Mischung erfolgt beispielsweise über einen Trogmischer. Die Qualität der Homogenisierung ist von unterschiedlichen Faktoren wie einheitlicher Korngröße, hohem Feinheitsgrad, Mischzeit und Zusammensetzung des Gemenges abhängig. [80]

Anschließend wird das Gemenge in die Schmelzwanne befördert. In manchen Werken wird es dabei durch die Abwärme der Schmelzeinheit im Direktkontakt vorgewärmt [86][79]. Die Förderanlage weißt generell in der Glasindustrie wenig Spezifikationen auf [80].

Tabelle 4

Ausgangs- und Zusatzstoffe in der Mineralwollproduktion in % als Gesamttrag aus diversen Quellen

	Rohstoffe und Zusatzstoffe	Massenanteil in [%]	Rohstoffe und Zusatzstoffe	Massenanteil in [%]
	Glaswolle		Steinwolle	
Ausgangsstoffe	Allgemein mind. 90 %			
	Altglasscherben	40-80 ^{1,2,3,4,5}	Altglasscherben	10-30 ⁶
	(Quarz-)Sand (Siliziumdioxid, SiO ₂)	10-20 ^{1,2}	(Quarz-)Sand (Siliziumdioxid, SiO ₂)	10-30 ⁶
	Dolomit (MgCO ₃ CaCO ₃)	2-10 ^{1,[86]}	Dolomit (MgCO ₃ CaCO ₃)	10-30 ⁶
	Kalkstein (Kalziumkarbonat, CaCO ₃)	ohne Angabe ⁵	Kalkstein (Kalziumkarbonat, CaCO ₃)	10-30 ⁶
	Soda (Natriumkarbonat, Na ₂ O)	5-15 ^{1,2,3,4}		
	Borax (Natriumtetraborat, Na ₂ O2B ₂ O ₃)	5-10 ^{1,3,4} 4-8 (Borat) ²		
	Phonolith	4-10 ^{1,[86]}		
			Basalt	5-7 ⁶
			Dolomit und Basalt	40-50 ⁷
			Diabas und Basalt	27-50 ⁹
			zementgebundene Formsteine	45-73 ^{7,9}
			Eisenoxid	5-7 ⁶
			Recyceltes Material aus Stahlindustrie	ohne Angabe ^{5,8}
		Spat, Anorthosit	ohne Angabe ⁵	
		Gabbro	ohne Angabe ^[46]	
Bindemittel	Allgemein max. 8%			
	Phenol-Formaldehyd-Harz	max. 8 ^{1,2,4,5}	Phenol-Formaldehyd-Harz	max. 7 ^{5,7,9}
	Bindemittel auf Basis nachwachsender Rohstoffe	max. 8 ³		
Schmälzmittel	Allgemein max. 1%			
	Mineralöl	ca. 0,5 ⁵	Mineralöl	max. 0,5 ^{5,7,9}
	Haftmittel	0,1 ²	Haftvermittler	max. 0,1 ^{7,9}
	Hydrophobierungsmittel	max. 0,3 ²		
Staubbindemittel	max. 0,5 ²			

Quellen: 1) EPD-SGI-20160161-CAA1-DE, EPD-URS-20121111-D, 3) EPD-SAR-20200273-CBA1-DE, 4) (EPD-SAR-20200272-CBA1-DE, 5) Knauf 2023 [69]
6) EPD-SGI-20160160-CAA1-DE, 7) EPD-KNI-2013811-D, 8) EPD-KNI-20150327-CBB1-EN, Ebenso: EPD-KNI-20150328-CBB1-EN, EPD-KNI-20150329-CBB1-EN,
EPD-KNI-20160225-CBD1-EN, 9) EPD-DRW-20180065-IBC1-DE. Ebenso: EPD-DRW-20180118-IBC1-DE, EPD-DRW-20180119-IBC1-DE

2.3.2 Schmelzwanne

In der Schmelzwanne vollzieht sich die Stoffumwandlung des Gemenges zu einer verarbeitungsbereiten Glasschmelze, wobei sich mehr als nur der Aggregatzustand ändert. In der Regel steht die Glasschmelze mit anderen Phasen in Wechselwirkung, beispielsweise mit dem Feuerfestmaterial der Schmelzwanne. Vereinfacht dargestellt durchläuft eine Glasschmelze verschiedene Phasen in der folgenden Reihenfolge [80]:

- Silikatbildung: Erwärmen und chemische Reaktion der Rohstoffe untereinander, was zur Schmelzphase führt
- Glasbildung: bei der chemischen Reaktion nicht verbrauchter Quarz löst sich in Schmelze auf
- Läuterung: Entfernen von Blasen
- Konditionierung: Vorbereitung der blasenfreien Schmelze auf die weitere Bearbeitung

Die Schmelzwanne besteht in der Regel aus einem tragenden Stahlgehäuse, welches innen mit Feuerfeststeinen ausgekleidet ist, die unvermittelt und eng gestoßen ausgeführt werden. Vorhandene Fugen sollten nach Möglichkeit zwar vermieden werden, dichten sich aber bei korrekter Dimensionierung durch aushärtende Glasschmelze selbst ab. Das Feuerfestmaterial ist ein Verschleißteil, das unter anderem in Abhängigkeit der Glasschmelze, Temperatur, Ofenatmosphäre korrodiert. Die Verringerung der Steindicke erhöht die Wärmeverluste und damit den Energieverbrauch. Nach [80] kann monatlich von einer Erhöhung des Brennstoffverbrauchs von 0,8 bis 1,2% ausgegangen werden. Ein Einfluss auf die Chemie der Glasschmelze ist jedoch bei modernen Wannen nicht mehr zu erwarten.

Schmelzwannen werden durch einen Gas-Sauerstoff-Brenner, elektrischen Strom und / oder durch rekuporative Systeme betrieben. [56] Sauerstoff kann energieärmer als ein Luftgemisch erhitzt werden und wird mit Umluft aufgeheizt, wodurch es 200-300 kWh/t weniger Energie als das Gas-Luft-Modell verbraucht, für das der Energieaufwand ca. 1400 kWh/t Mineralwolle entspricht. [86]

Die Flammen der Öfen befinden sich dabei in der Regel oberhalb der Schmelze. Das Gemenge schwimmt auf der Glasschmelze, so dass es von unten durch die Schmelze und von oben durch die Flammen erhitzt wird. Die Energiezufuhr ist durch Querflammen als auch U-Flammenöfen möglich.

Die Temperatur, bei der die Rohstoffe geschmolzen werden, variiert laut Quellen und je Unternehmen zwischen 1.200 °C [78] und 1.600 °C [99]. In der Regel werden 1600°C aufgrund der Wannenbestandteile nicht überschritten [80]. Die Wanne selbst besteht aus Stahl und Feuerfestmaterialien. Die Lebensdauer einer solchen Wanne beträgt ca. 10 Jahre, wobei elektrisch betriebene Wannen bereits ab 3 Jahren ggf. ausgetauscht oder repariert werden müssen. [80], [86] Die Schmelzwannen in der Mineralwolleindustrie sind unterschiedlich, jedoch handelt es sich dabei in Deutschland immer um kontinuierlich laufende Öfen, die in der Regel mit Erdgas und Strom betrieben werden.

Üblicherweise ist heutzutage eine Wärmerückgewinnungsanlage an die Rauchgasleitungen angeschlossen, so dass mit Hilfe von Wärmetauschern wie Regeneratoren oder Rekuperatoren die Abwärme des Rauchgases nutzbar gemacht wird, um die zuzuführende Verbrennungsluft vorzuwärmen. [80], [86] Auch eine Rohstoffvorerwärmung ist wie oben beschrieben dadurch möglich.

Das geschmolzene Material wird sowohl bei den Kupolöfen als auch bei den Schmelzwannen am unteren Teil abgelassen. Üblicherweise wird die Schmelze in elektrisch beheizten Rohren zu den Zerfaserungsmaschinen transportiert. Damit wird gewährleistet, dass die Schmelze die erforderliche Viskosität und Wärme behält. [46], [69]

2.3.3 Zerfaserung

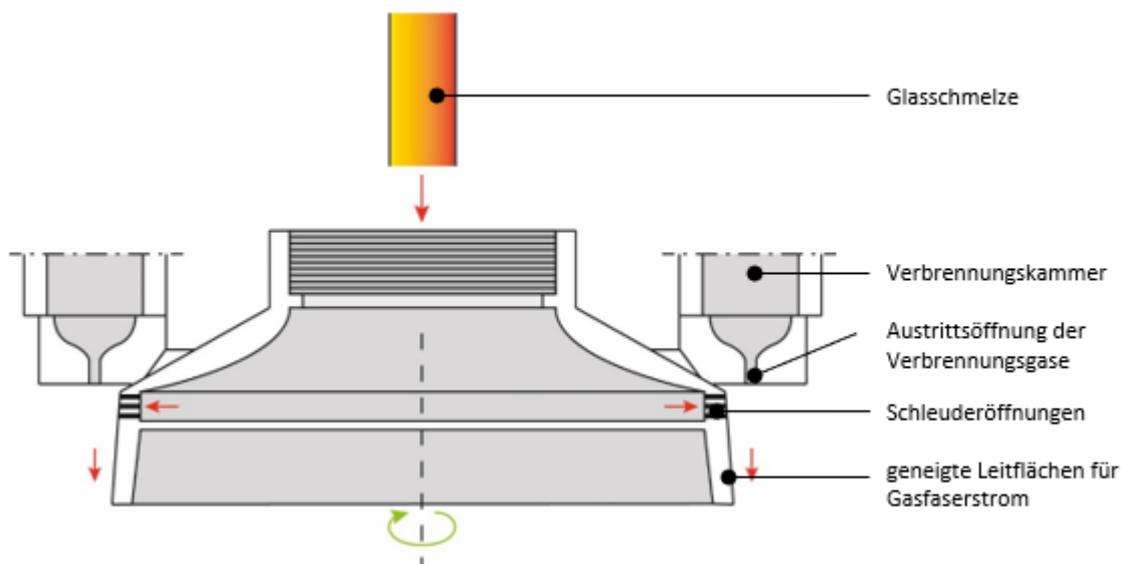
Die Zerfaserung selbst ist unternehmens- aber auch produktabhängig. Zu Beginn der Mineralwollherstellung wurden die Fasern nach der Zerfaserung teilweise in eine wässrige Zusatzmittel-Lösung getränkt. Dadurch kam es zu einem erhöhten und heutzutage überwiegend unerwünschten Bindemittelanteil in der

Mineralwolle. [49] Generell werden heute die Schleuder- und Düsenblasverfahren unterschieden, wobei es für beide Verfahren diverse Subkategorien gibt. Die in der Mineralwollindustrie verbreitetsten Methoden sollen nachfolgend vorgestellt werden:

Schleuderverfahren:

- a) Schleuderziehverfahren mit innerer Zentrifugierung, auch TEL-Verfahren: Das TEL-Verfahren wird meist für die Zerkleinerung von Glaswollschmelzen verwendet. Der flüssige Glasstrahl fällt aus der Schmelze durch eine Hohlwelle in einen mit hoher Geschwindigkeit horizontal rotierenden Verteilerkorb. Dieser Verteilerkorb wird auch Schleuderring oder Spinner genannt und weist bis zu ca. 6000 runde Öffnungen mit einem Durchmesser von 1mm in den Begrenzungswandungen auf. Per Zentrifugalkraft tritt das Schmelzgut durch die Öffnungen aus dem Verteilerkorb aus. Durch diesen Prozess wird die Schmelze zerkleinert. Beim Austreten aus dem Verteilerkorb treten die entstandenen Fasern in einen Blasstrom ein, der meist radial um den Verteilerkorb angeordnet ist. Sie werden durch heiße Luft nach unten geblasen und damit in die Länge gezogen. [86], [131]. Das TEL-Verfahren hat eine relativ lange Prozesszeit, sodass es für Steinwolle eher ungeeignet ist [102].

Abbildung 5
Schematische Abbildung des Zerkleinerungselements im Schleuderziehverfahren



Quelle: Eigene Darstellung nach Patent DE1225810B

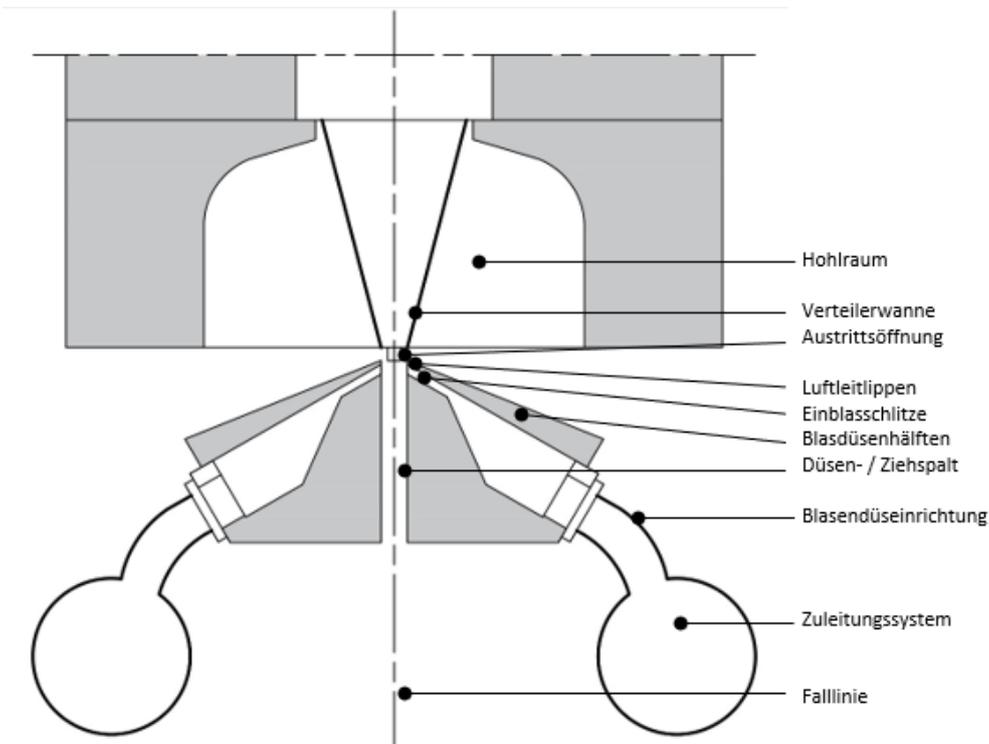
- b) Schleuderziehverfahren mit äußerer Zentrifugierung wie das Kaskaden-Schleuderverfahren,
c) Walzspinnverfahren, eingesetzt in der Steinwolleherstellung. Das geschmolzene Material wird in einem dünnen Strahl auf sich drehende, ggf. gerippte Walzen gelenkt, welche dann die Schmelze zerkleinert. Anordnung, Drehrichtung, Geschwindigkeit und Anzahl der Walzen können sich unterscheiden und sind patentabhängig. Durch die Walzen zerkleinert, werden die Mineralwollfasern anschließend durch ein senkrecht angebrachtes Gebläse abgelenkt. [43]

Düsenblasverfahren:

Im Düsenblasverfahren wird ein herabfallender Schmelzstrahl durch Platinum- oder Rhodiumdüsen in vertikaler Richtung zerkleinert. Die Schmelze wird daraufhin durch einen Hochgeschwindigkeitsluft-Dampfstrahl in dünne Fasern gezogen. Diese haben eine Länge von 1 m und einen Durchmesser von 15 μm . Es liegt eine kurze Verarbeitungszeit vor. Steinwolle ist durch

den geringen Siliziumdioxid-Anteil kristallisationsanfälliger als Glaswolle. Somit ist für Steinwolle eine kurze Prozesszeit wichtig. [102] Das Düsenmaterial verträgt höhere Temperaturen und kann daher auch in der Steinwollschmelze verwendet werden, im Vergleich zum Spinner des TEL-Verfahrens ist die Düse wesentlich teurer. [99][86]

Abbildung 6
Schematische Abbildung des Zerfaserungselements im Düsenblasverfahren



Quelle: Eigene Darstellung nach den Patenten DE000003509426A1, DE 10 2011 001 643 B4 2017.03.16 und DE 102007020559B4 2012.03.29

Bei Mineralwollämmstoffen, die Schmelzwannenverfahren hergestellt werden, zerfasert die Schmelze nahezu vollständig, so dass wenige bis keine nichtfaserartigen Bestandteile vorhanden sind. Bei Steinwollen hingegen, die bspw. mit Kaskaden-Zerfaserungsmaschinen oder dem Düsen-Blas-Verfahren hergestellt werden können 25-35% nichtfaserige Bestandteile enthalten sein [68]. Diese nichtfaserigen Bestandteile führen zu einer höheren Rohdichte und damit zu einer geringfügig höheren Wärmeleitfähigkeit der Mineralwollprodukte.

2.3.4 Binde- und Schmälmittel

Nachdem die Mineralwollschmelze zerfasert wurde, wird sie beim Herabfallen in einem Fallschacht mit Bindemitteln und Schmälmitteln besprüht. Diese Stelle ist dafür besonders geeignet, da die Fasern möglichst vollständig benetzt werden müssen, bevor sie verhaken oder klumpen [86]. Bindemittel sorgen primär dafür, dass die frisch gesponnenen Fasern nach einem Härtingsprozess in einem festen Verband gebunden werden. Sie sind also maßgeblich für die physikalischen Eigenschaften des Endprodukts verantwortlich.

Bindemittel wird als Dispersion - in der Regel mit Wasser [86] - aufgesprüht und verbindet die Punkte, an denen die einzelnen Fasern aneinander liegen. Das Wasser verdampft und die Erstarrung des Bindemittels beginnt augenblicklich aufgrund der hohen Temperaturen der Mineralfasern und die Fasern werden an den Knotenpunkten unverschiebbar. Nicht alle Fasern werden jedoch verbunden, manche werden nur durch den Faserverbund um sie herum im Produkt gehalten [68], [86].

Der Bindemittelanteil für Mineralwolle schwankt je nach Produkt zwischen 2-8%, wobei 8 % als sehr hoch bewertet wird und allgemein der Bindemittelanteil bei Glaswolle (4-6%) höher ist als bei Steinwolle (1-3,5 %). (vergleiche auch Tabelle 4) Die Elastizität des Produkts wird mit zunehmendem Bindemittelanteil eingeschränkt [86], [68] Mögliche Bindemittel sind:

Organische Bindemittel

- Duroplastisch aushärtende Kunstharze wie Phenol-, Formaldehyd- und Harnstoffharze sowie deren Mischungen. Phenol-Formaldehyd-Harze sind dabei die weit verbreitetsten Bindemittel in der Mineralwollindustrie und Stand der Technik. Harnstoff-Formaldehydharze wurden zur Reduzierung des Formaldehydsanteil in den Bindemitteln entwickelt, wobei Urea ein geeigneter und günstiger Ausgangsstoff darstellt, jedoch zu Geruchsproblemen führte [68], [20], [53], [45]
- Polyesterharze auf der Basis von carboxylierten Polymeren. Die gängigsten enthalten eine Kombination aus einem Acryl(co)polymer und einem niedermolekularen Polyol [68]
 - polymere Polycarbonsäuren, eine aushärtbare, formaldehydfreie, wässrige Bindemittelzusammensetzung [128]
 - Polyacrylsäure (große Mengen Ammoniak werden benötigt, teurer als Phenolharze) [45]
 - Bindemittel auf Acryl- und Wasserbasis, bspw. das Produkt PureOne der Fa. Ursa [121]²
- Bindemittel auf Basis pflanzlicher Bindemittel, beispielsweise auf Zucker- bzw. Kohlenhydratbasis bspw. ein wasserlösliches Polysaccharid wie Dextrin oder Maltodextrin mit Vernetzungsmittel Zitronensäure [45]. Mineralwollen mit diesen Bindemitteln in Reinform befinden sich erst seit den letzten Jahren auf dem Dämmstoffmarkt.
- Es kommt durchaus vor, dass ein Mineralwollprodukt eine Mischung aus mehreren dieser Bindemittel enthält.

Anorganisch Bindemittel

- organisch modifizierte Silane [67]
- Hochtemperaturbeständige anorganische Bindemittel, bspw. Sol-Gel Bindemittel³ [61], [103]

Bindemittel können zudem Katalysator, ein Kupplungsmittel, ein Verarbeitungshilfsmittel, einen Vernetzungsdichteverstärker, ein Streckmittel, ein feuchtigkeitsbeständiges Mittel, ein Entstaubungsmittel, einen Farbstoff, einen Korrosionsinhibitor, ein Tensid, einen pH-Einsteller und Kombinationen davon enthalten. [45]

Zusätzlich werden Schmelzmittel dem Produkt zugegeben, um für Staubminimierung und Hydrophobierung zu sorgen. Bekannte Schmelzmittel sind Mineralöle, Öl-Wasser-Emulsionen und Silikonöle, die nachher 0,5-1% am Endprodukt ausmachen. [53], [86]. Stopfwolle, die in loser Form vorliegt, wird ganz ohne Bindemittel hergestellt und enthält lediglich Schmelzmittel. [86]

2.3.5 Härteofen und Kaschierung

Die Faserlagen werden nach dem Besprühen mit Binde- und Schmelzmitteln auf einem Förderband zu einem watteartigen, feuchten Endlosvlies aus richtungslosen Fasern geschichtet und von dort in einen Härteofen transportiert. Innerhalb dieses Ofens wird das feuchte Mineralwollvlies komprimiert, je nach gewünschter

² Das Bindemittel ist nach telefonischer Aussage des Herstellers in den vergangenen Jahren aus Nachfragegründen zu einem Bindemittel auf Basis nachwachsender Rohstoffe verändert worden.

³ Das Sol-Gel Bindemittel wurde von der Pfeleiderer Dämmstoffe company angewendet, welche von Ursa aufgekauft wurde. Das Bindemittel wird heute noch von der Innomat GmbH hergestellt und bspw. im Dämmstoffmarkt für Öfen verwendet.

Dicke und Dichte des Endprodukts. Innerhalb des Ofens herrschen 200 bis 250 Grad [86], wodurch das Bindemittel pyrolysiert und ein dauerhafter komprimierter Zustand erreicht wird. Der mit dem Bindemittelauftrag begonnene Prozess der Unverschiebbarkeit der Faserknotenpunkte wird hier finalisiert.

Beim Pyrolysieren der Bindemittel entsteht in Abhängigkeit dieses Vorgangs, der Eigenfarbe der Glasschmelze, der nichtfaserigen Bestandteile sowie der Fasergeometrie die schlussendliche Produktfarbe der Mineralwolle. Mineralwollen ohne Bindemittel – auch virgin wool - sind reinweiß bis hellgräulich. [86]

Mögliche Kaschierungen werden unmittelbar vor dem Härteofen oder direkt im Anschluss aufgebracht.

Kaschierungen übernehmen unterschiedliche Funktionen wie beispielsweise Verbesserung der Witterungsbeständigkeit, Abriebfestigkeit, Optik, Haftung und auch Verhindern des Austretens von ungebundenen Fasern.

Produkte ohne Bindemittelauftrag müssen nicht ausgehärtet werden.

Hinter dem Härteofen sind verschiedene Schneide- und Sägeeinrichtungen installiert. Zum einen um das Endlosvlies in die spätere Rollen- oder Plattenlänge zu unterteilen. Zum anderen um den unsauberen Rand beidseitig des Vlieses abzuschneiden. Die daraus anfallenden Mineralwollreste, der sogenannte Verschnitt, betragen ca. 3-5% der produzierten Mineralwollmenge [86], [68]. Da dieser chemisch exakt dem herzustellenden Produkt entspricht und mit Ausnahme der Binde- und Schmelzmittel und ggf. einer Kaschierung keinerlei Verunreinigung enthält, wird dieser Verschnitt in der Regel werksintern wieder in den Prozess zurückgeführt. Dazu wird das Material zerkleinert, in einem Silo zwischengelagert und anschließend dann zurückgeführt über

- Schmelzzyklon: Dieser ist oberhalb der Schmelzwanne angeordnet. Die zerfaserte Mineralwolle fällt durch den temperierten Zyklon, wobei organische Anhaftungen sowie das Bindemittel verbrannt werden. Hier besteht die Möglichkeit auch für künftige Recyclingideen anzusetzen. Es kann noch geringfügig Einfluss über die Schmelzwanne und Zudosierung genommen werden (siehe auch Abbildung 4, Option 2).
- Zugabe der Mineralwolleflocken nach dem Bindemittelauftrag. Auch diese Option kann für ein Recycling angesetzt werden. Allerdings kann hier kein Einfluss mehr auf die Produktchemie genommen werden, weswegen das zu rezyklierende Material exakt dem Zielprodukt entsprechen muss (siehe auch Abbildung 4, Option 3).

Die Mineralwolle wird anschließend zu der gewünschten Größe und Form mittels Kreissägen oder Hochdruckwasserstrahlen geschnitten. Hier können ebenfalls Kaschierungen oder eine Beschichtung auf das Produkt aufgebracht werden. Das Endprodukt wird dann meistens für den Transport noch einmal komprimiert und in Folie eingeschweißt.

3. Mineralwollrecycling und aktuelle Hindernisse

3.1 Aktuelles End of Life von Mineralwolle

Nach dem derzeitigen Stand fällt Mineralwolle, die für einen Recyclingprozess in Frage kommt, hauptsächlich

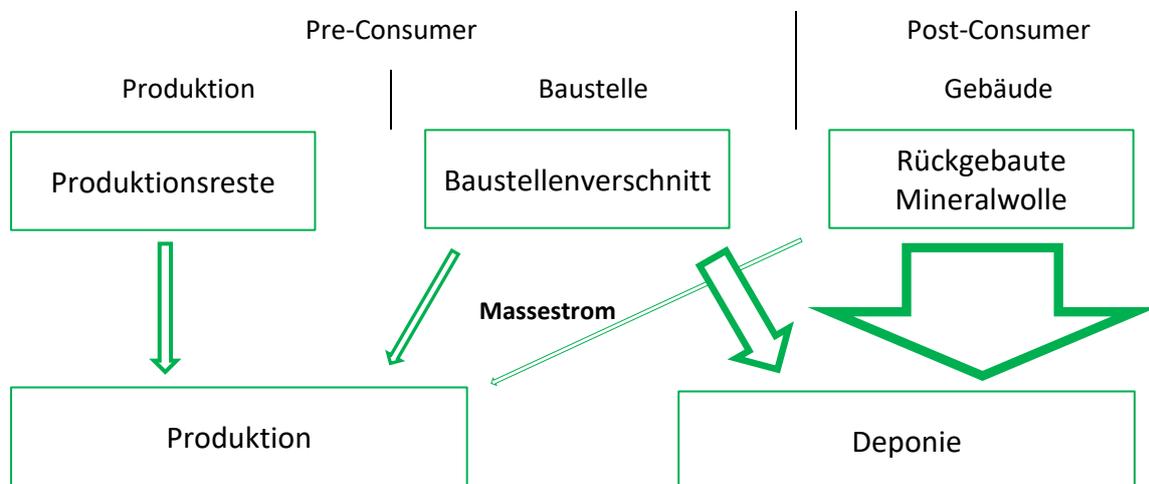
- bei der Produktion von Mineralwolle (Produktionsreste)
- bei der Herstellung von Gebäuden (Baustellenverschnitt) und
- bei Instandsetzung, Modernisierung, Rückbau und Abriss von Gebäuden an (rückgebaute Mineralwolle).

Produktionsreste werden heute der Produktion wieder zugeführt (vgl. 2.3 Herstellprozess für Mineralwolle im Schmelzwannenverfahren). Dazu werden die Produktionsreste innerhalb des Betriebes aufgemahlen und in den Produktionsprozess zurückgeführt.

Baustellenverschnitt kann ebenfalls weitestgehend wieder der Produktion zugeführt werden. Dafür bieten inzwischen alle namhaften Hersteller Verfahren an. Im weitesten Sinne handelt es sich bei Produktionsresten und Baustellenverschnitt um industrielle Nebenprodukte, die bei Einhaltung von üblichen Produktions- und Bauprozessen sortenrein, ohne Verunreinigungen und mit zugelassenen Fasertypen vorliegen (weiterführend 3.2 Hindernisse im Mineralwollrecycling und [126]) Dennoch werden diese Baustellenrestmassen weitestgehend deponiert.

Ebenso wird die Mineralwolle, die bei der Instandsetzung bzw. Modernisierung, Rückbau und Abriss von Gebäuden anfällt, fast ausschließlich Deponien zugeführt.

Abbildung 7
Schema Entsorgung von Mineralwolle



Quelle: Eigene Darstellung

Baustellenverschnitt

Um den Baustellenverschnitt zu recyceln, wird von den Herstellern ein Rücknahmeservice angeboten, der prototypisch in folgenden Schritten abläuft [44]:

- im Zuge des Kaufs des Mineralwolleproduktes werden BigBags des Herstellers erworben
- der Baustellenverschnitt wird während des Baus in den BigBags gesammelt
- bei Anlieferung von neuer Mineralwolle werden die gefüllten BigBags zum Händler mitgenommen

- beim Fachhändler werden die BigBags gesammelt und bei Anlieferung von neuer Mineralwolle vom Hersteller zum Werk zurückgeführt

Um die rechtlichen Anforderungen sowie die Anforderungen die an den Produktionsprozess zu erfüllen, ist es dabei notwendig, dass die Mineralwollreste ohne Verunreinigungen und sortenrein gesammelt werden. Durch die Nutzung des Händlernetzes können Leerfahrten beim Transport vermieden werden, wobei der Transport bei Belieferung von größeren Baustellen durch den Hersteller auch ohne den Zwischenhändler direkt erfolgen kann. Die Händler fungieren als Sammelstelle, die die regionale Abdeckung und die optimale Auslastung der Transporte sicherstellen. Durch den Verkauf der BigBags werden die Kosten für die Rückführung umverteilt, dabei können etwa 170 kg Steinwolle pro BigBag, der ein Volumen von ca. 1,7 m³ aufweist, rückgeführt werden [8]. Für eine durchschnittliche Glaswolle mit 25kg/m³ entspräche dies 42,5 kg.

Tabelle 5
Nettokosten 2023 der Hersteller von Mineralwolle für BigBags nach [23]

Materialvolumen ¹	Nettokosten pro BigBag	Einmaliger Mindermengenzuschlag
bis 7,5 m ³		500 €
bis 15 m ³	100 €	300 €
ab 15 m ³		

¹mit Befüllungsgrad von 87%

Der größte Anteil des Baustellenverschnitts wird derzeit aber noch deponiert. Die Firma Rockwool gibt die über ihr Recyclingsystem rückgeführte Steinwolle für 2021 mit 12.000 t an, was schätzungsweise bei einem Verschnitt von 5% einem Anteil von 25 M.% des Baustellenverschnitts von Mineralwolle entsprechen würde [44].

Zurückgebaute Mineralwolle

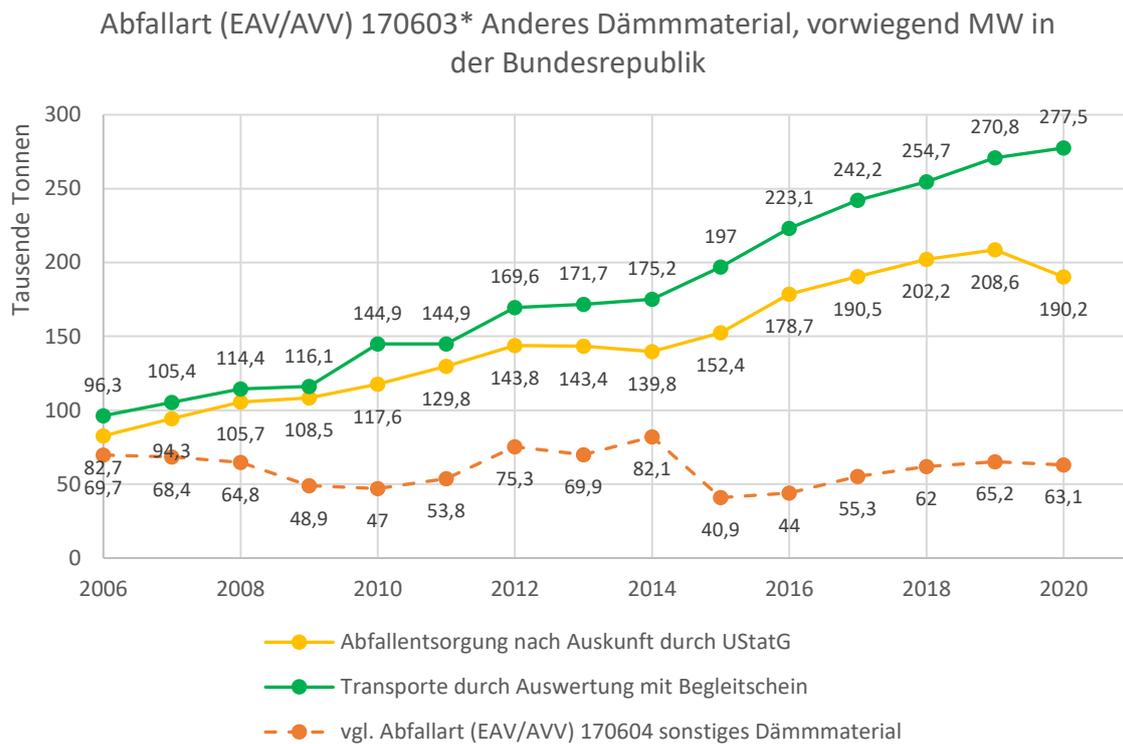
Der größte Anteil von Mineralwolle, deren Potential für einen Recyclingprozess gehoben werden muss, fällt bei Instandsetzung, Modernisierung, beim Rückbau sowie Abriss von Gebäuden an. Obwohl vereinzelt von den Herstellern Rücknahmekonzepte angeboten werden, wird die anfallende Mineralwolle aufgrund der Restriktionen bei der Herstellerrücknahme fast ausschließlich als Abfall deponiert.

In Deutschland wurde 2020 nach Erhebung der Daten entsprechend des Umweltstatistikgesetzes (UStatG) 190.200 t Dämmmaterial mit der Sonderabfall-Schlüsselnummer (EAV/AVV) 170603* den Abfallanlagen zugeführt. Während davon ausgegangen werden kann, dass unter dieser Schlüsselnummer fast ausschließlich Mineralwolle entsorgt wurde, ist bei der Schlüsselnummer (EAV/AVV) 170604 der Anteil von Mineralwolle nicht bekannt. Die Auswertung der Transporte von Abfall mit der Schlüsselnummer (EAV/AVV) 170603* ergeben dagegen für 2020 277.500 Tonnen [29]. Dies korrespondiert mit den Zahlen 200.000 bis 300.000 Tonnen, die in der Literatur genannt werden [126]. Je nach Datengrundlage verzeichnet die Schlüsselnummer (EAV/AVV) 170603*, unter der Mineralwolle ohne Nachweis als Abfall gesammelt wird, seit 2006 eine jährliche lineare Steigerung von 8.800 bis 14.000 Tonnen. Dagegen weist der Abfall unter der Schlüsselnummer (EAV/AVV) 170604, unter der nachgewiesene neue Mineralwolle gesammelt werden kann, keine lineare Steigerungsrate auf. Ursächlich könnte zum einen die Lebensdauer von mehr als 30 Jahren von Baukonstruktionen mit Mineralwolle sein, womit erst in den nächsten Jahren mit einer Erhöhung zu rechnen ist. Zum anderen könnte eine Ursache die mit Kosten verbundene notwendige Nachweisführung sein, dass es sich um neue Mineralwolle handelt, so dass diese dennoch unter (EAV/AVV) 170603* entsorgt wird.

Im Vergleich zur jährlichen Produktion entsprechen die erfassten rückgebauten Mengen etwa 1%. Prognosen gehen aber davon aus, dass in den nächsten Jahren sich die Abfallmenge exponentiell steigern wird. Das

Forschungsinstitut für Wärmeschutz prognostiziert für EPS-Dämmung, dass in 40 bis 50 Jahren die jährliche Abfallmenge gleich der Jahresproduktion sein wird [2]. Ähnliches darf auch für Mineralwollendämmung angenommen werden, da das Verhältnis zwischen Absatz EPS-Dämmung zu Mineralwollendämmung seit vielen Jahren weitestgehend stabil ist und die Dämmungen am Gebäude ähnlichen technischen Lebensdauern unterworfen sind.

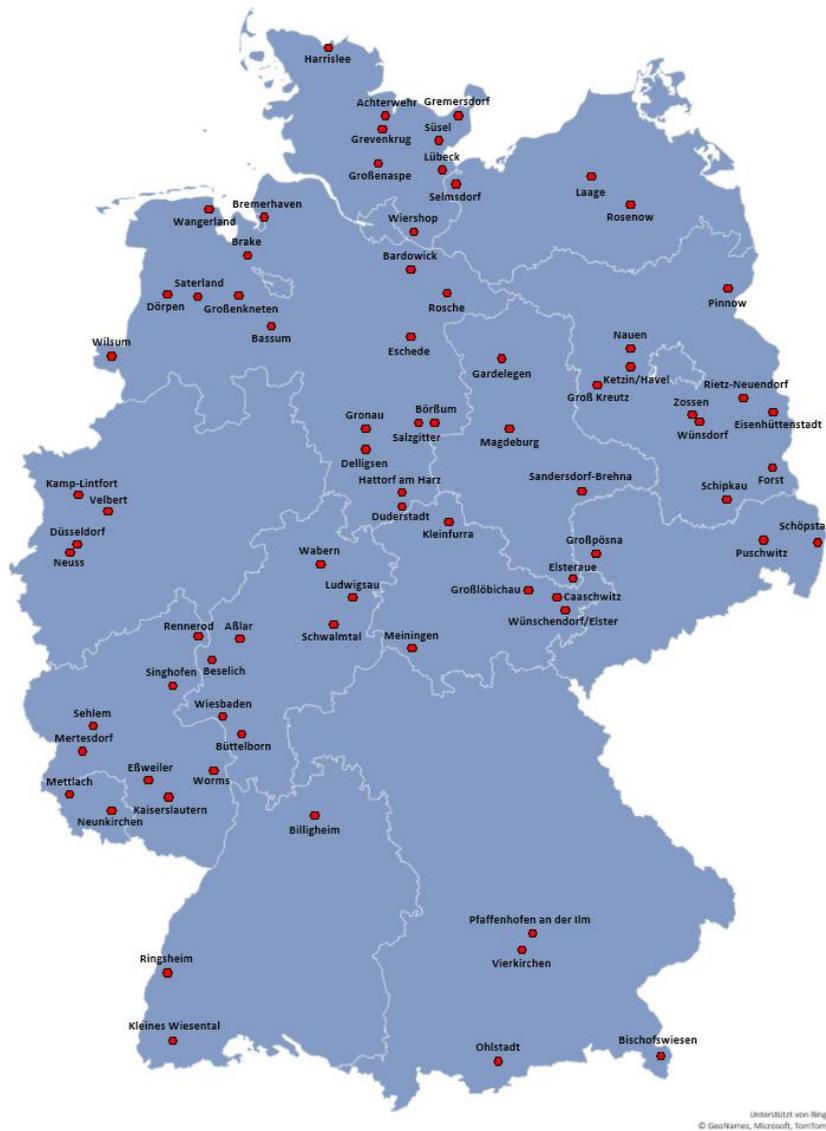
Abbildung 8
Abfallart (EAV/AVV) 170603* Anderes Dämmmaterial, vorwiegend MW in der Bundesrepublik nach [29]



Quelle: Eigene Darstellung

Nach Aussage der Umweltämter der Länder nehmen derzeit im Bundesgebiet 70 Deponien der Deponiekategorie I und II Mineralwolle an. Bei der geographischen Verteilung fällt auf, dass es in den Neuen Bundesländern überdurchschnittlich viele Deponien gibt.

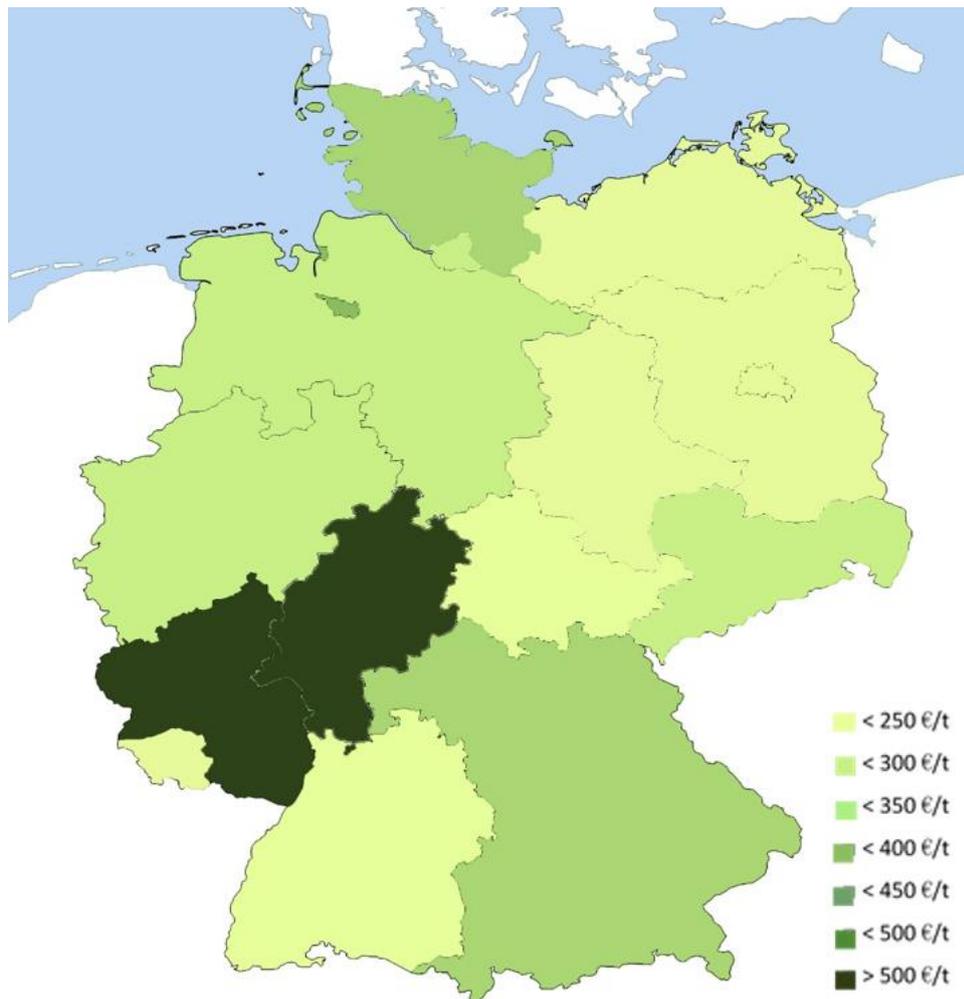
Abbildung 9
Übersicht der befragten Deponien



Quelle: Eigene Darstellung

Die Deponiedichte könnte erklären, dass in Ostdeutschland die Preise für die Annahme mit durchschnittlich 245 € deutlich niedriger liegen als der Bundesdurchschnitt. Der durchschnittliche Annahmepreis in Deutschland liegt derzeit bei 308 €/t. Damit ergibt sich eine durchschnittliche jährliche Preissteigerung seit 2017 von 8,4%. [126]

Abbildung 10
durchschnittliche Deponiepreise für EAV 170603* nach Bundesländern



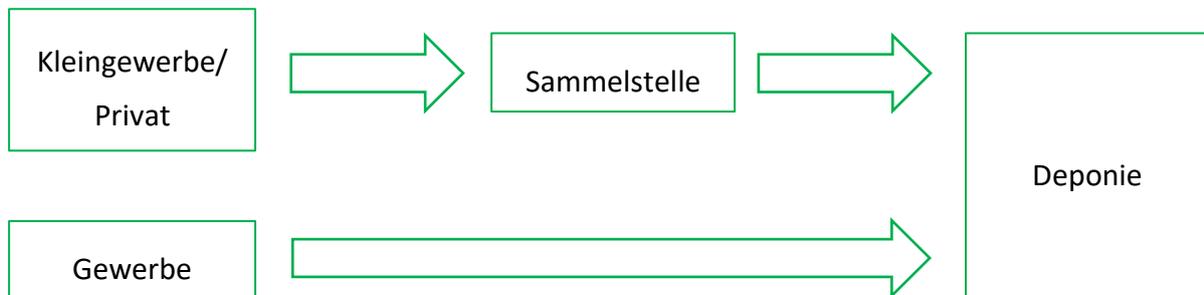
Quelle: Eigene Darstellung

Die derzeitigen Vorteile einer Deponierung von Mineralwolle liegen in der Nutzung des gut ausgebauten dezentralen Entsorgungssystems und der Deponiedichte. Dadurch ergeben sich kurze Entfernungen zwischen dem Versender und dem Empfänger, wodurch die Transportkosten geringgehalten werden. Stichproben anhand von zwei Bundesländern ergab eine durchschnittliche Entfernung der Deponien zueinander von 70 km, d.h. eine Deponie ist mit einer Entfernung von 35 km zu erreichen.

Zu dem vorhandenen Entsorgungssystem kommen Sammel- und Umschlagsplätze in Form von Wertstoff- und Recyclinghöfen mittels denen die Transportmengen optimiert werden hinzu. In Großstädten wie Berlin beträgt die Entfernung zwischen den Sammelstellen 12 km. Aber auch in ländlichen Gebieten lagen nach Stichproben die Sammelstellen nur 30 km voneinander entfernt, so dass jeder Absender eine Wegstrecke von 6 bis 15 km benötigt. Üblicherweise begrenzen Wertstoff- und Recyclinghöfe ihre Kundschaft auf Privatpersonen und Kleingewerbetreibende. Auftragnehmer von Großbaustellen seien es klassische Baubetriebe oder Entsorgungsunternehmen transportieren üblicherweise direkt zur Deponie. Im Zuge des vermehrten selektiven Rückbaus und der Verringerung von vorhandenen Baustellenflächen lässt sich eine Tendenz vom Anlieferungssystem zum Abholungssystem beobachten. Beim Abholssystem werden Container zur separaten Sammlung bereitgestellt und vom Entsorger abgeholt.

Zukünftig wird die Deponieanzahl weiter abnehmen und damit setzt sich eine allmähliche Zentralisierung fort. Schon heute gibt es Entsorgungsunternehmen, die mehr geschlossene Deponien in der Nachsorge betreiben als offene Deponien. Damit ist zu erwarten, dass die Kosten für den Transport und die Annahme des Abfalls in den nächsten Jahren über der allgemeinen Preissteigerung liegen werden.

Abbildung 11
Schema derzeitiges End-of-Life-Szenario



Quelle: Eigene Darstellung

Vergleich zum Recycling von Kunststofffenstern

Bei Kunststofffenstern hat sich ein Recyclingmarkt mit einer Recyclingquote von ca. 37% für Glas und ca. 70% für Kunststoffrahmen etabliert. [138]

Geht man vom statistisch erhobenen Abfallschlüssel 170202 aus, liegt das Potential von rückgebautem Glas mit 260.000 Tonnen im Jahr 2016 in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der Entsorgung von Mineralwolle. Die Entwicklung der Industrie erfolgte aber im Zuge des Recyclings von Glasbehältern; deren Markt lag 2016 bei 2.210.000 Tonnen (EAV/AVV 150107) [29] Das Statistische Bundesamt befragte 2016 für Verpackung 129 Entsorger und für Bauglas (EAV/AVV 170202) 255. Damit ist bei Glasrecycling eine Flächenabdeckung des Bundesgebietes gegeben. Dies wird von ift Rosenheim bestätigt; nach deren Umfrage 69% der Gebäudehüllenglasmenge bei den Recyclern aus der näheren Umgebung bis 100 km stammt. Weitere 28% sind aus der Umgebung bis 300 km. Die Transportkosten an dem erzielbaren Preis des Rezyklats von 80-90 €/t liegen dennoch zwischen 20 und 33 %.[95]

Obwohl der Markt für recyclebare Kunststofffensterrahmen mit 50.000 Tonnen im Jahr 2018 vergleichsweise gering ist, wurde maßgeblich durch die Recycling-Initiative, in der 89 Unternehmen aus Herstellern, Recyclern, Logistikpartnern und Annahmestellen vernetzt sind, das Recycling vorangetrieben. Um die Wirtschaftlichkeit des Transports zu erreichen, wird mit 69 regionalen Annahmestellen zusammengearbeitet, die als Sammelstelle zwischen Rückbau und Recyclingbetrieb agieren.

Bei Kunststofffenstern haben sich drei End-of-Life-Szenarien in Abhängigkeit zum Rückbau etabliert: Entsorgung über den Baumischabfall, von vollständigen Fensterelementen und von teilfraktionierten Fensterelementen. Die Entsorgung über den Baumischabfall wird vorwiegend bei geringen Rückbaumengen genutzt und führt über die Trennung mittels Sortieranlage zur thermischen Verwertung, mittels Aufbereitungsanlage zur stofflichen Verwertung und zur Deponierung. Bei vollständigen Fensterelementen, die vor allem durch die frühzeitige Einbindung der Entsorgungsbetriebe beim Rückbau entsteht, wird bei der Fraktionierung durch den Entsorgungsfachbetrieb Rahmen und Flachglas getrennt. Die entstehenden zu deponierenden Sortierreste sind minimiert. Die entstehenden Glas- und Rahmenfraktionen werden über Aufbereitungsanlagen zu Flachglas- und PVC-Rezyklat verarbeitet. Bei teilfraktionierten Fensterelementen folgt der Materialkreislauf weitestgehend den Fall der vollständigen Fensterelemente. Allerdings ist hier die jeweilige Quote der Deponierung, thermischen und stofflichen Verwertung ganz erheblich der unmittelbar in der Nähe vorhandenen Entsorgungsinfrastruktur unterworfen.

3.2 Hindernisse im Mineralwollrecycling

Die hier benannten Hindernisse stellen einen Zusammentrag dar aus den vorhergehenden Kapiteln, Literatur und Interviews mit Mineralwollherstellern.

Wie eingangs beschrieben stellen Mineralwollen, die vor dem Jahr 2000 produziert worden sind, ein potentiell Gesundheitsrisiko dar. Zum einen führt das dazu, dass im Umgang mit diesem Baustoff besondere Schutzmaßnahmen für alle Akteure im direkten Kontakt mit dem Baustoff oder der von ihm kontaminierten Luft entlang des gesamten Prozesses ergriffen werden müssen. Das macht aktuell den Rückbau aufwendiger und dadurch wesentlich kostspieliger. Die gleichen Aspekte wären bei einem künftigen Recycling zu betrachten. Aktuell wird Mineralwolle nach seinem Ausbau in luftdichten Bigbags verpackt. Zur weiteren Verwertung und Voruntersuchung müssten die Mineralwollen diesen wieder entnommen werden. Alle weiteren Personen und Anlagen sind entsprechend für den Umgang mit alter Mineralwolle zu schützen / auszustatten bis das Produkt derart verarbeitet ist, dass keine Faserfreisetzung mehr zu erwarten ist.

Darüber hinaus wurden beim Wechsel von „alter“ zu „neuer“ Mineralwolle die chemische Zusammensetzung der Mineralwollen geändert (vgl. u.a. Tabelle 2). Insbesondere beim Wiederverwerten in der Mineralwollindustrie spielt dies eine Rolle für die einzuhaltende Zielchemie.

Nicht zuletzt gilt Mineralwolle, die als Baustellabbruchmaterial einer Verwertung oder Verwendung zugeführt werden soll, unabhängig ihres Alters als Abfall. Nach KrWG §5 Abs.1 verliert die Mineralwolle ihre Abfalleigenschaft erst, wenn

- sie für bestimmte Zwecke genutzt wird (Verwertungsabsicht),
- es einen Markt für Mineralwolle zur Verwertung gibt oder Nachfrage danach besteht,
- sie alle technischen Anforderungen, Rechtsvorschriften und anwendbaren Normen erfüllt und
- die Verwendung / Verwertung nicht zur Schädigung von Menschen und Umwelt führt.

Es liegt nahe, dass aus diesem Grund die meisten der nachfolgend beschriebenen Forschungsvorhaben mit neuer Mineralwolle gearbeitet haben. Zudem ist es aus forschender Sicht daher auch schwierig an Probenmaterial alter Mineralwollen zu gelangen. Die meisten Baustellen und Wertstoffhöfen erlauben aus gesundheitsschutztechnischen bzw. rechtlichen Gründen keine Entnahme von alter Mineralwolle. Unternehmen, die mit Mineralwolle von Abbruchvorhaben arbeiten wollen, benötigen aktuell gleichzeitig auch immer eine abfallrechtliche Genehmigung, zumindest zum Transport und der Annahme sowie bei einer ersten Verwertung des Baustoffs.

Neben den gesundheitsspezifischen und abfallrechtlichen Belangen ist es bei Mineralwolle aus Abbruchvorhaben in der Regel auch so, dass sie mit Fremdstoffen verunreinigt sind. Aus forschender Sicht erschweren die Fremdstoffe eine zuverlässige Aussage über die Eignung der Mineralwolle selbst als Substitut oder Sekundärrohstoff. Gleichwohl ist im Rahmen von Forschung zum Mineralwollrecycling dieser Aspekt besonders wichtig und soll daher auch bei der nachfolgenden Vorstellung der bestehenden Recyclingstrategien berücksichtigt werden.

Das Thema der Verunreinigungen und Störstoffe sollen daher im Rahmen dieses Forschungsprojekts noch einmal gründlich analysiert werden, denn daraus erwachsen wirtschaftliche Hindernisse, die sich in der langen Zeitachse der zur Entwicklung eines Recyclingsystems widerspiegeln:

Recherchen beim Patentamt zeigen, dass bereits 1983 Verfahren zum Aufbereiten von Mineralwolle entwickelt wurden [34]. Seit 1994 bietet ein Steinwolleproduzent die Rücknahme von Baustellenverschnitt an [126]. Weitere 13 Jahre später wurde das System für anfallende Steinwolle des Herstellers von Flachdachsanierungen erweitert. Das Angebot ist an den Kauf von neuen Produkten, an die Sortenreinheit des Altdämmstoffs und die fachgerechte Verpackung gekoppelt [8]. Seit 2014 fördert ZukunftBau verstärkt die Entwicklung von Nachhaltigkeitskonzepten in der Dämmstoffindustrie.

Die Aufbereitung von Post-Consumer Mineralwolle zur Wiederverwertung in der Ziegelindustrie scheiterte wirtschaftlich 2012 [137]. Eine Weiterentwicklung von Forschungen im Labormaßstab von 2009 zur Erzeugung von Schlacken aus alter Mineralwolle mittels Microwellenbehandlung, bezüglich der Weiterverarbeitung dieser Schlacken ist nicht bekannt [78].

Diese Forschungs- und Erprobungszeitspanne verdeutlicht geringe Erwartungen und Erfolgsaussichten auf ein wirtschaftlich tragfähiges Konzept, womit auch die Frage der Akzeptanzkriterien für die Akteure einhergeht. Folgende wirtschaftliche Hindernisse im Detail sind identifiziert:

- die derzeit noch zu erwartenden relativ geringen Abfallmengen
- die derzeit noch preisgünstige Konkurrenz in Form der Deponien und der Rohmaterialien zur Herstellung
- der Aufbau bzw. die Nutzung eines Entsorgungsinfrastrukturnetzes zur Aufbereitung und
- fehlendes Risikokapital als Investition zur Entwicklung der aufwendigen Aufbereitungsverfahren aufgrund der Störstoffe.

3.3 Übersicht über bestehende Recyclingkonzepte im offenen Kreislauf

Zunächst soll der Status Quo im Mineralwollerecycling analysiert werden. Bestehende Konzepte aus Forschung und Praxis werden beschrieben und dahingehend geprüft, ob die Recyclingstrategie geeignet ist für Mineralwolle aus Abbruchvorhaben, bei der mit Störstoffen zu rechnen ist, für Mineralwolle, deren chemische Zusammensetzung nicht bekannt ist oder die ggf. vor dem Jahr 2000 verbaut wurde und für Glas- bzw. Steinwolle. Zusammenträge verschiedener Forschungsvorhaben zum Mineralwollerecycling haben auch [101], [123] und [134] durchgeführt. Innerhalb dieses Berichts werden die Ansätze aufgeführt, die einen Bezug zum Bauwesen haben, bereits Stand der Technik sind oder aufgrund des möglichen Mengenumsatzes vielversprechend klingen.

Bergversatz

Hohlräume, die in Folge von Grubenarbeiten zur Förderung unterschiedlichste Rohstoffe entstanden sind, werden zur Stabilisierung mit Versatzbaustoffen verfüllt. Natürliche Rohstoffe dürfen dafür nicht verwendet werden (bergrechtliche Versatzpflicht). Häufig verwendete Materialien für Versatzbaustoffe sind Filterstäube oder Flugaschen.

In Deutschland existiert ein Patent [42], welches mineralisch gebundene Mineralwollfasern, als Versatzstoff vorsieht. Gemäß Patent können Mineralwollfasern, die zugunsten einer höheren Schüttdichte ($> 0,15 \text{ g/cm}^3$) zerkleinert werden, mit Hilfe von Bindemittelsuspensionen zu einem geeigneten Bergversatzmaterial entwickelt werden. Als Bindemittel kommen unter anderem Zement, Gips, Kalkbinder und Sorelbinder in Frage oder aber die bereits benannten Filterstäube und Flugaschen. Abhängig vom Verhältnis der Bindemittelsuspension zum Mineralfaseranteil erhält man entweder eine pumpfähige oder eine erdfeuchte Masse, die noch verdichtet werden muss. Unabhängig der Verarbeitbarkeit härtet die Mischung selbstständig unter normalen Randbedingungen aus. Das Verhältnis von Bindemittel zu Mineralfaseranteil kann zwischen 5:1 bis 1:5 schwanken, als bevorzugt wird ein Bereich von 3:1 bis 1:1 angegeben. Der notwendige Wasseranteil kann aus abfallbasierten wässrigen Lösungen bestehen.

Auch eine Forschergruppe aus Österreich beschreibt Versatzstoffe aus mineralisch gebundener Mineralwolle als für den Bergversatz geeignet. Das Projekt forscht aktuell grundlagenbasiert zu pumpfähigen Versatzprodukten aus Mineralwolle. [127]

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle	Möglich, sofern Technik nicht beschädigt wird
... unbekannte Mineralwollchemie	Möglich, aber nicht empfohlen
... alte Mineralwolle	Durch den Bergversatz wird das Material gemäß Patent von der Biosphäre abgegrenzt und somit eine alternative Verwertung gemäß TRGS 905 sichergestellt.
... Glas- und Steinwolle	Ja
Status	Patent in Deutschland / Firmengründung ⁴

Mörtel und Beton

Bei der Recherche zur Weiterverwertung oder -verwendung von Mineralfaserprodukten wurden insbesondere der Einsatz von künstlichen Mineralfasern zu Verbesserung bestimmter Produkt- und Stoffeigenschaften vorgefunden. Eine ganze Reihe von Studien beschäftigt sich mit dem Einsatz von Mineralfasern in Mörtel- oder Betonrezepturen. Fokus der Arbeiten ist dabei aber immer das Stoffverhalten und weniger der Recyclingaspekt der Mineralfasern. Dieser wird eher als positive Nebeneigenschaft verstanden. Die nachfolgende Auflistung ist nicht abschließend.

Puzzolanische Materialien werden in der Betonherstellung eingesetzt um den Zementgehalt zu reduzieren. Wegen seiner Ausgangschemie (vgl. Tabelle 2) eignet sich Mineralwolle für puzzolanische Reaktionen. Wird Mineralwolle mit Zement zu einem Mörtel oder Beton vermischt, verändert es die Eigenschaften sowohl des Frischbetons als auch des ausgehärteten Betons.

Eine der Studien ersetzte beispielsweise bis zu 20 % des Zements durch Steinwolle und erzielte eine gesteigerte Frischbetonausbreitung sowie eine verlängerte Induktionsperiode der Zementhydratation. [71]

Sich ändernde Eigenschaften beim ausgehärteten Beton sind dahingegen unter anderem Dichte und Porosität [87], [94]. Glas- als auch Steinwollereste können auch direkt als Ersatz von Gesteinskörnungen wiederverwendet werden. Hierfür sind in [66] und [67] die mechanischen und strukturellen Eigenschaften eines Referenzbetons mit Betonen, bei denen zwischen 30% und 50% des Volumens an Gesteinskörnung durch Glas-, Steinwolle oder ein Gemisch beider Mineralwollen ersetzt wurden, verglichen worden. Der Referenzbeton bestand aus Portlandzement CEM II/B-L 32.5N zu einem w/z-Wert von 0,6 und Flusssand eines Korndurchmessers von 4mm. Eine weitere Erhöhung des Mineralwolleanteils führte zu einer erschwerten Verarbeitbarkeit des Betons. Geringe mineralische Verunreinigung der Dämmung ergaben keinen negativen Einfluss.

Einen positiven Einfluss auf Druck- und Biegefestigkeit, Absorption, Abriebfestigkeit, Widerstand gegen Eindringen von Chloriden stellten [25] fest

Im Rahmen einer Studie [51], die den Einfluss von Polyamid- sowie Mineralfasern in Mauerwerksmörteln untersucht, wurde auch das Elastizitätsverhalten einer Mörtelmischung, der Mineralwollfasern zugesetzt wurden, getestet. Einem Mörtel mit Mischverhältnis (CEM II / Sand / Wasser 1 : 3 : 0,6) wurden in Tastversuchen 30% Fasern einer Mineralwolle zugesetzt. Dabei wurde einmal Steinwollefasern, einmal Glaswollefasern und einmal eine Mischung aus beiden zugesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zu einem Referenzmörtel bis zu 20% geringere Steifigkeit erreicht wurde und der mineralfaserversetzte Mörtel ein gutes duktilen Verhalten aufweist. Am günstigsten wirkte sich die Glaswolle aus. [90]

Ein anderer Ansatz ist das Verwenden von Stäuben aus der Steinwolleproduktion im Kupolofen um Mikrosilikazusätze in Feuerfestbetonen zu substituieren. [116]

⁴ 3 RE:CYCON GmbH, www.3r-recycon.de/abfallbehandlungsanlage, zuletzt besucht am 23.02.23

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle	Wurde nicht geprüft, Einfluss auf Abbindeverhalten ist anzunehmen
... unbekante Mineralwollchemie	Unterschiedliches Verhalten in Abhängigkeit der Mineralwollchemie
... alte Mineralwolle	Wurde nicht geprüft, Fasern werden in Zementmatrix gebunden
... Glas- und Steinwolle	Ja
Status	unbekannt

Geopolymere

Unter Geopolymeren werden anorganische Bindemittel aus netzwerkartigen Silizium-Aluminiumverbindungen verstanden, die durch das Vermischen von mineralischen Rohstoffen mit alkalischen Lösungen entstehen. Geopolymere bilden dabei nur eine Untergruppe der alkalisch aktivierten Bindemittel. [28]-[105]

Ausgangsbasis für die Polymerisation sind Ausgangsmaterialien, die Silizium- und Aluminiumoxide enthalten, die unter alkalischen Bedingungen zu polymeren amorphen und semikristallinen Si-O-Al Verbindungen reagieren. [65] Die meistbenutzten Ausgangsstoffe für die alkalische Aktivierung sind Metakaolin, Flugasche und Schlacken aus der Industrie [35].

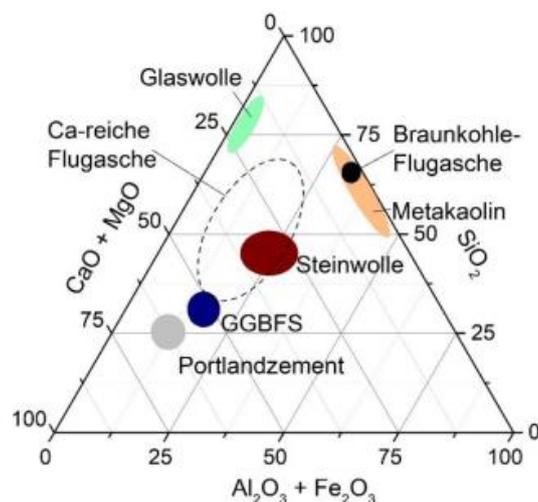
Die Aktivierung erfolgt in der Regel mit Natriumhydroxid, Kaliumhydroxid, Natriumsilikaten oder Kaliumsilikaten [3]. Rohstoff und Aktivator müssen aufeinander abgestimmt werden. Durch die chemische Aktivierung der Aluminosilikate entsteht ein gehärtetes Material, welches ähnliche Eigenschaften wie herkömmlicher Portlandzement hat und diesen potentiell ersetzen kann.

Verschiedene Studien – bspw. [66], [84], [132], [135] - zeigen nun, dass sich Mineralwolle als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Geopolymeren eignet, da sie

- ausreichende Mengen an löslichen Silizium- und Aluminiumverbindungen besitzt [66] und
- eine amorphe Struktur aufweist, welche eine hohe Reaktivität verspricht [84]

Abbildung 12

Dreiecksdiagramm zur Einordnung von Mineralwolle im Vergleich mit anderen alkalisch aktivierbaren Materialien und Bindemitteln



Quelle: Eigene Darstellung nach [66] und [84] aus [73]

In Fachkreisen wird auch oftmals zur Differenzierung zu konventionellen Geopolymeren, der Begriff "alkalisch aktivierte Mineralwolle" verwendet.

Nach Untersuchungen durch [135] hat organisches Bindemittel von Mineralwolle keinen oder möglicherweise einen positiven Einfluss auf die Druckfestigkeit der alkalisch aktivierten Mineralwolle. Allerdings handelt es sich hierbei um Tastversuche und auch andere Forschungsteams treffen eher Annahmen und konstatieren, dass weiterer Forschungsbedarf diesbezüglich besteht [66].

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle	Nein, wobei positive Effekte durch Organik des Bindemittels beobachtet wurden
... unbekannte Mineralwollchemie	Nein, Aktivator muss auch Chemie der Mineralwolle eingestellt werden
... alte Mineralwolle	Ja
... Glas- und Steinwolle	Ja, wobei Steinwolle bessere Ergebnisse (Druckfestigkeit) zeigt
Status	Erste Geopolymerprodukte aus Mineralwolle auf dem Europäischen Markt zugelassen / zur Marktreife entwickelt <ul style="list-style-type: none"> ▪ Akustik Deckenpanel von Saint-Gobain Ecophon Schweden⁵ [50] ▪ Weber geopolymerbasiertes Bindemittel (Trockenmischung) [70]

Blähton und leichte Zuschlagsstoffe

Nach Aussage verschiedener Abfallaufbereiter lassen sich zu Flocken zerkleinerte Mineralwollabfälle sehr gut in der Herstellung von Blähtonen verwenden. [22], [118] Den Autoren dieses Berichts liegen keine wissenschaftlichen Ausarbeitungen hierzu vor.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	nein
... unbekannte Mineralwollchemie	ja
... alte Mineralwolle?	Faserfreisetzung wurde nicht überprüft
... Glas- und Steinwolle?	ja
Status	Keine Anwendung bekannt

Steinwollgranulat

[24] stellt ein chinesisches Patent für ein Verfahren dar, bei dem Steinwolleabfall mit einer Schneckenmühle zerkleinert und anschließend mit Bindemittel wie bspw. Gips oder Zement trocken verpresst wird. Das so entstehende Gemisch kann dann für verschiedene Zwecke der Baubranche eingesetzt werden.

⁵ Patentgrundlage EP3617172A1 - Verfahren zum Recycling von Mineralwolle, Verfahren zur Herstellung von Akustikplattenelementen und solch ein Akustikplattenelement

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	teilweise
... unbekannte Mineralwollchemie	nein
... alte Mineralwolle?	möglich
... Glas- und Steinwolle?	Steinwolle
Status	Nicht bekannt

Keramische Baustoffe

[88] legen dar, dass Mineralwolle geeignet ist, um das in der Keramikherstellung als Hilfsmittel zu Magerung verwendete Material Quarz teilweise zu substituieren. Die Beigabe von Glaswolle hat zu einer starken Verbesserung der physikalischen, mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften geführt. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um die Erhöhung der Druck- und Biegefestigkeit sowie die Verringerung der Feuchtigkeitsaufnahme der keramischen Baustoffe. Negativ hat sich eine Erhöhung des Schwindens gezeigt. Neben den veränderten Eigenschaften ist außerdem eine niedrigere Temperatur beim Sintern erforderlich gewesen, was eine Einsparung an Energie beim Herstellungsprozess ermöglicht.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	Versuche mit Produktionsrückständen, Proben wurden mit 500°C vorbehandelt (keine Organik mehr)
... unbekannte Mineralwollchemie	Muss bekannt sein
... alte Mineralwolle?	Wurde nicht geprüft
... Glas- und Steinwolle?	Nur Glaswolle geprüft
Status	Noch in der Forschung

Holzwerkstoffplatten

In einer Studie von [74] konnte gezeigt werden, dass die Zugabe von Steinwollfasern in Holzfaserverplatten deren mechanischen Eigenschaften beeinflusst, das Quellvermögen reduziert und das Feuerwiderstandsverhalten verbessert. In der Versuchsreihe wurden bis zu 20% Mineralwolle hinzugegeben.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	Nicht untersucht
... unbekannte Mineralwollchemie	ja
... alte Mineralwolle?	Faserfreisetzung wurde nicht überprüft, Einbindung über Bindemittel möglich. Holzfaserverplatten werden i.d.R. jedoch mechanisch bearbeitet, daher nicht empfohlen
... Glas- und Steinwolle?	Nur Steinwolle geprüft
Status	Keine Anwendung bekannt

Substrate in Hydroponik

In der Pflanzenzucht mit Hydroponik-Systemen findet die Nährstoffversorgung im Idealfall ausschließlich über die flüssige Nährstofflösung, in der sich die Wurzeln befinden, statt. Das Substrat, in dem die Pflanzen wachsen, sorgt für Stabilität und beeinflusst die Sauerstoff- und Wasseraufnahme und somit die Nährstoffversorgung der Pflanze, stellt jedoch selbst keine oder nur wenige Nährstoffe bereit. Da thermisch vorbehandelte Steinwolle anorganisch ist, kann sie keine Nährstoffe, die die Versorgung beeinflussen, an die Pflanze abgeben und bietet auch keine gute Grundlage für die Bildung von Keimen und Bakterien. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Struktur der Steinwolle eine gute Wasseraufnahme, einen guten Luftwechsel sowie durch das hohe Porenvolumen, hohe Luft- und Wasserspeicherkapazitäten bietet. Diese Eigenschaften machen Steinwolle grundsätzlich zu einem sehr geeigneten Substrat in der Hydroponik. Solange keine Verunreinigung der Steinwolle vorliegt, könnte diese also in der Hydroponik, in der aktuell neue Steinwolle nach einmaliger Nutzung entsorgt wird, wiederverwendet werden. [12]

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	Nein
... unbekante Mineralwolle	möglich
... alte Mineralwolle?	Nein, strenge Anforderungen, weil ggf. im Kontakt mit Lebensmittel
... Glas- und Steinwolle?	Für Steinwolle erforscht, Glaswolle denkbar
Status	Neue Steinwolle wird bereits verwendet

Schaumglasproduktion

Auf der Suche nach eine ökologisch und ökonomisch günstigeren Herstellungsmethode für die Schaumglasproduktion haben [59] herausgefunden, dass sich bis zu 40 M.% Mineralwolle gut in den Prozess einfügen lassen.

Es wurden Mineralwolleabfälle aus China verwendet, jedoch nicht spezifiziert, ob es sich dabei um Baustellenabfälle oder Stein- bzw. Glaswolle handelt. Die chemische Analyse der Mineralwolle deutet auf Glaswolle hin, was im Sinne der Forschungsfrage nach chemisch ähnlichen Ausgangsstoffen sinnvoll erscheint.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	Vermutlich nicht wegen Zielchemie des Schaumglasprodukts, hier jedoch geringere Anforderungen als in der Mineralwolle
... unbekante Mineralwollchemie	nein
... alte Mineralwolle?	Fasern werden bis 800°C erhitzt und dann in Matrix gebunden
... Glas- und Steinwolle?	Glaswolle
Status	Keine Anwendung bekannt

Polymerverbundwerkstoffe

Zur Verbesserung der Materialeigenschaften können Fasern in die Polymermatrix eines Materials eingebunden werden. Auch Steinwollfasern sind dazu gemäß einer Studie von [13] geeignet. Es wurde ein verbessertes Materialverhalten unter Hitzeeinwirkung beobachtet. Die Biegespannung erhöhte sich, während

die Zugfestigkeit abnahm. Generell wurde festgestellt, dass reine Steinwolle vor dem Bindemittelauftrag zu besseren Ergebnissen führte als Mineralwolle mit Bindemitteln.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	nein
... unbekannte Mineralwollchemie	möglich
... alte Mineralwolle?	möglich
... Glas- und Steinwolle?	Steinwolle
Status	Nicht bekannt

Ziegelindustrie

Mineralwolle kann sich positiv in der Ziegelherstellung auswirken. [108] beschreibt eine verbesserte Trockenbiegesteifigkeit sowie reduziertes Schwinden beim Einsatz von Mineralfasern als Magerstoff und Porosierungsmittel. Der porosierende Effekt durch Aufschmelzen der Faser wirke sich positiv auf das Wärmedämmverhalten des Ziegelprodukts aus.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	teilweise
... unbekannte Mineralwollchemie	nein
... alte Mineralwolle?	nein
... Glas- und Steinwolle?	ja
Status	Unbekannt, Woolrec GmbH hat Betrieb eingestellt [137]

3.4 Übersicht über bestehende Recyclingkonzepte im geschlossenen Kreislauf

Direkte Injizierung in Kupolofen

Für Steinwollfasern, die als Prozessabfälle aus der Zerfaserung zurückbleiben, konnte gezeigt werden, dass eine direkte Injizierung von Fasern < 6mm in den Kupolofen möglich ist. Die Beschickung erfolgt über einen unter Druck stehendem Tank, auf dessen Boden sich ein rotierender Zubringer befindet, der das Material entsprechend dosiert. [62]

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	nein
... unbekannte Mineralwollchemie	nein
... alte Mineralwolle?	Möglich, hier nicht Forschungsgegenstand. Ziel war die Verarbeitung von anfallenden Prozessfasern
... Glas- und Steinwolle?	Steinwolle
Status	Methode findet Anwendung in skandinavischen Paroc-Werken

zementgebundene Steinwollfasern / Formsteine

Bei der Herstellung von Steinwolle im Kupolofen werden mineralisch gebundene Formsteine (manchmal auch Briketts oder Pellets) eingesetzt, da die eingesetzten Rohstoffe für einen stabilen Betrieb des Kupolofens eine gewisse Mindestgröße aufweisen müssen. Diesen Formsteinen wird aktuell bereits ein kleiner Anteil Mineralwollfasern aus dem Prozess zugeführt für werksinternes Recycling. Im Vorgängerprojekt zu diesem [126] wurde die Erhöhung des Mineralfaseranteils in den Formsteinen intensiv erforscht. Es konnte gezeigt werden, dass Formsteine mit bis zu 75M.% Steinwolleanteil möglich sind. Es wurde weiter beschrieben, dass der Kupolofen verhältnismäßig robust ist und geringe Mengen mineralischer Anhaftungen den Prozess nicht beeinträchtigen. Organische Stoffe im Gegenteil können sogar mitverbrannt werden und dienen als Energielieferant. An einem ähnlichen Ansatz zur Wiedereinbringung von Mineralwolle arbeiten [101].

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	Geringfügig möglich
... unbekannte Mineralwollchemie	Wenn extern homogenisiert und dann analysiert
... alte Mineralwolle?	Ja, in kleinen Dosen
... Glas- und Steinwolle?	Steinwolle
Status	Formsteine sind Stand der Technik bei Kupolöfen

papiergebundene Steinwollfasern

Das japanische Patent [119] versucht die Beseitigung von Steinwollabfällen und Abfällen aus der Papierherstellung zu kombinieren. Das Patent beschreibt eine Methode, bei der die Steinwolle und der Papierschlamm in einem Gewichtsverhältnis von 100:6 bis 1:1 gemischt, geknetet, verfestigt und granuliert werden. Das Mineralwollpapiergranulat wird dann als Sekundärrohstoff in den Kupolofen wieder zugeführt.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	teilweise
... unbekannte Mineralwollchemie	Wenn homogenisiert und dann analysiert
... alte Mineralwolle?	Ja, Faser löst sich in Schmelze
... Glas- und Steinwolle?	Steinwolle
Status	unbekannt

Interne Glaswolleaufbereitung über Schmelzyklon

Das unter Kapitel 2.3 beschriebene Verfahren der werksinternen Rückführung von Mineralfasern über den Schmelzyklon funktioniert prinzipiell auch für Mineralwolle, die von der Baustelle als Verschnitt oder Abbruchmaterial zurückgeliefert wurde. Die Mineralwolle wird zerfasert, zwischengelagert und dann über den Schmelzyklon zurück in die Schmelzwanne geführt. Der Zyklon ist durchströmt und sorgt auf diese Art über ein langsames Herabsinken der Mineralwolleflocken. Die Mineralwolle kann so temperiert werden, ungewünschte Organik – mindestens das Bindemittel - wird verbrannt und die Mineralwolle schmilzt an. Aufgrund der Entfernung der Organik sind auch Mineralwollen mit geringfügiger Anhaftung von Fremdstoffen wie beispielsweise Folien verarbeitbar. Je mehr Organik verbrannt wird, desto mehr NO_x werden jedoch emittiert. Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) spielt hier einen limitierenden Faktor.

Zusätzlich limitierend wirkt die notwendige Einhaltung der Zielchemie, die nur in Grenzen über die Schmelze gegengesteuert werden kann. [86]

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	Organik kann entfernt werden
... unbekannte Mineralwollchemie	Nein, geringfügige Abweichungen von Zielchemie jedoch möglich
... alte Mineralwolle?	Technisch möglich
... Glas- und Steinwolle?	Stein und Glaswolle
Status	Stand der Technik bei manchen Schmelzwannen

Interne Glaswolleaufbereitung über Zugabe zu Vlies

Reste aus der Produktion wie beispielsweise Verschnitt können innerhalb der gleichen Produktlinie nach dem Bindemittelauftrag zu dem Mineralwollvlies hinzudosiert und eingebunden werden. Bis auf einen möglicherweise vorangehenden Zerkleinerungsprozess sind keine weiteren Aufbereitungsschritte notwendig. Die Prozessfasern und das Produkt müssen jedoch für dieses Verfahren identisch sein.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	nein
... unbekannte Mineralwolle	Nein
... alte Mineralwolle?	nein
... Glas- und Steinwolle?	Stein und Glaswolle
Status	Stand der Technik bei manchen Mineralwollewerken

Glasfritten aus Mineralwolle

Die Stabilität von Glassilikaten macht es technisch möglich, dass diese wiederholt eingeschmolzen werden und dabei nahezu keinen Qualitätsverlust erfahren. Ein unbegrenztes Recycling ist damit theoretisch möglich. [77]

In Frankreich wurde das Glaswollrecycling über Glasfritten erprobt [98]. Dazu wurde in einem Werk in Orange eine entsprechende Linie entwickelt. Selektiv rückgebaute Mineralwolle wird durch im Projekt involvierte Dienstleister an das Frittenwerk geliefert, wo die Mineralwolle zerkleinert und anschließend eingeschmolzen wird. Erstarrt die Glasschmelze plötzlich, beispielsweise aufgrund eines schnellen Temperaturabfalls, dann zerspringt die Schmelze in Glasscherben, die auch Fritten genannt werden. Fritten ist ein gängiger Begriff in der Glasindustrie, bezeichnet jedoch sowohl einen Zwischenstoff als auch fertige Produkte. Teilweise werden auch Begriffe wie Glasgranulat oder -grieß verwendet. Auch speziell in der Glaswollindustrie ist die Herstellung von Fritten Stand der Praxis, beispielsweise, wenn aus technischen Gründen die Produktion gestoppt werden muss. [98], [86]

In Frankreich wird aktuell ein Oxymeltofen oder auch Oxymeltprozess eingesetzt, welcher mit sauerstoffangereicherter Luft (Sauerstoffgehalt > 40%) betrieben wird. Dadurch wird eine Verbrennung der organischen Bindemittel möglich. Die bei der organischen Verbrennung entstehende Hitze ist so hoch, dass sie genutzt werden kann, um die Mineralwollfasern zu schmelzen. [117] Eine Sauerstoffangereicherte

Verbrennung erzeugt stickstoffreduzierte Rauchgase sowie eine effizientere Ausnutzung der Brennstoffenergie. Eine Reduktion der NO_x-Werte ist insbesondere wegen der zu verbrennenden Organik wichtig. Die Technologie wird weiterentwickelt und verbessert [93], [27].

Der vielversprechende Ansatz wird nun im Forschungsprojekt I-LOOP LIFE (LIFE18 ENV/FR/000046) weiter erforscht. Das Projekt will zeigen, dass Glasfritten eine wirtschaftliche Option darstellen und der Energieverbrauch sowie CO₂ Emissionen reduziert werden können. Involviert sind Frankreich, die Benelux Länder sowie Schweden. Zudem wollen sie die Effektivität von Submerged-Burner-Meltern (SBM) – auch Submerged-Combustion-Melter - prüfen. Submerged-Burner-Melter stammen aus der Behandlung gefährlicher Abfälle. Wie bei [27] beschrieben ist die Idee mit sogenannten Tauchbrennern zu arbeiten, die nicht wie sonst oberhalb der Glasschmelze sitzen. Die Technik kann generell zur Schmelze von Stein- und Glaswolle angewendet werden.

Glasfritten aus Mineralwolle verlieren durch den Schmelzprozess nicht nur ihre Abfalleigenschaft, sondern selbst alte Minerawolle kann thermisch vollständig aufgelöst und chemisch neu entwickelt werden. Zudem kann das entstehende Sekundärprodukt ebenso wie Altglasscherben von allen bekannten Abnehmern, für die die Sekundärrohstoffqualität ausreichend ist, abgenommen werden.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	Nein, Ausnahme Organik
... unbekannte Mineralwollchemie	Möglich, Glas und Steinwolle muss unterschieden werden.
... alte Mineralwolle?	Ja
... Glas- und Steinwolle?	Stein- und Glaswolle
Status	Für Glaswolle in einem Werk in Orange, Frankreich

Mineralwollmehl

Auf industrieller Ebene wurde ein Verfahren aufbauend auf dem Gipsplattenrecycling entwickelt, das als Endpunkt ein Mineralwollmehl ähnlich von Sandkörnung liefert. [118] Während diese Fasergröße für den Kupolofen ungünstig ist, ist es durchaus denkbar die Schmelzwanne zusammen mit anderen Rohstoffen ähnlicher Partikelgröße mit dem Mineralwollmehl zu beschicken. Das Verfahren wird unter Kapitel 4.3 näher beschrieben. Nach Aussage des Geschäftsführers der Aufbereitungsanlage beliefert die Firma bereits Werke im skandinavischen Raum.

Geeignet für....

... verunreinigte Mineralwolle?	ja
... unbekannte Mineralwolle	ja
... alte Mineralwolle?	ja
... Glas- und Steinwolle?	Stein und Glaswolle (getrennt)
Status	In der Erprobungsphase

4. Störstoffe, Aufbereitungsverfahren und Logistikaspekte

4.1 Störstoffe und Grenzwerte

Ein Material kann aus unterschiedlichen Gründen zu einem Störstoff für einen Recyclingvorgang werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll jedes Material, das einen negativen Einfluss auf

- die chemische Zusammensetzung des Endprodukts (Produktstörstoff),
- die Anlagentechnik (Prozessstörstoff),
- die einzuhaltenen Emissionsgrenzwerte (Emissionsstörstoff) oder
- die Gesundheit der im Prozess Involvierten (Emissionsstörstoff)

hat, als Störstoff verstanden werden. Im Fokus liegt hier nicht die Unterscheidung zwischen Stoffen und Gütern, die im Sinne dieser Arbeit gleichermaßen einen Störstoff darstellen können. Im weiteren Sinne wird der Begriff Störstoffe in dieser Arbeit auch für Materialien verwendet, die die Messmethoden negativ beeinflussen und so eine Aufbereitung der Mineralwolle erschweren.

Ein Material, welches später ein Störstoff für den Recyclingprozess wird, kann dabei ein Fremdstoff wie beispielsweise Bauschutt sowie auch ein produkteigener Stoff wie beispielsweise das Bindemittel oder die Kaschierung sein. Im Behälterrecycling (Glas, Papier, Kunststoff) wird oftmals zusätzlich noch zwischen Fremdstoffen und Gebrauchsverunreinigungen unterschieden, die aus der Verwendung des zu rezyklierenden Materials als Behältnis rühren. Mit solchen Verunreinigungen ist für Mineralwolle nicht zu rechnen. Potentielle Störstoffe werden im Folgenden benannt, ihr störende Eigenschaft beschrieben und zum Schluss ihre für ein Mineralwollerecycling in der Schmelzwanne zulässigen Grenzwerte ermittelt.

Keramik, Steine, Porzellan (KSP)

Keramik, Steine und Porzellane schmelzen nicht oder für den Prozess zu langsam in der Glasschmelze auf [77]. Gelangt nichtaufgeschmolzenes Material in den Zerfaserungsprozess schädigt dieses die Zerfaserungseinheiten. Daher sollte möglichst kein KSP-Material in den Schmelzvorgang gelangen. Im geringfügigen Umfang kann es mitverarbeitet werden, sofern die Partikel kleiner als der Zerfaserungsdurchmesser (1mm) sind und die chemische Zusammensetzung möglichst der Zielchemie entspricht. [86] Für die üblichen Verwendungen der Mineralwollämmstoffe im Bauwesen sind mit folgenden KSP-Fractionen zu rechnen: mineralischer Bauschutt, mineralische Putzanhaftungen (eher bei Steinwolle im WDVS), Sanitärkeramikbruch. Mineralwolle kann entweder durch Beschichtungen oder durch unsaubere Stoffselektierung im Rückbau mit der Mineralwolle in Kontakt kommen.

Glaskeramik

Glaskeramik wird vereinfacht dargestellt durch eine Schmelze hergestellt, die nach dem glasigen Aushärten durch Wärmebehandlung kristallisiert. Diese erst nachträgliche Behandlung bzw. Kristallisation der Glasschmelze stellt den wesentlichen Unterschied zur Keramik her. Das erwünschte Kristallisieren durch die Wärmebehandlung stellt den wesentlichen Unterschied zum Glas dar. [97] Glaskeramik schmilzt ebenfalls nicht ausreichend bei den in der Schmelzwanne herrschenden Temperaturen auf und kann wie zuvor beschrieben bei einem Durchmesser <0,8 mm nur bis zu einem gewissen Prozentsatz verarbeitet werden, da sie andernfalls zu einer Unwucht im Spinner führen. [86] Glaskeramik kann von opak bis transparent gestaltet werden. Im Bauwesen wird Glaskeramik beispielsweise für Fassadenbekleidungen verwendet, kann aber auch durch unsachgemäße Bauschuttentsorgung – bspw. Ceranfelder – an der Mineralwolle anhaften. Visuell können viele Glaskeramiken meist weder vom menschlichen Auge noch von optischen Geräten zweifelsfrei erkannt werden. [81] In den Mineralwollewerken werden daher Sensorsortieranlagen eingesetzt, die

Glaskeramikscherben im Format 2-30mm/5mm aussortieren können[86], möglich ist dies beispielsweise mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) [81].

Metalle

Metalle schmelzen und/ oder reagieren bei den in der Schmelzwanne vorherrschenden Temperaturen. Dies kann sowohl zu einer Schädigung der Schmelzwanne (Prozessstörstoff) als auch der chemischen Zusammensetzung der Schmelze führen (Produktstörstoff). Metalle wie Blei, Zink, Kupfer aber auch Aluminium sinken zu Boden und verursachen eine Kontaktkorrosion, da hier zwei unterschiedliche edle Metalle aufeinandertreffen. Aluminium kann auf der anderen Seite genau wie Zink und zum Teil Eisen oxidieren und in der Glasschmelze gelöst werden. [77]

Im Bauwesen treten alle oben genannten Metalle auf, beispielsweise in Form von Bewehrungsseisen, Kupferrohren, Edelstahlkonsolen, Schrauben und Nägeln, aber auch Aluminiumkaschierungen direkt an der Mineralwolle.

Kohlenstoff / Organik

Der in organischen Stoffen enthaltene Kohlenstoff wirkt sich negativ auf den Schmelzprozess aus. Der Eintrag in den Kupolofen ist möglich, jedoch kann die Schmelze das Feuerfestmaterial des Ofens stärker angreifen. [39]

In den Glasschmelzwannen sollte der Kohlenstoffanteil möglichst vollständig reduziert werden [39], da die Organik in der Schmelzwanne bei ihrer thermischen Zersetzung eine schaumähnliche Schicht auf der flüssigen Glasschmelze bildet, die sich dann zwischen Brenner und Schmelze befindet und wie eine Isolierschicht wirkt. [86]. Die organischen Stoffe wirken wie ein Reduktionsmittel im Schmelz- und Läuterungsprozess der Glasschmelze. [93]

Einem unzulässigen Kohlenstoffeintrag kann über Oxidationsmittel entgegengewirkt werden, beispielsweise mit Natriumnitrat oder Manganoxid. Dieses wiederum wirkt sich in der Regel negativ auf die Kosten, Produktchemie oder Abgasemissionen aus. [39], [93]

Organische Verunreinigungen können im Bauwesen aus diversen Quellen stammen. So kann die Mineralwolle während sie eingebaut ist in Kontakt mit Staub und Tieren kommen (Dachbodendämmung) oder beim Ausbau nicht ausreichend geschützt sein. Beim Abbruch können organische Bestandteile mit abgebrochen werden, wie beispielsweise Holz aus Fußböden oder Ständerwänden oder Kunststofffolien. Bei unsachgemäßer Entsorgung kann auch Verpackungsmaterial aus Papier oder Kunststoff das Produkt verunreinigen. Darüber kann die Mineralwolle selbst mit Papierkaschierungen versehen sein. Und selbst wenn all das nicht zutrifft weist ein Großteil der auf dem deutschen Dämmmarkt erhältlichen Mineralwollen ein organisches Bindemittel auf (siehe Kapitel 2.3), so dass mit Kohlenstoffeinträgen im Mineralwollrecycling immer umgegangen werden muss.

Feuchte / Wasser

Wasser in zu hohen Mengen wirkt sich aufgrund der Verdunstungsenthalpie ungünstig auf den Schmelzprozess aus und erhöht den Energiebedarf in der Schmelzwanne. [93] In einer schadensfreien Baukonstruktion sollte keine übermäßige Feuchte zu erwarten sein. Da aber insbesondere bei Bauschäden eine Instandsetzungsmaßnahme durchgeführt wird, ist für rückgebaute Mineralwollen unregelmäßig, aber in relevantem Umfang mit erhöhter Feuchtebelastung zu rechnen.

Sulfate / Chloride

Sulfate und Chloride können zu Bewehrungskorrosion oder treibenden Prozessen führen, die Betone angreifen. Da viele der in Kapitel 3 benannten Recyclingkonzepte auf eine entsprechende Verwendung in Mörtel oder Betonen abzielen oder aber Dämmstoffe als Vorsatzkonstruktion mit Betonen in Kontakt stehen, stellt auch ein entsprechender Sulfat- oder Chloridgehalt einen Störstoff dar. Der Grenzwert ergibt sich dann entsprechend des Verwertungsziels des Betons. Eine Verunreinigung im Bauwesen kann stattfinden durch gipshaltige Baustoffe wie Innenputze oder Gipskartonplatten oder chlorhaltige Materialien wie beispielsweise Polyvinylchlorid (PVC) oder bestimmte Anstriche, Lacke und Kleber mit Chlorbindemitteln.

Schadstoffe

Mineralwollen, die von Abbruchvorhaben stammen, können prinzipiell auch Schadstoffe enthalten, die insbesondere die Gesundheit von Menschen beeinträchtigen. Zum einen kann Mineralwolle selbst ein Schadstoff sein (alte KMF). Zum anderen kann durch direkten Verbund oder durch nicht (ausschließlich) sortenreinen Rückbau eine Verunreinigung mit allen potentiellen Schadstoffen auf einer Baustelle denkbar sein. Dazu gehören nach [63]:

- Altholz: Das Holz selbst ist dabei kein Schadstoff, kann aber mit schädlichen Substanzen wie Farben, Lacken, Klebern und Holzschutzmittel versehen sein.
- Aromatische Kohlenwasserstoffe: Der bekannteste Vertreter im Bauwesen sind Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoff (PAK), die in teerhaltigen Stoffen wie alten Abdichtungsbahnen vorkommen und Polychlorierte Biphenyle (PCB), die als Weichmacher insbesondere in elastischen Dichtmassen vorkommen.
- Asbest: Zwischen 1930-1993 wegen seiner herausragenden Eigenschaften vielfach eingesetzt, ist es heute wegen seiner lungenschädlichen Wirkung (Asbestose) verboten, aber durchaus insbesondere in den jetzt anstehenden Abbruchvorhaben häufig vertreten.
- Formaldehyde: Die leicht flüchtigen Stoffe werden in der Regel nicht mehr bei Abbruchvorhaben erwartet, eine Verunreinigung der Mineralwolle ist eher unwahrscheinlich.
- Chlorhaltige Verbindungen: Dazu zählen beispielsweise Furane, Dioxine und chlorierte Kohlenwasserstoffe.
- Halogenierte Kohlenwasserstoffe: Hier sei insbesondere Hexabromcyclododecan (HBCD) hervorgehoben, welches insbesondere bei Polystyrolen als Brandschutzmittel eingesetzt wurde und durch nicht selektiven Rückbau auch in die Mineralwolle gelangen kann
- Radioaktive Gase: Beispielsweise Radon. Dieses ist eigentlich nur bei der Verunreinigung mit Baugrund zu erwarten
- Schwermetalle: Nicht alle Schwermetalle sind Schadstoffe. Als schädlich Schwermetalle könne im Baukontext insbesondere Blei (Pb), Cadmium (Cd), Quecksilber (Hg), Sechswertiges Chrom (CrVI)

Nachfolgend wurde zusammengefasst dargestellt, welche Schadstoffe in einer Mineralwolle aus einem Abbruchvorhaben denkbar sind und welche Grenzwerte für eine Verwertung innerhalb des Schmelzwannenverfahrens eingehalten werden müssen (vgl. Tabelle 6). Anschließend wurden die einzelnen Störstoffe zusammengefasst nach einem Schema, dass im Recycling von Behälterglas üblich ist und damit abgeglichen (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 6
Übersicht über Störstoffe in der Mineralwollindustrie (Schmelzwanne)

Mögliche Anhaftung / Verunreinigung		Störstoff, weil	Anforderung	Einzelgrenzwert in Prozent
„Bauschutt“	Mineral. Putze	Schmilzt nicht -> mechanische Beschädigung möglich, akzeptabel, wenn chemisch wie Zielprodukt	<1mm	< 0,5 %
	Glaskeramik	Schmilzt nicht -> mechanische Beschädigung möglich, Prozessstörung	<2mm	< 100 ppm > 0,8mm; keine Partikel > 2mm
	Kunstharzputze ¹⁾	Kohlenstoff enthalten		< 0,5 %
	Plastikdübel, Baufolien, Bitumen, Teer, Farbe ¹⁾	Kohlenstoff enthalten		
	Metallische Befestigungsmittel / Komponenten	1. Kontaktkorrosion möglich 2. Größere Bestandteile, die nicht aufschmelzen 3. Beschädigung beim Aufmahlen 4. ggf. Beeinflussung der Glaschemie		< 5 g/t
Verschmutzung	Erde ¹⁾	Kohlenstoff enthalten, Al-Gehalt relevant für Glasanalyse	<1mm	
	Tierexkremate ¹⁾	Kohlenstoff enthalten, Gesundheitsschutz		0 %
	Weitere organische Verunreinigungen ¹⁾	Kohlenstoff enthalten		
Kaschier.	Vlies ¹⁾	Verzerrung Glaszusammensetzung	< 2cm	< 5 %
	Alu	Verzerrung Glaszusammensetzung		< 5 g/t
	Papier / Organik ¹⁾	Kohlenstoff enthalten		
Wasser		Nasse Produkte verklumpen und können nicht in die Wanne befördert werden, Verdunstungsenthalpie erhöht Energieverbrauch		≤ 3 %
Schadstoffe	Alte KMF	1. Behandlung im Prozess bis Schmelzzeitpunkt wie Abfall (rechtlich), kann über Schmelze jedoch unschädlich gemacht werden 2. Andere chem. Zusammensetzung. 3. Gesundheitsschutz		< 10 %
	Asbest	Gesundheitsschutz		0,00 %
	Schwermetalle	Gesundheitsschutz, Verordnungen		Cd, Hg: < 1 ppm Cr(VI) < 2 ppm Pb: < 1 g/t
¹⁾ Gesamtvolumen Organik im recycelten Produkt vor Aufbereitung: ≤ 5 %				

Quelle: Eigene Darstellung, Grenzwerte von [86]

Tabelle 7
Grenzwerte für Störstoffe zum Recycling in der Behälterglas- und Mineralwollindustrie

Mögliche Anhaftung / Verunreinigung	Anforderung Behälterglasindustrie		Anforderung Mineralwollindustrie (Schmelzwanne)
	Mittel	Max	
Keramik, Steine, Porzellan (KSP) ¹⁾	≤ 0,002%	< 0,005%	< 0,5 %
NE-Metalle	≤ 0,0003%	< 0,0005%	≤ 0,0005%
FE-Metalle	≤ 0,0002%	< 0,0005%	
Glaskeramik >10mm (BG) / 20mm (Miwo)	≤ 0,0005%	< 0,0005%	≤ 0,0 %
Glaskeramik ≤ 10mm (BG) / 20mm (Miwo)	≤ 0,001%	< 0,003%	≤ 0,01%
Lose organ. Stoffe ⁴⁾	≤ 0,03%	< 0,05%	≤ 5 %
Feuchtigkeit	≤ 2%	< 5%	≤ 3 %
Schwermetallgehalt ^{2,3)}	≤ 200ppm		≤ 5ppm

1) Korngrößen < 1mm, für Behälterglas siehe [18]
2) Für Glas: Kumulativ Pb, Cd, Cr(VI), Hg
3) Für Mineralwolle: Cd, Hg: < 1 ppm, Cr(VI) < 2 ppm, Pb: < 1 ppm
4) Für Mineralwolle inkl. produkteigenes Bindemittel

Quelle: Eigene Darstellung nach BV GLAS. OST. Standardblatt T 120 [18] und SG Isover [86]

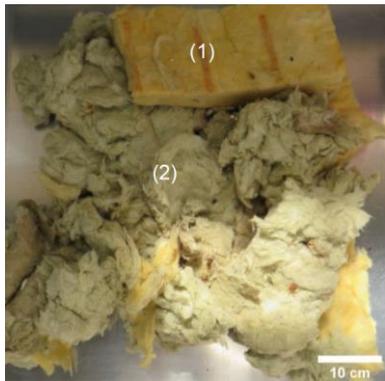
Zur Evaluierung welcher Verunreinigungsgrad bei Mineralwolle, die auf der Baustelle entsorgt wird, zu erwarten ist, wurden sechs Proben (W1-W6) von einem Wertstoffhof in Brandenburg entnommen. Bei den Proben handelte es sich um Baustellenverschnitte aber auch rückgebaute Mineralwolle. Teilweise wurden verschiedene Mineralwollen in einem und demselben BigBag vorgefunden. Eine weitere Probe (W7) wurde direkt bei einem Abbruchvorhaben eines Dachgeschosses entnommen. Es wurden jeweils drei Probebehälter mit einem Volumen von ca. 10L befüllt. Dabei wurde versucht, die Gesamtmenge möglichst repräsentativ abzubilden und auch beispielsweise Mineralwolle und Feinanteile aus den unteren Bereichen der BigBags zu entnehmen. Nichtsdestotrotz stellt die Entnahme eine gewisse subjektive Vorsortierung dar und beeinflusst die weiteren Ergebnisse.

Die Proben wurden im Labor zunächst händisch gesichtet und Störstoffe, die lose mit der Hand oder Pinzette entnommen werden konnten, aussortiert. Eine Übersicht über den Probensatz kann der nachstehenden Tabelle 8 entnommen werden. Die Proben wurden per NIR Handheld Aura in Steinwolle und Glaswolle differenziert. In den sieben Probensätzen befinden sich sieben Steinwollen und sechs Glaswollen. Der Glühverlust der einzelnen Mineralwollen bei 550°C und 1h Glühzeit wurde ermittelt. Die Range liegt zwischen 0,53%-8,9% und damit im üblichen Bereich. Der Mittelwert der Glaswollen im Probensatz W1-W7 betrug 7,72M.%, der der Steinwollen 3,22M.% (vgl. Tabelle 8). Der Bindemittelanteil ist hier als kritisch zu werten, da dieser allein bereits die vorgegebenen Grenzwerte nach Tabelle 7 für vier von sechs Glaswollen überschreitet. Eine thermische Vorbehandlung der Mineralwollfasern ist daher für die Wiedereinführung in die Schmelzwanne ungeachtet der vorhergehenden Aufbereitungsqualität notwendig.

Anschließend wurden die Proben mittels Thermogravimetrie (TGA) analysiert. Die Messungen erfolgten mit dem Gerät TG 209 F3 Tarsus des Herstellers Netzsch. Die TGA zeigt den Masseverlust einer Probe in Abhängigkeit der Temperatur und Zeit an. Die Proben wurden hier bis zu 650°C erhitzt. Eine weitere Erhöhung der Temperatur wurde aus messtechnischen Gründen nicht durchgeführt, da anhand vorhergehender Tastversuche ab 650°C erste Schmelzreaktionen bei den Proben festgestellt wurden. Als einleitendes Gas wurde Stickstoff verwendet.

Tabelle 8

Übersicht über je einen von drei Probensätzen der Proben W1-W7, mit Differenzierung in SW/GW und Angabe Glühverlust [550°C für 1h]



Probensatz W1
W1.1 | GW | 4,95%
W1.2 | SW | 0,53%



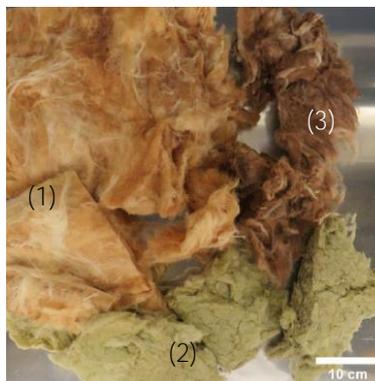
Probensatz W2
W2 | SW | 3,39%



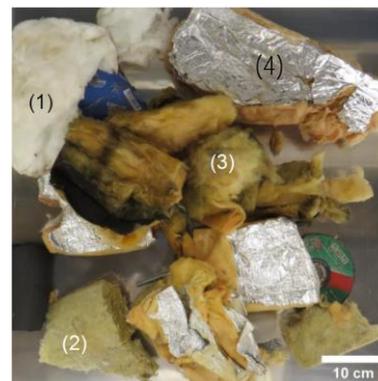
Probensatz W3
W3 | SW | 1,13%



Probensatz W4
W4 | SW | 0,80%



Probensatz W5
W5.1 | GW | 8,81%
W5.2 | SW | 8,89%
W5.3 | GW | 8,94%



Probensatz W6
W6.1 | GW | 2,99%
W6.2 | SW | 6,79%
W6.3 | GW | 8,92%
W6.4 | GW | 8,92%



Probensatz W7
W7 | SW | 1,34%

Quelle: Eigene Aufnahmen und Messwerte

Vorbereitend wurden die Proben in einer Scheibenschwingmühle MSL 2 des Herstellers BHK „Albert Funk“ drei Minuten bei einer Frequenz von 50 Hertz aufgemahlen und anschließend drei Stichproben à 0,1mg gemessen. Durch die dreifache Messung wurde validiert, dass später gegebenenfalls beobachtete Schwankungen keiner Zufälligkeit unterliegen. Als Referenzmessung wurde eine weitere Messung mit einer Reinprobe der Mineralwollen durchgeführt. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Proben W1-W6 keine mit dieser Methode feststellbaren, fremden organische Verunreinigung mehr enthielten. Beispielhaft sind die Analysen der Proben W3, W6, W7 dargestellt. Bei Probe W3 (vgl. Abbildung 13, oben) fällt auf, dass es einen Masseverlust bei 100-110°C gibt, den die Reinprobe (pink) nicht aufweist. Vermutlich handelt es sich hierbei um Feuchte in der Probe. Bei Probe W6 liegen die drei Messungen zu der händisch vorsortierten Probe exakt übereinander, was auf eine präzise Messung und gute Homogenisierung hindeutet. Die Einzelmessungen der Proben W6.1 - 4 schwanken vor allem im Bereich um 220°C-360°C (vgl. Abbildung 13, mittig), vor allem die W6.. Möglicherweise sieht man hier vor allem das organische Bindemittel der Proben selbst, welches pyrolysiert. Die Effekte überlagern sich, so dass Sie in der Messung der gemischten Probe W6 nicht so eindeutig ausgefallen sind. Da die Proben in der Glühverlustbestimmung verhältnismäßig hohe Werte an Organik aufweisen, ist es vorstellbar, diese Anteile auch über die TGA zu sehen. Eindeutig erkennbar hingegen ist der Unterschied für Probe W7 (vgl. Abbildung 13, unten). Während die drei Stichproben, der händisch sortieren Mineralwollprobe zwischen 300-400°C einen deutlichen Masseverlust von ca. 4 M.% aufweisen, fehlt dieser bei der Reinprobe. Für die händisch vorsortierten Proben war visuell bereits festgestellt worden, dass noch Holzsplitter an der Probe anhafteten. Diese Feststellung ist kongruent mit der TGA Analyse, da Holzstaub typischerweise ab 300°C anfängt zu glimmen [10]. Die Zündtemperatur für viele Hölzer wird in der Regel ebenfalls in diesem Bereich angegeben

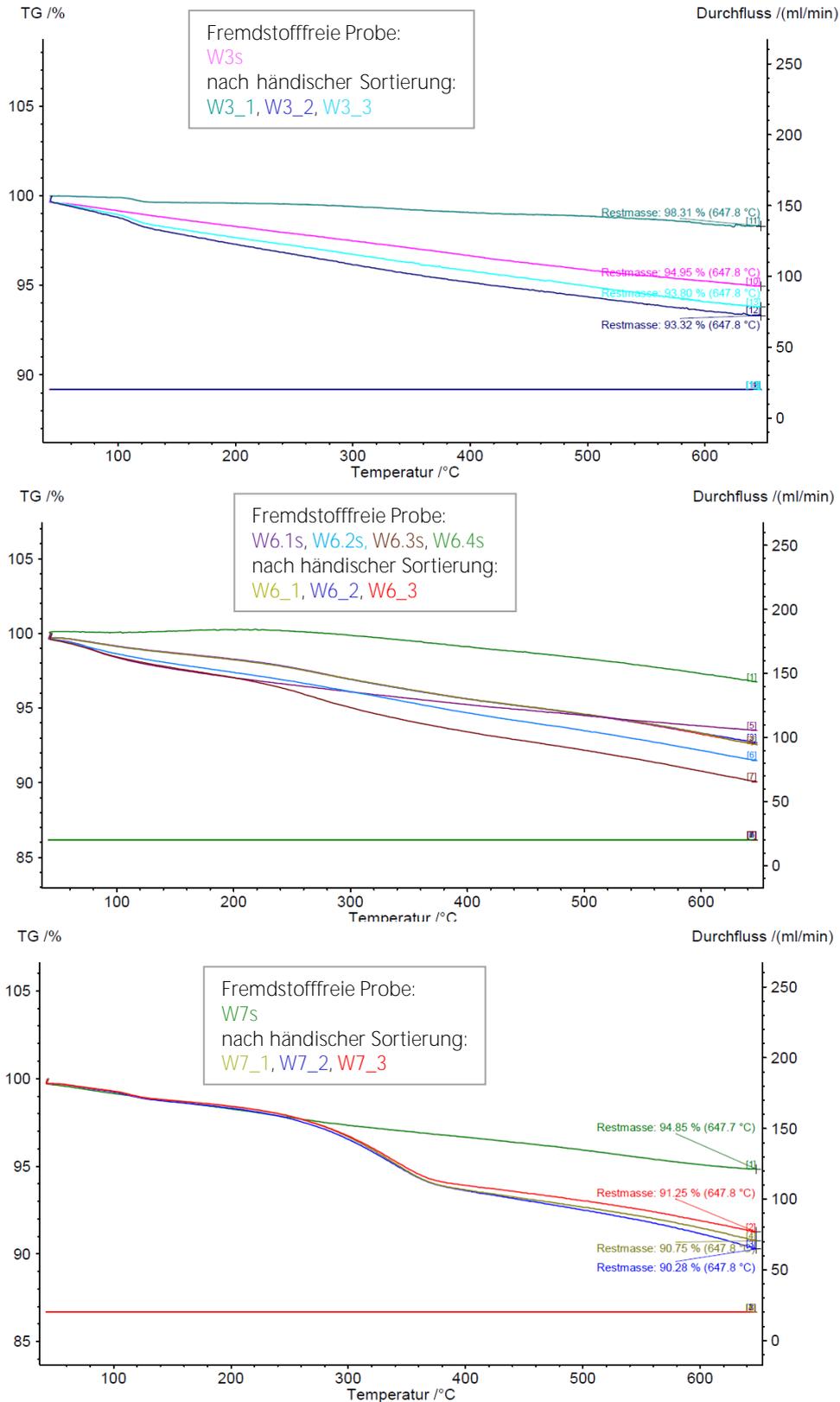
Die händische Sortierung ergab bei fünf von sieben Mineralwollproben (W1-W5) eine organische Verunreinigung <1M.% (vgl. Abbildung 14). Es konnten keine großen Veränderungen durch die TGA festgestellt werden, die nicht zuvor beschrieben wurden. Es ist daher anzunehmen, dass sich die organische Belastung aus dem Einschmelzen der Proben W1-W5 im Bereich ihres Glühverlust plus zusätzlich maximal ca. 1% bewegen würde. Eine entsprechende Aufbereitung vorab wäre hier nicht notwendig, da wie oben beschrieben sowieso eine thermische Vorbehandlung durchgeführt werden muss. Probe W6 und W7 hingegen weisen nach der händischen Sortierung organische Fremdstoffe von 8 M.% bzw. 4 M.% auf. Die Auswertung der TGA zeigt, dass bei Probe W6 die Störstoffe überwiegend sortiert werden konnten, während bei W7 keine ausreichende Reinheit erfolgte. Der Masseverlust innerhalb der TGA im Bereich der Holzpyrolyse betrug ca. 4M.% (allerdings unter Stickstoff).

Die Auswertung der Sortierung metallischer Bestandteile zeigt, dass sofern Metall in den Probensätzen vorhanden war, dieses aufgrund ihrer hohen Rohdichte die Grenzwerte aus Tabelle 7 immer überschreiten. Für die KSP-Fractionen überschreiten die Proben W4 und W7 die ermittelten Grenzwerte von 0.5%. Sowohl für die metallischen als auch KSP-Fractionen waren die Störstoffe überwiegend stückig in Korngrößen >20mm vorhanden, so dass mit einer guten Trennbarkeit gerechnet wird. Feinanteile an KSP konnten im Rahmen des Projekts weder messtechnisch erfasst noch durch Aufbereitung separiert werden.

Es kann festgestellt werden, dass durch die händische Sortierung in sechs von sieben Fällen eine gute Eliminierung fremder Organik ermöglichte. Gleichwohl ist diese Art der Probensortierung großmaßstäblich nicht praktikabel. Die folgenden zwei Kapitel befassen sich aus diesem Grund zum einen mit konstruktiven Lösungen, um bereits baustellenseitig möglichst saubere Proben rückzubauen und zum anderen mit verschiedenen Methoden der Aufbereitung. Zudem soll festgehalten werden, dass die TGA keine Rückschlüsse auf die nicht organischen Verbindungen zulässt und vor allem dann eindeutige Ergebnisse liefert, wenn diese auch visuell feststellbar sind.

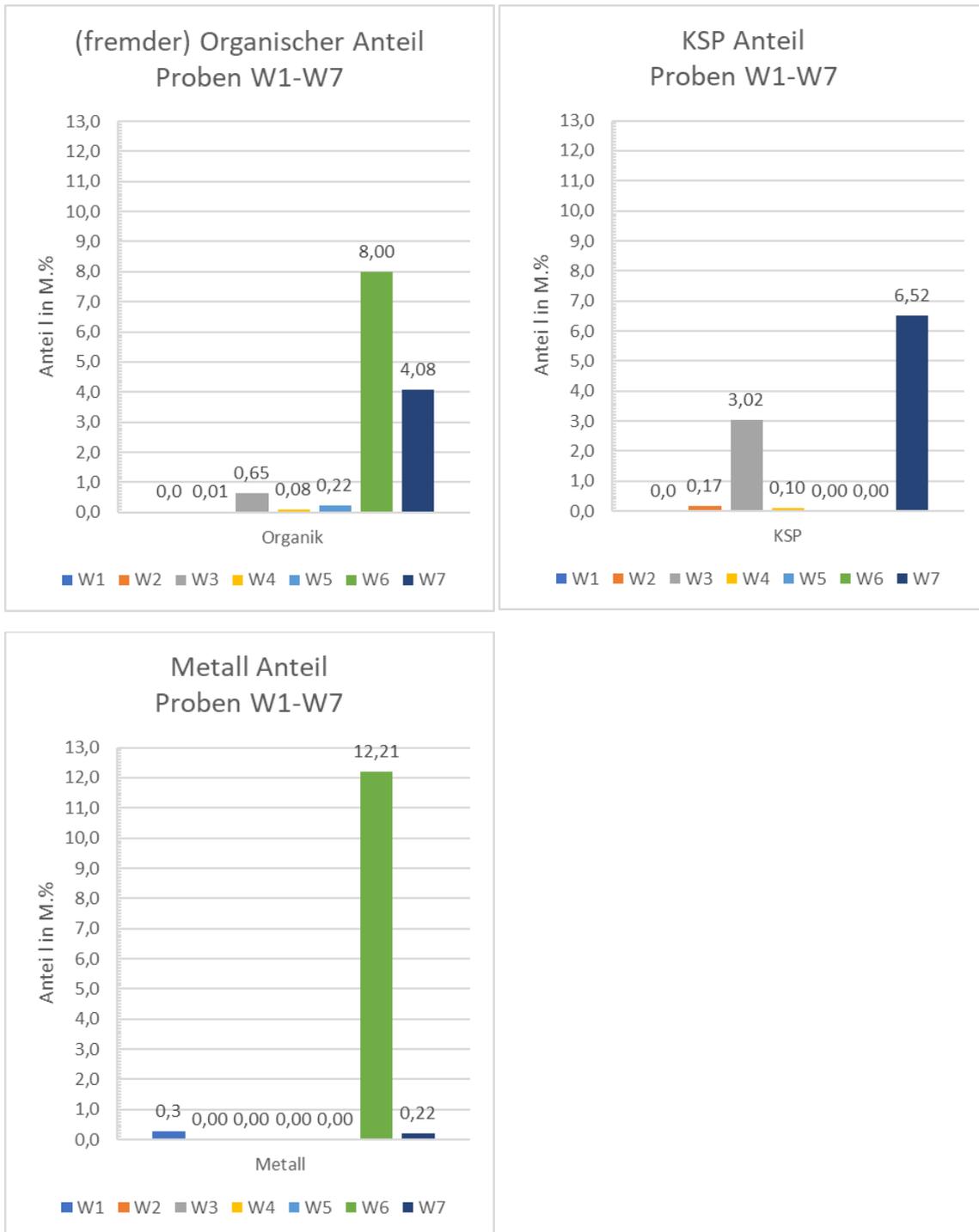
Die Vielzahl und Menge der vorgefundenen Störstoffe macht deutlich, dass ein sortenreiner Rückbau und ein zukünftig verantwortungsvoller Umgang mit Abbruchmaterial erforderlich wird, um eine hohe Recyclingquote gewährleisten zu können. Dazu sollte ein technisch möglichst einfacher und schneller Rückbau ermöglicht werden sowie eine sortenrein trennbare Konstruktion bereits bei der Planung bedacht werden.

Abbildung 13:
TGA Analyse der Proben W3 (oben), W6 (mitte) und W7 (unten).



Quelle: Auszug aus Programmausdruck Netzsch-Proteus-61, eigene Legende

Abbildung 14
Darstellung der prozentualen Störstoffanteile [M.-%] nach händischer Sortierung



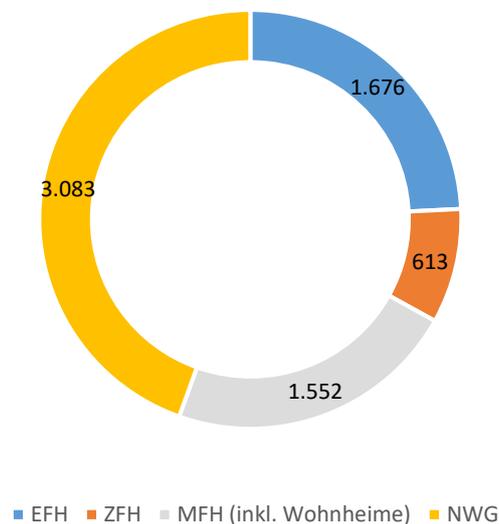
Quelle: Eigene Darstellung und Messwerte

4.2 Konstruktive Lösungen zur Reduzierung von Störstoffen

Hinsichtlich des Recyclings werden Gebäude künftig idealerweise bereits so geplant, dass in ihrem End of Life ein sortenreiner Rückbau der Baustoffe / -konstruktionen mit wenig Aufwand und frei von den zuvor definierten Störstoffen realisiert werden kann. Im Rahmen dieses Projekts wurde dabei die Betrachtung auf Konstruktionen mit Mineralwolle beschränkt.

Der deutsche Gebäudebestand teilt sich auf in 3.841 Mio.m² Wohnfläche [114] und 3.083 Mio.m² Nettoraumfläche von Nichtwohngebäuden, die in den Geltungsbereich des GEGs [52] fallen und damit gedämmt werden. [52] stellt die These auf, dass dies nur ca. 9,4 % der Nichtwohngebäude betrifft. Bei Wohngebäuden werden die Wohnflächen unterteilt nach Einfamilienhäusern (EFH), Zweifamilienhäusern (ZFH) und Gebäude mit mehr als drei Wohnungen / Mehrfamilienhäusern (MFH) getrennt aufgeschlüsselt. Der Gebäudebestand für 2021 in Deutschland ist entsprechend anbei dargestellt.

Abbildung 15
Verteilung der Flächen des deutschen Gebäudebestands in Mio.m² auf Wohn- und Nichtwohngebäude im Jahr 2021, nur NWG im Geltungsbereich des GEG



Quelle: Eigene Darstellung, Daten: Destatis [114] und Hörner [52]

Eine Analyse der Bautätigkeiten der letzten Jahrzehnte, ausführlich beschrieben in [30] und [72] ergab, dass ein durchschnittliches Wohngebäude in Deutschland die in Tabelle 9 aufgeführten Gebäudeeigenschaften aufweist. Da keine aktuelleren Daten vorlagen, wurde angenommen, dass die für den Zeitraum 2000-2009 beschriebenen Bauteiltypen weiterhin die meist verbauten sind. Ein- und Mehrfamilienhäuser unterscheiden sich hierbei nur unwesentlich mit Ausnahme des Dachs. Nichtwohngebäude fallen konstruktiv wesentlich differenzierter aus, weswegen hier keine pauschalen Aussagen getroffen werden können. Die für Wohngebäude getroffenen Maßnahmen lassen sich jedoch auf viele Nichtwohngebäudetypen übertragen wie beispielsweise Büro- Verwaltungsgebäude, Praxen, Hotels und Gastronomie. Die Fassadengestaltung und Tragstruktur variiert allerdings bei Nichtwohngebäuden häufiger als bei Wohngebäuden. Auf Grundlage der Angaben aus Tabelle 9 wurden zwei repräsentative Gebäudegrundrisse (1EFH und 1MFH) hinsichtlich ihres Mineralwollanteils untersucht. Es wurde dabei die Annahme getroffen, dass für alle Bauteile, in denen es technisch sinnvoll und möglich ist, Mineralwolle eingesetzt wurde in einer ausreichenden Dämmstoffdicke bei WL 035, um die Anforderungen des baulichen Wärmeschutzes nach Anlage 1 GEG2023 einzuhalten. Daraus ergibt sich ein verbautes Dämmvolumen von 53 m³ (EFH) und 156m³ (MFH). Unter der Annahme, dass die Kellerdecke, die Außenwände und das Flachdach des Mehrfamilienhauses mit einem anderen Dämmstoff

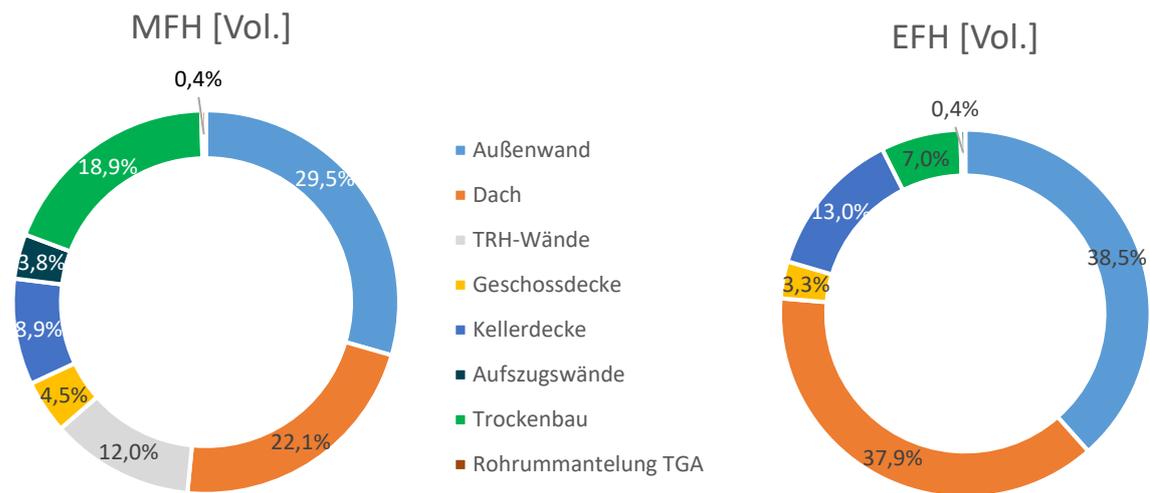
gedämmt werden ergäbe sich ein minimaler, aber dennoch üblicher Mineralwolleinsatz von 26m³ (EFH) bzw. 76m³ (MFH). Die Menge verteilt sich über das Gebäude wie in Abbildung 16 dargestellt. Überwiegend befindet sie sich in den Flächenbauteilen Außenwand, Dach, Kellerdecken (bei unbeheiztem Keller) und leichte Trennwände.

Tabelle 9
Übersicht über typische konstruktive Eckdaten im Wohnungsneubau

Typologie	Einfamilienhaus (2002-2009)	Mehrfamilienhaus (2002-2009)
Geschosszahl	2	4
Dachform	Satteldach	Warmdach, Sattel-/Flachdach
AW-Dämmung	WDVS	WDVS
Fassade	Putz, teilweise Klinker Vorsatzschale	Putz, teilweise Klinker Vorsatzschale
Tragmaterial	Mauerwerk KS monolithisch	Mauerwerk KS monolithisch
Decken	Stahlbeton	Stahlbeton
Wohnfläche je WE	138,7 m ²	84,6 m ²
Raumanzahl	Schlafzimmer 2x Wohnzimmer 1x Esszimmer 1x Küche 1x Badezimmer 2x Flur 2x	Schlafzimmer 1x Wohnzimmer 1x Küche 1x Badezimmer 1x Flur 1x

Quelle: Eigene Darstellung, Daten nach destatis [30], Loga, T. [72]

Abbildung 16
Anteil des Mineralwolle volumens im Gebäude aufgeteilt nach Bauteilgruppen, beispielhaft für ein EFH (rechts) und MFH (links)



Quelle: Eigene Darstellung

Mittels einer Art vereinfachten Sensitivitätsanalyse wurde überprüft wie sich die Dämmstoffmengen und damit Anteile ändern, wenn die Dämmstoffdicke variiert. Für Trockenbauwände wurden nur die bauüblichen Konstruktionen betrachtet. Zusätzlich wurde überprüft, wie sich eine flächenmäßige Veränderung der leichten Wände auf die Bewertung ausübt. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 10 dargestellt. Es ist deutlich, dass die Außenwand für beide Gebäudetypen maßgeblich bleiben wird. Generell können die Betrachtungen als robust bewertet werden, da die Volumenanteile bei aktuellen Dämmniveaus mehr mit der Bauteilfläche zusammenhängen als mit der Dicke des Dämmstoffs. Unabhängig davon, dass hier nur ein beispielhafter Grundriss analysiert wurde, kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass die thermische Hülle begrenzenden Flächenbauteile maßgeblich bleiben. Bezüglich der Wichtigkeit von Trockenbauwänden insbesondere im Mehrfamilienhausbau kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. Da die Mineralwolle in diesen Konstruktionen aber bereits jetzt gut zurückgebaut werden kann, kann diese Bauart vernachlässigt werden.

Tabelle 10

Sensitivitätsanalyse zu den Mineralwolle-Mengen der MFH (oben) und EFH (unten) nach Bauteilen differenziert, fett markiert die betrachtete Basisvariante.

SENSITIVITÄTSANALYSE MFH										
	Dicke der Mineralwolle	Bauteil						Bauteilfläche	Bauteil	
		Außenwand	Flachdach	TRH-Wände	Kellerdecke	Geschossdecke	GK-Wände		GK-Wände	
	0,02 m	-	-	-	-	6,96 m ³	-	-	-	-
	0,04 m	-	-	-	-	13,93 m ³	-	93,72 m ²	9,37 m ³	
	0,06 m	-	-	-	-	20,89 m ³	-	143,72 m ²	14,37 m ³	
	0,08 m	-	-	-	13,93 m ³	27,85 m ³	23,50 m ³	193,72 m ²	19,37 m ³	
	0,10 m	-	-	18,69 m ³	17,41 m ³	34,82 m ³	29,37 m ³	243,72 m ²	24,37 m ³	
	0,12 m	45,87 m ³	-	22,42 m ³	20,89 m ³	41,78 m ³	-	293,72 m ²	29,37 m ³	
	0,14 m	53,51 m ³	-	26,16 m ³	24,37 m ³	-	-	343,72 m ²	34,37 m ³	
	0,16 m	61,16 m ³	-	29,90 m ³	27,85 m ³	-	-	393,72 m ²	39,37 m ³	
	0,18 m	68,80 m ³	34,36 m ³	33,63 m ³	31,33 m ³	-	-	443,72 m ²	44,37 m ³	
	0,20 m	76,45 m ³	38,17 m ³	37,37 m ³	34,81 m ³	-	-	493,72 m ²	49,37 m ³	
	0,22 m	84,09 m ³	41,99 m ³	41,11 m ³	38,30 m ³	-	-	-	-	

SENSITIVITÄTSANALYSE EFH									
	Dicke der Mineralwolle	Bauteil					Bauteilfläche	Bauteil	
		Außenwand	Satteldach	Kellerdecke	Geschossdecke	GK-Wände		GK-Wände	
	0,02 m	-	-	-	1,73 m ³	-	-	-	-
	0,04 m	-	-	-	3,46 m ³	-	-	-	-
	0,06 m	-	-	-	5,20 m ³	-	-	-	-
	0,08 m	-	-	6,93 m ³	6,93 m ³	3,71 m ³	9,45 m ²	0,71 m ³	
	0,10 m	-	-	8,66 m ³	8,66 m ³	4,95 m ³	29,45 m ²	2,21 m ³	
	0,12 m	20,46 m ³	-	10,39 m ³	10,39 m ³	-	49,45 m ²	3,71 m ³	
	0,14 m	23,86 m ³	-	12,13 m ³	-	-	69,45 m ²	5,21 m ³	
	0,16 m	27,27 m ³	-	13,86 m ³	-	-	89,45 m ²	6,71 m ³	
	0,18 m	30,68 m ³	16,47 m ³	15,59 m ³	-	-	-	-	
	0,20 m	34,09 m ³	18,30 m ³	17,32 m ³	-	-	-	-	
	0,22 m	37,50 m ³	20,13 m ³	19,05 m ³	-	-	-	-	

Datenquelle: Eigene Berechnung und Darstellung [48]

In einem nächsten Schritt wurde bewertet, wie die sortenreine Rückbaufähigkeit der vorhandenen Konstruktionen zu bewerten ist. Einige Konstruktionen lassen sich nur mit erhöhtem Maschinen- und vor allem Personenaufwand sortenrein zurückbauen. Den Autoren liegen hierzu keine wissenschaftlich fundierten Zahlen vor, doch der Aufwand für den sortenreinen Rückbau wurde in verschiedenen Gesprächen mit Abbruchfirmen auf den Zeitfaktor 5-10 im Vergleich zum konventionellen Rückbau beziffert. Aus diesem Grund wurden die Beispielgebäude dahingegen optimiert, dass sie unter Berücksichtigung des jetzigen Stands der Technik eine maximale Ausbeute an weiterverwertbarer Mineralwolle liefern.

Als kritische Konstruktionen wurden im Zusammenspiel aus Volumen und kritischer Rückbaufähigkeit folgende drei Bauteilkonstruktionen identifiziert.

- Massive Außenwand mit WDVS: Die Dämmung wird an den Wandbildner geklebt und ggf. gedübelt. Das Wärmedämmverbundsystem selbst ist ein stoffschlüssiges System, so dass die Dämmung beidseitig nicht ohne Aufwand getrennt werden kann.
- Gedämmte Kellerdecke mit Trittschalldämmung: Unterseitig wird die Dämmung ähnlich einem WDVS befestigt oder durch werkseitig vorbeschichtete Mineralwollplatten (Steinwolle) an die Kellerdecke geklebt. Oberseitig der Stahlbetondecke liegt die Mineralwolldämmung unter dem Zementestrich. Mineralwolle und Estrich sind durch eine Folie voneinander getrennt, damit bei der Konstruktionserrichtung der Estrich nicht in die Mineralwolle fließt. Eine Trennung ist theoretisch möglich. Beim Abbruch des Estrichs ist jedoch damit zu rechnen, dass auch die Mineralwolle sowie die Folie beschädigt werden und sich Estrich und Mineralwolle vermengen.
- Konventionelles Flachdach: Bitumen und Dämmstoff sind stoffschlüssig miteinander verbunden.

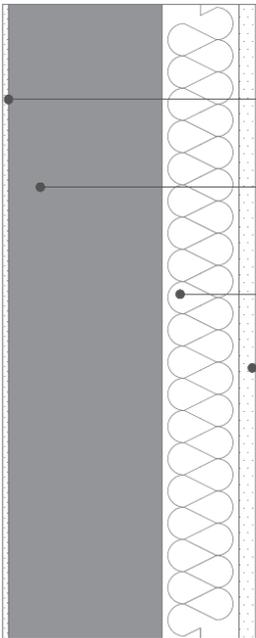
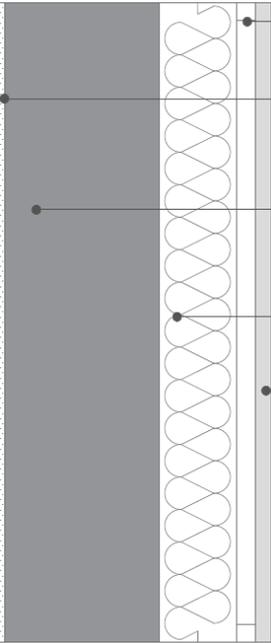
Ausgehend von dem Ansatz nach [47] und [58] ist für einen sortenreinen Rückbau bzw. einen niedrigen Trennungsaufwand vor allem die Verbindungsart entscheidend. Darüber hinaus sollte die Konstruktion möglichst schnell und einfach zurückgebaut werden können, um die Akzeptanz bei den ausführenden Firmen zu erhöhen. Als Optimierungsoptionen wurden daher die in Tabelle 11 bis Tabelle 13 genannten Optionen vorgeschlagen.

Die Außenwand übernimmt verschiedene Aufgaben in einem Gebäude. Für ein Wohngebäude gehört sie klassischerweise zum statischen Lastabtrag hinzu und erfüllt daneben mehrere bauphysikalische Aufgaben (Brandschutz, Schallschutz, Feuchteschutz, Wärmeschutz). [58] Der Wandbildner soll hier beibehalten werden, weswegen der Fokus auf der Fassadengestaltung beruht. Für Fassaden bestehen bereits im Stand der Technik diverse Gestaltungsoptionen.

Als vielversprechend in diesem Kontext wird das Prinzip der vorgehängten hinterlüfteten Bekleidung bewertet. Eine vorgehängte hinterlüftete Fassade setzt sich zusammen aus Fassadenbekleidung mit Unterkonstruktion, Hinterlüftung und Dämmung. Es wurde zunächst eine metallische Unterkonstruktion aus Aluminium gewählt. Alternativ werden ebenfalls üblich andere nichtrostende Metalle oder Holz für Unterkonstruktionen verwendet. Die Mineralwolle wird punktförmig geklebt oder gedübelt nach DIN 18516. Die außenseitige Bekleidung kann frei gewählt werden. Idealerweise könnte die Mineralwolle durch Klemmung ausreichend lagegesichert werden. Hierfür liegt den Autoren jedoch kein zugelassenes System vor.

Adaptiert an das hohe Rückbaupotential von Trockenbaukonstruktionen für Wand- und Deckenbauteile wird auch für den Fußboden vorgeschlagen den Estrich als Trockenestrich auszuführen. Trockenestrichplatten können aus verschiedenen Materialien wie Gipsfaser, Faserzement oder auch Holzwerkstoffplatten bestehen. Die Platten werden untereinander verklebt und / oder verschraubt schwimmend auf einer Trittschalldämmung verlegt. Im Sinne der Rückbaufähigkeit sollte auf eine Verklebung verzichtet werden. Trockenestrichkonstruktionen sind Stand der Technik, werden aber überwiegend in der Bestandssanierung wegen geringerer Lasten und Einbaufeuchte als Nassestrichsysteme verwendet. Im Rahmen des Projekts wurde ein Trockenestrich aus 25mm starken Gipsfaserplatten betrachtet. Eine alternative Konstruktion mit einer gleich starken OSB Platte beeinflusste das Ergebnis geringfügig positiv für GWP, ODP, AP, EP und PENRT und geringfügig negativ für PE_{ges} und PERT. POCP fiel für die Gipsfaser-Alternative um ca. ein Drittel besser aus.

Tabelle 11
konstruktive Optimierung hinsichtlich des Mineralwollrecyclings einer massiven Außenwand

Konstruktion	Darstellung	Hinweis
massive Außenwand – außenseitig gedämmt	 <ul style="list-style-type: none"> mineralischer Innenputz, d=1cm massive Wandkonstruktion, d=24cm Mineralwolle WLG035, d=12cm WDVS-Putzsystem 	<p>Veränderung der stoffschlüssigen Verbindung zur kraftschlüssigen Verbindung für die äußere Bekleidung. Der Dämmstoff ist normrechtlich nach DIN 18516 dennoch lagezusichern (kleben oder dübeln).</p>
Basis	 <ul style="list-style-type: none"> Unterkonstruktion und Belüftung mineralischer Innenputz, d=1cm massive Wandkonstruktion, d=24cm Mineralwolle WLG035, d=12cm Bekleidung 	
optimiert		

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 12
konstruktive Optimierung hinsichtlich des Mineralwollrecyclings einer massiven Geschossdecke

Konstruktion	Darstellung	Hinweis
Gedämmte Kellerdecke		<p>Austausch des Zementestrichs im Nassverfahren zu einer Trockenestrichkonstruktion mit OSB-Platten oder Faserzementplatten auf Mineralwolle. Eine Alternative stellt die Erforschung eines Abbruchverfahrens dar, welches den getrennten Rückbau von Estrich und Mineralwolle möglich macht, da diese an sich nicht stoffschlüssig verbunden sind. Unterseitig vlieskaschierte Mineralwolle (idealerweise Steinwolle, da robuster bei geringfügigen Anhaftungen)</p>

Quelle: Eigene Darstellung

Am umfangreichsten gestaltet sich die Konstruktion eines rückbaufähigen Flachdachs unter Berücksichtigung der aktuellen konstruktiven Lösungen im Stand der Technik. Hier wird das Klemmprinzip des Satteldachs adaptiert. Ein massiver Aufbau ist dann konstruktiv nicht mehr notwendig, da die Sparren auch eine tragende Funktion übernehmen können. Um dem Flachdach Rechnung zu tragen wird die optimierte Dachkonstruktion flach geneigt (ca. 7-10%) geplant. Die flache Dachneigung schränkt die Wahl der Dachdeckung ein. Hier wurden Stehfalzprofile gewählt, die hygrothermisch simuliert werden sollten, um nachweisbar schadensfrei zu sein. Durch die hier gewählte Dacheindeckung kann auf ein wasserdichtes Unterdach verzichtet werden.

Tabelle 13
konstruktive Optimierung hinsichtlich des Mineralwollerecyclings eines Flachdachs

Konstruktion	Darstellung	Hinweis
Flachdach	<p>Abdichtungsbahnen</p> <p>Flachdachdämmung WLG035 i.M. d=18cm</p> <p>Stahlbedondecke, d=20cm</p> <p>mineralischer Innenputz, d=1cm</p> <p>Basis</p> <p>Stehpfalzprofil</p> <p>Holzschalung, d=2,4cm</p> <p>Unterkonstruktion</p> <p>Holzfaserplatte</p> <p>Sparren 20/10 Mineralwolle WLG032, d=20cm</p> <p>Gipskartonplatte auf Unterkonstruktion</p> <p>optimiert</p>	<p>Auflösen der stoffschlüssigen Verbindung durch Änderung der Dachkonstruktion. Adaption des gut rückbaubaren Steildachsystems unter Beibehaltung der wesentlichen Dachform (dennoch geringfügige Änderung der Dachneigung).</p>

Quelle: Eigene Darstellung

Das konstruktiv optimierte Gebäude wurde auf seine ökologische und ökonomische Wirkung hin überprüft. Es wurde berechnet, ob sich gängige Umweltindikatoren⁶ in der Ökobilanz, wie das Treibauspotential, Versauerungspotential, Eutrophierungspotential, Ozonbildungspotential, Ozonschichtabbaupotential und der Gesamtprimärenergiebedarf sowie die Lebenszykluskosten im Vergleich zu dem ursprünglichen Gebäude verschlechtern. Die Ergebnisse wurden auf den Quadratmeter des betrachteten Bauteils bezogen.

Ökobilanzieller Vergleich der optimierten Konstruktion

Die Ökobilanz wurde mit Hilfe des Programm eLCA und auf Datengrundlage der Ökobaudat 2021 durchgeführt. Normgrundlage ist die DIN 15804-A1. Für die Nutzungsdauern der Bauteilschichten wurde die **Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ mit Stand 24.02.2017 inkl. FAQs zu Grunde gelegt.** Nachfolgend sind in Abbildung 17 und Abbildung 18 alle Bauteilbasisvarianten und die jeweilige Optimierungsstrategie dargestellt. Als Betrachtungszeitraum wurden 50 Jahre gewählt. Die Bauteilalternativen wurden für den Anwendungsfall

⁶ Gewählt auf Grundlage zertifizierter Indikatoren nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)

konstruktiv sinnvoll gewählt und funktional über einen gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten beziehungsweise die gleiche Tragfähigkeit abgestimmt. Die vollständigen Ergebnisse können Anlage B entnommen werden.

Für das Treibhauspotential und den Gesamtprimärenergiebedarf kann festgestellt werden, dass die Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade etwas ungünstiger abschneidet. Dies liegt vor allem in der Herstellungsphase und hier bei dem gewählten Fassadensystem. Es wurden verschiedene Hersteller-EPDs für Fassadensysteme angewendet, um auszuschließen, dass es sich hierbei um Zufälligkeit handelt. Das WDVS muss über den Lebenszyklus einmal ausgetauscht werden, schneidet jedoch dennoch besser ab. Noch nicht berücksichtigt werden kann hier der positive Effekt auf des Recyclingpotential im End of Life für Mineralwolle. Es wurde zudem für die Mineralwolle ein generischer Datensatz für Fassadendämmung verwendet, wobei die Autoren anmerken, dass für ein WDVS aktuell nur Steinwolle in Frage kommt, für eine vorgehängte hinterlüftete Fassade jedoch beide Mineralwollen.

Das flach geneigte Dach ist bezüglich des GWP's deutlich günstiger zu bewerten als das konventionelle Flachdach. Beim Flachdach fällt an dieser Stelle vor allem der Stahlbeton negativ auf. Die hohen Werte für die Entsorgung sind maßgeblich auf den Beton zurückzuführen, wohingegen es beim flach geneigten Dach hauptsächlich die Holzbauteile sind, die überwiegend thermisch verwertet werden. Es wird davon ausgegangen das sowohl die beschieferte Bitumenbahn als auch die Stehpfalzprofile innerhalb des Betrachtungszeitraumes einmal ausgetauscht werden müssen.

Die beiden Deckenvarianten sind vergleichsweise ähnlich, hier stammt der Hauptbeitrag zum GWP aus der gleichbleibenden Tragkonstruktion. Als Trockenestrichelement wurde eine Gipsfaserplatte angesetzt. Eine OSB Platte gleicher Dicke verbesserte die Werte für GWP, AP und EP, verschlechterte jedoch die Werte für POCP und PE_{GES} . Die Veränderungen waren nicht maßgeblich. Die recyclingoptimierte Deckenvariante ist hier geringfügig besser zu bewerten.

Die Dach- und Deckenvarianten verhalten sich bezüglich des Primärenergiebedarfs ähnlich zum bereits betrachteten GWP. Daraus lässt sich ableiten, dass der Hauptbeitrag des GWP aus Verbrennungsprozessen der Herstellung oder Energiebereitstellung stammt. Die Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteter Bekleidung ist ungünstiger als die WDVS- Variante, die Decke mit Trockenestrich geringfügig besser zu bewerten bezüglich des Primärenergieverbrauchs. Anders sieht es beim Dach aus. Die thermische Verwertung des Holzes wirkt sich primärenergetisch positiv aus. Der Anteil der Entsorgung für das konventionelle Flachdach ist gering, eine wesentlichere Rolle spielt die Instandsetzung der Bitumenbahn.

Beim Ozonbildungspotential fällt auf, dass die Bauteile mit Stahlbetonanteilen wesentlich größere Beiträge liefern. Dieser Umstand ist vor allem auf den Stahl zurückzuführen. Im Vergleich der einzelnen Varianten untereinander schneidet die vorgehängte hinterlüftete Bekleidung schlechter ab als die WDVS-Variante, die sogar einen negativen Wert in der Herstellung aufweist. Dies liegt am Datensatz für Kalksandstein, der einen negativen POCP Wert aufweist. Da die vorgehängte hinterlüftete Bekleidung den gleichen Wandbildner verwendet, wird deutlich, dass wieder das Fassadenelement maßgeblich für die deutlich feststellbaren Unterschiede ist.

Für das Flachdach kann im Vergleich zu seiner recyclingoptimierten Variante ein deutlicher Unterschied in der Herstellungsphase festgestellt werden. Ergänzend zu der zuvor getroffenen Aussage bezüglich des Einflusses von Stahl auf diesen Wert, ist auch für das flachgeneigte Dach zum einen die metallische Dacheindeckung maßgeblich, aber zum anderen auch die Holzwerkstoffplatte (MDF / HDF).

Die Dachkonstruktionen fallen für den Indikator Versauerungspotential nahezu identisch im Gesamtwert aus, ebenso die Außenwände, wobei dies bei der WDVS Variante vor allem an der notwendigen Instandsetzung des WDVS liegt, wahren bei der vhF Variante die Werte maßgeblich aus der Herstellung stammen. Vorstellbar wäre als Verursacher die Aluminiumunterkonstruktion.

Das Flachdach fällt deutlich schlechter aus als das flachgeneigte Dach. Hauptursächlich ist dafür die größere Mineralwollmenge, die durch die Schmelzprozesse einen großen Beitrag zum Versauerungspotential hat.

Zwischen den beiden Deckenvarianten besteht fast kein Unterschied, dieser zeigt sich nur geringfügig in der Entsorgung, die für den Zementestrich aufgrund der höheren Masse negativer ausfällt.

Beim Eutrophierungspotential ist die Instandhaltung der WDVS Fassade ursächlich dafür, dass dieser Wandaufbau in Summe etwas ungünstiger zu bewerten ist als die vorgehängte hinterlüftete Fassade.

Die horizontalen Bauteile Dach und Decke fallen in ihrer Bewertung wie beim Versauerungspotential auf. Die beiden optimierten Varianten sind leicht vorteilhaft zu bewerten.

Abbildung 17
Umweltindikatoren für 1m² Fläche der optimierten Bauteile im Vergleich zur Ausgangsvariante, GWP (oben), PE_{GES} (unten)



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

Abbildung 18
Umweltindikatoren für 1m² Fläche der optimierten Bauteile im Vergleich zur Ausgangsvariante, POCP (oben), AP (mitte), EP (unten)



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

Ökonomischer Vergleich der optimierten Konstruktion

Um bewerten zu können, inwiefern sich die Konstruktionsalternativen ökonomisch unterscheiden, wurden die Herstellkosten mit Hilfe der Software Legep ermittelt. Das Programm ermöglicht eine Kostenplanung nach DIN 276 und greift auf die sirAdos Datenbank Stand 2019 zu. Vorteilhaft daran ist, dass nicht nur die Herstellkosten der einzelnen Bauteilschichten berücksichtigt werden, sondern auch anteilige Nebenarbeiten sowie Lohn-, Stoff-, Geräte- und sonstige Kosten in den Preisen miteingepreist sind.

Die in drei Bauteilkonstruktionen wurden zusammen mit ihren jeweiligen Konstruktionsalternativen geplant. Die Kostengegenüberstellung kann Tabelle 14 entnommen werden. Es kann festgestellt werden, dass die Standardkonstruktionen wie erwartet in ihrer Herstellung kostengünstiger sind. Erstaunlicherweise ergab insbesondere das Flachdach, geplant als Filigrandecke, im Vergleich zum flachgeneigten Dach mittels Holzstegträgern keinen bedeutenden Preisunterschied.

Für den Lebenszyklus sind nur bei der Dachdeckung (Bitumenbahn und Stehpfalzverblechung) unterschiedliche Kostenentwicklungen zu erwarten, da bei den anderen Bauteilen innerhalb eines in der LCC-Betrachtung üblichen Zeitrahmens für Gebäude von 50a kein Austausch derjenigen Schichten zu erwarten ist, die variieren. Weitere Kosten für den Lebenszyklus wie Reinigung und regelmäßige Wartung wurden hier nicht berücksichtigt. Für die Bitumenbahn wurde ein Lebenszyklus von 20a angesetzt, für die Metalldacheindeckung 45a [15]. Es wurde eine allgemeine Preissteigerungsrate von 2% und ein Diskontierungszins von 1,5% gewählt [16].

Unter Berücksichtigung der Instandsetzung des Dachbauteils schneidet die recyclingoptimierte Variante kostengünstiger ab.

Tabelle 14

Vergleichende Darstellung der Herstellkosten für ein Basisbauteil und einer für den Rückbau von Mineralwolle optimierte Konstruktionsvariante

Bauteil	Kosten Basisvariante [€/m ²]	Kosten optimierte Variante [€/m ²]	Differenz [€/m ²]	Differenz
Außenwand	241,78	331,14	89,39	137%
Kellerdecke	339,48	369,81	30,33	109%
Dach	300,41	304,77	4,36	101%
(Dach LCC)	(487,81)	(426,81)	(-61,00)	(87%)

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, Datengrundlage: sirAdos Datenbank Stand 2019

Zusammenfassend schneidet die Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteten Bekleidung in allen Kriterien mit Ausnahme von POCP nach aktueller Bewertungsgrundlage ökologisch als auch ökonomisch schlechter als das WDVS ab. Die Berücksichtigung von Mineralwolle im Recyclingpotential würde das Ergebnis qualitativ nicht verändern, da innerhalb dieser Methode nicht unterschieden werden kann, ob der Dämmstoff später noch verwertbar ist oder nicht. Das bedeutet eventuelle künftige Gutschriften beim Recyclingpotential in der EPD würden beiden Varianten zu Gute kommen. Die Vorteile der vorgehängten hinterlüfteten Bekleidung können also nicht korrekt abgebildet werden. Generell zeigt dieser Vergleich auf, dass Ressourcenverbrauch und Beitrag zu Umweltwirkungen teilweise gegeneinander abzuwägen sind, so dass beide Varianten Vor- und Nachteile haben und keine eindeutig empfohlen werden kann.

Die Deckenkonstruktion mit Trockenestrich schneidet in allen zuvor ökobilanziellen Vergleichen geringfügig besser als die konventionelle Estrichdecke ab. Dies ist in Anbetracht dessen, dass beide Varianten stofflich sehr ähnlich sind, die Trockenestrichvariante allerdings leichter, plausibel. Preislich ist die Trockenestrichvariante

ungünstiger zu bewerten, wobei hier unter Berücksichtigung von Preisschwankungen und individuellen Angebotsverhandlungen eine Vorteilhaftigkeit nicht prinzipiell ausgeschlossen ist.

Das flach geneigte Dach schneidet in allen Umweltindikatoren besser ab als das konventionelle Flachdach. Dies liegt zum einen in der leichteren Bauart, dem ökobilanziell negativen Beitrag von Stahl im Gegensatz zum positiven Beitrag von Holz und der entfallenden Bitumenbahn, wobei für diese noch zu prüfen ist, ob auf eine entsprechende Abdichtungsbahn im flach geneigten Dach tatsächlich verzichtet werden kann. Auch ökonomisch ist das flach geneigte Dach bei der Herstellung nur als geringfügig nachteilhafter als das Steildach einzuordnen, im Lebenszykluskostenvergleich sogar positiv, so dass diese Alternative empfohlen wird sofern dem keine anderen bautechnischen Belange entgegenstehen.

Ausdrücklich soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die gewählten Alternativkonstruktionen exemplarische Varianten darstellen, an Hand derer nachgewiesen werden sollte, dass durchaus ökologisch und ökonomisch gleichwertige Konstruktionslösungen mit gleichzeitig hohem Recyclingpotenzial entwickelt werden können. Die planerische Vielfalt soll keinesfalls eingeschränkt werden.

4.3 Aufbereitungsmaßnahmen

Eines der spannendsten Forschungsthemen rund um das Recycling von Mineralwolle ist die Frage nach einem geeigneten Aufbereitungsverfahren, um die Mineralfasern von den für ein Recycling störenden Stoffen zu trennen. Während es gute Techniken gibt, Mineralwollämmstoffe zu zerkleinern, ist insbesondere aufgrund des Faserhaltens eine Trennung von Störstoffen schwieriger.

[37], [38] haben eine Methode entwickelt, um expandiertes Polystyrol von Wärmedämmverbundsystembestandteilen zu trennen. Sie stellen einen guten Trennschnitt fest. Polystyrole verhalten sich jedoch grundsätzlich anders als Faserdämmstoffe. Forschende der soeben genannten Veröffentlichung gaben auf persönliche Rückfrage an, ihre Methode ohne weitere Anpassungen aufgrund der Faserfreisetzung von Mineralwolle als nicht geeignet zu bewerten.

[129] hat darüber hinaus in ihrer Dissertation ein Verfahren zum Systemabtrag von Wärmedämmverbundsystemen mittels einer speziellen Bürste geforscht. Einen anderen Ansatz wählen [115], die zu einem deaktivierbaren Klebstoff für WDVS geforscht haben.

Die Produktreihe WEBER hat auf dem deutschen Bauproduktmarkt ein System entwickelt, welches beim Rückbau eine Trennung der mineralischen Schichten vom Dämmstoff mittels Strippen möglich macht. [33]

Im Rahmen des durch das European Union's Horizon 2020 geförderten Projekts Wool2Loop [132] hat sich ein Team eines polnischen Abbruchunternehmens⁷ neben „smarten Abbruchmöglichkeiten“ insbesondere für gefährliche Abfälle auch mit der Aufbereitung der Mineralwollabfälle beschäftigt. Fokus lag dabei auf der Komprimierung zwecks Lagerung und Transport. [22] Es wurden drei Optionen vorgestellt, die geeignet sind sowohl auf der Baustelle als auch auf einer Sammelstelle implementiert zu werden.

- Presscontainer, Kompaktierungsleistung 6:1
- Ballenpresse, Kompaktierungsleistung 15:2⁸
- Hochgeschwindigkeitsschredder, Kompaktierungsleistung 4:1

Darüber hinaus gibt es auch in Deutschland einen Anbieter (Europress Umwelttechnik⁹), der mobile und stationäre Kanalbalkenpressen anbietet. Nach Angabe des Herstellers liegt die Komprimierungsleistung bei 6:1 bis 10:1 und wird daher offiziell mit durchschnittlich 8:1 angegeben. Die Angaben passen gut zu [22],

⁷ TREE Grupa, www.tree.com.pl

⁸ In der Originalquelle wird eine Kompaktierungsleistung 15:1 angegeben, auf Nachfrage hat die Referentin diese Leistung aber nach unten korrigiert auf 15:2.

⁹ EUROPRESS Umwelttechnik GmbH, www.europress-umwelttechnik.de

weswegen sie als plausibel angenommen werden. In die Kanalbalkenpresse werden die BigBags als Ganzes eingebracht, verpresst und dann foliert. Nach Angabe eines Mitarbeiters der Firma können zumindest die stationären Anlagen technisch auch ohne BigBags betrieben werden – so würde es in Österreich gehandhabt werden. Es wird jedoch darauf verwiesen, dass die Mineralwolle in Deutschland verpflichtend über BigBags entsorgt werden muss.

Alle vier genannten Optionen setzen jedoch voraus, dass die Mineralwolle vorher selektiv zurückgebaut worden ist und bieten daher keine reinigende Aufbereitungsmaßnahme.

Zu Beginn des Kapitel 4 wurde dargelegt, welche Verunreinigungen bei Mineralwolle anfallen können und was für ein Recycling als Störstoff zu werten ist. Es wurde festgestellt, dass es große Schnittmengen in der Störstoffdefinition zur Behälterglasindustrie gibt. Angelehnt an die dortigen Aufbereitungsanlagen wurde auf dieser Grundlage ein theoretisches Konzept entwickelt, mit Hilfe dessen Störstoffe von Mineralwolle separiert werden können (vgl. Abbildung 20).

Die Beprobung der Proben W1-W7 von Rückbauvorhaben haben gezeigt, dass der Reinheitsgrad der entsorgten Mineralwolle stark variieren kann. Aus diesem Grund sollte jedem Aufbereitungsschritt immer eine visuelle Sichtung und ggf. händische Grobsortierung vorangehen. Im Zuge dieser Maßnahme kann auch die spektroskopische Überprüfung erfolgen, ob es sich bei den Proben um Glas- oder Steinwolle handelt. In einem nächsten Schritt sollten die Proben zerkleinert und gesiebt werden. Eigene Versuchsreihen an einer Schneidemühle Retsch SM 100 an den Proben W1, W2, W6 und W7 legen dar, dass Kunststofffolien ein gänzlich anderes Zerkleinerungsverhalten als Mineralwolle aufweisen. Während die Mineralwolle sehr schnell in kleine Flocken zerkleinert wurde, konnten die Messer aufgrund ihres Abstands zueinander bei der Folie so gut wie keiner Zerkleinerung bewirken. Durch die resultierende sehr unterschiedliche Stoffgröße wird eine erste Grobsiebung als vielversprechend bewertet. Darüber hinaus setzen die meisten nachfolgenden Sortiermechanismen eine gewisse Range an Partikelgröße voraus, um effizient zu funktionieren und somit einen guten Trennschnitt zu erreichen.

Abbildung 19
Mineralwolleflocken der Probe W6 nach Durchgang Schneidemühle und Sieb <10mm. Die Kunststofffolie hatten das Sieb zuvor nicht passiert.



Bildquelle: Eigene Aufnahme

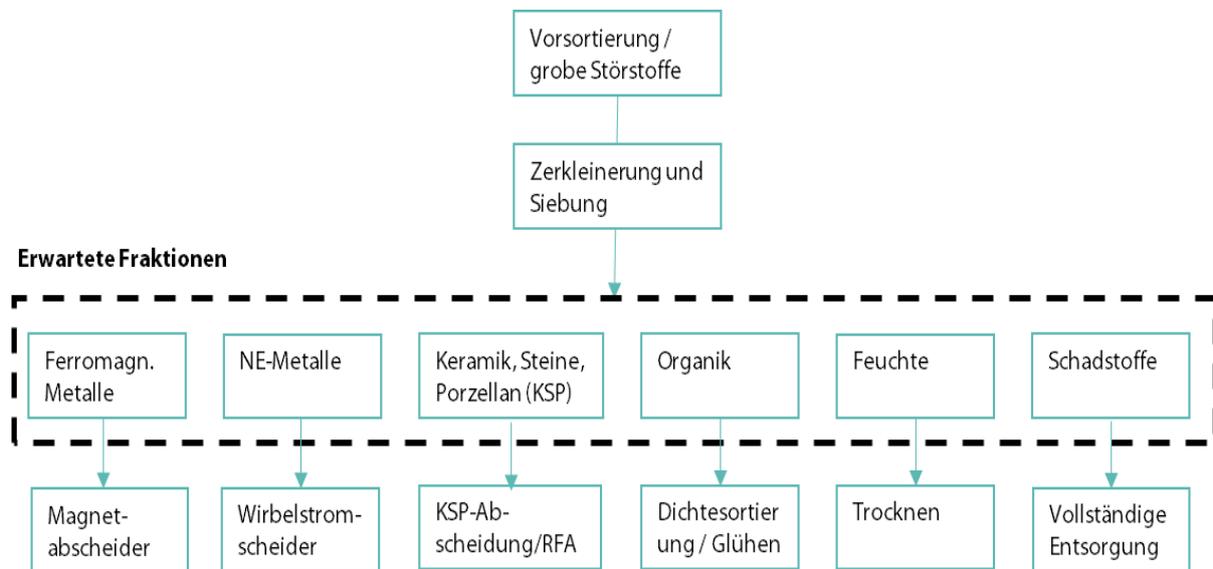
Ferromagnetische Störstoffe wie bspw. Eisenwerkstoffe und niedrig- bis mittellegierte Stähle können über einen Magnetabscheider entfernt werden. Denkbar sind Trommel- oder Überbandscheider. Nach [77] besteht auch die Möglichkeit einer Nassmagnetabscheidung, da der Trenneffekt in Suspensionen vielversprechend ist und zudem die Nachteile aus zu feuchten oder zu trockenen Proben entfallen. Auf diese Nachteile weist auch [22] hin. Zu feuchte Proben verklumpen, wohingegen zu trockene Proben eine unerwünschte Staubbildung verursachen. Da Feuchte selbst allerdings ebenfalls einen Prozessstörstoff im Recycling darstellt, müsste an

dieser Stelle zum Rücktrocknungsverhalten von durchfeuchteter, zerkleinerte Mineralwolle weiter geforscht werden.

Nichteisenmetalle wie Kupfer, Edelstahl oder Aluminium sollen über einen Wirbelstromabscheider bzw. per Wirbelstromsortierung von der Mineralwolle getrennt werden. Dieser Technik, die über die magnetische Wirkung mit elektromagnetischen Feldern arbeitet, ist nach [77] besonders gut für aluminiumhaltige Materialien und für Partikelgrößen > 6mm geeignet. Die Wirbelstromsichtung sollte prozesstechnisch nach der Abtrennung ferromagnetischer Störstoffe erfolgen.

Zur Trennung der KSP-Fractionen werden in der Regel optische Systeme verwendet, die über Kameras Farben und Nichttransparenz unterscheiden können. Schwierig wird hierbei Glaskeramik, welche optisch wie Glas aussieht, aber einen Störstoff darstellt [77]. Gut erkannt werden kann die Glaskeramik, wenn bei der KSP-Abscheidung auch Röntgenfluoreszenz eingesetzt wird [81]. Wird ein Störstoff erfasst, dann wird dieser in der Regel mit Druckluft aussortiert. Den Autoren liegen keine Informationen darüber vor, ob sich um den auszuscheidenden Stoff befindliche zerkleinerte Mineralfaser hier aufgrund der Faserbeschaffenheit signifikant anders verhält als zerkleinertes Behälterglas.

Abbildung 20
Schematische Darstellung von Aufbereitungsschritten zur Entfernung von Störstoffen aus Abbruchmineralwolle für künftige Wiederverwertung entsprechend der erwarteten Fraktionen



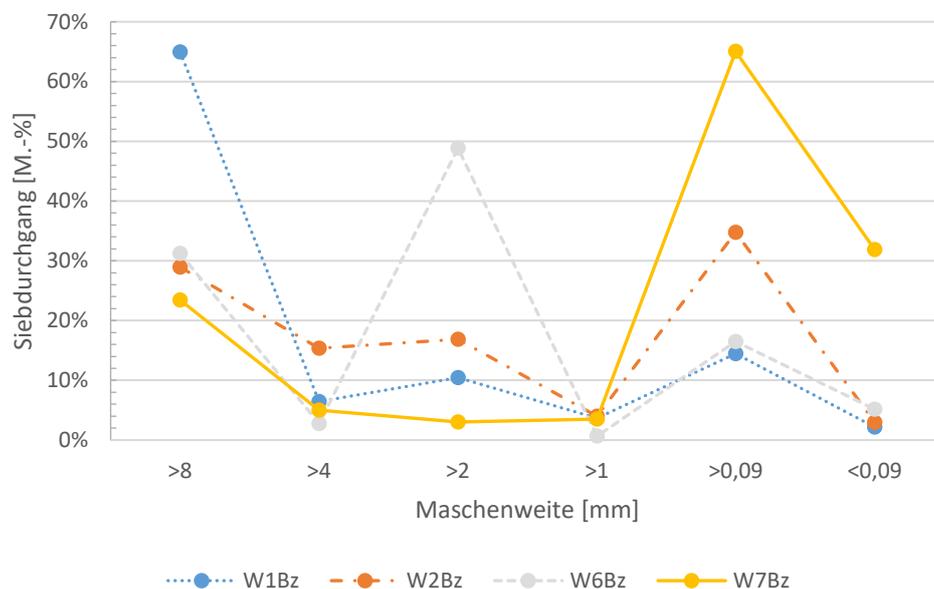
Quelle: Eigene Darstellung nach [95]

Für die Abtrennung der Organik und insbesondere von Folien und Kunststoffen wird eine Dichtesortierung empfohlen. Die Dichtesortierung nutzt Dichteunterschiede unterschiedlicher Materialien und daraus resultierende unterschiedliche Fallgeschwindigkeiten oder Beschleunigungsreaktionen. Typischer Vertreter in der Dichtesortierung ist die Windsichtung. In der Regel fällt dabei das zu reinigende Gut, während durch gezielte Luftströme leichtere organische Stoffe aussortiert werden. Es wäre denkbar dieses Prinzip umzudrehen oder gar, die Mineralwolle über einem Fließband abzusaugen. Organik, die auf diese Art nicht aussortiert werden kann, kann über eine Vortemperierung entfernt werden. Aufgrund des notwendigen Energieaufwands sowie der im Verbrennungsprozess entstehenden NO_x Werte wird der letzte Schritt aber kritisch betrachtet. Gleichzeitig würde aber eine Erwärmung der Proben auch unerwünschte Feuchte entfernen. Alternativ können die Proben energieärmer, dafür zeitaufwändiger auch durch geschützte Lagerung trocknen.

Um das Verhalten von Mineralwollen, die von der Baustelle zurückgeliefert werden, beschreiben zu können, wurden die Proben W1, W2, W6 und W7 so wie sie von der Baustelle kamen zerkleinert und klassifiziert. Dazu

wurden die Proben zunächst mit einer Schneidemühle auf Mineralwollflocken mit einer Größe <10mm zerkleinert. Metalle mussten aus technischen Gründen vorher aus dem Probensatz entfernt werden. Allerdings handelt es sich hierbei um eine Mühle in Technikumsgröße. Es ist anzunehmen, dass großindustrielle Mühlen vereinzelte Drahtanhaftungen verarbeiten können. Anschließend wurden die Proben mit einer Analysensiebmaschine Haver EML 400 in Korngrößengruppen sortiert (vgl. Abbildung 21). Dabei wurde festgestellt, dass das größte Sieb nicht zu hoch mit den Flocken bedeckt werden darf, da andernfalls die Mineralfaserflocken beginnen sich wieder zu verfilzen und nicht durch das Sieb fallen. Dieser Punkt sollte auch bei der Planung künftiger Anlagen berücksichtigt werden. Dies kann ein unerwünschter Effekt sein, wenn die gewünschte Sortierung nicht eintritt.

Abbildung 21
Siebklassifizierung der Mineralwollen W1z, W2z, W6z und W7z, das z steht für den vorangegangenen Zerkleinerungsprozess. Die Flocken wiesen eine maximale Größe von 10mm auf.



Quelle: Eigene Daten

Betrachtet man die Sieblinie (vgl. Abbildung 21), kann festgestellt werden, dass die notwendige Korngröße der Proben von >4mm sich für einen hohen Anteil der Proben eingestellt hat. Vor allem Volumenmäßig war dies der größte Anteil. Massenmäßig fällt auf, dass alle Proben einen verhältnismäßig hohen Anteil an Mineralfaserflocken der mit einer Größe von 0,09-1mm aufweisen.

Es wurde weiter festgestellt, dass kleinstteilige, mineralische und organische Verunreinigungen in jeder Siebklasse weiterhin vorzufinden waren. So wurde beispielsweise bei Probe W7z festgestellt, dass im Sieb der Maschenweite 2 mm die Mineralwollflocken größer waren als die sonstigen darin befindlichen Stoffe und begannen sich zu filzigen Kugeln zu agglomerieren (vgl. Abbildung 22).

Von einem dänischen Unternehmen für Recyclinganlagen¹⁰ wurde ein Verfahren entwickelt, das auf einer bestehenden Anlage zur Aufbereitung von Gipskartonplatten aufbaut. Das Verfahren beinhaltet bereits einige der zuvor beschriebenen Aspekte, die durch die Autoren als geeignet bewertet wurden und soll daher näher beschrieben werden: Nach der Anlieferung der Abbruchmineralwolle findet eine grobe Vorsortierung mit dem Bagger statt. Dieser befördert anschließend die Mineralwolle in den Zerkleinerer über eine Trichtervorrichtung. Im Zerkleinerer befindet sich eine Schneckenmühle, die mit ca. 15 Umdrehungen je Minute arbeitet. Die einzelnen Mühlen bewegen sich horizontal sowie vertikal zueinander. Der Abstand zwischen den

¹⁰ ACA Industry ApS, <https://acaindustry.de/>

Mühlschnecken ist verglichen zu anderen Mühlen groß, so dass das Material sich überwiegend aneinander zerkleinert. Das zerkleinerte Material fällt anschließend auf ein Förderband, wo ein Magnetabscheider Eisenmetalle entfernen kann. Anschließend gelangt es zu einer Vibrationssiebzanlage. Das Siebband vibriert, um Energie auf die einzelnen Stoffe des noch verunreinigten Mineralwollgemisches zu übertragen. Da die Fremdstoffe und die Mineralwolle unterschiedliche Dichten aufweisen, bewegen diese sich unterschiedlich auf dem Siebband, so dass eine Separation in Stoffe $< 10\text{ mm}$ und $> 10\text{ mm}$ stattfindet. Die wiederzuverwertende Mineralwolle befindet sich in der kleineren Einheit. Der beschriebene Vorgang ist schematisch in Abbildung 23 und Fotografien der Mineralwollrecyclinganlage in Abbildung 24 dargestellt. Nach Aussage des Unternehmensinhabers wurde eine entsprechende Maschine gerade von einem Glaswollehersteller in Finnland implementiert.

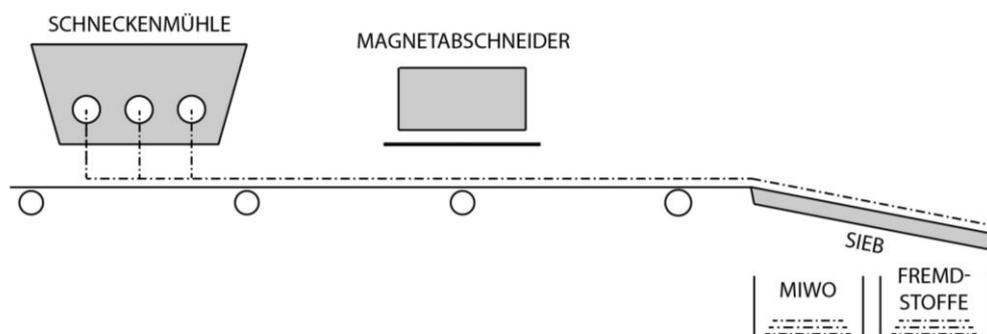
Eine visuelle Untersuchung einer zur Verfügung gestellten Probe attestiert, dass die Korngröße weit unter $0,5\text{ mm}$ liegt. Vereinzelt Verunreinigungen konnten festgestellt werden.

Abbildung 22
Mineralwollefraktionen $>2\text{ mm}$ und $<4\text{ mm}$ der Probe W7z



Quelle: Eigene Aufnahme

Abbildung 23:
Schematische Darstellung einer bestehenden Mineralwollaufbereitungsanlage



Quelle: Eigene Darstellung nach [118]

Abbildung 24

oben links: angeliefertes Material nach grober Vorsortierung, oben rechts: Schneckenmühle zur Zerkleinerung der Mineralwolle
unten links: zerkleinerte Mineralwollflocken fallen auf ein Förderband, unten rechts: Die Mineralwolle wird über ein Siebband separiert.
Links befindet sich das Mineralwollmehl, rechts die Störstoffe.



Quelle: ACA Industry¹¹ [118]

¹¹ ACA Industry ApS, <https://acaindustry.de/>

4.4 Logistikaspekte

Das Beispiel aus der Glasindustrie zeigt (Kap. 3.1), dass der Transport eine relevante Kostengröße darstellt. Dabei spielen als Faktoren der Durchfluss also die zu transportierende Mineralwollemenge, das Transportmittel, die Auslastung und der Weg eine Rolle. Die Optimierung dieser Faktoren wird über die Transportinfrastruktur gesteuert. Als Transportinfrastruktur wird in diesem Zusammenhang die Kapazitätsgrenzen von Transportmitteln sowie Sammel- und Umschlagsplätze verstanden, die zur Optimierung als zeitliche Pufferzone und zur Komprimierung des Transportgutes dienen können.

Im Vergleich zu anderen Abfallarten spielt Mineralwolle mit dem jährlichen Aufkommen von ca. 200.000 Tonnen bisher im Transportsystem eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 15
Abfallaufkommen (EAV/AVV) 170603* Auswahl Bundesländer 2016

Bundesland	Tonnen/Jahr	Tonnen/Arbeitstag ¹
Berlin	9.071	36,3
Niedersachsen	9.439	37,7
Bayern	26.484	105,9

¹angenommene zeitliche Gleichverteilung

Da das Baugewerbe saisonalen Zyklen unterworfen ist, sind von den Absendern – Baustellen – über das Jahr verteilt unterschiedlich hohe Abfallmengen zu erwarten. Nach [126] sind bei Einfamilienhäusern derzeit nur Minderungen von beispielsweise 6,8 m³ zu erwarten, da die Lebensdauer der Konstruktionen 30 Jahre und mehr beträgt. Dadurch sind derzeit hauptsächlich Instandsetzung und Rückbau von Gebäuden aus der Zeit zwischen der Ölkrise und der Wärmeschutzverordnung von 1994 zu erwarten bzw. deren letzter Sanierungszyklus in diese Zeit zu verorten ist. In dieser Zeit wurde Mineralwolle vorwiegend für die Dämmung von Dächern, abgehängten Decken und Geschossdecken verwendet. Ein Vielfaches ist mit 53 m³ nach dem heutigen Gebäudeenergiegesetz zu erwarten (vgl. Kapitel 4.2). In [126] variiert die Zahl im Bereich einer Spannweite von 15 %. Auch bei Mehrfamilienhäusern wird in dieser Literatur nur mit ca. 45 m³ gerechnet, wobei dieser Ansatz nicht Mehrfamilienhäuser aus der seriellen Fertigung berücksichtigt. Da Wohngebäude in Deutschland den Großteil aller Gebäude ausmacht und auch bei Modernisierungen in Büro- und Verwaltungsgebäuden (Bsp. Veränderung von Raumaufteilung durch Erneuerung von Trennwänden) eher geringe Mengen zu erwarten sind, ist bezogen auf den Transport von vielen Absendern mit geringen Mineralwollerückbaumengen auszugehen. Typische Akteure sind Private und Kleingewerbetreibende. Daneben sind Gewerbetreibende als Absender mit höheren Mineralwolle-mengen zu erwarten, z.B. durch Großbaustellen im Bereich der Nichtwohngebäude.

Im Bereich der Entsorgung von Bauabfällen haben sich für den Transport Lastkraftwagen durchgesetzt, die mit Containern beladen sind. Darüber hinaus werden leichte Lastkraftwagen bis 7,5 t und Transporter eingesetzt, da nach älteren Regelungen mehr Personal zur Verfügung steht, die die Fahrzeuge führen dürfen. Für eine Bewertung werden folgende Transportmittel angesetzt:

- Transporter bis 3,5 t mit einem maximalen Volumen von 11,5 m³
- leichte Lastkraftwagen bis 7,5 t mit einem maximalen Volumen von 17,5 m³
- Lastkraftwagen 18 t, 28 t mit und ohne Anhänger mit einem maximalen Volumen pro Container von 38,6 m³

Tabelle 16
Vergleich angesetzt Kosten

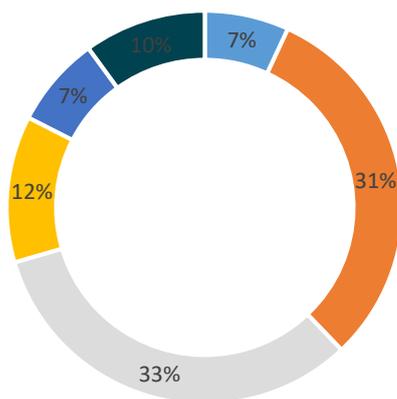
Betriebskostenart (Cent/km)	Transporter bis 3,5 t	Lastkraftwagen 18 t mit Anhänger
Gebühren und Versicherung	6	35,6
Kraftstoff	27	61
Fahrer	28,4	35,2
Investition (12%)	10,5	22,4
Wartung & Reparatur (7,5%)	6,5	14
Gemeinkosten (10%)	8,7	18,7
Gesamt	87	187

Quelle: Eigene Darstellung

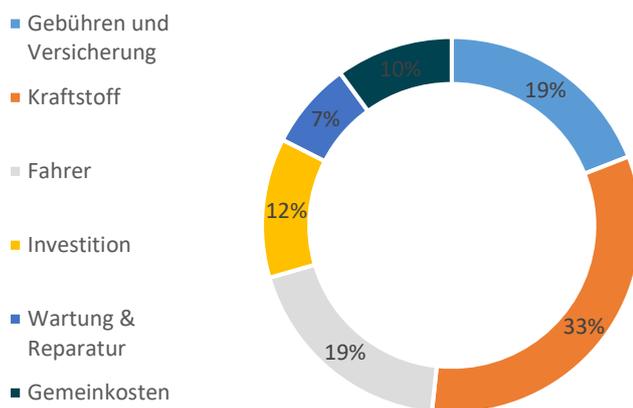
Für die Analyse der Transportmittel wurde ein stationärer Ansatz im Fernverkehr gewählt. Dazu sind die Betriebskosten aus Kraftstoff, Personal, Gebühren und Versicherung herangezogen worden. Die Kosten für Investition, Wartung und Reparatur sowie Gemeinkosten wurden pauschal angesetzt (in Anlehnung an [104]). Die Personalkosten sind mit 14,79 €/h angesetzt und variieren aufgrund der unterschiedlichen Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge. Die Kraftstoffverbrauchsdaten wurden als gewichteter Querschnitt aus derzeit üblichen Fahrzeugen ermittelt und mit [60] sowie [104] abgeglichen. Für die Kraftstoffkosten wurden 2 €/l angesetzt.

Abbildung 25
prozentuale Kostenverteilung

Kostenanteile Transporter

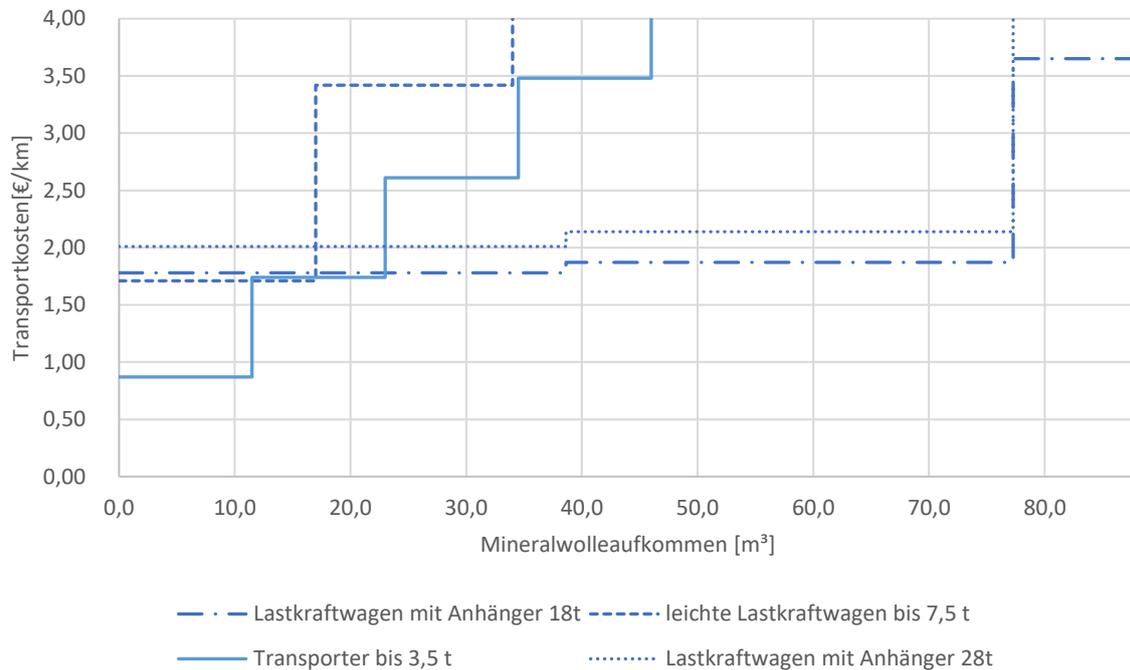


LKW 18t mit Anhänger



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 26
Transportkosten in Abhängigkeit des Mineralwolleaufkommens

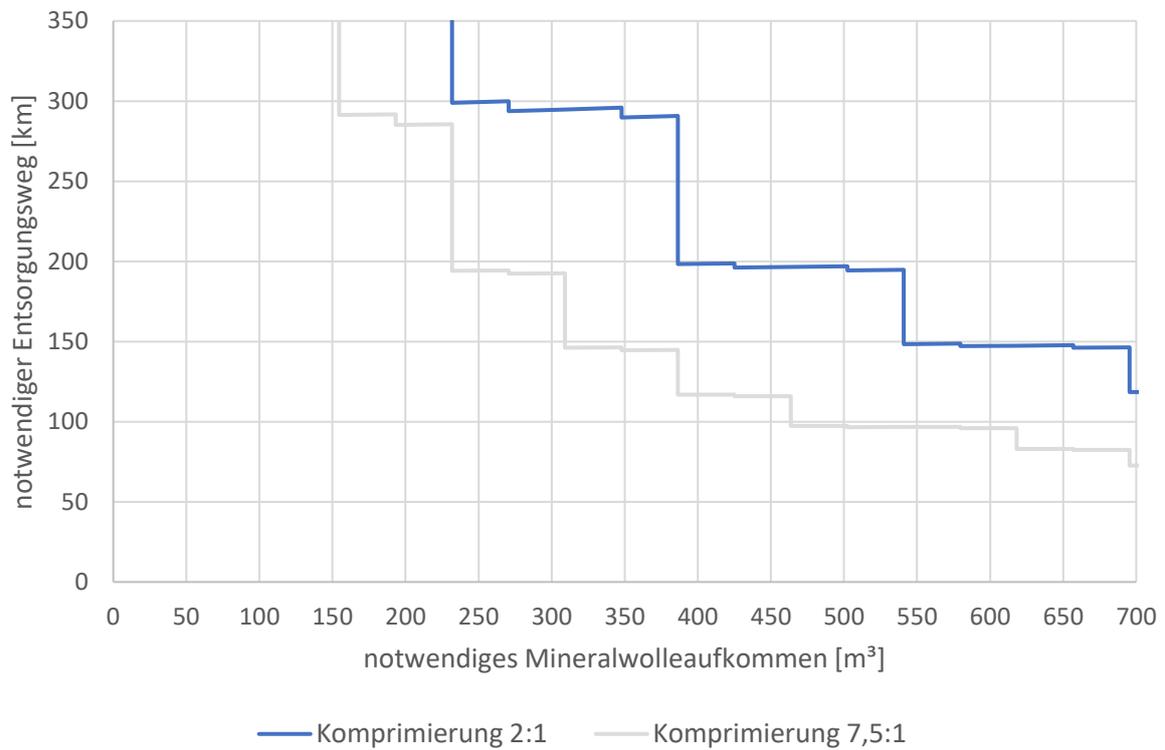


Quelle: Eigene Darstellung

Da bei dem gewählten Ansatz die Kosten für Kraftstoff und Personal maßgebend sind, ergibt sich mit der Kapazitätsgrenze des Transporters und leichten Kraftlastwagen die wirtschaftliche Grenze für deren Verwendung. Bei einem höheren zu transportierenden Volumen ist es wirtschaftlich geboten, einen Lastkraftwagen zu wählen. D.h. für Mindermengen bis 11,5 m³ bzw. 17,5 m³ auf der Baustelle, wie für Einfamilienhäuser zu erwarten, sind der Transporter und leichte Lastkraftwagen geeignet. Das bedeutet aber auch für die Versorgungsinfrastruktur, dass Sammel- und Umschlagplätze notwendig sind. Der volumenbezogene Transport führt dazu, dass die Kapazitätsgrenze des Fahrzeugs und dessen Motorisierung, mit der der Kraftstoffverbrauch einhergeht, einen entscheidenden Einfluss hat. So stellt sich der leichte Lastkraftwagen auf Grund seines deutlich höheren Verbrauchs als nicht wirtschaftlicher dar als die Nutzung eines Transporters. Da für den LKW mit 18 Tonnen und für 28 Tonnen die Transportkapazität durch den Container gleich groß ist und die massebezogene Beladungskapazität nicht ausgenutzt wird, führt die höhere Motorisierung und das höhere Eigengewicht des LKWs für 28 Tonnen zu höheren Kosten.

Der massebezogene Transport setzt Komprimierungsanlagen voraus. Damit die Komprimierungsanlage sich wirtschaftlich darstellt, muss die Kosteneinsparung durch den massebezogenen Transport höher sein als die Kosten für die Anlage. Bei gemieteten Anlagen ist für die Wirtschaftlichkeit ein relativ hohes Mineralwolleaufkommen und lange Entsorgungswege notwendig. So ist beispielsweise für Entsorgungswege von 200 – 290 km ein Aufkommen von 380 m³ bei einer Komprimierung 2:1 und 230 m³ bei einer Komprimierung 7,5:1 erforderlich.

Abbildung 27
Wirtschaftlichkeit von gemieteten Komprimierungsanlagen



Quelle: Eigene Darstellung

Im Zusammenhang mit dem Mineralwolleaufkommen auf Baustellen bieten sich gemietete Komprimierungsanlagen nicht an.

5. Spektroskopische Untersuchungen an Mineralwolle

Aufgabenstellungen sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Fragestellung -1 **Klassifizierung des „Materials“**

Basierend auf Vorarbeiten der Projektpartner wurden im Rahmen einer Masterarbeit [14] Untersuchungen an 70 Mineralwollen durchgeführt und Nahinfrarot (NIR)-Spektroskopie als ein mögliches Verfahren zur Klassifizierung des Mineralwollematerials identifiziert [82]. Dabei kam ein leistungsfähiges Prozessspektrometer Matrix-F Duplex der Fa. Bruker zum Einsatz. Im Ergebnis dieser Studie wurden auf Grundlage eines an 40 Kalibrierproben erstellten chemometrischen Modells die Materialien von 30 zufällig ausgewählten Mineralwollen korrekt vorhergesagt [83]. Erste Versuche, Mineralwollen im Rahmen der Masterarbeit mit einem Hand-NIR-Gerät zu untersuchen waren jedoch nicht erfolgreich [14]. Für die Übertragung der NIR-spektroskopischen Methode auf ein mobiles Gerät, wurde das AURA® Handheld NIR Spektrometer der Fa. Zeiss Spectroscopy GmbH favorisiert, und die Firma motiviert, sich am Projekt zu beteiligen. Trotz einer Vielzahl von Sensoren und sogenannten Handgeräten, die sich derzeit auf dem Markt befinden, fiel die Wahl auf dieses Gerät, weil es sich seit fünf Jahren bereits bei Vorort-Analysen im landwirtschaftlichen Sektor bewährt hat. Sowohl die Robustheit der Komponenten als auch die optische Präzision stellen die geeigneten Voraussetzungen für die genannten Aufgaben dar. Weiterhin besteht bei dem AURA® Handheld NIR-Spektrometer die Möglichkeit, offline erstellte chemometrische Modelle zur Datenanalyse in die Gerätesoftware zu implementieren, so dass tatsächlich eine Analyse vor Ort möglich ist. Die Herausforderung lag hier vor allem in dem deutlich geringeren Messbereich, welcher nur ungefähr die Hälfte des vorher genutzten Spektralbereichs umfasst.

Als Referenzanalytik für die weitgehend unbekanntenen Proben diente die Bestimmung der Oxidgehalte der Proben gemäß VDI3492 [124] mittels Wellenlängendispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Um die Bestimmung des Materials anhand der RFA-Analytik stärker an den Analyten anzupassen, wurde in diesem Projekt eine alternative Form der Probenvorbereitung in Form von Lithiumborat-Schmelztabletten realisiert. Dies beinhaltete ebenfalls die Erstellung von Kalibriertabletten, die gemäß VDI 3492 [124] möglichst den Bereich realer Oxidkompositionen in Mineralwollen wiedergibt. Es wird erwartet, dass somit präzisere Bestimmungen der Oxidgehalte als bei den ursprünglich verwendeten Presslingen[82]], möglich sind.

Fragestellung -2 **Identifikation von „Störstoffen“**

Die Information, welche Störstoffe für die Weiterverarbeitung von Mineralwolleabfällen relevant sind, wurde im Laufe des Projekts durch den Kooperationspartner erarbeitet und ist in Abschnitt 4 zusammengefasst. Unter Verwendung des NIR Handgeräts AURA® wurden 14 verschiedene Baustoffe wie Ziegel, Putz oder Beton, die typischerweise auf Abbruchstellen vorkommen könnten, untersucht.

Fragestellung -3 **Klassifizierung des „Alters“**

In der 2020 publizierte Studie [82] stand lediglich für 27 Mineralwollen eine Altersinformation zur Verfügung, so dass keine Prognose möglich war, ob anhand der NIR-Spektren eine entsprechende Klassifizierung erzielt werden kann. In diesem Projekt liegen für ca. die Hälfte der nach einem Jahr gesammelten Mineralwollen Informationen zum Herstellungsalter vor. Im Gegensatz zur Materialklassifizierung steht jedoch keine Referenzanalytik zur Verfügung, so dass bei den Proben nur die - nicht immer abgesicherte - Information, die sich anhand der Beschaffung ergab, genutzt werden konnte.

Die im Projektantrag enthaltene Fragestellung: „Erkennen von Mineralwollen des Projektpartners Isover“ wurde in Absprache mit Herrn J. Trappmann für dieses Projekt zunächst ausgeklammert und die Bearbeitung von Fragestellungen (1) – (3) in den Vordergrund gestellt [11].

5.1 Material und Methoden

5.1.1 Material

Die im Projekt verwendeten Geräte, Chemikalien und Software sind in Tabelle 17 – Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 17
Im Projekt verwendete Geräte

Gerät	Hersteller
Glovebox	Eigenbau BAM (Berlin, Deutschland)
AURA® Handheld NIR-Spektrometer (AURA)	Carl Zeiss Spectroscopy GmbH (Jena, Deutschland)
BORAMAT® 18 Material Dosier	Fluxana (Bedburg-Hau, Deutschland)
MagiX Pro Röntgenfluoreszenz (RFA)-Spektrometer (MagiX)	Malvern PANalytical (Almelo, Niederlande)
Matrix-F Duplex FT-NIR Prozess Spektrometer (Matrix-F)	Bruker Optics GmbH & Co. KG (Ettlingen, Deutschland)
Niton™ XL3t GOLDD+	ThermoFisher (Waltham, MA, USA)
Reflexionssonde	Solvias (Kaiseraugst, Schweiz)
Scheibenschwingmühle MSL 2	BHK „Albert Funk“ (Deutschland)
Scheibenschwingmühle Pulverisette	Fritsch (Idar-Oberstein, Deutschland)
VITRIOX® ELECTRIC	Fluxana (Bedburg-Hau, Deutschland)
Zetium RFA-Spektrometer (Zetium)	Malvern PANalytical (Almelo, Niederlande)

Tabelle 18
Im Projekt verwendete Software

Software	Verwendung
OPUS (Bruker)	Messung & Verarbeitung von NIR-Spektren am Matrix-F
InProcess Client (Zeiss Spectroscopy GmbH)	Messung & Verarbeitung von NIR-Spektren am AURA
Omnian	Semiquantitative Kalibration Spektren (RFA)
OriginPro 2019	Plot und Analyse von Spektren (RFA), lineare Regression
PEAXACT (S-Pact)	Spektrenanalyse (RFA) basierend auf Hardmodels
SuperQ	Messung & Auswertung von RFA-Spektren am MagiX- und Zetium-Spektrometer
R	Berechnung von Wahrscheinlichkeiten
Thermo Scientific™ NDT™/ NDTr™	Messung & und Datentransfer am Niton™ XL3t GOLDD+
The Unscrambler®X Vers. 11 (Camo Software)	Multivariate Daten- und Spektrenanalyse unter Nutzung von PLS, PLS-DA, MCR, PCA, SIMCA

Tabelle 19
Im Projekt verwendete Chemikalien

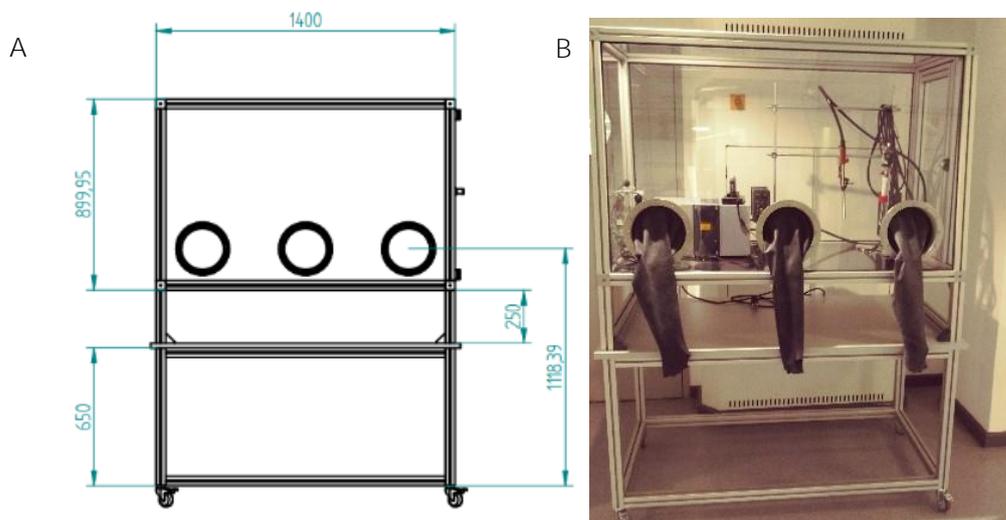
Chemikalie	Hersteller
Aluminiumoxid (Al_2O_3)	Johnson Matthey (London, UK)
Ammoniumiodid NH_4I (25 g/100 mL dest. H_2O)	Fluxana (Bedburg-Hau, Deutschland)
Bariumcarbonat (BaCO_3)	Merck (Darmstadt, Deutschland)
Boroxid (B_2O_3)	Merck (Darmstadt, Deutschland)
Calciumcarbonat (CaCO_3)	Merck (Darmstadt, Deutschland)
Eisenoxid (Fe_2O_3)	Alfa Aesar (Kandel, Deutschland)
FX-X65 (66:34 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$: LiBO_2)	Fluxana (Bedburg-Hau, Deutschland)
Kaliumoxid (K_2O)	Merck (Darmstadt, Deutschland)
Magnesiumoxid (MgO)	Johnson Matthey (London, UK)
Natriumoxid (Na_2O)	Merck (Darmstadt, Deutschland)
Siliziumoxid (SiO_2)	BAM (Berlin, Deutschland)
Titanoxid (TiO_2)	Johnson Matthey (London, UK)

Glovebox

Mineralwollen, die vor dem Jahr 2000 hergestellt wurden, können lungengängige Fasern freisetzen, die zudem im Verdacht stehen, krebserregend zu sein. Um die Freisetzung und das Einatmen der potenziell kanzerogenen Fasern zu verhindern, wurde ein sicherer Arbeitsplatz in Form einer Glovebox entwickelt. Eine Glovebox ist eine gegenüber dem Außenraum abgeschlossene Box, ausgestattet mit luftdichten Butylhandschuhen, die das Arbeiten in der Glovebox ermöglichen.

Die Glovebox wurde über die Werkstatt der BAM gefertigt, und ist mit drei armlangen Butylhandschuhen (SylaTech), welche das Arbeiten in der gesamten Box ermöglichen, einer Dreifachsteckdose für die Versorgung mit Strom, sowie einer USB- und LAN-Durchführung zur Ansteuerung der Messinstrumente ausgestattet. Die Glovebox bietet eine Arbeitsfläche von 800x1450 mm, sowie darunter eine Ablagefläche mit den gleichen Maßen. Weiterhin ist die Glovebox an der rechten Seite mit einer Scharniertür mit den Maßen 456x804 mm ausgestattet, die zum Ent- und Beladen der Glovebox dient. In Abbildung 28 ist die der Konstruktion zugrunde liegende Zeichnung sowie die fertiggestellte Box zu sehen.

Abbildung 28
Konstruktionszeichnung der Glovebox mit Maßen in [mm] (A) sowie Foto der fertiggestellten Glovebox (B)



Quelle: Abbildung BAM

In der Glovebox wurden NIR-Untersuchungen mit den NIR-Spektrometern Matrix-F und AURA durchgeführt. Für Untersuchungen mit dem Matrix-F befand sich das gesamte Spektrometer in der Glovebox, und war über die LAN-Durchführung mit dem Rechner verbunden. Die Sonde des Spektrometers wurde an einem, ebenfalls in die Glovebox eingebrachtem Stativ, befestigt. Für Messungen mit dem AURA gibt es rechtsseitig auf der Arbeitsfläche der Glovebox eine feste Konstruktion, welche es erlaubt die Proben in der idealen Position mit dem AURA zu vermessen (siehe Abbildung 30).

Das Be- und Entladen der Glovebox mit den Messgeräten und Proben musste an einem gut gelüfteten Ort, in diesem Fall dem Außenbereich der BAM, erfolgen, um die Freisetzung der gesundheitsschädlichen Fasern in den Laborräumen zu verhindern. Zum Transport der Glovebox wurde der Abluftschieber geschlossen, und die Box von der Abluftvorrichtung, durch das Lösen der Klammern, sowie vom Strom getrennt. Beim Be- und Entladen wurde geeignete Schutzkleidung (Maske, Handschuhe) getragen. Nach erfolgter Beladung der Box wurde die Tür an den Zargen mit Klebeband luftdicht verschlossen, und die Box wieder ins Labor transportiert. Dort wurde die Box wieder an den Strom und die Abluftvorrichtung angeschlossen, und zuletzt der Abluftschieber geöffnet.

5.1.2 Methoden

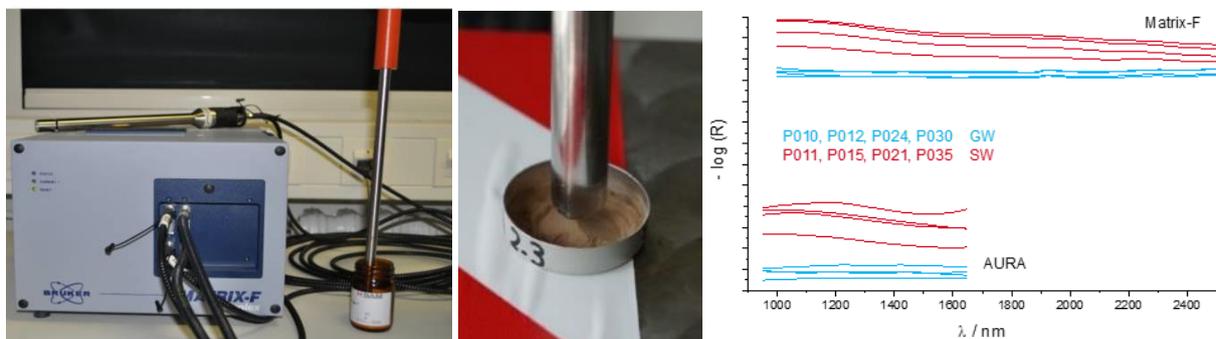
Nahinfrarotspektroskopie (NIR-Spektroskopie)

Prozessspektrometer mit Reflexionssonde

NIR-Spektren wurden mit dem Matrix-F Duplex FT-NIR Spektrometer ausgestattet mit einer faseroptischen Reflexionssonde (Abbildung 29, Tabelle 17), bei Raumtemperatur (22–24 °C) unter Verwendung eines Spektralons-Standards (Bruker) als Referenz gemessen. Die Reflexionssonde besteht aus Edelstahl mit einem Durchmesser von 12 mm, einer Faserlänge von 2 m und besitzt ein Saphirfenster mit einem Durchmesser von 3 mm. Das Matrix-F besteht aus einer versiegelten Einheit, in der die Signalein- und -ausgabe nur über die Kopplungseinheit erfolgt. Das Instrument arbeitet mit einem Strahlenteiler aus Quarz, einem permanent justierten ROCKSOLID™ Interferometer, welches über einen HeNe-Laser ($\lambda = 633 \text{ nm}$) gesteuert wird, und einem temperaturstabilisierten InGaAs-Detektor.

Abbildung 29

Links: NIR Prozessspektrometer Matrix-F mit lichtleitergekoppelten Transmissions- und Reflexionssonden, Mitte: Reflexionssonde positioniert für die Messung einer pulverförmigen Probe in Aluminiumschale, sowie rechts: Vergleich der spektralen Lage von NIR-Spektren des Matrix-F und AURA-NIR-Spektrometers



Quelle: Fotos und Abbildung BAM

Die Untersuchungen umfassten den Spektralbereich von $15.000 - 4.000 \text{ cm}^{-1}$ bei einer optischen Auflösung von 16 cm^{-1} mit einem Zerofill von 2 sowie einer Blackman-Harris-3-Term-Apodisierungsfunktion. Pro Messung wurden 64 Reflexionsspektren akkumuliert und mittels der Spektrometer Software OPUS in Absorptionseinheiten transformiert. Der Transfer der Messdaten vom Messgerät zum Steuer PC erfolgte über eine LAN-Verbindung. Für die weitere Bearbeitung wurden unbearbeitete Spektren im OPUS-Format exportiert und mittels der Software The Unscrambler®X bearbeitet.

Für die Messung wurden die Mineralwolleproben in einem Aluminiumschälchen ($d=3 \text{ cm}$, Abbildung 29) platziert, da dieses als neutraler Hintergrund ohne spektrale Beiträge im NIR-Spektrum identifiziert wurde. Die Untersuchung der Proben erfolgte im direkten Kontakt mit dem Messkopf der Sonde. Mindestens 5 Wiederholungsmessungen an verschiedenen Probenpositionen wurden durchgeführt.

NIR-Handgerät

Das AURA® Handheld NIR-Spektrometer (Tabelle 17) ist mit einem Polychromator ausgestattet, einem Messkopf für diffuse Reflexion und enthält Komponenten, die eine automatische interne Referenzierung ermöglichen. Das AURA gestattet die Untersuchungen in einem Teilbereich des NIR-Spektrums von $10.526 - 6.060 \text{ cm}^{-1}$ ($950 - 1650 \text{ nm}$). Die spektrale Auflösung ist $< 10 \text{ nm}$, mit einem nativen Stützstellenintervall der Diodenzeile von etwa 3 nm . Die ausgegebenen Spektren weisen eine Schrittweite von 2 nm auf infolge Interpolation über einen Spline. Nach Vorversuchen wurde eine interne Mittelung von 35 Akkumulationen als ideal für die Messaufgabe identifiziert. Daraus ergibt sich eine Gesamtmessdauer von 351 ms pro Spektrum. Die Untersuchungen fanden ebenfalls bei Raumtemperatur (22–24 °C) statt. Für den Routineeinsatz in der Glovebox wurde eine Halterung konstruiert (siehe Abbildung 30), die zur idealen Positionierung des

Messkopfes über der Probe diente, die für die Messung in einem Quarzglas mit schwarzem Untergrund verbracht wurde. In Analogie zur Aluminiumschale beim Matrix-F ergab diese Form der Probenpositionierung einen neutralen Hintergrund. Bei Messungen außerhalb der Glovebox im Technikum der TU oder im Abzug, wurde das AURA manuell auf die zu untersuchenden Proben positioniert. Der Durchmesser der kreisrunden Messöffnung beträgt 13,5 mm und das Messfenster befand sich jeweils in direktem Kontakt mit der Probe. Nach Vorversuchen, in denen mittels experimentellem Versuchsplan Fragen der Positionierung (siehe oben) und der Messparameter auf die Qualität der NIR-Spektren getestet wurden, wurde eine Methode mit dem Namen „Miwo“ aufgesetzt. Der Datentransfer erfolgte per LAN-Verbindung auf einen PC mittels der Software „InProcess Client“ und die gesamte Auswertung der Daten erfolgte im Programm The Unscramblers®X.

Abbildung 30

Links: Konstruierte Halterung zur Ablage des AURA bei der Probenmessung in der Glovebox, Mitte: Quarzglas als Container für die Mineralwolleproben während der Messung, Rechts: Abbildung des AURA



Quelle: Fotos BAM und Hersteller

Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Herstellung von Lithiumborat Schmelztabletten

Zunächst wurden jeweils 4-6 g der Mineralwolleproben in Scheibenschwingmühlen gemahlen. Die Proben W1-W7 wurden in **Stahlmahlbechern in der Scheibenschwingmühle MSL 2 des Herstellers BHK „Albert Funk“** für 3 min bei einer Frequenz von 50 Hz vermahlen. Die Proben P001-P160 wurden in Wolframcarbitmahlbechern in der Scheibenschwingmühle Pulverisette für 10-15 min gemahlen.

Gemahlene Mineralwolleproben wurden zur Entfernung von kohlenstoffhaltigen Verbindungen für ca. 1 h bei 650 °C bis 800 °C im Muffelofen geglüht. Die geglühten und per Hand in einem Achat-Mörser wiederum gemahlene Mineralwolleproben wurden im Verhältnis 0,5:8,5 oder 1:8 (Mineralwolle:Schmelzmittel) mit dem aus Lithiumboraten ($\text{Li}_x\text{B}_y\text{O}_z$) bestehendem Schmelzmittel FX-X65 (66:34 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$: LiBO_2) von Fluxana am **„BOROMAT® 18 Material Doser“ eingewogen und anschließend in Platin-Schmelztiegel** umgefüllt (Abbildung 31). Der Probe W7A wurden zusätzlich 5 Tropfen 25%-ige NH_4I -Lösung zugesetzt, um ein Brechen der **Glastablette zu verhindern. Das Schmelzen der Proben erfolgte anschließend am Gerät „VITRIOX® Electric“** im Programm A00, mit einer fest implementierten Schmelzroutine (Probe laden, Vorschmelze: 120 s, Hauptschmelze: 35 s, Hauptschmelze+Rühren: 320 s, Probe gießen, Schmelzstabilisierung: 35 s, Abkühlen) bei einer Temperatur von 1200 °C. Fertige Schmelztabletten wurden im Trockenschrank gelagert.

Abbildung 31

Links: Automatische Einwaage und **Verhältnisbestimmung am „BOROMAT® 18 Material Doser“**, Rechts, Mitte: **Automatisierte Glasschmelze am „VITRIOX® Electric“**



Quelle: Abbildung BAM

Röntgenfluoreszenzanalyse der Schmelztabletten

Die Schmelztabletten wurden an den wellenlängendispersiven (wd) RFA-Spektrometern MagiX Pro sowie Zetium (siehe Tabelle 17) gemessen. Die Ergebnisse der RFA-Untersuchungen umfassen hier Elemente ab einer Ordnungszahl > 4, d. h. Wasserstoff, Helium, Lithium und Beryllium werden nicht ermittelt. Für die **Auswertung der Messergebnisse wurde das semiquantitative Programm „Omnia“ eingesetzt, in dem die Berechnung der Oxidanteile über Verwendung des Fundamentalparameteransatzes erfolgt.** Um eine Vorhersage der in den Mineralwollen enthaltenen Oxide zu ermöglichen, wurden auf Grundlage eines Kalibriertablettensatzes, in dem 9 typische Oxidgehalte von Mineralwollen in verschiedenen Kombinationen in Form eingewogener Oxide simuliert wurden (Tabelle 20), Kalibriergeraden für jedes Element mittels linearer Regression erstellt. Zielstellung war es, die Massenanteile der in VDI 3492 [124] identifizierten Oxide abzudecken.

Tabelle 20

Massenanteil der verwendeten Oxide in den Kalibriertabletten K1 – K18

% (m/m)	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15	K16	K17	K18
Al ₂ O ₃	0,00	9,61	14,43	1,04	7,01	4,80	2,02	2,95	30,13	24,07	12,87	0,00	31,08	9,98	17,77	3,81	11,38	2,29
B ₂ O ₃	0,00	3,00	9,08	0,00	0,98	0,00	10,10	3,00	0,00	6,78	6,10	0,00	8,30	14,75	4,01	4,66	4,63	3,01
MgO	4,55	0,95	9,53	2,24	16,10	14,37	6,93	0,00	0,00	8,62	0,95	17,83	2,05	0,99	4,90	6,56	1,94	0,00
CaO	16,64	6,76	14,87	1,99	4,94	14,18	1,01	26,74	0,00	4,81	22,92	29,09	5,13	4,96	9,26	7,55	14,16	23,51
BaO	2,52	1,30	0,76	0,00	1,29	6,57	0,00	0,00	0,00	13,23	2,78	1,31	16,86	1,38	6,87	6,55	6,82	0,00
K ₂ O	2,20	17,55	4,83	1,24	1,21	17,24	1,18	7,20	0,00	2,23	0,00	5,86	5,06	1,22	2,40	7,87	17,07	7,21
Na ₂ O	14,80	9,69	4,90	17,83	1,97	13,77	2,02	3,95	0,00	7,65	0,00	24,46	4,13	0,99	3,91	10,75	20,79	14,69
Fe ₂ O ₃	0,00	2,01	6,93	5,08	14,92	0,00	2,00	0,00	0,00	0,96	14,86	19,74	15,53	15,17	4,87	1,95	2,02	0,00
TiO ₂	0,00	0,96	0,00	1,03	0,00	0,00	0,00	2,87	0,00	7,66	4,97	1,71	10,82	7,98	2,03	0,99	1,38	3,06
SiO ₂	59,29	48,16	34,67	69,55	51,56	29,07	74,74	53,29	69,87	23,98	34,54	0,00	1,04	42,57	43,98	49,31	19,81	46,24

Quelle: Tabelle BAM

Zum Vergleich wurde für die Auswertung der Messergebnisse einiger Proben zusätzlich die Kalibrierung „FLX-RAW-Pro“ von Fluxana (Beinhaltende Elemente: Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, Hf, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Si, S, Sr, Ti, V, Zn und Zr) verwendet. Dabei ergaben sich durchweg identische Ergebnisse für die Klassifizierung der Proben in GW oder SW.

Im letzten Schritt wurden die somit ermittelten Metalloxid-Gehalte anhand der in VDI 3492 [124] vorgegebenen Grenzen als Steinwolle (SW) oder Glaswolle (GW) zugeordnet. Praktisch wurde diese Zuordnung in einem EXCEL-Sheet realisiert, indem die Summe der Treffer für SW mit „+1“ und für GW mit „-1“, und im Falle, dass aufgrund der überlappenden Grenzen für SW und GW keine eindeutige Zuordnung möglich war als unbestimmt mit „0“ zugeordnet. Aus der Summe der Metalloxide wurde dann die betreffende Probe als SW (Summe ≥ 3), GW (Summe ≤ -3) oder unbestimmt (- 2 ≤ Summe ≤ 2) identifiziert.

Abbildung 32

Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzspektrometer Links: MagiX Pro, Mitte: Zetium Ultimate, Rechts: Massenanteile der Oxide die indikativ für Steinwolle (SW) oder Glaswolle (GW) sind nach VDI 3492 [124]



Oxid	SW % (m/m)		GW % (m/m)	
SiO ₂	40 -	53	48 -	70
Al ₂ O ₃	6 -	18	0 -	9
CaO	10 -	40	5 -	28
MgO	0,5 -	16	0 -	5
K ₂ O	0,3 -	5	0 -	3,6
Na ₂ O	0,1 -	4,5	4 -	18
Fe ₂ O ₃	0,5 -	12	0 -	5
BaO	0 -	0	0 -	3
TiO ₂	0,5 -	3,5	0 -	0,5

Quelle: Fotos Hersteller und BAM, Abbildung BAM

Niton™ XL3t GOLDD+

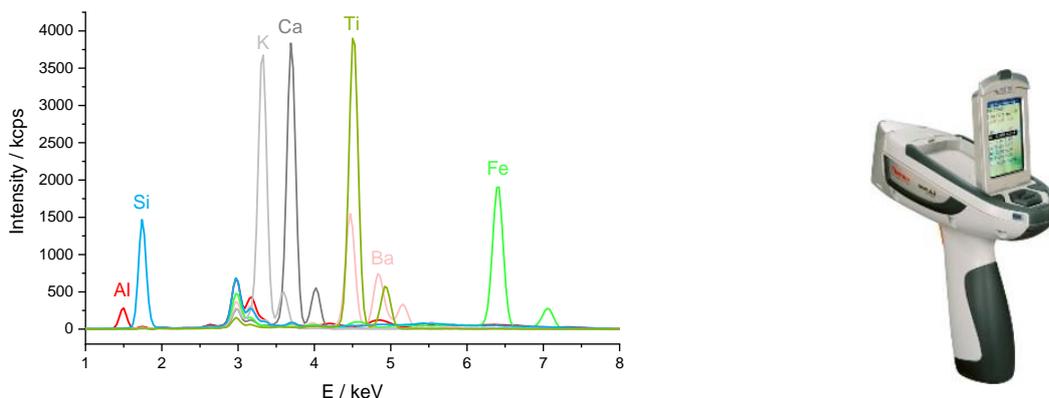
Die Schmelztabletten wurden ebenfalls am energiedispersiven Hand-RFA-Spektrometer „Niton™ XL3t GOLDD+“ vermessen. Das Handgerät ist ausgestattet mit einer Silber-Anode (6-50 kV, 0-200 μ A) sowie einem „Geometrically Optimized Large Area Drift Detector (GOLDD)“ mit einem Durchsatz von 180000 cps. Die Proben wurden mit dem Programm „Mineralien mit Cu/Zn“ in allen Bereichen „Light, Main, Low und High Range“ (Beinhaltende Elementen: Ba, Sb, Sn, Cd, Pd, Ag, Mo, Nb, Zr, Sr, Rb, Bi, As, Se, Au, Pb, W, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Ti, Ca, K, Al, P, Si, Cl, S und Mg) gemessen. Die erhaltenen Spektren wurden als ASCII File exportiert und verschiedene Verfahren der Auswertung getestet.

Im Gegensatz zu der wd-RFA mit den Geräten Zetium Ultimate und MagiX Pro in Kombination mit der Software Omnia zur semiautomatischen Erstellung einer Kalibrierung, welche die direkte Ausgabe der Oxidgehalte unbekannter Proben ermöglicht, konnte eine vergleichbare Kalibriermöglichkeit bei dem RFA-Handgerät nicht genutzt werden.

Zudem konnten anhand des eingeschränkten Spektralbereichs von den neun als relevant identifizierten Oxiden (Tabelle 20), MgO und Na₂O nicht mit dem RFA-Handgerät erfasst werden. Versuche, die Messungen unter Helium-Atmosphäre zu wiederholen, um insbesondere den Spektralbereich < 1,3 keV auszuwerten, erbrachten jedoch keine Verbesserung (nicht dargestellt). Somit verbleiben die in Abbildung 33 gezeigten sieben Oxide, deren Spektren gemessen und analysiert werden konnten.

Abbildung 33

Links: RFA-Spektren mit den Elementen der 7 messbaren Oxide illustriert anhand von Reinstoffen, Rechts: energiedispersives Röntgenfluoreszenzspektrometer Niton™ XL3t GOLDD+



Quelle: Abbildung BAM, Foto Hersteller

Für die Ermittlung der Oxidgehalte in den Mineralwolleproben wurden zunächst dieselben *Kalibrierproben* in Form von Schmelztabletten vermessen, die bereits für die Geräte MagiX Pro sowie Zetium verwendet wurden. Die Analyse der Banden der Oxide in RFA-Spektren erfolgte zunächst testweise mit vier verschiedenen Ansätzen, auf die im Ergebnisteil näher eingegangen wird. In Tabelle 21 werden Eigenschaften der wd-RFA mit dem Niton-Handgerät verglichen.

Tabelle 21
Vergleich der RFA-Untersuchungen mittels Laborgeräten und Handgerät

	wd-RFA MagiX Pro & Zetium	„Hand“-RFA Niton™ XL3t GOLDD+
Messverfahren	Wellenlängendispersiv	Energiedispersiv
Auswertung des Signals	Intensität des Peaks im Maximum aufgrund sehr schmaler Banden	Integrale einzelner Peaks oder Analyse ganzer Spektralbereiche aufgrund breiter, teilweise überlappender Banden
Probenform	Pressling oder Tablette	Pressling, Tablette, Wolle
Messpunkt	Omnian: 27 mm Kalibrierung Fluxana: 37 mm	Lokaler Messpunkt ca. 8 mm
Messbereich	Ebenfalls geeignet für leichte Elemente (Elemente B-U)	Betonung der schwereren Elemente (Elemente Al-Ba)
Anregungsleistung	Hoch (4 kW) 32 - 60 kV, 60 - 125 µA	Niedrig (2 W) Main: 40 kV, 5 µA; Low: 20 kV, 2 µA; High: 50 kV, 5µA; Light: 6,2 kV, 10 µA
Messdauer pro Probe	Omnian: ~ 30 min Kalibrierung Fluxana: ~ 10 min	Pro Range „ Light, Main, Low, High “ 30 s
Auswertung	Berücksichtigt Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementen über semiquantitative integrierte Software	Keine Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Elementen berücksichtigt, für Mineralwollen musste Kalibrierung entwickelt werden
Ergebnisse	9/9 Oxiden können gemessen, quantifiziert und für die Charakterisierung der Mineralwollen verwendet werden	7/9 Oxiden können messtechnisch erfasst werden, jedoch nur SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ und K ₂ O ergeben valide Ergebnisse in Mineralwollen

Quelle: Tabelle BAM

Multivariate Datenanalyse der Spektren (Chemometrie)

Die *Hauptkomponentenanalyse (Principal Components Analysis, PCA)* [64], [57] stellt eine Methode des nicht-überwachten Lernens dar, d.h. die Analyse der Daten erfolgt allein aufgrund ihrer innewohnenden Varianz, ohne dass Vorannahmen getroffen werden. Bei der PCA handelt es sich um ein statistisches Verfahren, das angewandt wird, wenn viele Eigenschaften, die an vielen Objekten gemessen wurden, auf wenige gemeinsame, aber unabhängige, Einflussgrößen reduziert werden sollen. Diese stellen eine optimale Linearkombination der ursprünglichen Variablen dar und werden als latente Vektoren, Eigenwerte oder Hauptkomponenten bezeichnet. Auf diese Weise ist eine Veranschaulichung der wesentlichen Struktur eines Datensatzes möglich. Das Besondere dabei ist, dass die wesentliche Information, die in den Daten enthalten ist, bewahrt bleibt und in den meisten Fällen sogar deutlicher dargestellt wird. Die Methode fasst dazu Variablen zusammen, die stark untereinander korreliert sind, da diese weitgehend dasselbe Ergebnis liefern. Die PCA kann durch Eigenwertzerlegung einer Datenkovarianzmatrix (oder Korrelationsmatrix) oder durch Singulärwertzerlegung einer Datenmatrix, in der Regel nach einem Normalisierungsschritt der Ausgangsdaten, durchgeführt werden. Man erhält die sogenannten Eigenwerte, welche die durch die Hauptkomponente repräsentierte Varianz angeben und Eigenvektoren, die optimale Gewichte der Ausgangsvariablen für die Bildung der Hauptkomponenten enthalten, die sogenannten Loadings und Scores. Loadings zeigen die Korrelation zwischen den Variablen sowie die Wichtigkeit der Variablen für das verwendete Modell auf. Die Projektion jedes einzelnen Datenpunkts auf die jeweilige Hauptkomponentenachse ergibt den Scores Plot. Dabei erhält man pro Hauptachse für jede Probe einen Faktorenwert, den man Scorewert oder Score nennt. Da die Hauptachsen orthogonal aufeinander stehen, zeichnet man in ein rechtwinkliges Koordinatensystem, bestehend aus den Hauptachsen, die Proben darin entsprechend den Scorewerten ein. Liegen die Scores von Proben dicht beieinander, weist dies auf ähnliche Eigenschaften hinsichtlich der dargestellten Hauptkomponenten hin, liegen sie weit voneinander entfernt, handelt es sich also um stark unterschiedliche Proben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die PCA zur explorativen Datenanalyse und vor allem als Grundlage der *SIMCA-Klassifizierung* verwendet [76]. **SIMCA steht für „Soft Modeling of Class Analogies“.** Im Gegensatz zur Diskriminanzanalyse besteht bei der SIMCA-Modellierung die Möglichkeit, Proben zu erkennen, die zu keiner der kalibrierten Klassen gehört. SIMCA basiert auf der Erstellung eines PCA-Modells für jede Klasse in einer definierten Trainingsmenge. Unbekannte Proben werden dann mit den Klassenmodellen verglichen und je nach ihrer Nähe zu den Trainingsproben den Klassen zugeordnet. Die PCA-Modelle sollen dabei die Struktur dieser Klasse so gut wie möglich beschreiben. Die optimale Anzahl von Hauptkomponenten (PCs) sollte für jedes Modell separat nach einem geeigneten Validierungsverfahren ausgewählt werden. Jedes Modell sollte auf mögliche Ausreißer überprüft werden. Die Trainingsphase setzt voraus, dass man genügend Proben als Mitglieder jeder Klasse identifiziert hat, um ein zuverlässiges Modell erstellen zu können. Außerdem müssen genügend Variablen gemessen werden, um die Stichproben genau zu beschreiben. In der Testphase werden Signifikanztests verwendet, um neue Proben zu klassifizieren, wobei die Entscheidungen auf statistischen Tests beruhen, die für die Abstände zwischen Objekt und Modell durchgeführt werden.

Sobald jede Klasse modelliert wurde, werden neue Stichproben auf jedes im SIMCA-Klassifizierungsprozess verwendete Modell projiziert. Dies bedeutet, dass für jede Probe Scores durch Projektion der Proben auf die Loadings der verwendeten Modelle erstellt werden. Die Zugehörigkeit zu einer bestehenden Klasse basiert dann auf Distanzmetriken, die für PCA-Modelle charakteristisch sind. Die Residuen werden dann zu einem Maß für den Abstand zwischen Objekt und Modell kombiniert. Die Scores werden verwendet, um ein Maß für den Abstand der Stichprobe zum Modellzentrum zu ermitteln. Schließlich wird der Objekt-zu-Modell-Abstand berücksichtigt, um zu entscheiden, zu welcher Klasse bzw. zu welchen Klassen die Probe gehört. Die Entscheidungsregel für die Klassifizierung basiert auf einem klassischen statistischen Ansatz. Wenn eine Probe zu einer Klasse gehört, sollte sie einen geringen Abstand zum Klassenmodell haben (der Idealfall ist "Abstand = 0"). Bei einer neuen Stichprobe wird ihr Abstand zu einem bestimmten Modell verglichen und festgestellt, ob dieser Abstand innerhalb der Klassenzugehörigkeitsgrenze des Modells liegt. Dies entspricht der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Abstände zwischen Objekt und Modell um den Wert Null.

Im Ergebnis der SIMCA-Klassifizierung erhält man eine Klassifizierungstabelle. Klassen, die für eine Stichprobe signifikant sind, werden mit einem Stern gekennzeichnet. Das Ergebnis der Klassifizierung hängt von der Signifikanzgrenze ab, die hier standardmäßig auf 5 % eingestellt wurde. Es gibt drei mögliche Ergebnisse einer Klassifizierung: (i) die unbekannte Probe gehört zu einer Klasse, (ii) die unbekannte Probe gehört zu mehreren Klassen und (iii) die unbekannte Probe gehört zu keiner der Klassen.

Partial Least Squares Regression (PLSR) [107] ist eine bi-lineare Methode, die auf einer Dimensionsreduktion durch die Projektion der x- und y-Variablen in einen neuen (Faktoren)-Raum basiert, wobei die Kovarianz zwischen der X- und Y-Matrix maximiert wird. Sowohl X als auch Y werden gleichzeitig modelliert, um die latenten Variablen in X zu finden, die am besten die latenten Variablen in Y vorhersagen können. Die latenten Variablen werden als Faktoren bezeichnet [64]. Für die Optimierung von PLSR-Modellen wird der mittlere quadratische Fehler (Root Mean Square Error, RMSE, siehe Gleichung 1) der Kalibrierung und der Kreuzvalidierung als Qualitätskriterium genutzt. Die beste Vorhersageleistung wird von Modellen mit möglichst kleinen und ähnlichen RMSE-Werten erwartet. In (1) stellt y_i den bekannten Analytgehalt oder Typ **der Kalibrierproben**, \hat{y}_i die vorhergesagten Gehaltswerte und n die Anzahl der Proben dar.

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

Basierend auf der PLSR kann die PLS-DA als multivariate Klassifizierungsmethode verwendet werden [19]. Zu diesem Zweck wird eine zweispaltige Matrix Y (y_{GW} , y_{SW}) aufgestellt, die für alle GW-Proben die Werte (1, 0) und für die SW-Proben (0, 1) enthält. Die PLS-DA-Modelle wurden mit mittenzentrierten und auf die Standardabweichung s gewichteten Variablen erstellt. Entsprechend der Kalibrierstrategie kann anhand der **Prädiktionsergebnisse** (\hat{y}_i) von "1" und "0" für "unbekannte" Proben die Zuweisung zu den jeweiligen Gruppen **erfolgen. Proben mit $\hat{y}_i > 0,5$ und einer Standardabweichung s, die die 0,5-Linie nicht kreuzt, stellen Mitglieder der jeweiligen Klasse dar, während Proben mit $\hat{y}_i < 0,5$ und einer Standardabweichung s, die die 0,5-Linie nicht kreuzt, keine Mitglieder dieser Klasse sind.** Da die anhand von Wiederholungsmessungen ermittelten Werte von s häufig sehr gering waren, wurden die Grenzen für alle Klassifizierungen auf $\leq 0 - 0,4$ bzw. $\geq 0,6$ gesetzt. **Da alle Proben mit der Zuweisung „1“ für einen Materialtyp „0“ für den alternativen Materialtyp erhalten,** ergeben sich die Vorhersageergebnisse beider Gruppen automatisch invers.

Multivariate Curve Resolution (MCR) ist ein multivariater Ansatz zur Extraktion von Informationen über „reine“ Komponenten in überlagerten Mischungen mit einer minimalen Anzahl von Annahmen über die Art und Zusammensetzung dieser Gemische [7].

Die PCA erzeugt eine orthogonale bilineare Matrixzerlegung, bei der die Komponenten oder Faktoren sequenziell ermittelt werden, um die maximale Varianz zu erklären. Unter Verwendung dieser Einschränkungen und der Normalisierung während der bilinearen Matrixzerlegung erzeugt die PCA eindeutige Lösungen. Diese "abstrakten" eindeutigen und orthogonalen (unabhängigen) Lösungen sind sehr hilfreich, um die Anzahl der verschiedenen in den Daten vorhandenen Variationsquellen zu ermitteln, jedoch handelt es sich nicht um die "wahren" Faktoren, die der Datenvariation zugrunde liegen, sondern um orthogonale Linearkombinationen dieser Faktoren.

Im Gegensatz dazu zielt die MCR darauf, die "wahren" Ursachen der Datenvariation zu entschlüsseln. Es geht nicht nur um die Frage, wie viele verschiedene Quellen vorhanden sind und wie sie interpretiert werden können, sondern darum, herauszufinden, wie sie in Wirklichkeit sind. Dazu wird die MCR mit einer Reihe von Einschränkungen durchgeführt. Bei der Modellierung von Röntgenfluoreszenzspektren wurden die MCR-Iterationen mit den Einschränkungen "nicht-negative Spektren" und "nicht-negative Konzentrationen" initialisiert, und die Empfindlichkeit gegenüber reinen Verbindungen wurde auf 100 gesetzt. Die maximale Anzahl der Iterationen wurde auf 1000 festgelegt. Im Ergebnis der MCR erhält man geschätzte Konzentrationen und geschätzte Spektren, wobei die Spektren einheitsvektoriell normiert sind und die geschätzten Konzentrationen relative Werte innerhalb einer einzelnen Komponente selbst sind.

5.2 Ergebnisse

Mineralwollen

Durch die TU Berlin wurden innerhalb des ersten Projektjahres 161 Mineralwollen gesammelt. Diese Sammlung umfasst die bereits in Paul et al. 2020 [82] verfügbaren 70 Wollen, sowie 91 weitere, noch nicht untersuchte Wollen. Eine Zusammenfassung aller verfügbaren Metainformationen wie „Material“, „Alter“, „Herkunft“ sowie subjektive Bewertungen wie „Farbe“, „Homogenität“ oder „Verschmutzung“ befindet sich in der Anlage in Tabelle 33, die Ergebnisse der aktuellen Studie sind in Tabelle 34 a) zusammengefasst.

Ein kurzer Überblick der von der TU Berlin zur Verfügung gestellten Materialien befindet sich in Tabelle 22. Dabei ist zu erkennen, dass insgesamt mehr SW als GW zur Verfügung stehen und der Anteil der Proben mit vorhandener Altersangabe etwa die Hälfte des Probensatzes umfasst. Heruntergebrochen auf die jeweiligen Materialien GW und SW muss befürchtet werden, dass die kritische Anzahl an Kalibrierproben, die für diese äußerst diffizile und dennoch sehr wichtige Fragestellung benötigt wird, damit nicht erreicht wurde.

Tabelle 22

Überblick über Probenmaterialien hinsichtlich der Bearbeitung der Fragestellungen mittels NIR: 1 – Klassifizierung des Materials, 2 – Klassifizierung des Alters, 3 – Identifikation von Störstoffen

„Material“		„Alter“		„Störstoffe“
GW	↔	vor 2000	↔	Erkennen von Fremdmaterialien
Probensatz Kalibrierung 55 GW	85 SW	34 16 GW, 18 SW	48 15 GW, 33 SW	14 „Baumaterialien“ Ziegel, Beton, Putze, Kalksandstein
Referenzanalytik Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)		Referenzdaten nur externe Information		Referenzdaten (LIBS) Interne Kooperation BAM
Nahinfrarot Spektroskopie mittels AURA & Matrix-F Ausgewählte Proben mit Hand-RFA				
Analyse der NIR-Spektren mit multivariaten Methoden Kalibrierung, Validierung, Messunsicherheit				

Quelle: Tabelle BAM

Neben den 161 besprochenen Proben der TU Berlin wurden durch Herrn J. Trappman im Juni 2022 weitere vier Mineralwollen des Produzenten Saint Gobain Isover G+H AG zur Verfügung gestellt. Vom örtlichen Dachdecker erhielten wir zwei alte SW aus DDR-Produktion. Diese Materialien sind in Tabelle 34 b) zusammengefasst. Im Rahmen einer Probenahme der TU Berlin wurden insgesamt 11 Wollen aus BigBags entnommen (Tabelle 34 c)). Diese Materialien wurden mittels NIR-Spektroskopie und für die Proben aus den BigBags wurden ebenfalls wd-RFA Untersuchungen an Schmelztabletten durchgeführt.

Um Aussagen zu baustellenseitig anfallenden Störstoffen zu ermöglichen, wurden zusätzlich 14 an der BAM im Projekt „LIBS-ConSort“ verwendete Baumaterialien der IAB Weimar GmbH mittels Hand-NIR (AURA) untersucht.

Aufgabenstellung 1, Klassifizierung des Materials

NIR-Spektren

Für die Kalibrierung wurden jeweils 5 NIR-Spektren sowohl mit dem AURA- als auch dem Matrix-F-NIR Spektrometer an variierenden Probenpositionen der verfügbaren Mineralwolleproben vermessen. Für die Darstellung in Abbildung 34 wurden diese 5 Einzelspektren zur besseren Übersicht gemittelt. Anhand der dargestellten NIR-Spektren des TU-Probensatzes ist unschwer zu erkennen, dass sich die meisten der 55 GW (blau) und 85 SW (rot) Proben sowohl anhand des Offsets der Spektren als auch dem Vorhandensein bestimmter spektraler Signaturen in beiden Messungen mit bloßem Auge unterscheiden lassen. Auffällig sind weiterhin die Spektren organischer Fasern der Proben P153 und P155, die sich bei Messungen mit beiden Spektrometern klar von den Mineralwollen abheben (gelb).

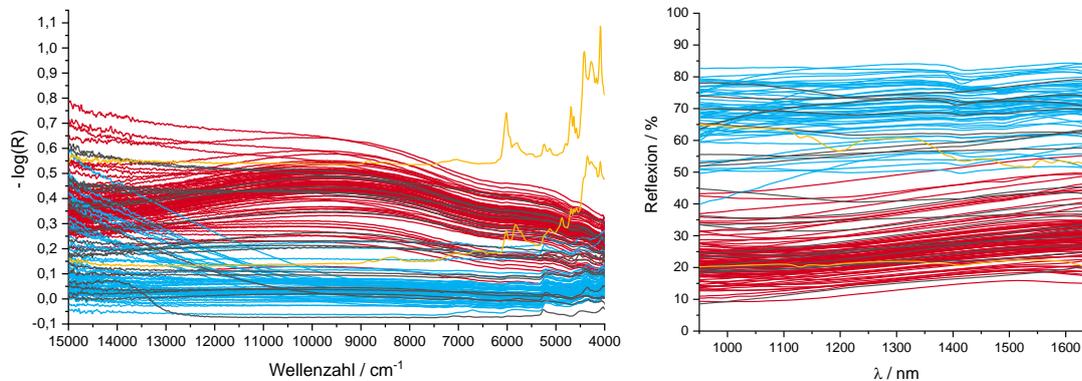
Es sei darauf hingewiesen, dass die NIR-Spektren des Matrix-F und des AURA (Abbildung 34) sowohl in verschiedenen Wellenlängeneinheiten, als auch in unterschiedlichen Reflexionseinheiten dargestellt wurden, entsprechend der Ausgabe der jeweiligen Geräte. Grundsätzlich können diese Einheiten ineinander umgerechnet werden. Um jedoch einen direkten Vergleich der Spektren zu ermöglichen, wurden daher beispielhaft jeweils 8 Proben mit angepassten Einheiten in Abbildung 29 dargestellt.

Der Hauptunterschied zwischen den GW und SW NIR-Spektren findet sich jeweils im Offset der Reflexion bzw. Absorption insbesondere im Bereich höherer Wellenzahlen, angrenzend an den sichtbaren Spektralbereich. Die beobachtete Basislinienverschiebung und -krümmung ist bekannt als eine Folge multiplikative Interferenzen von Streuung und Partikelgröße wie sie bei Reflexionsmessungen an pulverförmigen oder dicht gepackten Proben auftreten [7]. Schwingungsbanden und deren Wichtigkeit für die Klassifizierung von GW und SW bei Untersuchungen mit dem Matrix-F Spektrometer wurden bereits in Paul et al. 2020 ausführlich diskutiert [82]. Im NIR-Spektralbereich resultieren Banden hauptsächlich aus der Anregung molekularer Oberton- und Kombinationsschwingungen des Typs X-H (C-H, O-H, N-H, SiO-H) usw. sowie C=C, C=O [106]. Grundsätzlich ist aufgrund der breiten und häufig stark überlagerten Banden im NIR die Zuordnung der Banden zu einzelnen Molekülen oder Molekülgruppen problematisch. Erschwert wird dieser Umstand hier noch durch die Kombination mineralischer und organischer Bestandteile. Der mineralische Anteil von Mineralwolle kann aus Glasrohstoffen, Altgläsern, vulkanischem Gestein oder Kalkstein resultieren. Weiterhin werden organische Binde- und Schmälmittel eingesetzt, die Fasern in den Verband einbinden. In der Regel enthalten Glaswollen einen höheren Anteil an Bindemittel als Steinwollen. Als Bindemittel werden in Wasser gelöste Gemische aus Kunstharzverbindungen wie Phenolharze, Harnstoff-Formaldehydharze, modifizierte Maisstärke oder Natriumpolyphosphate verwendet und als Schmälmittel dienen Mineralöle, Öl-Wasser-Emulsionen, Silikonöle oder Silikonharze. Hinzu kommen Beschichtungen wie Dämmfilze, die auf dünne, papierverstärkte Aluminiumfolien kaschiert werden. Auch Vliese dienen als Schutz- und Verstärkungsschicht. Sie bestehen aus Textilglasfasern mit Harnstoff oder Melaminharz [86].

In den NIR-Spektren des AURAs können zwei Banden, vor allem bei GW, um 1395 nm und 1456 nm beobachtet werden. Die Bande bei 1395 nm könnte aus der Kombination von C-H Streck- und Deformationsschwingungen von CH₂-Gruppen resultieren. In einigen Proben finden sich ebenfalls um 1450-1460 cm⁻¹ Banden, welche entweder dem ersten Oberton intramolekularer O-H Schwingungen oder dem ersten Oberton der N-H Steckschwingung zugeordnet werden könnten. Da jedoch in GW und SW grundsätzlich ähnliche Zuschlagstoffe verwendet werden, sollte hierin nicht das Unterscheidungsmerkmal liegen [54]. Die Energie zur Anregung der fundamentalen Moden geologisch wichtiger Materialien trifft in den mittleren und Fernen Infrarot-Bereich. Im NIR-Bereich werden vorrangig Moden der OH-Gruppe, die sich bei ca. 5333, 6878, 7246, 8811 und 10616 cm⁻¹ (1875, 1454, 1380, 1135, 942 nm) befinden, beobachtet [96]. Wassermoleküle die sowohl physikalisch als auch chemisch an den Kristalloberflächen adsorbiert sind oder in Flüssigkeitseinschlüssen in der Kristallstruktur vorliegen, können ebenfalls in Form einzelner Moleküle oder Molekülcluster zu diesen Banden beitragen.

Abbildung 34

Spektren der 161 Proben. Links: Matrix-F: gemessen in diffuser Reflexion, konvertiert in $-\log(R)$ Einheiten und Rechts: AURA: gemessen und dargestellt in Reflexionseinheiten (rechts). Farbcode für Kalibrierproben – SW (rot), GW (blau), Testproben (schwarz) davon nicht-mineralische Fasern (gelb)



Quelle: Abbildung BAM, Foto Hersteller

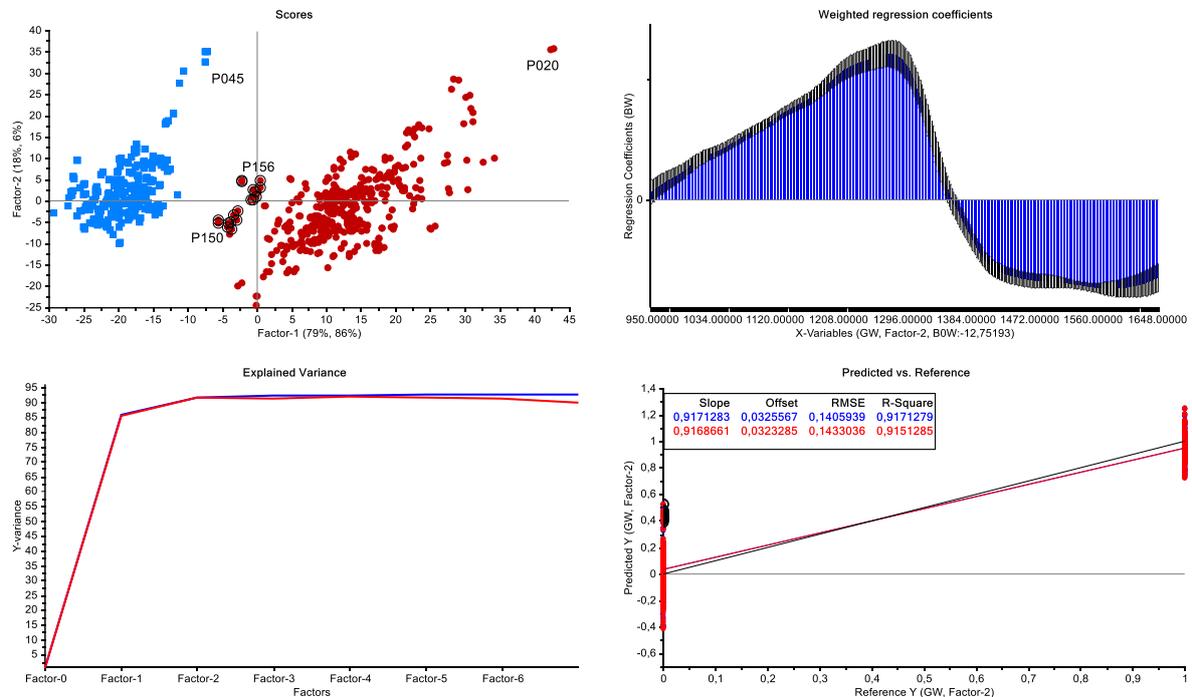
Die Situation verkompliziert sich anhand der Vielzahl der möglichen Positionen und Umgebungen, wodurch spektrale Verschiebungen und Variationen der Intensität auftreten. Kombinationsbanden der fundamentalen O-H Streckschwingung mit einer X-OH-Biegeschwingung (wobei X z.B. Al sein kann) die im Wellenzahlbereich unter 4500 cm^{-1} beobachtet werden [106] sind für Untersuchungen mit dem AURA nicht von Relevanz. Fe^{3+} Ionen dagegen zeichnen sich eher durch intensive Elektronenübergänge im sichtbaren Bereich aus [121]. Das Hauptproblem für die quantitative Analyse von NIR-Spektren anorganischer Oxide ergibt sich anhand des dominierenden Einflusses von Kristallgröße und -aggregation, sowie der Koordination der metallischen Zentren [54], [96].

Multivariate Kalibriermodelle

Aufgrund der Komplexität der Spektren erfolgt die quantitative Analyse von NIR-Spektren ausschließlich unter Verwendung multivariater Datenanalyseverfahren. Die Modellierung basiert auf der Untersuchung von Proben mit bekannten Eigenschaften oder Referenzwerten, um anschließend nach einer Validierung mit weiteren Proben bekannter Eigenschaften ein sogenanntes chemometrisches Modell zu erstellen, das es ermöglicht, anhand der Spektren unbekannter Proben eine Vorhersage bezüglich der kalibrierten Eigenschaften zu treffen. Dabei ist es von allerhöchster Wichtigkeit, dass sowohl hochqualitative Messungen als auch zuverlässige Referenzinformation oder -daten vorliegen. Weiterhin ist wichtig, dass die zur Kalibration des Modells verwendeten Proben in genügend hoher Anzahl und Varianz vorliegen, um möglichst umfassend die Eigenschaften der zu erwartenden unbekannteren Proben abzubilden.

Abbildung 35

Ergebnis der PLS-DA der AURA-Spektren nach Flächennormierung mit 4 Subplots: Scores Plot mit Farbcode für GW (blau) und SW (rot), (oben links), Spektrale Regressionskoeffizienten mit Varianz (schwarz) für 2 Faktoren (oben rechts), Erklärte Varianz der Zielvariablen y für Kalibrierung (blau) und Kreuzvalidierung (rot) (links unten), Modellvorhersagen gegen Referenzwerte mit Regressionsgeraden der Kalibrierung (blau) und Kreuzvalidierung (rot) inklusive Anstiege, Offset, R² und RMSE (unten rechts)



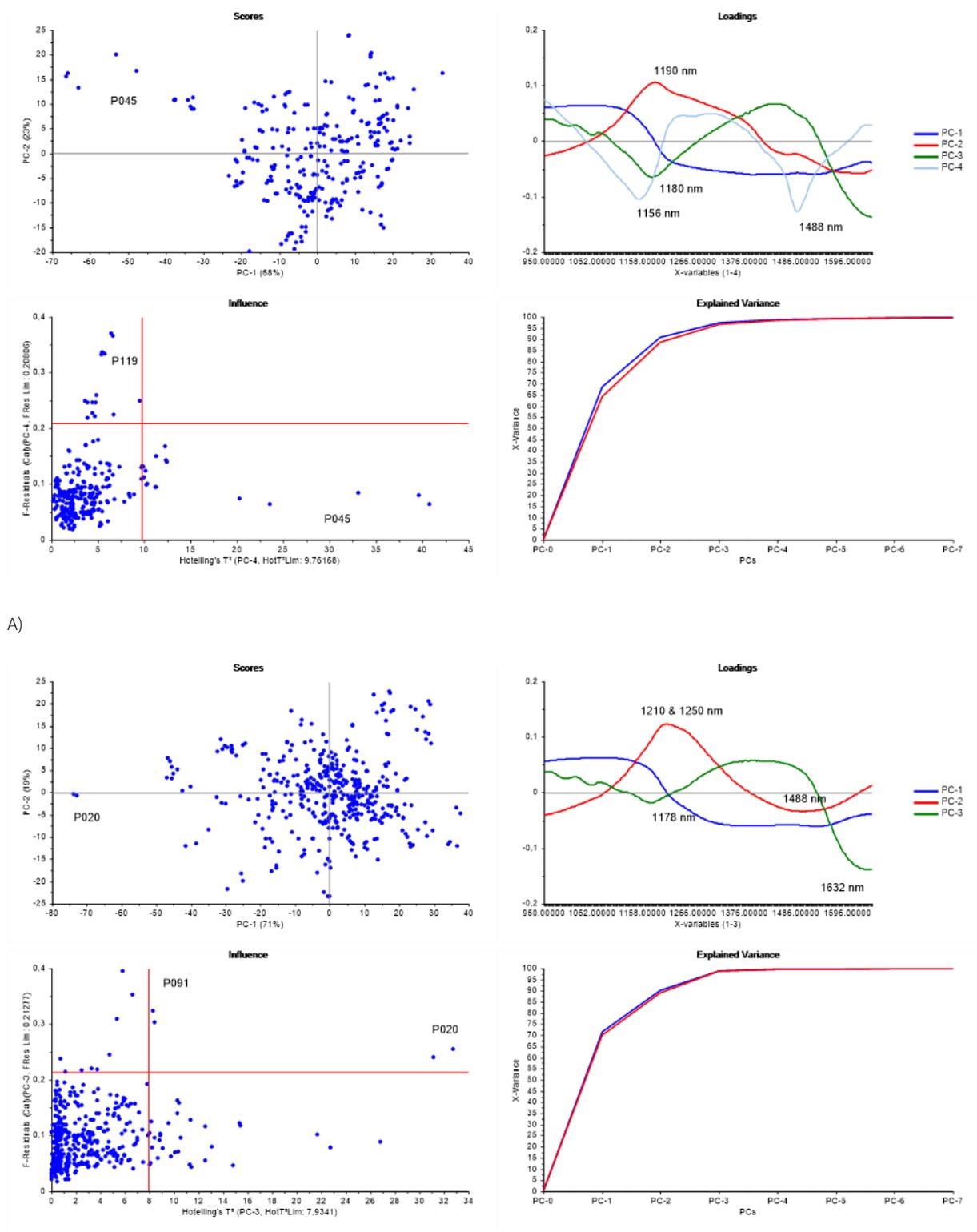
Quelle: Abbildung Hardcopy aus Software, BAM.

Beispielhaft für ein PLS-DA Modell ist hier das Ergebnis der Modellierung des Kalibrierprobensatzes bestehend aus jeweils 5 Einzelspektren, die gleichzeitig als Basis der systematischen Kreuzvalidierung dienen, in Abbildung 35 dargestellt. Man erkennt, dass insbesondere Faktor-1 mit 86 % erklärter Varianz für die Unterscheidung von GW und SW verantwortlich ist. Auf Faktor-2 (6 % erklärte Varianz) sind offensichtlich weitere Informationen enthalten, die auf anderen spektralen Informationen beruhen. Die Abgrenzung von GW und SW ist insgesamt sehr eng, aber nicht überlappend: In Abbildung 35 ist zu erkennen, dass die Scores aller GW-Spektren (blau) mit negativen Scores vertreten sind, während einige SW-Spektren, die sich ansonsten im Bereich positiver Scores befinden, ebenfalls im negativen Bereich zu finden sind. Bei diesen auffälligen Spektren, deren Scores schwarz markiert wurden, handelt es sich um zwei alte SW-Proben (P150 und P156). Ebenfalls ins Auge fallen Spektren einer alten SW (P020) und einer neuen GW (P045), die sich v.a. auf dem Faktor-2 vom Hauptcluster absetzen.

Ein alternativer chemometrischer Klassifizierungsansatz exakt derselben spektralen Daten wird anhand von Abbildung 36 illustriert. Um eine Klassifizierung anhand des SIMCA Algorithmus durchzuführen, müssen zunächst PCA-Modelle für alle GW-Spektren (A) bzw. alle SW-Spektren (B) der Kalibrierproben erstellt werden. Unter Nutzung dieser beiden PCA-Modelle können neue Proben mittels SIMCA klassifiziert werden. Bei den PCA-Modellen werden wieder einige auffällige Proben beobachtet, die z.T. bereits in der PLS-DA gekennzeichnet wurden. Da jedoch die betreffenden Spektren nicht die Kriterien für multivariate Ausreißer erfüllen, d.h. gleichzeitig überdurchschnittlich hohe Werte bei den Q-Residuen und der Hotelling-T² Werte im Influence Plot auftreten, wurden alle Proben beibehalten. Letztendlich ist es wichtig, dass der Kalibrierprobensatz eine möglichst weite spektrale Varianz umfasst, die auch zukünftige unbekannte Proben mit abbilden kann.

Abbildung 36

PCA-Modelle für GW (A) und SW (B) als Grundlage einer SIMCA Klassifizierung. Die PCA-Modelle umfassen vier Subplots: Scores für PC1 und PC2 (oben links), spektrale Loadings der relevanten Hauptkomponenten (oben rechts), Influence Plots zur Identifizierung potenzieller Ausreißer und extremer Proben (unten links), kumulierte erklärte Varianz der Hauptkomponenten (unten rechts)



Quelle: Abbildung Hardcopy aus Software, BAM

Beim Vergleich der PCA-Modelle für GW und SW fällt auf, dass die Modellierung für GW eine Hauptkomponente mehr umfasst, (PC4) die ebenfalls wichtig für die Materialdifferenzierung ist. Die Entscheidung, wie viele Hauptkomponenten in einem Modell zugelassen werden, wird (i) anhand der erklärten Varianz aus Kalibrierung und Kreuzvalidierung entschieden und (ii) anhand der Sinnhaftigkeit der Loadings – handelt es sich noch um eine spektrale Signatur oder liegt Rauschen vor? Im Falle der PCA der GW handelt es sich jedoch eindeutig nicht um Rauschen. NIR-Tabellenwerke weisen Schwingungen um 1152 nm dem zweiten Oberton der C-H Streckschwingung in CH₃-Gruppen und Schwingungen um 1490 nm entweder dem ersten Oberton der N-H Schwingung in Gruppen des Typs CONHR oder dem ersten Oberton der O-H Schwingung in Kohlehydraten wie Cellulose zu. Die in Frage kommenden chemischen Komponenten werden in Bindemitteln vermutet. Da diese sowohl in GW als auch in SW verwendet werden, ist es ohne Kenntnis der konkreten chemischen Zusammensetzungen von Mineralwollen schwer zu entscheiden, ob die Interpretation valide ist.

Vorhersagen & Anwendungen der Modelle

Unter Verwendung der hier vorgestellten PLS-DA und PCA-Modelle wurden Vorhersagen zum Material für **zahlreiche „unbekannte“ Proben getroffen**. In der linken Spalte von Tabelle 23 befinden sich die Probenbezeichnungen, daneben **folgen in der Spalte „Predicted“ die Vorhersageergebnisse der PLS-DA** (immer in Bezug auf GW): Werte kleiner 0,4 werden als SW interpretiert und Werte größer 0,6 als GW. Zur besseren Veranschaulichung wurden diese Zuordnungen im Fall von GW grün und im Fall von SW rot **unterlegt**. **Ist die Vorhersage nicht eindeutig, erfolgte keine farbliche Kodierung**. In der Spalte „sdev“ ist ein Parameter dargestellt, der keine Standardabweichung darstellt, sondern als Maß für die Nähe der unbekanntenen Proben zum PLS-DA-Modell dient. Hohe Werte für sdev gelten als Indikator für Proben, die im jeweils dem Modell zugrundeliegenden multivariaten Raum nicht gut zu den Kalibrierproben passen. Zur Visualisierung wurde bei sdev > 0,1 hier eine gelbe Markierung hinterlegt.

Die Spalten mit den Bezeichnungen „PCA-GW“ und „PCA-SW“ zeigen die SIMCA-Klassifizierung der untersuchten Spektren anhand eines Sterns bei dem jeweils passenden Material-Modell. In Fällen, wo entweder Treffer für beide oder keins der Modelle ausgegeben wurden, wurde der Hintergrund grau hinterlegt. Die letzte Spalte beinhaltet die Vorabinformation bzw. Ergebnisse der Referenzanalytik wd-RFA. Beim ersten Blick auf Tabelle 23 fällt auf, **dass bei den Probensätzen „Validierproben“, und „Wiederholungsmessungen“ eindeutige Ergebnisse in vollständiger Übereinstimmung zwischen den Vorhersagen der verwendeten Modelle und den Referenzdaten gibt**. Es sei darauf hingewiesen, dass dabei in zwei Fällen der Wiederholungsmessungen bei unsicherer Klassifizierung durch die Referenzanalytik, basierend auf den NIR-Spektren des AURAs, eine eindeutige Klassifizierung möglich war. Ähnlich gestaltet es sich bei Probe W5A-2 im Probensatz „BigBags“. Bei den Proben W3A, W4A und W7A zeigte sich, dass sowohl Referenzanalytik als auch NIR-Vorhersage mittels PLS-DA keine klaren Ergebnisse liefern, die SIMCA-Klassifizierung jedoch die Zuordnung der mit geringem Score angegebenen Referenzanalytik unterstützt. Bei den problematischen Wollen W3A und W4A handelt es sich nach Aussage der TU Berlin vermutlich um dasselbe Material, bei W2A liegt eine neue Wolle vor und W7A ist vermutlich eine alte Mineralwolle aus dem ehemaligen Gebiet der DDR.

Am heterogensten sind die Ergebnisse für die 19 Mineralwollen des TU-Probensatzes, die nicht in die Kalibrierung mit einbezogen wurde. Grund dafür waren Auffälligkeiten, die sich nach der ersten Sichtung der Messergebnisse zeigten. An diesen Proben wurden, wenn genügend Material vorlag, sowohl NIR- als auch RFA-Untersuchungen wiederholt.

P007, P017, P027, P028, P043, P044, P127, P131, P132, P134 und P137 konnten dabei eindeutig und richtig in Bezug auf die wd-RFA zugeordnet werden, jedoch im Falle von P017, P027 und P120 mit einem hohen Wert für sdev, was auf untypische Proben in Bezug auf das PLS-DA Kalibriermodell hinweist.

Tabelle 23

Ergebnisse der Vorhersagen für „unbekannte“ Proben anhand der in Abbildung 35 und Abbildung 36 vorgestellten PLS-DA bzw. PCA-Modelle über SIMCA-Klassifizierung. Die Tabelle untergliedert sich in die Probensätze „Validierproben“, „BigBags“ und „Proben, die kein Bestandteil des Kalibriersatzes waren“ sowie „Wiederholungsmessungen“. Referenzwerte in Klammern bedeuten, dass die Klassifizierung gemäß VDI 3492 [124] nur einen sehr geringen Score aufwies, und „unsicher“, dass keine klare Zuordnung zum Material getroffen werden konnte.

Probe	Predicted	sdev	PCA-GW	PCA-SW	Referenz
Validierproben					Information
Dachboden	-0,10	0,05		*	SW
Bungalow	0,12	0,06		*	SW
DP3	-0,16	0,07		*	SW
FSP2	0,97	0,04	*		GW
KD2	0,85	0,03	*		GW
TS15	1,00	0,05	*		GW
Proben aus BigBags					RFA
W1A-1	0,12	0,06		*	SW
W1A-2	0,98	0,03	*		GW
W2A	0,11	0,04		*	SW
W3A	0,47	0,06		*	(SW)
W4A	0,49	0,05		*	(SW)
W5A-1	0,12	0,04		*	n.d.
W5A-2	1,16	0,09	*		(GW)
W6A-1	0,86	0,07	*		GW
W6A-2	1,01	0,03	*		GW
W6A-3	0,87	0,04	*		GW
W7A	0,40	0,08		*	SW
Proben, die nicht in der Kalibrierung verwendet wurden					RFA
P007	0,71	0,09	*		GW
P017	-0,06	0,21		*	SW
P027	-0,23	0,35			SW
P028	1,02	0,06	*		GW
P043	-0,01	0,05		*	SW
P044	0,75	0,08	*		GW
P074	0,08	0,02		*	unsicher
P079	-0,25	0,22		*	unsicher
P115	0,77	0,09	*		SW
P120	0,49	0,22		*	SW
P127	0,91	0,08	*		SW
P129	0,70	0,06			GW
P131	0,95	0,07	*		GW
P132	0,06	0,09		*	SW
P134	0,95	0,03	*		GW
P137	1,09	0,09	*		GW
P138	0,44	0,08		*	keine
P139	0,60	0,12	*		GW
P149	0,18	0,04		*	unsicher
Wiederholungsmessungen von Kalibrierproben nach mindestens 3 Monaten					RFA
P006	0,23	0,04		*	SW
P009	0,17	0,02		*	(SW)
P022	1,04	0,03	*		GW
P045	1,10	0,09	*		GW
P070	0,87	0,04	*		GW
P073	0,91	0,03	*		GW
P074	0,17	0,04		*	(SW)
P104	0,06	0,02		*	SW
P107	0,12	0,04		*	SW
P159	0,26	0,08		*	SW
P160	-0,25	0,03		*	SW

Quelle: Tabelle BAM

Für P120, eine alte braune SW, ergibt sich eine grenzwertige NIR-Vorhersage mittels PLS-DA, jedoch im Fall von P120 eine richtige Klassifizierung als SW über SIMCA. Der umgekehrte Fall lag bei P129 vor, einer alten weißen GW, mit unklarer NIR-Vorhersage über SIMCA, aber richtiger Zuordnung über PLS-DA.

Für P074, P079, P149 liegen keine eindeutigen Klassifizierungen über die Referenzanalytik vor und für P138 fehlt die Referenzanalytik aufgrund einer kontaminierten Tablette. Interessanterweise zeigen P079 und P138 ebenfalls Auffälligkeiten bei der Klassifizierung über die NIR-Spektren. Eine Diskussion der Referenzanalytik ist im Abschnitt „Referenzanalytik“ ausführlich dargelegt.

P115 & P127, beides alte hellgraue Wollen, wurden anhand der NIR-Spektren mit beiden Modellen eindeutig als GW klassifiziert und stehen somit im Widerspruch zur Referenzanalytik, die SW prognostiziert. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass hier eine Verwechslung von Proben bzw. Probenbezeichnungen vorliegt.

Im Laufe der Untersuchungen zeigte sich, dass es sich bei problematischen Klassifizierungen häufig um weiße Wollen handelt, so auch bei den Proben W3A, W4A aus den BigBags. Nach Einschätzung der Kollegen der TU Berlin können weiße Wollen vorliegen, wenn i) keine Bindemittel verwendet wurden, ii) als Resultat anorganischer Zuschlagstoffe, wie z.B. Sol- oder Kieselgel, Wasserglas oder Silane, oder iii) aufgrund von farblosen Bindemitteln auf Acrylbasis (vgl. Kapitel 2.3.4).

Tabelle 24 illustriert anhand der Spektren des Matrix-F an Proben der BigBags wie mathematische Transformationen bei der Modellerstellung Vorhersageergebnisse modifizieren können.

Tabelle 24

Referenzanalytik und Vorhersagen verschiedener Klassifizierungsmodelle für die NIR-Spektren. „raw“ bezeichnet unbehandelte Spektren, SG-die Nutzung erster Ableitung kombiniert mit einem Polynom nach Savitzky-Golay

Analytik	RFA	RFA	NIR	NIR	NIR	NIR	NIR	NIR
Gerät			Matrix-F	Matrix-F	Matrix-F	Matrix-F	AURA	AURA
Modell	Omnian = Fluxana	Omnian = Fluxana	PLS-DA raw	PLS-DA SG	SIMCA raw	SIMCA SG	PLS-DA raw	SIMCA raw
Proben	Material	"Vorsagestärke"	Vorhersage(F3)	Vorhersage(F2)	5%	5%	Vorhersage(F2)	5%
W1A-1	SW	stark	SW	SW	SW	SW	SW	SW
W1A-2	GW	stark	GW	GW	GW	GW	GW	GW
W2A	SW	stark	SW	SW	SW	SW	SW	SW
W3A	SW	schwach						SW
W4A	SW	schwach						SW
W5A-1	fehlt	fehlt	SW	SW	SW	SW	SW	SW
W5A-2	GW	schwach	GW	GW	GW	GW	GW	GW
W6A-1	GW	stark	GW	GW	GW	GW	GW	GW
W6A-2	GW	stark	GW	GW	GW	GW	GW	GW
W6A-3	GW	stark	GW	GW	GW	GW	GW	GW
W7A	SW	stark	SW	SW		SW	SW	SW

Quelle: Tabelle BAM

Im Folgenden wird auf die detaillierte Diskussion der Vorhersageergebnisse verschiedener Datentransformationen verzichtet und Kennzahlen in Form von *Sensitivität* und *Spezifität* genutzt, deren Vergleich einen besseren Überblick über die Leistung der einzelnen Methoden und Modelle gestattet. Unter Verwendung der Bezeichnungen "positiv" und "negativ" gibt es bei einem binären Klassifizierungsproblem vier mögliche Ergebnisse: Bei richtiger Klassifizierung erhält man richtig-positive und richtig-negative Ergebnisse, bei falscher Klassifizierung falsch-positive und falsch-negative Ergebnisse. Die Sensitivität ist definiert als das Verhältnis von richtig-positiv und der Summe von richtig-positiv und falsch-negativ, und die Spezifität als das Verhältnis von richtig-negativ und der Summe von richtig-negativ und falsch-positiv. Im Idealfall, wenn alle Vorhersagen richtig sind, erreichen sowohl die Sensitivität als auch die Spezifität den Wert 100 %. Für die Berechnung dieser Kenngrößen ist es also wichtig, eine Reihe von Nicht-Mineralwollen zu testen, um zu erkennen, ob diese fälschlicherweise als Mineralwollen erkannt werden (falsch-positiv). Diese Fähigkeit der Modelle ist v.a. wichtig für die Identifizierung potenzieller Störstoffe, die baustellenseitig anfallen könnten.

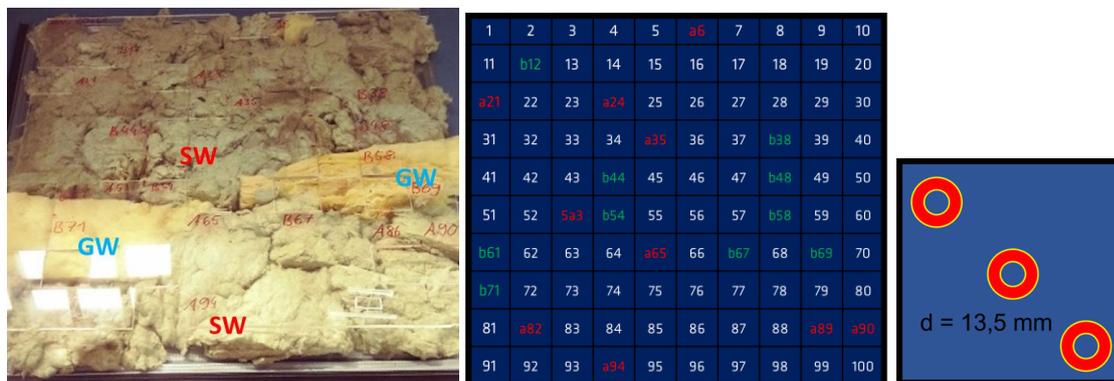
Obwohl die Vorstellung der Ergebnisse an den NIR-Untersuchungen zu „Störstoffen“ erst im folgenden Kapitel erfolgt, wird hier bereits auf die in Tabelle 26 hinterlegten Ergebnisse zurückgegriffen. Unter Berücksichtigung der Vorhersagen gemäß Tabelle 23 und Tabelle 26 ergibt sich somit für das PLS-DA-Modell eine Sensitivität von 88,4 % und eine Spezifität von 0%, da Materialien, die keine Mineralwollen darstellen nicht klar ausgeschlossen werden. Im Gegensatz dazu erhält man mit der SIMCA-Klassifizierung eine Sensitivität von 95,4 % und eine Spezifität von 80% und somit für beide Kenngrößen deutlich bessere Ergebnisse.

Anwendungsfall – in situ Untersuchungen mit dem NIR-Handgerät an Proben aus BigBag W1

Abschließend wird die in-situ Untersuchung einer, durch die TU Berlin aus BigBags entnommenen Probensammlung, erläutert. Zunächst wurde das Material auf einem Blech gleichmäßig ausgebreitet und anschließend mit einer vorbereiteten Plexiglasmaske, die in 100 quadratische Felder geteilt war, bedeckt. Auf diese Weise wurde an 2x10 zufällig ermittelten Feldern die Beprobung mit dem AURA ermöglicht (Abbildung 37). Dabei wurden jeweils drei Messungen in diagonaler Position pro Teilfeld ausgeführt und für die Vorhersagen gemittelt. Indem mindestens 10% der Fläche beprobt wurde, konnten Aussagen zur Homogenität des Inhalts von BigBag W1 getroffen werden, in dem Fall, dass es sich mindestens um zwei verschiedene Wollen handelt. Sowohl die ersten 10 (a-Satz) als auch die zweiten 10 Testproben (b-Satz) bestätigten diese Annahme. Dieser Ansatz wurde der Theorie der Probenahme (Uncertainty of Sampling, UfS) entlehnt, die besagt, dass häufig die Unsicherheit der Probenahme einen größeren Beitrag im Unsicherheitsbudget generiert als die analytische Methode selbst [92]. Die Berücksichtigung der UfS spielt insbesondere bei modernen Vorort-analytische Verfahren eine wichtige Rolle.

Abbildung 37

Links: Mineralwolleproben aus dem BigBag W1 auf einem Blech ausgebreitet und mit einer Plexiglasmaske zur Markierung von Messfeldern bedeckt, Mitte: schematische Darstellung der Messpositionen, Rechts: schematische Darstellung der Beprobung pro Teilfeld mit dem AURA



Quelle: Foto und Abbildungen BAM

Die Vorhersagen erfolgten anhand der SIMCA-Klassifizierung unter Verwendung der PCA-Modelle in Abbildung 37 und sind in Tabelle 25 zusammengefasst. Dabei ist zu erkennen, dass alle Messungen eindeutige Resultate erbrachten und offenbar zwei verschiedene Wollen, eine SW und eine GW, in diesem BigBag enthalten waren. Die Zuordnung der Vorhersagen wurde in das Foto in Abbildung 37 farblich eingetragen.

Nach der NIR-Messung, die im Technikum der TU Berlin stattfand, wurden aus den Messfeldern jeweils Mineralwollestücke entnommen und im Labor der BAM mittels Hand-RFA untersucht, wobei die Vorhersagen der SIMCA-Klassifizierung verifiziert werden konnten. Nach dieser in-situ Beprobung wurden Teilproben dieser und anderer BigBags noch einmal mit dem AURA und Matrix-F vermessen sowie wd-RFA Referenzanalytik durchgeführt. Die Ergebnisse der Laboranalytik unterstützen die in situ Untersuchungen und sind in Tabelle 25 zusammengefasst.

Tabelle 25
Vorhersagen für BigBag-Proben W1, Details siehe Abbildung 37

Teilfläche	NIRS	AURA	SIMCA	Hand-RFA
	GW		SW	Oxide
a06			*	✓
a21			*	✓
a24			*	✓
a35			*	✓
a53			*	✓
a54			*	✓
a65			*	✓
a82	*			✓
a86			*	✓
a90			*	✓
a94			*	✓
b12			*	✓
b38			*	✓
b44			*	✓
b48			*	✓
b58	*			✓
b61	*			✓
b67	*			✓
b69	*			✓
b71	*			✓

Quelle: Abbildung BAM

Aufgabenstellung 2, Erkennen von Störstoffen

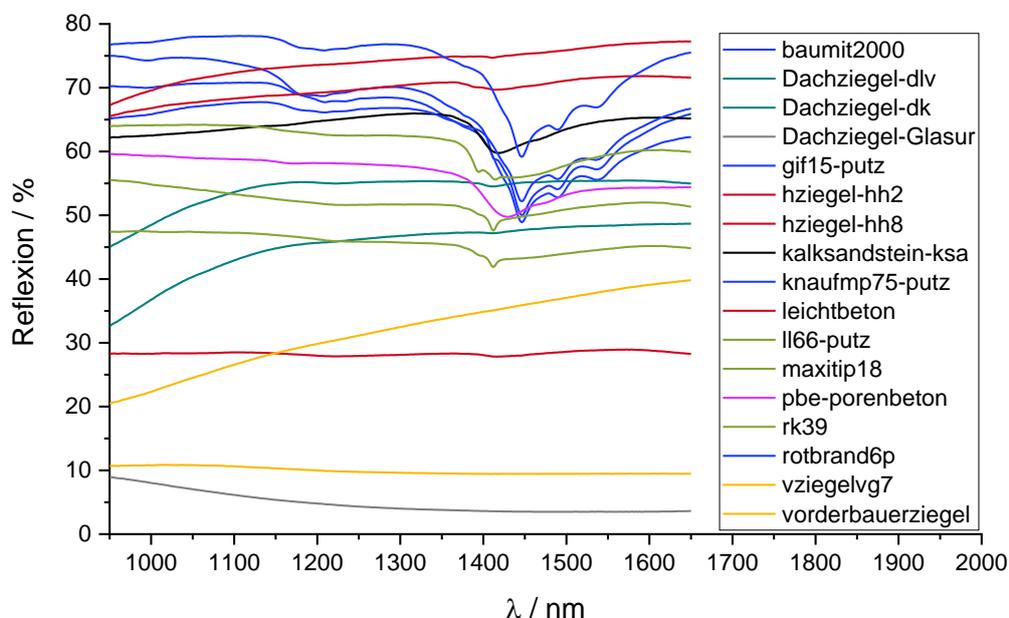
Das Projektziel bestand in der Abgrenzung von Fremdmaterialien in Mineralwollen, die potenzielle Störstoffe für die Weiterverarbeitung darstellen. Zu diesem Zweck wurde getestet, ob die Fremdmaterialien anhand der, zur Materialklassifizierung etablierten PLS-DA (Abbildung 35) und SIMCA-Modelle (Abbildung 36), als Mineralwollen ausgeschlossen werden. Alternativ könnten ebenfalls bei Vorhandensein größerer Probenmengen bekannter Materialien, die als Störstoffe klassifiziert werden sollen, PCA-Modelle für eine SIMCA-Klassifizierung dieser erstellt werden.

Als Testproben dienten die in Tabelle 26 zusammengestellten Baustoffe, sowie ebenfalls Beschichtungen von Mineralwollen und zwei organische Fasern (P153, P155). Bei den Vorhersagen fällt zunächst auf, dass mittels PLS-DA für fast alle Materialien Zuordnungen als GW erhalten werden, wenn auch in den meisten Fällen mit auffällig erhöhten Werten für sdev, als Indiz für Modell-ferne, untypische Proben.

Im Gegensatz dazu werden bei der SIMCA-Klassifizierung, mit Ausnahme der Beschichtungen, nur wenige Fehlzuordnungen beobachtet. Beschichtungen von Mineralwollen sollten somit niemals als Messpunkt gewählt werden, da sie nicht nur Vliese, sondern auch Reste von Hotmelt Klebstoffen enthalten können [54]. Messungen an Umgebungsmaterialien, zum Beispiel auf einer keramischen Abzugsoberfläche oder an Zellstoff, ergeben keine Treffer bei der SIMCA-Klassifizierung. Ebenso werden organische Fasern (P153, P155) nicht als Mineralwollen erkannt.

Unter den Baustoffen gibt es 3 Fehlklassifizierungen für die Materialien Hintermauerziegel hziegel-hh2 und hh8, sowie für Leichtbeton. In Abbildung 38 sind die Mittelwertspektren der AURA-Messungen zusammengestellt, wobei die problematischen Proben rot gezeichnet sind. Sehr gut zu erkennen ist beispielsweise der Gipsanteil in vier Baumitteln, hier blau gekennzeichnet. Wiederholung der SIMCA-Klassifizierung mit Spektren nach 1. Ableitung reduziert die Anzahl der falsch-positiven Ergebnisse auf eine Probe, hziegel-hh8, die fälschlicherweise als GW klassifiziert wird.

Abbildung 38
NIR-Spektren von Baustoffen (Mittelwertspektren, AURA) die Grundlage der Vorhersagen in Tabelle 26 waren



Quelle: Abbildung BAM

Tabelle 26

Ergebnisse der Vorhersagen für „unbekannte“ Proben, die keine Mineralwollen darstellen, anhand der in Abbildung 35 und Abbildung 36 vorgestellten PLS-DA bzw. PCA-Modelle

Probe	Predicted	sdev	PCA-GW	PCA-SW
Beschichtungen				
160_Beschichtung	-0,32	0,93		
FSP2_Beschichtung	1,02	0,09	*	
KD2_Beschichtung	0,77	0,06	*	
DP3_Beschichtung	0,84	0,08	*	
P107_Beschichtung	1,07	0,29		
P045_Beschichtung	0,82	0,11	*	
Umgebungsmaterialien				
Abzugoberflaeche	1,86	0,22		
Zellstoff	1,83	0,46		
Untersuchungen an Baumitteln				
putz(gips)-baumittel2000	1,98	0,62		
Dachziegel-dlv	1,10	0,21		
Dachziegel-dk	0,93	0,26		
Dachziegel-Glasur	1,39	0,33		
putz(gips)-gif15	2,00	0,70		
hziegel-hh2	0,95	0,04	*	
hziegel-hh8	0,90	0,10	*	
kalksandstein-ksa	1,24	0,29		
putz(gips)-knaufmp75	1,64	0,52		
leichtbeton	0,92	0,08	*	
putz-ll66	1,22	0,16		
putz-maxitip18	1,08	0,15		
porenbeton-pbe	1,51	0,32		
putz-rk39	1,42	0,32		
putz(gips)-rotbrandGP	1,67	0,54		
vziegel-vg7	1,11	0,17		
vorderbauerziegel	0,12	0,23		
Organische Fasern irrtümlicherweise als Mineralwolle gesammelt				
P153	1,12	0,44		
P155	1,69	0,60		

Quelle: Tabelle BAM

Aufgabenstellung 3, Identifikation des Alters

Mineralwollen können Fasern in die Umgebung freisetzen, und die bis etwa 2000 hergestellten Mineralwollen stehen im Verdacht, krebserregend zu sein. Dies ist der Fall, wenn sie in die Lunge gelangen, dort ausreichend lange bleiben, biobeständig sind und wenn die Fasern kürzer als 250 μm und dünner als 3 μm sind. Untersuchungen mit humanen Mesothelzellen in vitro ergaben, dass Fasern von Mineralwollen generell weniger toxisch sind als beispielsweise Asbestfasern, jedoch immer noch 50% der Zellen bei den untersuchten Dosen schädigten. In abnehmender Toxizität wurden ebenfalls dünne Glas- gefolgt von dünner Steinwolle, grobe Glas- und Steinwolle, sowohl gemahlene Stein- und Glaswolle getestet [5].

Seit Juni 2000 sind in Deutschland nur noch Mineralwolle-Dämmstoffe mit RAL-Siegel auf dem Markt, das diese als nicht krebserregend ausweist. Dieses RAL-Gütezeichen beruht auf toxikologischen Bewertungen der Biobeständigkeit anhand von Tierversuchen. Für die Unbedenklichkeit der modernen Fasern spricht eine Studie aus den USA an exponierten Arbeitern in der Industrie, in der zwar eine erhöhte Inzidenz für Atemwegserkrankungen gefunden wurde, wie sie beim Umgang mit Stäuben typischerweise auftreten, aber keine Hinweise auf ein gesteigertes Risiko von Lungenkrebskrankungen gefunden wurden [122].

Das Verwendungs- und Inverkehrbringungsverbot führte dazu, dass die Hersteller von Mineralfaserprodukten die Chemie der Fasern und deren Biopersistenz so verändern mussten, dass die Fasern die vorgeschriebenen Tests bestanden und kein Verdacht auf Krebszeugung mehr bestand. Dazu mussten andere Rohstoffdosierungen, Zerkleinerungsmechanismen und / oder Bindemittelarten und -mengen verwendet werden. Detailliert wurde das Thema der Gesundheitsbedenklichkeit von Mineralfasern in Kapitel 2.2.2 behandelt. Der Punkt wird hier noch einmal aufgegriffen, da sich aus diesen vorgenommenen Änderungen möglicherweise ein Indikator ergibt, der spektroskopisch erfasst und ausgewertet werden kann.

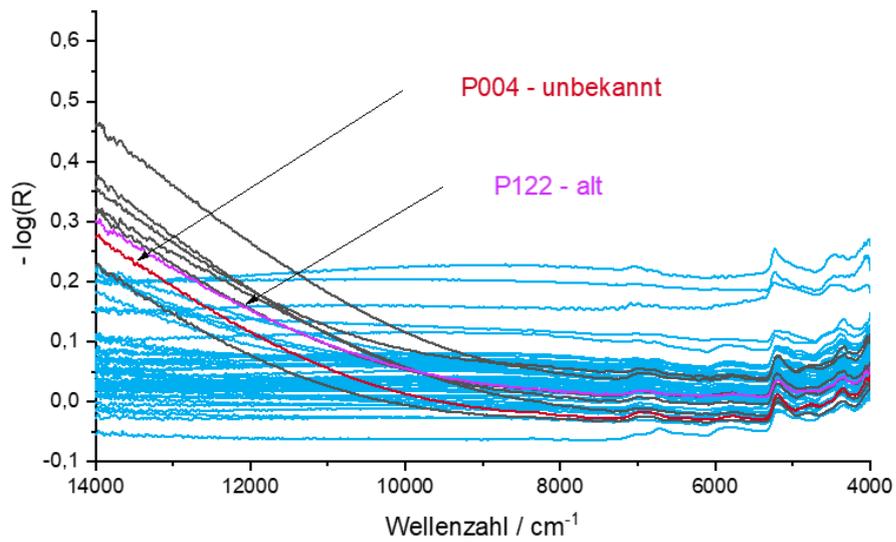
Im Rahmen des TU-Probensatzes liegen 34 GW und 48 SW mit Altersangaben vor (Tabelle 22). Dazu kommen noch einmal zwei alte GW, eine neue GW und drei neue SW aus dem Validierdatensatz (Tabelle 23). Es wurden verschiedene Modelliersätze mit unbehandelten Daten, verschiedenen Normierungen (Flächennormierung, Einheitsvektornormierung), Standardnormalvariate-Transformation (SNV) [106], sowie mathematischen Ableitungen der NIR-Spektren von AURA und Matrix-F mittels PLS-DA, SIMCA oder Linearer Diskriminanzanalyse unter Nutzung der PCA-Scores eingesetzt. Mit keiner der genannten Methoden wurden ernstzunehmende Erfolge erzielt.

Einzig anhand der NIR-Spektren des Matrix-F kann scheinbar eine Gruppe neuer Glaswollen anhand eines auffälligen Anstiegs im Spektralbereich 15.000 – 10.000 cm^{-1} identifiziert werden (Abbildung 39). Zwei weitere Proben weisen dieselbe spektrale Signatur auf, bei P004 handelt es sich um eine Probe ohne Altersangabe, wo man vermuten könnte, dass es sich also auch um eine neue GW handelt, während es sich bei P122 um eine Probe handelt, die als alte GW eingestuft wurde. Bei der braunen Farbe in neuen GW handelt es sich vermutlich um zuckerbasierte Bindemittel [86], die eher in neuer Zeit eingesetzt wurden.

Dieses Beispiel illustriert jedoch die Problematik der Entwicklung der Altersbestimmung. Tatsächlich bestand die Hoffnung, dass sich gerade anhand historisch-spezifischer Zusätze in den Mineralwollen auf indirektem Weg ein (spektroskopisch messbarer) Zugang zu der Thematik finden lässt, aber bereits der erste greifbare Ansatz offenbart eine widersprüchliche Ausgangssituation. Da jedoch die Frage, ob es sich um eine alte Wolle, die einen Gefahrstoff darstellt, oder um eine neue Wolle, die mit weitaus geringeren Sicherheitsbedenken gehandhabt werden kann, von großer Wichtigkeit ist, kann man diese Thematik nicht mit derartigen Unsicherheiten bereits im Kalibrierstadium, bearbeiten.

Abbildung 39

NIR-Spektren des Matrix-F an GW zwecks Visualisierung einer Gruppe neuer, brauner GW (schwarz) die sich durch typische Spektren auszeichnen. Dies trifft weiterhin auf die unbekannte Probe P004 und eine alte GW, P122, zu.



Quelle: Abbildung BAM

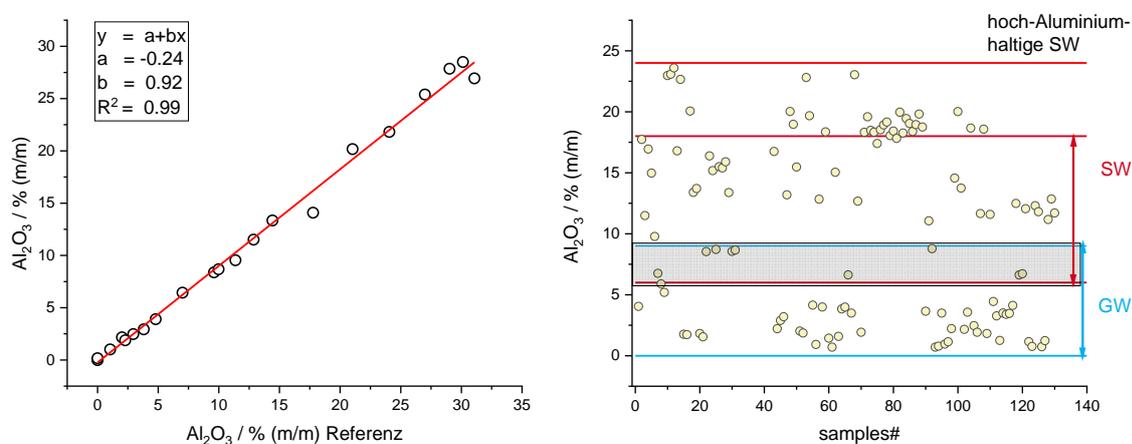
Referenzanalytik mittels Röntgenfluoreszenzanalyse

Im Ergebnis der Untersuchungen an Lithiumborat Schmelztabletten des TU-Probensatzes an den wd-RFA-Spektrometern MagiX Pro und Zetium liegen Massenanteile für neun Oxide vor, die gemäß VDI 3492 [124], wie im Methodenteil beschrieben, ausgewertet wurden. Der Vergleich der semiquantitativen Auswertung über das Programm „Omnian“, sowie über die Kalibrierung „FLX-RAW-Pro“ von Fluxana ergab für 20 Testproben identische Ergebnisse bezüglich der Zuordnung der Mineralwollen als GW oder SW. Die im Folgenden diskutierten Ergebnisse beziehen sich auf die Auswertung über „Omnian“.

Da sich trotz Wiederholungsmessungen an neu erstellten Proben in einigen Fällen entweder keine klare Klassifizierung anhand der wd-RFA, bzw. in zwei Fällen widersprüchliche Aussagen zur Klassifizierung über die NIR-Analysen ergaben, wurde das Verfahren auf mögliche Unsicherheiten untersucht, und hier am Beispiel von Al_2O_3 diskutiert. Mögliche Beiträge zur Messunsicherheit können u.a. aus der Tablettierung (Einwaage Fehler, Inhomogenitäten etc.), der Messung selbst und der Kalibriergeraden entstehen. Um den Einfluss der Tablettierung zu untersuchen, wurden für P039 unter Nutzung von drei Unterproben, zwei Mühlen sowie drei leicht variierenden Verfahren der Tablettierung, inklusive Duplikaten, insgesamt 12 verschiedene Tabletten hergestellt. Die für Al_2O_3 resultierende relative Unsicherheit betrug hierbei 1,06 %. Die Messgenauigkeit wurde anhand von Wiederholungsmessungen auf 0,2 % bestimmt. Der höchste Beitrag zur Messunsicherheit resultiert aus der Kalibrierung mit 3 %, siehe auch Kalibriergeraden in Abbildung 40 (links). Insgesamt ergibt sich eine einfache Unsicherheit $u = 3,2 \%$ und für $k=2$ eine erweiterte Unsicherheit $U = 6,4 \%$ für die Bestimmung von Al_2O_3 Gehalten in Mineralwollen mittels wd-RFA.

Abbildung 40

Links: Kalibrierkurve für Al_2O_3 („Omnian“) basierend auf 22 Proben (Einwaagen der Oxide), rechts: Al_2O_3 Gehalte von Mineralwollen ermittelt anhand von Schmelztabletten mit Grenzen für die Zuordnung zu GW und SW gemäß VDI 3492 [124]



Quelle: Abbildung BAM

Neben der analytischen Messunsicherheit ist jedoch bereits in den Vorgaben von VDI 3492 [124] (siehe Abbildung 32), die Quelle für zweideutige Ergebnisse aufgrund überlappender Grenzen für GW mit 0-9 % (m/m) und SW mit 6-24 % (m/m) angelegt. Diese Überlappungen treten für alle Oxide auf. Um die Problematik zu illustrieren, wurden in Abbildung 40 die ermittelten Al_2O_3 Gehalte der Mineralwolleproben des Kalibriersatzes eingetragen. Es ist zu erkennen, dass für 10 von 140 analysierten Proben die ermittelten Al_2O_3 Gehalte in den Grenzbereich fallen, das entspricht 8,8 % der Proben.

Weiterhin sieht man, dass die in VDI 3492 [124] vorgegebenen Maximalgehalte teilweise deutlich überschritten werden. Hierbei handelt es sich um sogenannte Hoch-Aluminiumhaltige SW mit gleichzeitig geringem SiO_2 Anteil, diese wird typischerweise seit den 1990er Jahren produziert. Im vorliegenden Datensatz

weisen insgesamt 32 Mineralwollen Al_2O_3 Massenanteile $> 18\%$ auf. Für vier dieser Proben (P011, P013, P014, P016) liegt die Altersinformation „neu“ vor, bei P019 handelt es sich jedoch um eine alte Probe mit einem Massenanteil von $20,05\%$ Al_2O_3 . Auch hier stellt sich wieder die Frage, wie genau Messwerte tatsächlich bestimmt werden können bzw. ob die Altersangaben korrekt sind. Jedoch wäre es denkbar, dass anhand der Kombination der Oxidgehalte zumindest bei SW eine Alterseinstufung möglich ist (Tabelle 27).

Tabelle 27

Mineralwollen mit einem Massenanteil $> 18\%$ Al_2O_3

Probe	Produzent	RFA „Hand“	Alter	Al_2O_3	Massenan SiO_2
P011	Isover	SW	neu	23,0	41,3
P013	Isover	SW	neu	23,1	41,6
P014	Isover	SW	neu	23,6	41,4
P016	Isover	SW	neu	22,7	41,9
P019		SW	alt	20,1	37,6
P049		n.d.		20,0	37,0
P050		SW		19,0	38,7
P056		SW		22,8	41,8
P059		SW		19,7	41,7
P068		SW		18,3	40,8
P076		SW		23,0	42,0
P081	Rockwool	SW		18,3	40,6
P085		SW		19,6	38,7
P091	Rockwool?	SW		18,3	39,0
P093	Rockwool	SW		18,5	40,7
P095	Rockwool	SW		19,2	40,8
P096	Rockwool	SW		18,0	40,3
P098	Rockwool	SW		18,4	40,9
P100	Rockwool	SW		20,0	37,0
P103	Rockwool	SW		18,3	40,9
P104	Rockwool	SW		19,4	38,7
P105	Rockwool	SW		19,0	41,5
P107	Rockwool	SW		18,4	41,5
P108	Rockwool	SW		18,9	38,7
P109	Rockwool	SW		19,8	38,8
P110	Rockwool	SW		18,8	41,0
P125	TIR Kamilit	SW		20,0	42,2
P135	Contrino	SW		18,6	41,7

Quelle: Tabelle BAM

Überlegungen zum Einfluss der Messunsicherheit auf die Zuordnung gemäß VDI 3492

Aufgrund der abgeschätzten Messunsicherheit muss berücksichtigt werden, dass die Grenzen der Einstufung in GW und SW noch stärker überlappen. Um dies zu illustrieren, wird der Einfachheit halber zunächst eine Gleichverteilung der Proben in den Gruppen angenommen.

$$f_{GW}(x) = \frac{1}{9-0} = \frac{1}{9}, \text{ wenn } 0 \leq x \leq 9 \tag{Gleichung 2}$$

$$f_{SW}(x) = \frac{1}{18-6} = \frac{1}{12}, \text{ wenn } 6 \leq x \leq 18 \tag{Gleichung 3}$$

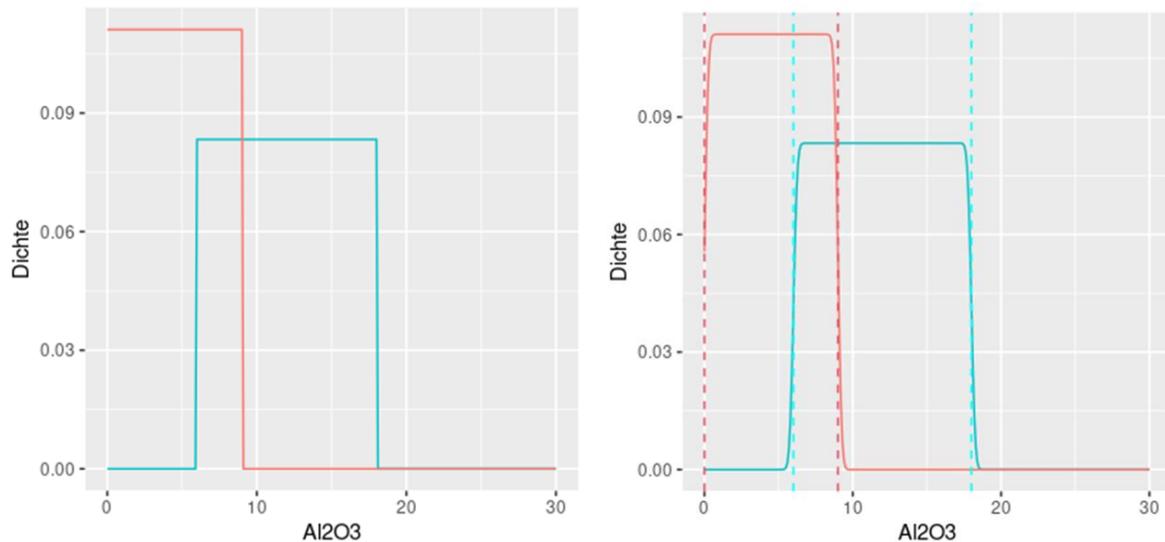
Wenn nun eine Messunsicherheit berücksichtigt werden muss, ändert sich die Verteilung. Unter der Annahme, dass der Fehler einer Normalverteilung folgt, ergibt sich der gemessene Wert Z dann aus:

- wirklicher Wert: $Y_1 \sim U(a, b)$ (uniform distribution)
- plus Messunsicherheit: $Y_2 \sim N(0, \sigma^2)$ (normal distribution)

$$Z = Y_1 + Y_2 \tag{Gleichung 4}$$

Wenn σ unabhängig vom Aluminiumoxidgehalt ist, können Y_1 und Y_2 als unabhängige Variablen betrachtet werden. Die Dichte von Z (Gleichung 4) lässt sich dann aus der Faltung der Gleichverteilung mit der Normalverteilung berechnen und die Gleichverteilung/Rechteckverteilung in Abbildung 41 wird dadurch etwas abgerundet (Gleichungen 5 –7).

Abbildung 41
Effekt einer Messunsicherheit (rechter Graph) auf die Klassifizierung von GW und SW basierend auf Al_2O_3 gemäß VDI 3492 [124]



Quelle: Hardcopy aus Software R, Abbildung BAM

$$f_Z(z) = \int f_{U[a,b]}(u) f_{N(0,\sigma^2)}(z - u) du \tag{Gleichung 5}$$

$$f_Z(z) = \frac{1}{b-a} \int_{z-b}^{z-a} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}v^2} dv \tag{Gleichung 6}$$

$$f_Z(z) = \frac{1}{b-a} \int_{\frac{z-b}{\sigma}}^{\frac{z-a}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx = \frac{F_{N(0,1)}\left(\frac{z-a}{\sigma}\right) - F_{N(0,1)}\left(\frac{z-b}{\sigma}\right)}{b-a} \tag{Gleichung 7}$$

Mit den Verteilungen lassen sich Wahrscheinlichkeiten für die weiteren Fragestellungen berechnen. Zum Beispiel, wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass für SW ein Gehalt $<9\%$ oder $<6\%$ gemessen wird: $P(x < 9|SW)$ bzw. $P(x < 6|SW)$. Kennt man den Anteil von SW und GW in der Grundgesamtheit (z.B. $P(SW) = P(GW) = 0.5$), lassen sich daraus weitere Wahrscheinlichkeiten berechnen. Beispielsweise, wenn der gemessene Wert zwischen 6 und 9 liegt, wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit für SW: $P(SW|6 < x < 9)$; oder wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit für SW, wenn der gemessene Wert kleiner als 6 ist $P(SW|x < 6)$. Daraus können dann schlussendlich die Wahrscheinlichkeiten für eine falsche Zuordnung abgeleitet werden. Diese Berechnungen befinden sich derzeit noch in Arbeit und sollen auf alle 9 Oxide übertragen werden.

Analytik mit dem RFA-Handgerät

Vor Verwendung des Niton™ XL3t GOLDD+ RFA-Handgeräts musste zunächst die Analyse der Banden der Oxide in den Spektren erfolgen. Zu diesem Zweck wurde zunächst testweise mit 4 verschiedenen Ansätzen gearbeitet, die hier kurz erläutert werden.

- Basislinienkorrektur und Integration von Einzelbanden* mittels der Software OriginPro 2019. Vorteil der Methode ist eine schnelle Analyse großer Spektrenzahlen im Batchmodus. Nachteilig wirkt sich vor allem die Wahl der Grenzen für Basislinie und Integrationsbereich bei stark variierenden Probenzusammensetzungen aus. Die ermittelten Massenanteile der einzelnen Oxide werden nachfolgend per linearer Regression ausgewertet.
- Indirect Hard Modeling*. Aufgrund des Verfahrens, das auf der Modellierung von Voigtprofilen komplexer spektraler Strukturen überlagernden Banden und deren Basislinie unter Kenntnis von Reinstoff- und Mischungsspektren beruht, ist es möglich, quantitative Aussagen zu den Anteilen der betreffenden Oxide in einer unbekanntem Probe zu treffen. Anhand des ermittelten Hardmodels können Oxidgehalte unbekanntem Proben bestimmt werden.
- Multivariate Curve Resolution (MCR)*. Modellierung über MCR ermöglicht auch bei stark überlagernden Spektren die Identifikation von einzelnen Komponenten (Oxiden), wie es insbesondere in den **Messbereichen „Low“ und „Light“ der Fall ist. Im Ergebnis der MCR werden Massenanteile erhalten, die wie bei der Integrationsmethode (a) über lineare Regression zur Untersuchung unbekanntem Proben verwendet werden können.**
- Multivariate Regressionsanalyse (PLS)*. PLS gestattet die Berechnung sogenannter PLS-Modelle die analog **zu bekannten Verfahren der „univariaten“ Regression über vorher als sinnvoll ermittelte** spektrale Bereiche quantitative Aussagen zu den betreffenden Oxiden ermöglicht. Während die Erstellung der Modelle aufwendig ist (Auswahl des Spektralbereichs, Kalibrierung und Validierung des Modells) ist die Vorhersage unbekannter Proben komfortabel und zuverlässig über Einlesen von Rohspektren unbekannter Proben möglich.

Tabelle 28

Messbereiche der Hand-RFA mit Lage der Hauptpeaks der zu untersuchenden Oxide, blau unterlegt sind jene Oxide, die sich zuverlässig in Mineralwolleproben vorhersagen lassen

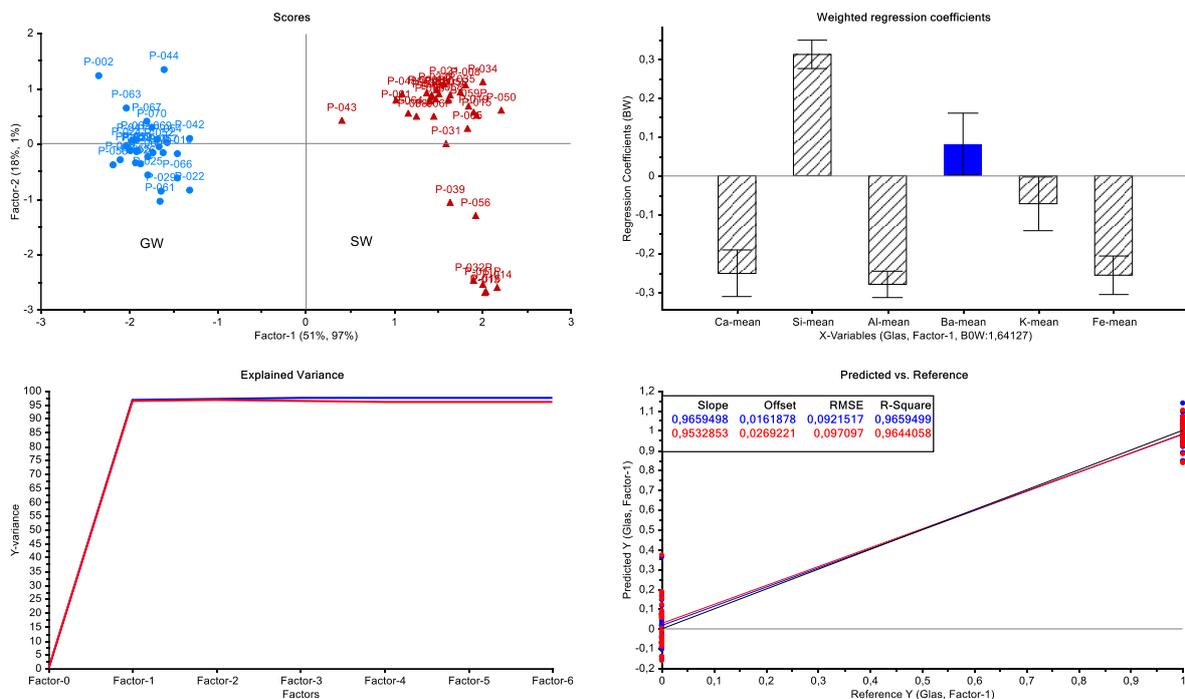
Bereich	Oxid	Energie	kalibriert	RMSE PLS	R ² aus Validierung Der Modelle			
		keV	% (m/m)	% (m/m)	Integral	PLS	MCR	Peaxact
„High“	CaO	3,75	0 - 30	2,19				
„Low“	K ₂ O	3,34	0 - 18	1,04	0,86	0,86	n.d.	0,89
	TiO ₂	4,50	0 - 11	0,44*				
	BaO	5,19	0 - 17	0,97*				
„Light“	SiO ₂	1,77	0 - 75	7,60	0,81	0,92	0,80	0,80
	Al ₂ O ₃	1,54	0 - 18	4,10	0,90	0,82	0,94	0,88
	MgO	1,27	n.d.	n.d.				
	Na ₂ O	1,04	n.d.	n.d.				
„Main“	Fe ₂ O ₃	6,43	0 - 20	1,63	0,92	0,92	n.d.	n.d.

*) trotz scheinbar guter Modelle zeigt sich anhand der Validierproben, dass keine Vorhersagen möglich sind

Quelle: Tabelle BAM

In Tabelle 28 sind die Bandenmaxima der analysierten Oxide in den Bereichen „Light“, „Main“, „Low“ und „High“ Range, der verwendete Kalibrierbereich, sowie der RMSE der erstellten PLS-Modelle zusammengefasst (siehe Gleichung 1). In den vier rechten Spalten von Tabelle 28 sind die ermittelten Korrelationskoeffizienten vom Vergleich des Hand-RFA gegen die Referenzdaten des wd-RFA Geräts aufgetragen, um die vier getesteten Ansätze zu vergleichen. Grundlage für die Validierung war jeweils eine Vierfachbestimmung (2 Messtage, 2 Operatoren) von 61 Lithiumboratschmelztabletten von Mineralwollen. Folgende Oxide konnten zunächst erfolgreich modelliert werden: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ und K₂O, CaO, TiO₂ und BaO. Jedoch ergeben die Validierungsuntersuchungen, dass trotz scheinbar gut kalibrierter Modelle CaO, TiO₂ und BaO mittels Hand-RFA in Mineralwollen nicht zuverlässig bestimmt werden können. Diese Problematik trat grundsätzlich bei allen Evaluierungsansätzen auf. Aufgrund der weitgehend vergleichbaren Leistung und aus pragmatischen Gründen wurde die Auswertung mittels PLS favorisiert. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass keine Vorannahmen hinsichtlich der zu erwartenden Linienbreiten nötig sind und Basislinienkorrekturen daher nicht Peak-bezogen, sondern über den gesamten gewählten Spektralbereich erfolgen. Im Ergebnis der Kalibrierung liegen zugleich zuverlässige und leistungsfähige Modelle vor, die anschließend für die Vorhersage unbekannter Proben genutzt werden können.

Abbildung 42
 PLS-DA der Oxide in Mineralwollen nach Bestimmung mit dem RFA-Handgerät. Erklärung der Plots analog Abbildung 35



Quelle: Abbildung BAM

Es wurde weiterhin getestet, ob eine PLS-DA der ermittelten Oxidgehalte der Hand-RFA, in Analogie zur Klassifizierung von Mineralwollen, basierend auf den NIR-Spektren eingesetzt werden kann. Dies ist der Fall, wie anhand von Abbildung 42 zu erkennen ist. Überraschenderweise erkennt man, dass trotz unsicherer Bestimmung auch der Gehalt von CaO, neben Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O und SiO₂, wichtig für die Klassifizierung der Mineralwollen ist. Dies ist anhand der Regressionskoeffizienten zu erkennen: Wenn die in der Kreuzvalidierung ermittelte Varianz geringer als der Betrag des Koeffizienten ist, ist diese spektrale Variable relevant für das vorliegende Modell. Im Gegensatz hierzu weist BaO hier einen kleinen Betrag des Koeffizienten gepaart mit einer hohen Varianz auf und ist somit nicht für die Klassifizierung relevant (blau gekennzeichnet in Abbildung 42).

In Tabelle 29 wird das Ergebnis einer Validierungsmessung an der Probe KD2 (Isover) aus dem Validierprobensatz gezeigt. Dabei wurde schichtweise Material abgetragen und anhand der ermittelten Anteile der Oxide eine Vorhersage für das Material, basierend auf dem PLS-DA Modell in Abbildung 42 vorgenommen. Die hohen Werte von sdev weisen darauf hin, dass es sich hierbei um eine Probe handelt, die nicht typisch für das Kalibriermodell ist. Dies ist nicht unerwartet, da Vorhersagen für eine native Mineralwolle mit einem Modell, das mit Lithiumborat Schmelztabletten kalibriert wurde, erfolgte. Dennoch ist die Vorhersage als GW in allen Fällen korrekt.

Das hier vorgestellte Verfahren wurde ebenfalls für die Interpretation der Untersuchungsergebnisse der Proben aus den BigBags eingesetzt. Dazu wurden die Mineralwolleproben mittels eines Stahlzylinders vor der Messung komprimiert.

Tabelle 29

Links: Vorhersagen mittels PLS-DA für die schichtweise Hand-RFA Messung an einer kompakten Mineralwolleplatte der Probe KD2 (Isover), Rechts: Foto der Platte mit Plexiglasschablone zur Festlegung der Messfelder

Tiefe / cm	Probe	Predicted-F1	sdev
0	layer 0	1,07	0,65
0	layer 0	0,81	0,51
0	layer 0	1,03	0,63
0	layer 0	1,02	0,59
2	layer 1	1,14	0,62
2	layer 1	1,05	0,55
2	layer 1	1,20	0,55
2	layer 1	1,00	0,60
4	layer 2	1,25	0,76
4	layer 2	1,12	0,67
4	layer 2	1,08	0,58
4	layer 2	1,04	0,50
6	layer 3	1,15	0,63
6	layer 3	1,05	0,51
6	layer 3	0,97	0,64
6	layer 3	1,08	0,55



Quelle: Tabelle und Foto BAM

Trotz des hohen Aufwandes, der derzeit bei der Auswertung der Daten des Hand-RFA-Geräts für die Untersuchung von Mineralwollen entsteht, bietet gerade dieser Ansatz den Vorteil, unverarbeitete Proben mobil zu untersuchen und könnte eine orthogonale Methode zur NIR-Spektroskopie darstellen. Dazu bedarf es lediglich der vorherigen Kompression der Proben, die mittels Stahlzylinder in einem passenden Container erfolgte.

6. Nachhaltigkeitsbewertung ausgewählter Recyclingstrategien

Ziel des Projektes ist es Recyclingstrategien für Mineralwolle im Schmelzwannenverfahren aufzuzeigen, die wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll sind. Um eine Lösung darüber hinaus als nachhaltig bezeichnen zu können, sollte sie auch die soziale und speziell im Bauwesen funktionale Aspekte zumindest nicht negativer als die Ausgangssituation beeinflussen.

Um sich dem komplexen Thema der sozialen, technisch funktionalen sowie standortspezifischen Aspekte der Nachhaltigkeit anzunähern wurden zunächst bestehende Bewertungskriterien aus deutschen Nachhaltigkeitszertifikaten (DGNB und BNB) zusammengetragen. Dabei wurde der Kriterienkatalog Büro- und Verwaltungsneubau BNB_BN 2015 als Ausgangsvariante gewählt. Weitere Gebäudetypen sowie die Kriterien der DGNB wurden damit abgeglichen und die Tabelle ggf. ergänzt. Es wurde sich auf die Kriterien für den Neubau beschränkt. Insgesamt wurden dabei 143 Hauptkriterien mit in der Regel zwei bis neun Teilkriterien analysiert und zu 191 wesentlichen Prüfmerkmalen zusammengefasst. Die vollständige Auflistung der betrachtenden Kriterien kann der Anlage B entnommen werden.

Alle Kriterien wurden zunächst dahingehend geprüft, ob Dämmstoffe für dieses Kriterium überhaupt eine Rolle spielen. Anschließend wurde für die relevanten Kriterien überprüft, welche Eigenschaft des Dämmstoffs das Kriterium beeinflusst und ob eine Veränderung der Bewertung durch die betrachteten Recyclingstrategien zu erwarten ist.

Auf folgende soziale und funktionale Nachhaltigkeitsaspekte eines Gebäudelebenszyklus nimmt das Recycling der Mineralwolle möglicherweise Einfluss:

- **Thermischer Komfort:** Durch das Verwenden von Mineralwolle als Sekundärrohstoff ist es denkbar, dass sich das Faserverhalten geringfügig ändert, was den Einsatz von mehr / anderem Bindemittel notwendig macht oder den Einsatz bestimmter anderer Rohstoffe zur Einhaltung einer unbedenklichen Mineralfaserverhalten. Diese Umstände können sich negativ auf die Rohdichte des Materials im Sinne einer Erhöhung und damit seine Wärmeleitfähigkeit auswirken. Eine höhere Wärmeleitfähigkeit hätte, insofern sie nicht über eine höhere Dämmstoffdicke kompensiert werden kann, Einfluss auf verschiedene technische Kennwerte wie Oberflächen- und Lufttemperatur und davon abgeleitet auf Behaglichkeitsfelder wie Zugluftempfinden, operative Temperaturen, Strahlungstemperaturasymmetrien u.a. Der Effekt wird aber insgesamt als vernachlässigbar gering bewertet.
- **Innenraumlufthygiene:** Hierbei ist nicht die Faser selbst ggf. bedenklich, da nur Mineralwolleprodukte nur nach den in 2.2.2 beschriebenen Test vermarktet werden dürfen. Allerdings kann es wie zuvor beschrieben zu einer Änderung im Bindemittel kommen, welches dann weder Formaldehyd noch VOCs emittieren sollte.
- **Akustischer Komfort und Schallschutz:** Ein verändertes Faserverhalten kann Einfluss auf die bauakustisch und schallschutztechnisch relevanten Parameter eines Dämmstoffs nehmen – z.B. den dynamischen Elastizitätsmodul.
- **Wärme- und Tauwasserschutz:** siehe Thermischen Komfort.
- **Rückbau und Recyclingfreundlichkeit:** Die Möglichkeit Mineralwollendämmstoffe erstmalig volumenrelevant zu rezyklieren, kann sich sehr positiv auf den selektiven Rückbau von Dämmstoffen und die Entwicklung in diesem Bereich auswirken.

Kein Einfluss durch Recycling von Mineralwolle wird erwartet bei den Indikatoren: visueller Komfort, Einflussnahmemöglichkeiten durch Nutzer, Aufenthaltsqualitäten, Barrierefreiheit, Infrastruktur, gestalterische, städtebauliche und ästhetische Qualität, Reinigung und Instandhaltungsfreundlichkeit, Prozessqualität und Standortqualität.

6.1 Ökologische Betrachtung

Ziel einer Recyclingstrategie ist aus ökologischen Aspekten für gewöhnlich die Minimierung des Primärressourcenverbrauchs. Dazu kann es unterschiedliche Anreize geben. Aus ökologischer Sicht ist einer der größten Beweggründe die Ressourcenschonung, insbesondere endlicher Ressourcen, aber auch der Wunsch möglicherweise Energieverbrauch oder Emissionen zu reduzieren, dadurch, dass der Abbau der Primärressource entfällt. Auch wenn die Rohstoffe von Mineralwolle zumeist aus endlichen Ressourcen stammen, gelten diese nicht als begrenzt. Gleichwohl zeigen tagesaktuelle wirtschaftliche Entwicklungen, dass sowohl für Sand als auch für Glasscherben der Markt angespannt ist. Ziel eines Mineralwollrecyclings kann es daher auch viel mehr sein, eine geeignetere Strategie als flächenintensive und technisch aufwendige Deponierung zu finden. Die Umweltaspekte, die innerhalb dieses Projekts Berücksichtigung finden sind entnommen aus den Potentialen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040

- Treibhauspotential (GWP)
- Primärenergieverbrauch (PE)
- Ozonbildungspotential (ODP)
- Ozonschichtabbaupotential (POCP)
- Versauerungspotential (AP)
- Eutrophierungspotential (EP)

Nach DIN 15804 wird der Lebenszyklus eines Gebäudes unterteilt in Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase sowie positive und negative Potentiale, die sich am Lebenszyklusende (End of Life) außerhalb der Systemgrenzen des betrachteten Objekts einstellen.

6.1.1 Auswertung bestehender Umweltproduktdeklarationen

In einem ersten Schritt wurden zunächst bestehende Umweltproduktdeklarationen für Glas- und Steinwolle miteinander verglichen. Es sollte überprüft werden, ob sich aus den Daten Hinweise darauf ergeben, welche Prozesse maßgeblich für die unterschiedlichen Umweltwirkungen sind und ob allgemeingültige Aussagen über unterschiedliche Hersteller ableitbar sind. Gegenstand der Untersuchung waren die folgenden EPDs (vgl. Tabelle 30).

Alle Umweltwirkungen wurden auf das Volumen bezogen ausgewertet, da häufig die Dämmstoffdicke in Verbindung mit der Wärmeleitfähigkeit planungs- und kaufentscheidend ist. Die Ergebnisse wurden auf die Lebenszyklusphasen A1-A3, C und D aufgeteilt, dabei wurde festgestellt, dass der Herstellprozess immer maßgebend ist. Etwaige Gutschriften im Modul D sind meist auf die Verwertung von Transport- oder Verpackungsmaterial zurückzuführen. Da zur Erreichung bestimmter Drucksteifigkeiten beispielsweise aber auch Produkte mit höherer Rohdichte notwendig sein können, wurde die Auswertung auch noch einmal mit Masse als Bezugsgröße durchgeführt. Darüber hinaus konnte auf diese Art verifiziert werden, ob eine festgestellte Auswirkung auf der eingesetzten Rohstoffmenge basiert oder aus dem Prozess selbst kommt. Generell fällt auf, dass die Ergebnisse im volumenbezogenen Ansatz stärker variieren. Dies kann zum einen wie gerade aufgeführt daran liegen, dass die meisten Emissionen im Zusammenhang mit der Rohstoffmasse und der daraus resultierenden Produktmasse stehen. Zum anderen werden die meisten EPDs für verschiedene Mineralwollen anhand einer Standortanalyse linear korreliert auf Produkte mit unterschiedlicher Rohdichte.

Tabelle 30
Ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen

	Nr.	EPD Name
Steinwolle	1	EPD-KNI-20150329-CBB1-EN
	2	EPD-KNI-20150327-CBB1-EN
	3	EPD-KNI-20150328-CBB1-EN
	4	EPD-KNI-20160225-CBD1-EN
	5	EPD-KNI-2013811-D
	6	EPD-DRW-20180119-IBC1-DE
	7	EPD-DRW-20180118-IBC1-DE
	8	EPD-DRW-20180065-IBC1-DE
	9	EPD-SGI-20160160-CAA1-DE
Glaswolle	10	EPD-SGI-20160161-CAA1-DE
	11	EPD-URS-2012211-D
	12	EPD-URS-2012221-D
	13	EPD-URS-2012121-D

Treibhauspotential

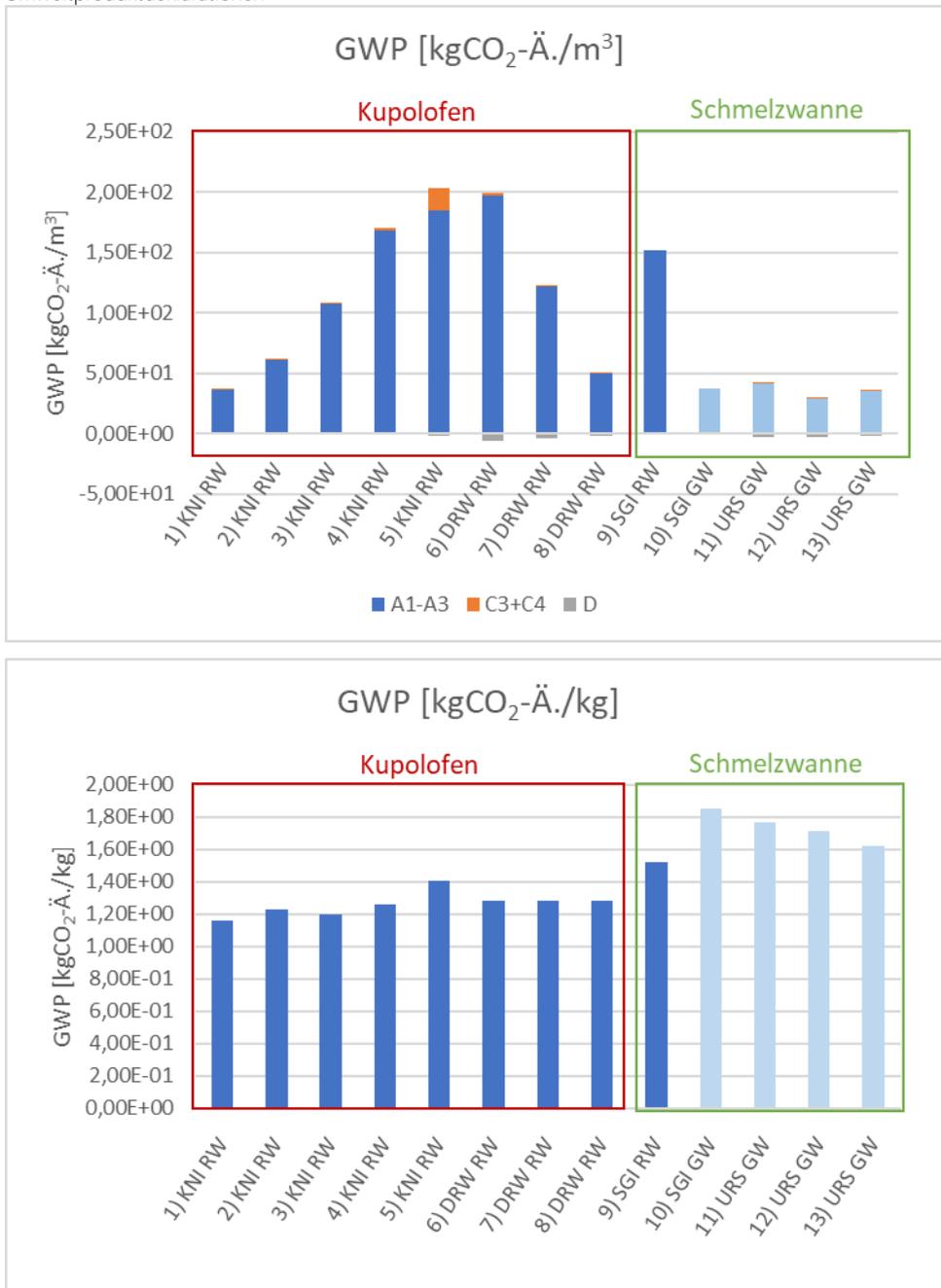
Unter den Steinwolle-Produkten weist 9) das höchste massenbezogene GWP auf. 9) ist die einzige Steinwolle, bei der Kalkstein mit 10-30 % am Gemenge direkt als Ausgangsstoff gemäß EPD aufgeführt wird. Kalkstein wirkt sich durch die enthaltenen Karbonate auf die CO₂ Emissionen aus [75]. Die Steinwolle 5) beinhaltet zu 45-55 % zementgebundene Formsteine, wohingegen 6)-8) einen höheren Anteil von 50-73 % aufweist.

Das massebezogene GWP der Glaswolle ist im Durchschnitt höher als das von Steinwolle, wohingegen es volumenbezogen deutlich geringer ist. Dies erscheint logisch unter Berücksichtigung der geringen Rohdichte von Glaswolle gegenüber Steinwolle. Das Gemenge von Glaswollprodukten enthält im Gegensatz zu dem von Steinwollprodukten Soda als Flussmittel. Die Glaswolle 10) enthält nach EPD 40 % Scherben und 5-10 % Soda. Die Glaswolle 11-13 enthalten einen höheren Anteil an Recyclingglas mit 50-70 %, Soda ist zu 5-15 % enthalten.

Die Auswertung bestätigt, dass sich hohe Anteile von Recyclingprodukten (Scherben, Steinwolle-Abfälle) und geringe Anteile von Kalkstein und Soda günstig auf das GWP auswirken. Die höheren Emissionen an CO₂-Äquivalenten können auf das Schmelzwannenverfahren zurückgeführt werden, da diese tendenziell mehr Energie verbrauchen, in der Regel Erdgas. Der durchschnittliche Energieverbrauch für die Herstellung von Glaswolle liegt nach [75] zwischen 9 und 20 GJ/t und für die Herstellung von Steinwolle zwischen 7 und 14 GJ/t. Bei der Glaswolle Herstellung verteilt sich der Energiebedarf auf etwa gleich hohe Anteile für das Schmelzen (20 - 45 %), Zerfasern (25 - 35 %) und Aushärten (25 - 35 %). Bei der Steinwolle Herstellung werden hingegen 60 - 80 % der Energie für das Schmelzen und nur 2 - 10 % für das Zerfasern verbraucht. Die Verwendung von Scherben reduziert den Energieverbrauch und kann generell bei allen Öfen eingesetzt werden. 10 % an zusätzlichen Scherben führt zu einer Reduktion des Energieverbrauchs für das Schmelzen von 2,5 – 3,0 %. [75]

Abbildung 43

Treibhauspotential (GWP) in kgCO₂-Äqu./m³ (oben) und kgCO₂-Äqu./kg (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen

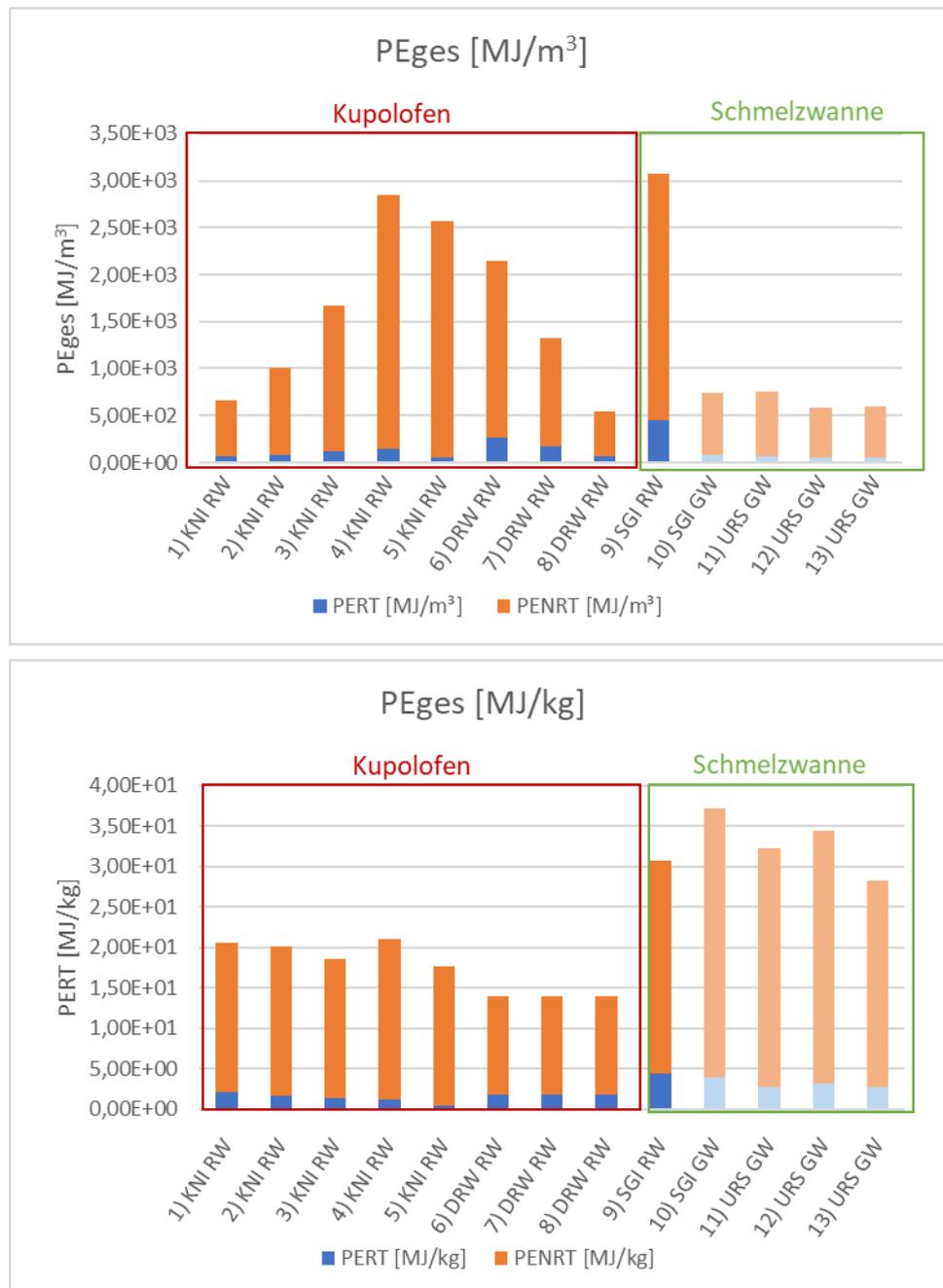


Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, Datengrundlage: Tabelle 30

Primärenergieverbrauch

Die qualitative Verteilung für den Primärenergieverbrauch ist sehr ähnlich zu der des GWP. Zudem ist der Anteil an erneuerbaren Energien relativ gering. Dies deutet als Indikator daraufhin, dass der Verbrauch von Primärenergie maßgeblich verantwortlich für die GWP Werte der Mineralwollen ist.

Abbildung 44
Gesamtprimärenergiebedarf (PE_{GES}) in MJ/m³ (oben) und MJ/kg (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen

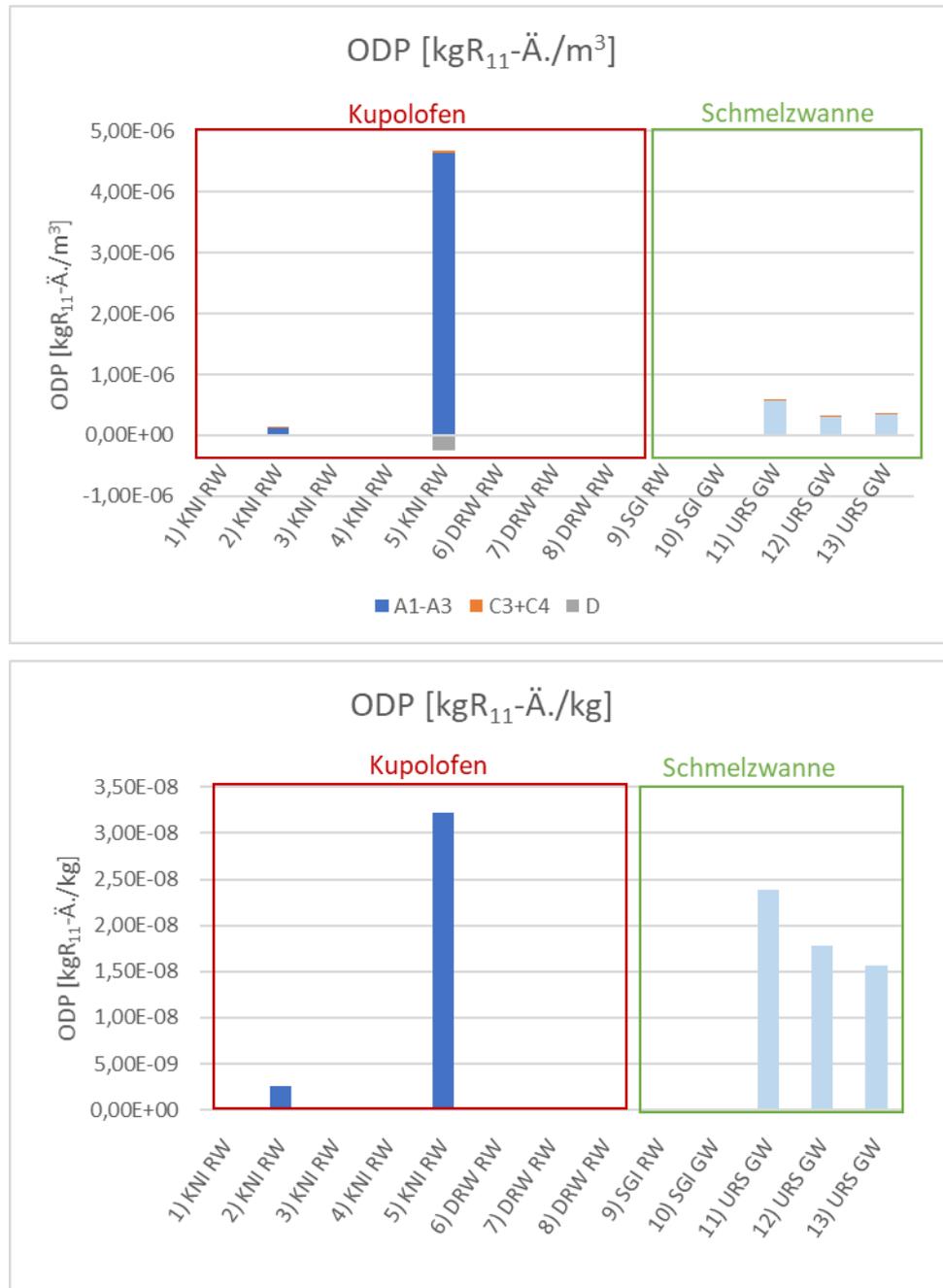


Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, Datengrundlage: Tabelle 30

Ozonschichtabbaupotential

Hauptsächlich ursächlich für dieses Potential sind die Emissionen aus Trichlorfluormethan R11 wie bspw. Fluorkohlenwasserstoffe und VOCs. Diese finden sich in der Mineralwolleherstellung vor allem nach Auswertung der EPDs für Steinwollen in der Herstellungsphase (A3) und für Glaswollen in der Rohstoffbereitstellung. Insbesondere Formaldehydhaltige Bindemittel tragen zum ODP bei. Hier fällt insbesondere die Steinwolle 5) auf. Es konnte nicht festgestellt werden, an welchem Rohstoff oder Prozess dies liegt und ob dieser Wert plausibel ist.

Abbildung 45
 Ozonschichtabbaupotential (ODP) in $\text{kgR}_{11}\text{-Äqu.}/\text{m}^3$ (oben) und $\text{kgR}_{11}\text{-Äqu.}/\text{kg}$ (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen



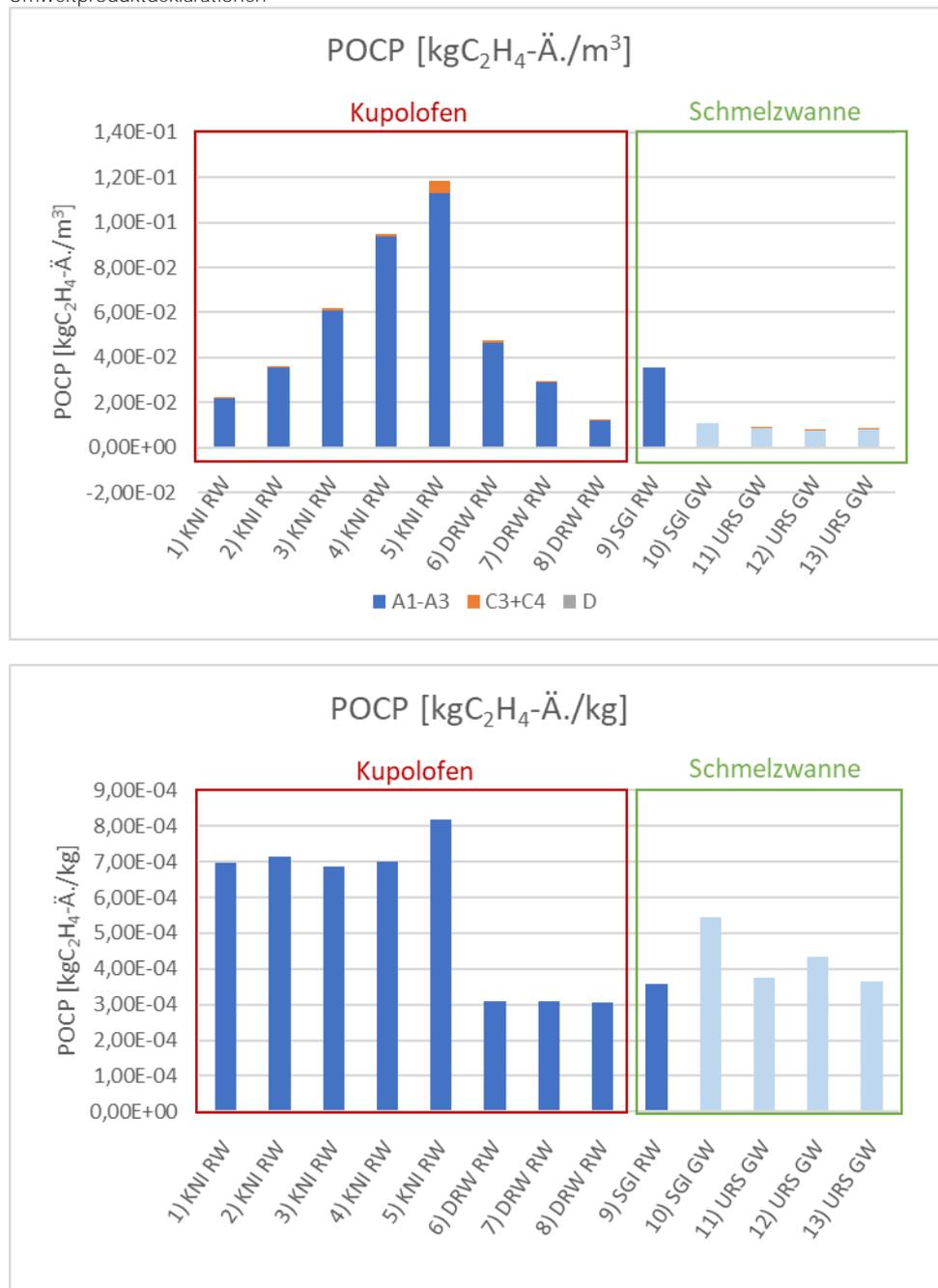
Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, Datengrundlage: Tabelle 30

Ozonbildungspotential

Zu den Verursachern des Ozonbildungspotentials zählen Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide. Mit Gas-Sauerstoff betriebene Schmelzwannen verursachen bei Ausstattung mit einem Elektrostatikfilter durchschnittlich geringere Stickstoffoxid-Emissionen als der Kupolofen. Bei der Herstellung von Glaswolle entstehen hingegen aus den nachgeschalteten Produktionsprozessen höhere Ammoniak-Emissionen, die ebenfalls zu Stickstoffoxiden führen. In dem Bindemittel enthaltener Formaldehyd besteht aus Kohlenwasserstoffen, was ebenfalls zu einer Erhöhung des POCPs führt. Harnstoff kann bei der Zerfaserung

und dem Aushärten zur Bildung von Ammoniak abgebaut werden, verringert allerdings auch die Emissionen aus freiem Formaldehyd. Durch diese ineinandergreifenden Effekte ist es schwer möglich, die genauen Gründe für die Verteilung des POCPs auszumachen.

Abbildung 46
 Ozonbildungspotential (POCP) in $\text{kgC}_2\text{H}_4\text{-Ä.}/\text{m}^3$ (oben) und $\text{kgC}_2\text{H}_4\text{-Ä.}/\text{kg}$ (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, Datengrundlage: Tabelle 30

Die Glaswollen weisen volumenbezogen ein geringeres POCP auf als die Steinwollen. Das POCP ist massenbezogen bei den Steinwollen 1) bis 4) in etwa gleich, die Steinwolle 5) weist ein etwas höheres POCP auf. In der EPD von 5) wird eine thermische Nachverbrennung angegeben, die wiederum zu höheren

Stickoxiden führt. In den EPDs von 1) bis 4) werden die Emissionen aus dem Kupolofen und anderen Prozessen als Verursacher angegeben. In der EPD 5) ebenfalls die Herstellungsphase A3 als Ursache mit einem Anteil von 70-80 % am POCP angegeben. Die Steinwollen 6)-8) weisen das geringste POCP auf. Die Abluftmengen werden thermisch nachverbrannt und es wird ein harnstoffmodifiziertes Phenol-Formaldehyd-Harz eingesetzt. In den EPD 6)-8) werden die Emissionen aus dem Werk, das Formaldehyd, andere NMVOC-Emissionen und aus dem Koksverbrennung resultierendes SO₂ als ursächlich genannt. Die POCP-Werte der Glaswollen sind im Durchschnitt geringer als die der Steinwollen. Ursa gibt in den EPDs an, dass 54 bis 61 % des POCPs auf die Herstellungsphase A3 zurückzuführen sind. Als Verursacher dafür werden der Erdgas- und Stromeinsatz, die Emissionen aus der Glasherstellung und die Verpackungsmaterialien genannt. 37 bis 45 % resultieren aus der Rohstoffbereitstellung (A1).

Versauerungspotential

Zum einen wird NO_x beim Schmelzen durch die Zersetzung der nitrithaltigen Ausgangsstoffe emittiert. Zum anderen können Emissionen durch den Brennstoff bedingt auftreten, indem aus Nitraten bestehende Brennstoffkomponenten oxidiert (Beitrag relativ gering). Die Hauptursache ist allerdings das thermisch bedingte NO_x, das bei der Oxidation von Nitraten in der Verbrennungsumgebung bei Temperaturen über 1300 °C entsteht, da Luft zu überwiegenden Anteilen aus Stickoxiden besteht. Eine Anreicherung der Verbrennungsumgebung mit Sauerstoff kann hierbei einen positiven Effekt haben.

Bei der Glaswollherstellung werden zudem Nitrate als Oxidationsmittel verwendet, um den beim Schmelzen von organischen Stoffen auftretenden Sauerstoffverbrauch zu kompensieren, insbesondere dann, wenn ein hoher Anteil von Recyclingglas im Gemenge enthalten ist.

Eine weitere Quelle von Stickstoffemissionen stellt das Bindemittel dar. Das Abgas aus den Formprozessen enthält Anteile an Feinstaub, Phenol, Formaldehyd und Ammoniak. Die chemische Zusammensetzung des Bindemittels nimmt dabei Einfluss auf die Höhe der Emissionen. Ammoniak ist eine Stickstoffverbindung und verdampft als flüchtige Bindemittelkomponente beim Bindemittelauftrag. Den größten Anteil daran nehmen die Emissionen aus dem Härteofen. Wird das Abgas aus den dem Schmelzen nachgeschalteten Prozessen thermisch verbrannt, werden dadurch zwar die organischen Komponenten des Abgases zerstört, aber die CO₂-, SO_x- und NO_x-Emissionen infolge der Oxidation nehmen zu. [75]

In Auswertung der EPD kann festgestellt werden, dass die Steinwolleprodukte durchschnittlich etwas höhere Stickstoffäquivalente emittieren, insbesondere volumenbezogen. Massenbezogen fallen insbesondere die Steinwolle 9) und die Glaswolle 10) mit hohen Emissionen auf. Alle anderen Produkte sind unabhängig der Schmelzeinheit ähnlich zwischen $1,5 \cdot 10^{-2}$ und $0,5 \cdot 10^{-2}$ kgSO₂-Äqu./kg.

Eutrophierungspotential

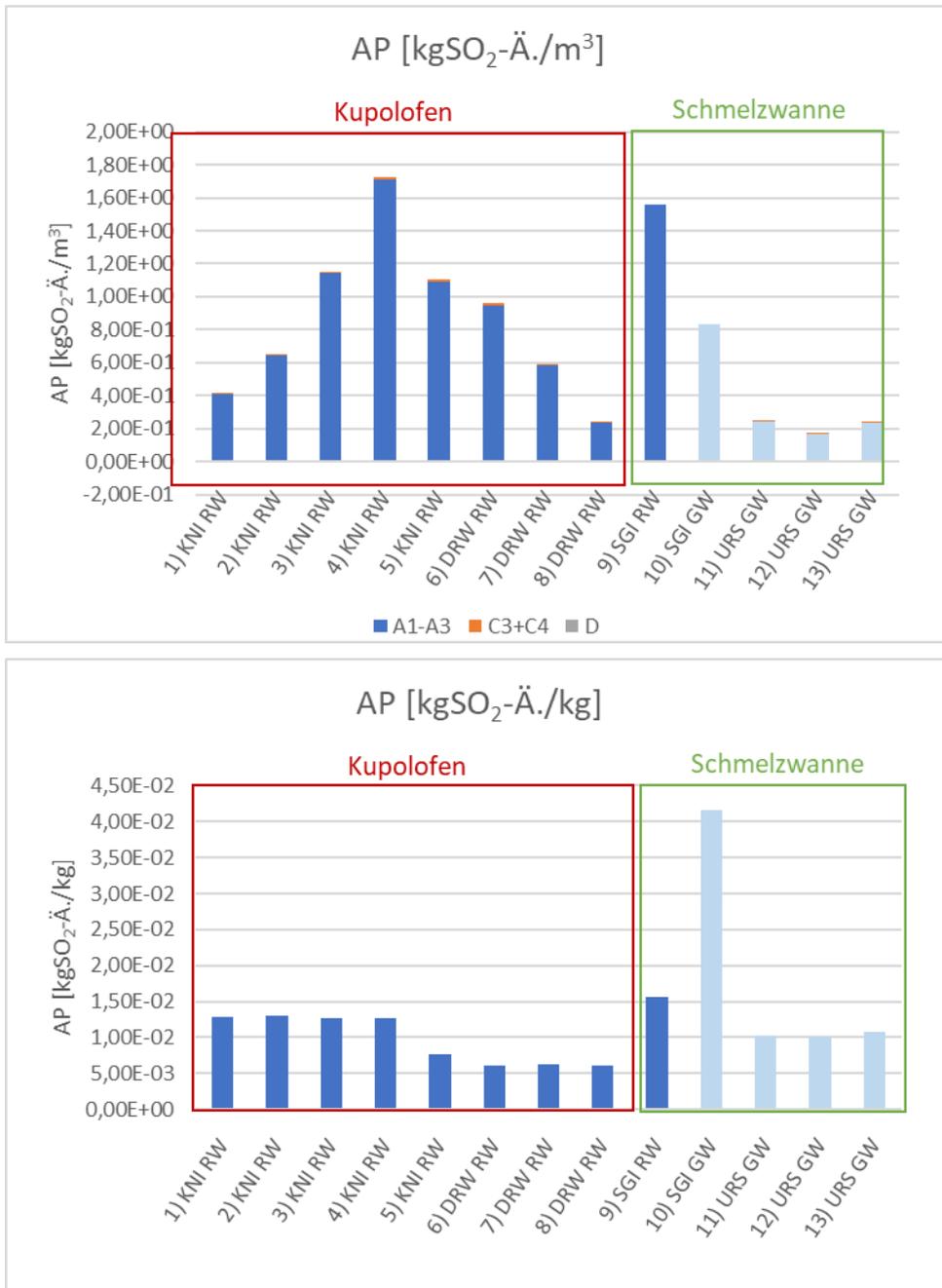
Für das Eutrophierungspotential sind wieder NO_x-Emissionen (s. Versauerungspotential) und zudem auch Phosphorverbindungen verantwortlich

Insgesamt werden in allen EPDs die Luftemissionen aus den Schmelzprozessen, dem Bindemittel und dem Härteofen (Phase A3) als dominierender Treiber des EPs aufgeführt. Neben den schon beschriebenen Prozessen wird hier vor allem Phenol-Formaldehyd-Harz Herstellung oder Ammoniak Emissionen beim Aushärten als ursächlich für EP gemacht.

Die Auswertung der EPD Daten bestätigt, dass sich die Mineralwollen qualitativ gleich abbilden lassen wie beim Versauerungspotential, wodurch angenommen werden kann, dass hier die gleichen Prozesse und somit insbesondere die NO_x Emissionen maßgeblich sind.

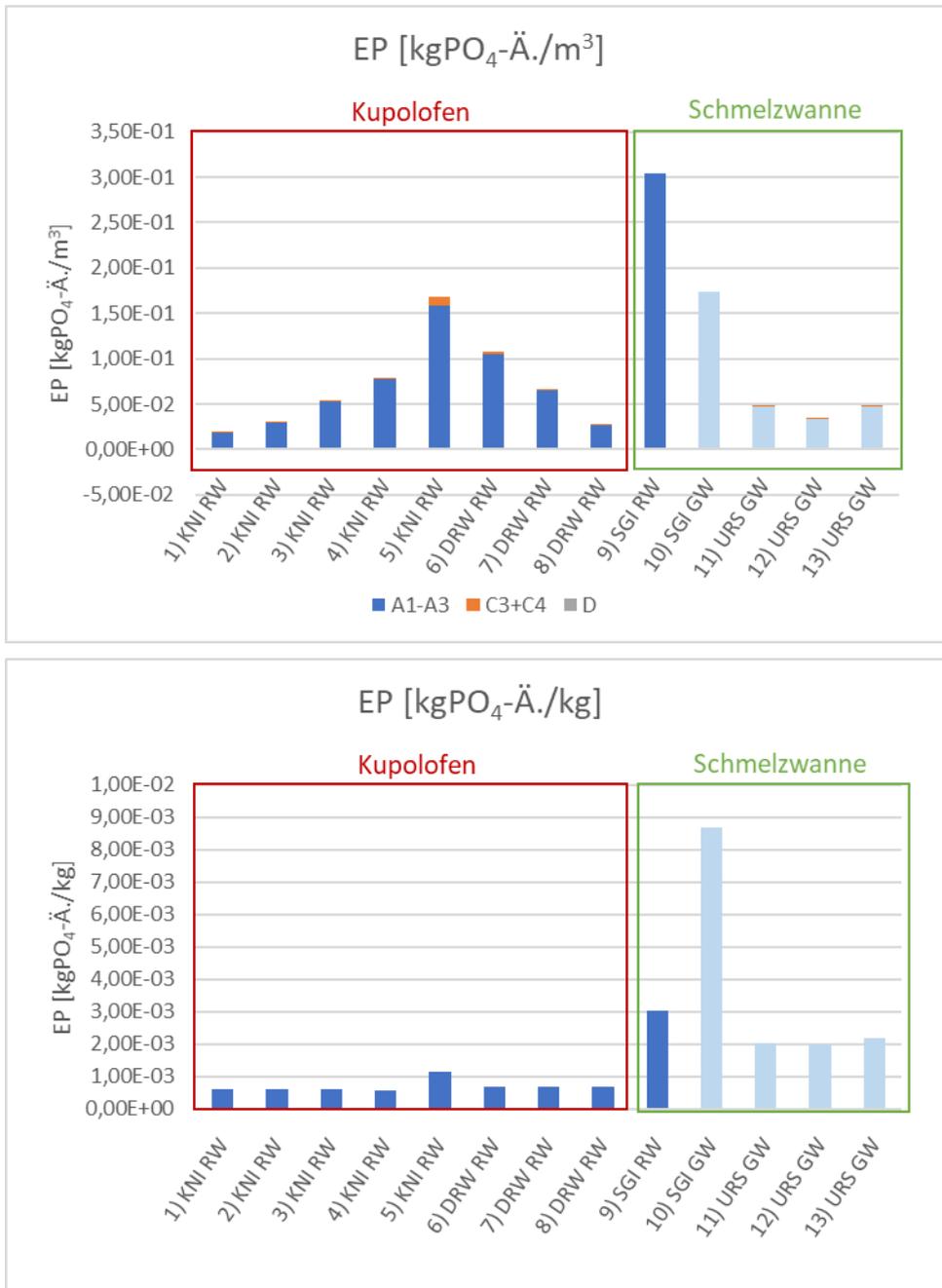
Abbildung 47

Versauerungspotential (AP) in $\text{kgSO}_2\text{-Äqu.}/\text{m}^3$ (oben) und $\text{kgSO}_2\text{-Äqu.}/\text{kg}$ (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, Datengrundlage: Tabelle 30

Abbildung 48
 Eutrophierungspotential (EP) in $\text{kgPO}_4\text{-Äqu.}/\text{m}^3$ (oben) und $\text{kgPO}_4\text{-Äqu.}/\text{kg}$ (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung, Datengrundlage: Tabelle 30

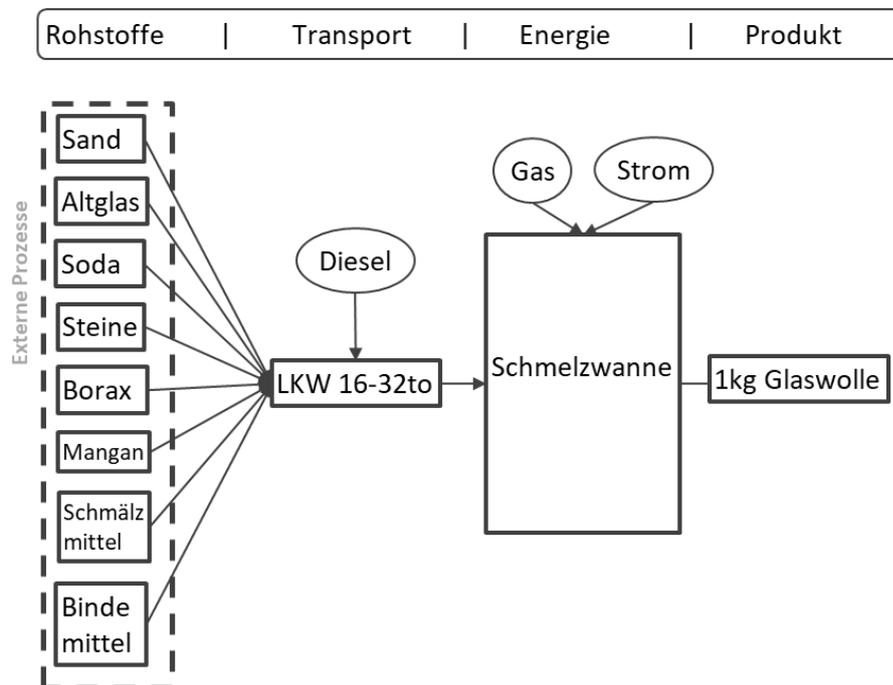
6.1.2 Ökobilanz ausgewählter Recyclingstrategien

Ökobilanzierungen auf Grundlage der DIN EN ISO 14040 stellen eine gängige Methode auch außerhalb des Bauwesens dar, um Umweltwirkungen bewertbar zu machen. Für diesen Bericht wurde die Web-App *R<Think*¹² verwendet, welches Datensätze der ecoinvent Datenbank verwendet. Ein Vergleich zu einer EPD von SG Isover ist hierüber nicht möglich.

In diesem Kapitel wird allerdings keine vollständige Ökobilanzierung durchgeführt, sondern vereinfachend der Herstellprozess, der alle sich im wesentlichen ändernden Prozesse erfasst. Es wird die Annahme getroffen, dass unabhängig des gewählten Szenarios nach dem Passieren der Schmelzwanne eine silikatische Schmelze entstanden ist, die den üblichen weiteren Herstellprozessen folgen kann, daher wird für diese Prozesse der Energieverbrauch erfasst, ist aber für alle betrachteten Szenarien identisch und ändert sich nur bis zur Schmelzwanne.

Für das Modell, welches bilanziert werden sollte, wurden die Rohstoffe Sand, Altglas, Soda, Steine, Borax, Mangan, Schmelzmittel und Bindemittel berücksichtigt. Die genaue Rohstoffdosierung lag zur Modellbildung vor, kann aber nicht veröffentlicht werden. Der Herstellprozess und die enthaltenen Rohstoffe wurden in Kapitel 2.3 beschrieben. Für den Transport der Rohstoffe zum Mineralwollewerk wird eine durchschnittliche Transportdistanz per LKW von 50km angesetzt. Der Herstellprozess wurde darüber bilanziert, dass der Gesamtverbrauch¹³ an thermischer Energie (Erdgas) und elektrischer Energie (Strom) eines Werkes von SG Isover zurückgerechnet wurde auf 1kg Glaswolle und berücksichtigt wurde. Der sich daraus ergebende Erdgasverbrauch befindet sich im unteren Grenzwert der Angabe nach [75] und wird damit als plausibel bewertet.

Abbildung 49
Sachbilanz des Szenarios IST-Zustand Mineralwolleherstellung in Schmelzwanne



Quelle: Eigene Darstellung

¹² Ein Produkt des Sustainability Teams der Kiwa GmbH, mehr Infos unter: www.kiwa.com/de/de/service2/zertifizieren/rethink-okobilanz-epd/pdf/

¹³ Gesamtverbrauch erfasst im Rahmen der Datensammlungsbogen zur Erstellung einer Umweltproduktdeklaration (EPD)

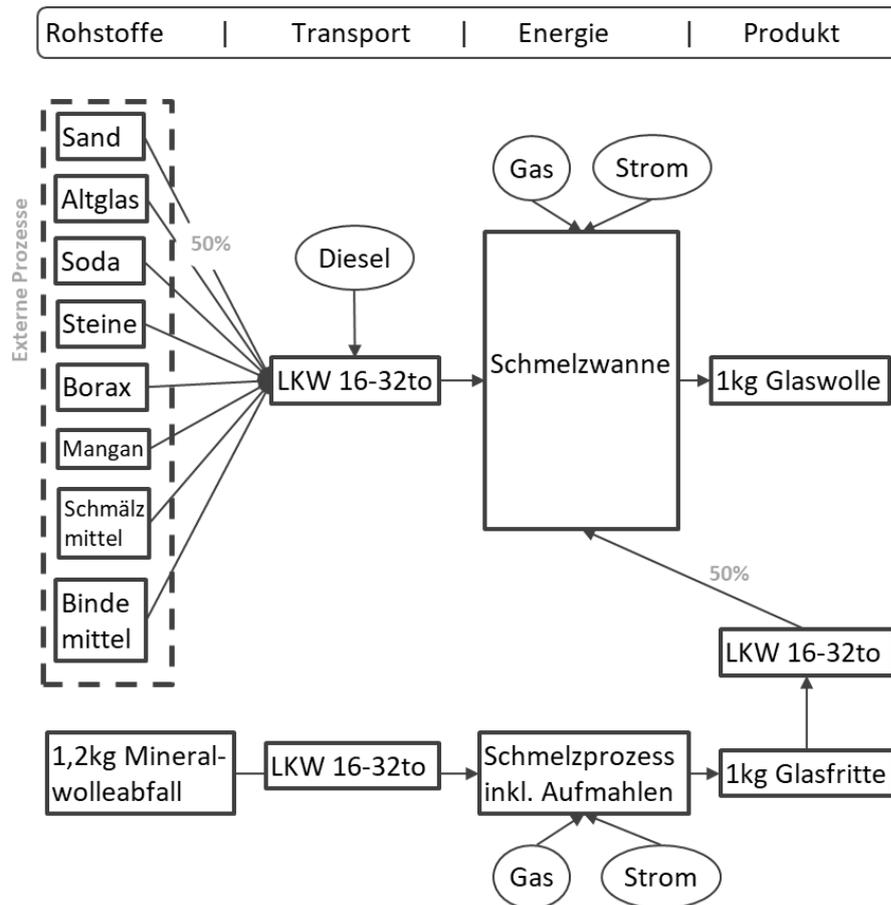
Anders als bei einem Steinwollrecycling, welches in [126] untersucht wurde, wird hier die Annahme getroffen, dass aufgrund der chemischen Ähnlichkeit insbesondere Altglasscherben durch einen Mineralwollesekundärrohstoff ersetzt werden können. Dabei wurde auf Grundlage von Kapitel 3.4 für die Altglasscherben eine Substitution von 10% bei innerer Aufbereitung und von 50% durch die Glasfritten bilanziert.

Für die interne Aufbereitung über den Schmelzyklon wurde die Annahme getroffen, dass die Schmelzeinheit generell 45% des thermischen Gesamtenergieverbrauchs eines Mineralwollewerks ausmacht [75] sowie 10% des Strombedarfs. Zusätzlich wurden noch 3,7 kWh¹⁴ für den Zerkleinerungsprozess durch eine Hammermühle vorgesehen.

Die Herstellung der Glasfritten (vgl. Abbildung 50) wird abgebildet über einen halbfertigen Prozess, in den 1,2kg Mineralwolleabfall gegeben werden um 1kg Glaswolle zu erhalten. Dies berücksichtigt, dass im Schmelzprozess auch zu einem gewissen Anteil Materialverlust stattfindet und ein Teil der Mineralwolle nicht zur Weiterverwertung geeignet ist und weiterhin deponiert werden muss. Die Transportdistanz der Glasfritte zum Mineralwollwerk beträgt 290km. Der Schmelzprozess des Frittenwerks wurde abgebildet ausgehend vom Energieverbrauch des Mineralwollewerks. Angelehnt an die Angaben zur Glasfrittenherstellung von [75] wurde angenommen, dass das Frittenwerk eine kleinere Schmelzeinheit als das Mineralwollewerk aufweist mit einer Kapazität kleiner <20 Tonnen am Tag. Nach [75] brauchen gasbetriebene Wannen dafür in der Regel mehr als 13GJ/t Fritte. Da die hier angestellten Kalkulationen zeigen, dass für die Mineralwolleherstellung eher die unteren Grenzwerte passten und die Werte >10 Jahre alte sind (Austauschzyklus einer Wanne) und somit ein gewisser technischer Fortschritt zu erwarten ist, wurde auch hier der untere Grenzwert gewählt. Für den Strombedarf wurde für die Schmelze 20 % des Gesamtenergiebedarfs je Kilogramm Mineralwolle eines Werks von SG Isover verwendet. Die Hammermühle wurde wie bei der internen Aufbereitung angesetzt.

¹⁴ Kessens Hammermühle Typ KHM22, Mahlleistung 6,5to/h bei 22kW

Abbildung 50
Sachbilanz des Recyclingszenarios Glasfritten



Quelle: Eigene Darstellung

Es wurden ausschließlich Datensätze der Datenbank ecoinvent verwendet. Dort wurden bevorzugt Datensätze aus Deutschland gewählt. Wenn diese nicht vorhanden waren, dann wurde auch auf Datensätze aus Europa oder weltweit zurückgegriffen. Alle in Tabelle 31 abgebildeten Rohstoffe und Vorprozesse konnten ausreichend abgebildet werden. Für Phonolith, Dicalciumphosphat – in Summe ca. 5 M.% der Rohstoffe sowie die Sauerstoffzuführung in die Schmelzwanne waren keine Datensätze vorhanden.

Die Ergebnisse der Bilanzierung für die Herstellungsphase (A1-A3) wurden mit den Ergebnissen der original EPD Bilanzierung auf Plausibilität geprüft. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass den Autoren nicht bekannt ist auf Basis welcher Datenbank die Originaldaten generiert wurden. Die Abweichungen sind graphisch in Abbildung 51 dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass beim selbst bilanzierten Primärenergieverbrauch der nicht erneuerbare Anteil ca. 30% höher ist als beim Original, wohingegen der erneuerbare Anteil ca. 30% geringer ausfällt. Hier scheint der Energiemix des im Original verwendeten Datensatzes etwas konservativer auszufallen. In Summe ist der Gesamtenergieverbrauch für die gegenständliche Bilanzierung 17% überbewertet worden, was sich entsprechend auch auf das GWP auswirkt. Für das ODP konnten keine plausiblen Werte ermittelt werden. Die bilanzierten Daten waren fünfhundertmal zu hoch und wurden deswegen aus der Bewertung herausgenommen. Ebenfalls auffällig ist das maritime Eutrophierungspotential (EP-m), welches um den Faktor 6 die Originaldaten überschreitet. Ein Fehler in der Datengrundlage kann nicht ausgeschlossen werden.

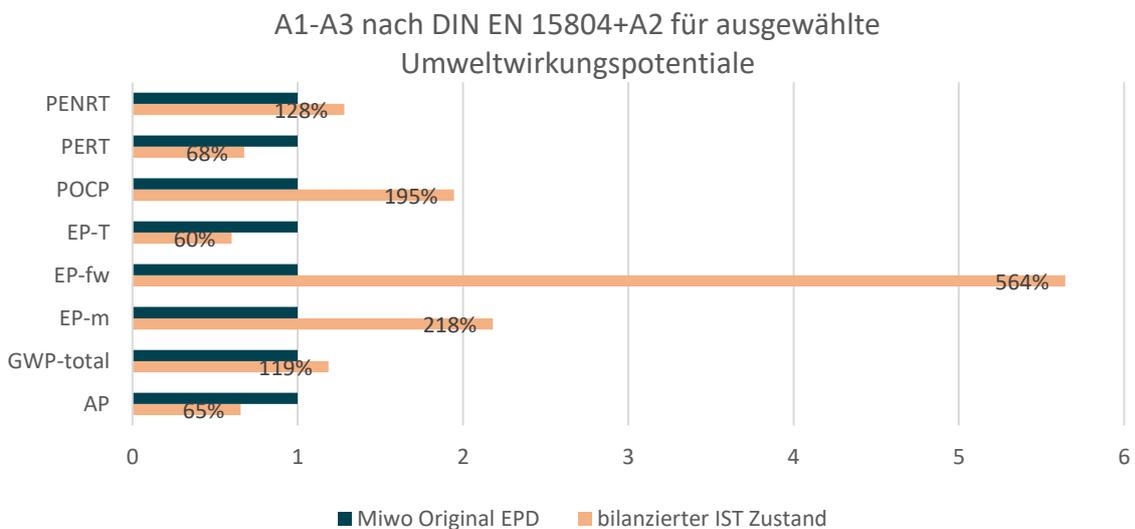
Alle anderen Werte schwanken zwischen 60% bis 220% um die originalen Werte und werden unter Berücksichtigung der vereinfachten Kalkulationssätze für eine fiktive Recyclingwolle und unter den beschriebenen Schwankungen ins 6.1.1 für eine Ausgangsvariante akzeptiert. Insbesondere da der Fokus auf die qualitativen Veränderungen durch Recycling zur Ausgangsvariante liegen soll.

Tabelle 31
Rohstoffeinsatz für Mineralwolle und verwendete ecoinvent-Datensätze

Material	Ecoinvent Datensatz (Location)
Dolomit	Dolomite production (EU)
Bindemittel (trocken)	Urea formaldehyde resin production (EU)
Oil	Crude oil produced in Germany [PCR Asphalt NL]
Glucose	Glucose production (EU)
Ammoniumsulfat	ammonium sulfate production (EU)
Silikon	Silicone product production (EU)
Altglas	Glass cullet, sorted {RER} treatment of waste glass from unsorted public collection, sorting
Mineralwollabfall	Waste mineral wool, for final disposal {Europe without Switzerland} treatment of waste mineral wool, inert material landfill, including processes sorting plant BE-PCR
Manganerz	Manganese production (EU)
Sand	Silica sand production (DE)
Sodaasche	Soda ash, dense modified Solvay process, (GLO)
Borat	Borax, anhydrous, powder production (EU)
Mangandioxid	Manganese dioxide production (GLO)
Elektrische Energie	Electricity (DE) - medium voltage (1kV - 24kV)
Thermische Energie	Heat production, natural gas, at industrial furnace (EU)
Transport	Lorry (Truck) 16-32t, EURO4 market for (EU)

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

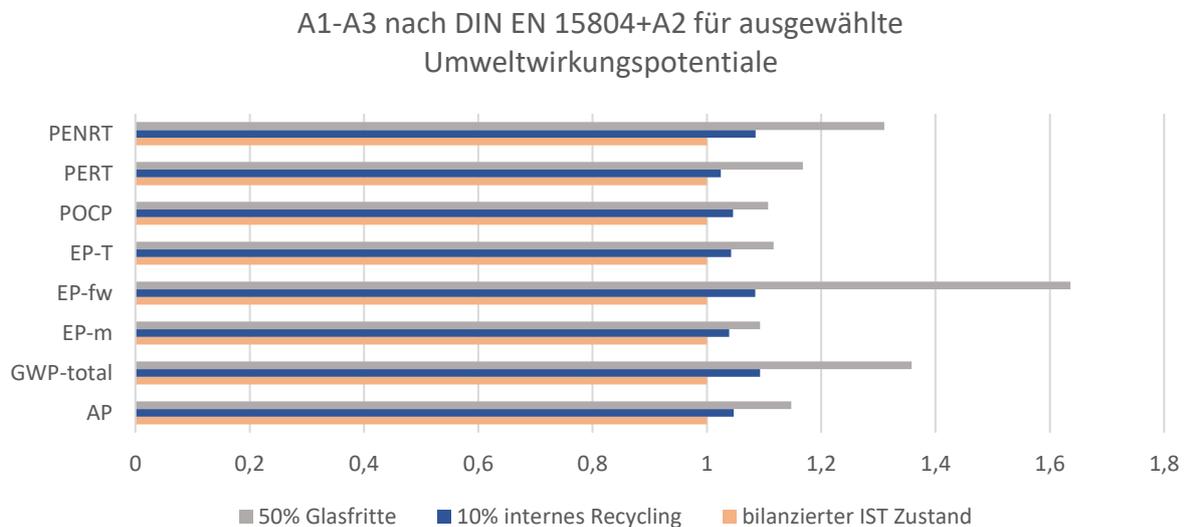
Abbildung 51
Relativer Vergleich zwischen den Ökobilanzergebnissen einer Original EPD für Glaswolle zu der aufgestellten Ökobilanz für eine Glaswolleherstellung für PENRT (MJ/kg), PERT (MJ/kg), POCP (kg NMVOC eqv./kg), EP-T (mol N eqv./kg), EP-fw (kgP egv./kg), EP-m (kgN eqv./kg), GWP-total (kgCO₂ eqv./kg), AP (mol H+ eqv./kg)



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

Abbildung 52

Ökobilanzieller Vergleich für PENRT (MJ/kg), PERT (MJ/kg), POCP (kg NMVOC eqv./kg), EP-T (mol N eqv./kg), EP-fw (kgP eqv./kg), EP-m (kgN eqv./kg), GWP-total (kgCO₂ eqv./kg), AP (mol H+ eqv./kg) nach DIN EN 15804 +A2 für Mineralwollherstellung ohne Recycling, mit 10% internem Recycling und 50% Recyclingquote durch Glasfritten



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

Im direkten Vergleich zwischen den beiden Recyclingoptionen zu der Ausgangsvariante (vgl. Abbildung 52) ist deutlich, dass die Variante mit Glasfritten ökologisch am ungünstigsten ist. Auch wenn der Wert für EP-fw aus den oben genannten Gründen ggf. nicht repräsentativ ist, wird auch an allen übrigen Potentialen eine Verschlechterung von 9 % (EP-m) bis 36% (GWP) festgestellt. Insbesondere der zweite Schmelzvorgang verursacht wie zu erwarten hohe Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen. Gleichzeitig wird durch die Glasfritten ein Rohstoff ersetzt, der bereits ein Sekundärmaterial darstellt, so dass dies sich nur geringfügig positiv auswirkt. Die Variante der internen Aufbereitung weist eine deutlich geringe Verschlechterung von 4-9% auf, aber ist immer noch als ökologisch ungünstig im Vergleich zur Ausgangsvariante zu bewerten.

6.2 Ökonomische Betrachtung

Um bezüglich eines Prozesses beurteilen zu können, ob dieser nachhaltig ist oder nicht, sind auch ökonomische Auswirkungen mit zu bewerten. Idealerweise bietet Recycling eine Strategie, die sowohl ökologisch vorteilhaft als auch kostengünstiger ist. Darüber hinaus sind konventionelle Dämmstoffhersteller auf einem Markt aktiv, der vor allem über Preiskampf geführt wird. Für die Akzeptanz einer Alternative durch den Herstellenden ist daher die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme ein Hauptaspekt. Als wirtschaftlich in diesem Kontext soll die Maßnahme dann gelten, wenn Sie kostengleich oder – günstiger als der jetzige Prozess der Herstellung und Entsorgung ist.

Es wurde ein Referenzszenario und zwei technisch unterschiedliche Recyclingkonzepte entwickelt, die bereits in 6.1.2 betrachtet worden sind. Für jedes Recyclingszenario wurden zwei logistische Szenarien geprüft. Generell wurde angenommen, dass die zu entsorgende Mineralwollmenge nicht limitierend ist, das heißt, dass bei Kleinstmengen eine Zwischensammlung durch das Abbruchunternehmen durchgeführt wurde. Weiter wurde angenommen, dass alle Prozesse von Transport bis Entsorgung durch den Mineralwollhersteller zu tragen sind. Eine Kalkulation von Fremdleistung innerhalb dieses Prozesses wäre rein spekulativ. Private Rückbau- und Entsorgungsmaßnahmen wurden daher nicht mit in den Vergleich aufgenommen. Sie wurden jedoch ebenfalls kalkuliert, um darzulegen, wie eine durchschnittliche Gebühr in etwa aussehen könnte (siehe Kapitel 3.1), die der Mineralwollhersteller für das Recycling der Mineralwolle anstatt der dadurch entfallenden

Deponiegebühr nehmen kann. Kosten der Anlagentechnik, Werke und deren Unterhalt wurden nicht betrachtet.

- Fall 1: Deponierung durch Gewerbetreibende, keine Verwertung
- Fall 2: Interne Aufbereitung im Mineralwollwerk über Zyklon, Fahrt von Baustelle zu Mineralwollehersteller (ggf. Zwischensammlung in Firmenlager bei Kleinstmengen)
- Fall 3: wie Fall 2, jedoch mit einem Zwischenlager zwischen Baustelle und Mineralwollwerk. Die Mineralwolle wird im Zwischenlager komprimiert.
- Fall 4: Externe Aufbereitung in einem Frittenwerk, Fahrt von Baustelle zum Frittenwerk, dort Herstellung von Glaswollefritten, Transport des Sekundärrohstoffs zum Mineralwollwerk
- Fall 5: wie Fall 4, jedoch mit Zwischenlager zwischen Baustelle und Frittenwerk. Die Mineralwolle wird im Zwischenlager komprimiert.

Das Referenzszenario entspricht dem aktuellen Entsorgungsweg von Mineralwolle. Es werden die Entfernungen aus Kapitel 4.4 zu Grunde gelegt. Alle Kosten und Annahmen sind übersichtlich in Tabelle 32 zusammengefasst. Die durchschnittliche Entfernung zu einer Sammelstell beträgt 10km, die zur Deponie 35km. Für eine ideale Lage einer externen Aufbereitungsanlage innerhalb Deutschlands wurde ein Standort bestimmt, der durchschnittlich mit 280 km Distanz zu erreichen ist. Von dort zum Mineralwollwerk sind dann nochmals 290km Entfernung zu bewältigen. Für die durchschnittliche Entfernung zwischen Mineralwollwerk zum Endverbraucher wird nach gewichteten Durchschnittswerten, wie sie in Mineralwolle EPDs verwendet werden 355km angesetzt [55], [86].

Abgeleitet aus den logistischen Untersuchungen in Kapitel 4.4 wurde für den Transport die Annahme getroffen, dass die Baustelle ein LKW (18t) mit einer Containergröße von 7m³ verlässt. Sofern eine Sammelstelle mit Komprimierungsmöglichkeit geplant wurde, wurde dann angenommen, dass die Sammelstelle ein 28t LKW verlässt, der ein Ladevermögen von 40m³ aufweist. Für die Komprimierung wurde als Mittelwert aus Kapitel 4.3 zunächst eine Leistung von 5:1 angenommen.

Das Be- und Entladen auf der Baustelle, oder später an den Werken ist abhängig von dem Transportmedium. Muss ein LKW händisch entladen werden, kann dies in Abhängigkeit der Beladung bis zu 2h in Anspruch nehmen [86], hier wurde durchschnittlich 1h angesetzt.

Für die Unterscheidung der Mineralwolle in Glas- und Steinwolle wird das in Kapitel 5 beschriebene NIR Handheld empfohlen. Die Kosten für das Gerät können aktuell nur sehr grob abgeschätzt werden. Sowohl nach Aussage des Herstellers des hier verwendeten NIR Handhelds als auch des in [126] verwendeten Handhelds liegen die Kosten jedoch ca. um 20.000 €. **Unter der Annahme, dass das Handheld 5 Jahre genutzt, vollständig abgeschrieben und durchschnittlich 1 to. Mineralwolle je Werktag analysiert wird, ergibt sich bei 365 Arbeitstagen im Jahr (Mineralwollefertigung im Dauerbetrieb) ein Analyse-Preis von 11 €/t.**

Die Energiepreise konnten aus Daten des statistischen Bundesamtes entnommen werden, für den Altglaspreis wurden verschiedene Glasaufbereiter in Deutschland angefragt. Die benannte Preisspanne lag zwischen 30-120 €/to. **Als Durchschnittswert wurden 75 €/to angesetzt.**

Tabelle 32

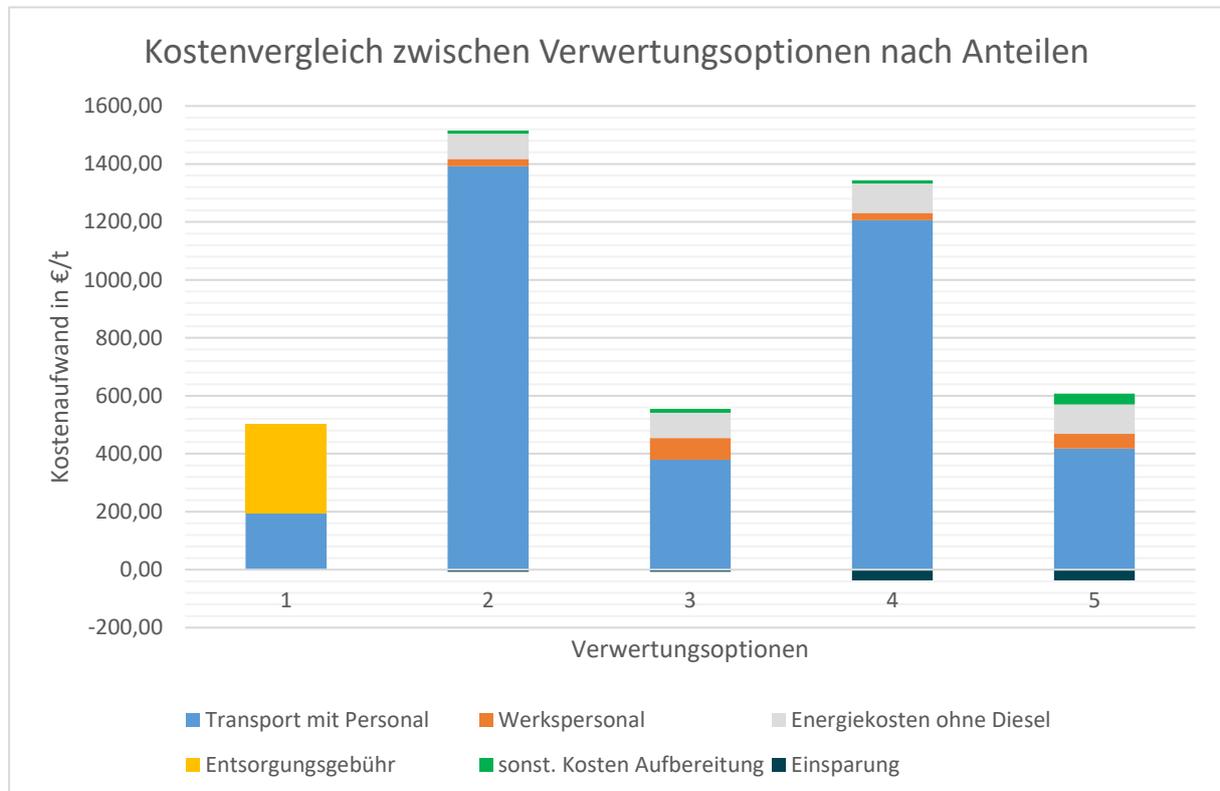
Eingabewerte zur Kalkulation der Kosten für ausgewählte Mineralwollrecyclingstrategien

Kostenfaktor	Min.	Basis	Max.	Einheit	Quelle f. Basis
Gebühr der Deponie		307,73		€/t	Kap. 3.1
Distanz zur Sammelstelle		10		km	Kap. 3.1
Distanz zur Deponie		35		km	Kap. 3.1
Distanz zum Frittenwerk	50	280	800	km	Kap. 4.4
Distanz Frittenwerk zum Miwowerk	290	290	290	km	Kap. 4.4
Distanz zum Miwowerk	50	355	800	km	[55], [86]
Energiekosten (Benzin/ Diesel)		2		€/l	Trendschätzung nach [113]
18t LKW Zuladung ohne Komprimierung	0,175	0,175	0,175	t	Kap. 4.4
18t LKW Zuladung mit Komprimierung	0,35	0,875	1,3125	t	Kap. 4.4
28t LKW Zuladung ohne Komprimierung	1	1	1	t	Kap. 4.4
28t LKW Zuladung mit Komprimierung	2	5	7,5	t	Kap. 4.4
Be- und Entladen händisch		1		h	[86]
Be- und Entladen automatisiert		0,25		h	[86]
Transportkosten		1,87		€/km	Tabelle 16
Kalkulationssatz Personal LKW (keine Fremdfirma)	10	14,79	80	€/h	[109], [111]
Kalkulationssatz Werkspersonal	10	25	80	€/h	[86]
Begleitschein	-	2,7	-	€/Fahrt	[136]
Unterscheidung Mineralwolle	-	11	-	€/t	Annahme
Preis Strom NWG	-	0,2	-	€/kWh	[112]
Preis Gas NWG	-	0,065	-	€/kWh	Durchschnittswert nach [110]
Kosten für Altglas	30	75	120	€/t	Eigene Recherche

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 53

Kostenvergleich für Unterschiedliche Verwertungsoptionen von selektiv zurückgebauter Mineralwolle aufgeteilt nach Kostenanteilen. Fall 1: Verwertung zur Entsorgung (Deponie), Fall 2: Verwertung innerhalb des Mineralwollewerks, Fall 3: wie 2 mit Sammelstelle und Komprimierung, Fall 4: Externe Verwertung im Frittenwerk, Fall 5: wie 4 mit Sammelstelle und Komprimierung



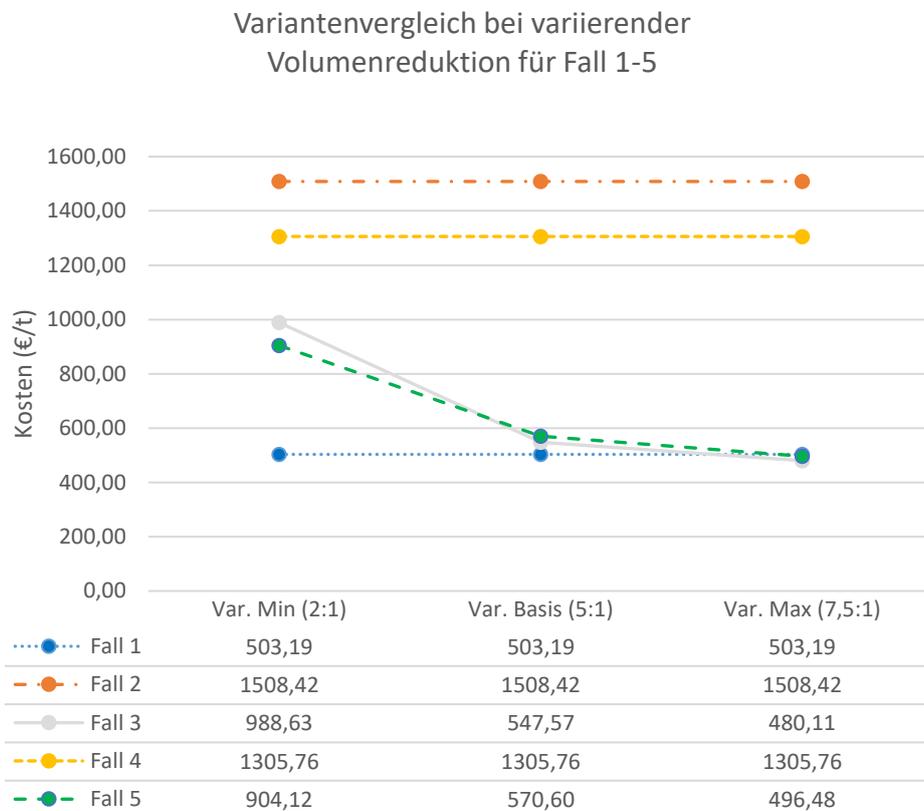
Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

Wie in Abbildung 53 hervorgeht, ist insbesondere der Transport der maßgebende Preistreiber in allen betrachteten Recyclingvarianten (2-5). Den Preis für die Transportkosten beeinflussen unterschiedliche Anteile, die daher nachfolgend variiert werden sollen. Zum einen kann dadurch gezeigt werden wo die größten Preistreiber liegen, zum anderen wird das dargestellte Ergebnis auf Robustheit geprüft oder aber die Stellen aufgezeigt, an denen sich die Vorteilhaftigkeit entsprechend ändert. In Abbildung 53 ist auch deutlich erkennbar, dass insbesondere die Varianten ohne Sammelstelle, von wo aus die Mineralwolle komprimiert weiter transportiert wird, sehr hohe Kosten verursachen. Daher wurde zunächst der Einfluss der Komprimierungsleistung geprüft. Dabei wurde als unterer Grenzwert eine Komprimierung von 2:1 festgelegt. Als oberer Grenzwert wurde wie in Kapitel 4.3 beschrieben 7,5:1 angesetzt und 5:1 als Mittelwert (Basis) gewählt. Als mittlere Rohdichte für Glaswolle wurden 25kg/m³ angesetzt. Die ermittelten Transportmassen wurden dahingehend geprüft, ob das Transportvolumen oder die maximale Gewichtszuladung maßgeblich wird. In allen Fällen blieb das Transportvolumen maßgeblich.

Bezüglich der Kosten kann festgestellt werden, dass eine Komprimierung (>2:1) immer als ökonomisch vorteilhaft bewertet werden kann. Bei einer sehr hohen Komprimierungsleistung ab 7,5 ändert sich die Vorteilhaftigkeit der Recyclingvarianten gegenüber der Variante der Deponierung. Hier sei jedoch auf die vereinfachte Kalkulation bei den Recyclingoptionen hingewiesen, wohingegen die Deponierung schon so gut wie alle Kostenfaktoren enthält. Das qualitative Verhältnis zwischen den Recyclingvarianten ändert sich nicht.

Abbildung 54

Ökonomischer Variantenvergleich für eine Komprimierung der Mineralwolle ab Sammelstelle von min. 2:1, Basis 5:1 und max. 7,5:1
 Fall 1: Verwertung zur Entsorgung (Deponie), Fall 2: Verwertung innerhalb des Mineralwollewerks, Fall 3: wie 2 mit Sammelstelle und Komprimierung, Fall 4: Externe Verwertung im Frittenwerk, Fall 5: wie 4 mit Sammelstelle und Komprimierung



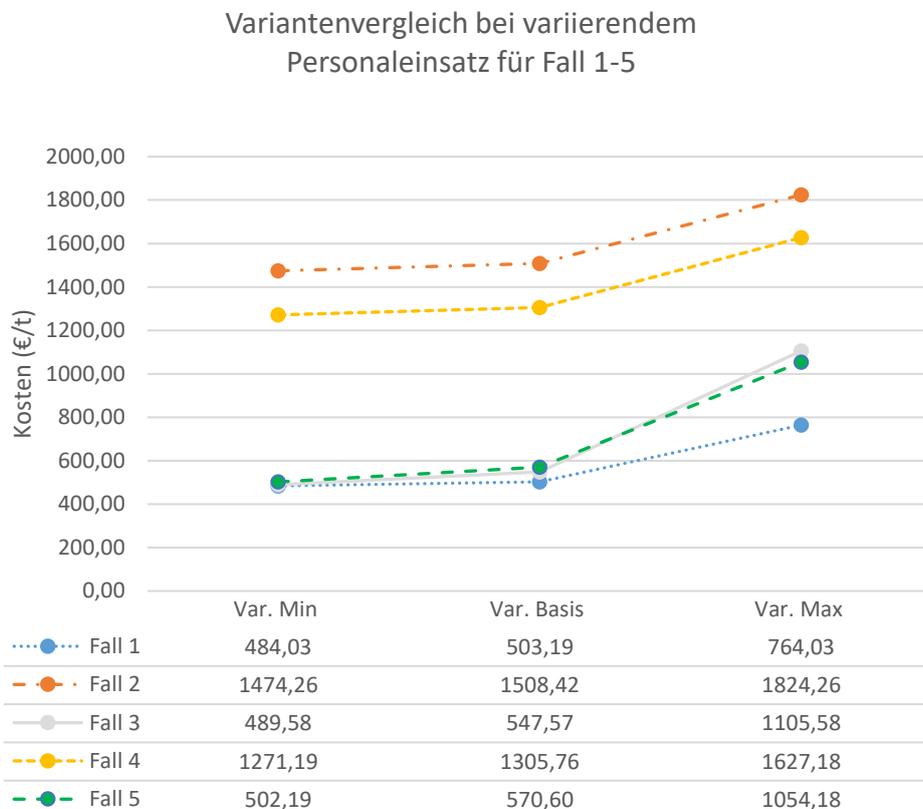
Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

Des Weiteren wurde geprüft inwiefern sich die Lohnkosten der im Prozess Ausführenden auf die Gesamtkosten der **Varianten auswirken**. Dabei wurde von einem minimalen Satz von 10€/h ausgegangen. Die Autoren weisen darauf hin, dass diese Bruttostundenlohn unterhalb des in Deutschland geltenden Mindestlohn liegt. Er dient hier informativ als untere Grenze, um eine Range zu öffnen. Zudem wurde nicht der Stundeneinsatz an sich variiert, wobei der Stundenlohn immer im Produkt mit Arbeitszeit in die Kalkulation einfluss. Der geringe Wert kann daher auch eine zeitsparendere Arbeitsweise abbilden und soll keinen Lohnvorschlag darstellen. **Als maximaler Betrachtungsweg wurden 80€/h Bruttostundenlohn angesetzt**. Auch dieser Wert stellt keinen realistischen Stundenlohn für eigenes Personal dar, es gelten aber die gerade beschriebenen Gedanken.

Qualitativ ändert sich das Ergebnis durch die Lohnvarianten kaum. Die Betrachtung kann diesbezüglich also als robust bezeichnet werden. Gleichwohl hat der Personaleinsatz einen großen Einfluss auf die Höhe der zu erwartenden Kosten, was insbesondere bei Beauftragung von Fremdfirmen für einzelne Zwischenschritte relevant ist.

Abbildung 55

Ökonomischer Variantenvergleich für einen Personaleinsatz von min. 10 €/h, Basis 14,7925 €/h bzw. 25 €/h und max. 80 €/h
 Fall 1: Verwertung zur Entsorgung (Deponie), Fall 2: Verwertung innerhalb des Mineralwollewerks, Fall 3: wie 2 mit Sammelstelle und Komprimierung, Fall 4: Externe Verwertung im Frittenwerk, Fall 5: wie 4 mit Sammelstelle und Komprimierung



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

Bezüglich der Transportwege sollte abgeschätzt werden, wie sich der Variantenvergleich verändert, wenn die Baustelle sehr nahe an den verschiedenen beschriebenen Standorten befindet oder umgekehrt sehr weit entfernt. Es wurde als minimale Variante eine Distanz zwischen Baustelle zum Mineralwollewerk oder Frittenwerk von 50km festgelegt. Als maximale Variante wurde eine entsprechende Distanz von 800 km (bspw. Wegstrecke Flensburg – Ladenburg) gewählt. Die anderen Distanzen bleiben unverändert. Im Ergebnis zeigt sich, dass bei geringen Distanzen rechnerisch die Deponierung aufgrund der Deponiegebühren die teuerste Variante wäre, wohingegen es bei weiten Distanzen, die kostengünstigste ist. Die Variante 2 und 4 verhalten sich qualitativ wie die Varianten 3 und 5 zueinander. Variante 2 und 4 haben bei geringen Transportdistanzen keinen großen Nachteil gegenüber den Varianten mit Sammelstelle. Mit steigender Entfernung verschärft sich hier jedoch der Umstand der unwirtschaftlichen Ladung aufgrund fehlender Komprimierung. Auffällig ist, dass Variante 4 und 5 vor allem bei der mittleren Distanz vorteilhaft gegenüber den Varianten 2 bzw. 3 ausfallen, während sie sowohl bei den kurzen als auch sehr langen Entfernungen nachteilig diesen gegenüber zu bewerten sind. Dies liegt insbesondere an der künstlichen Gleichschaltung der Distanzen für die Minimal- und Maximalvariante, betont aber noch einmal den großen Einfluss einer wirtschaftlichen Transportlogistik.

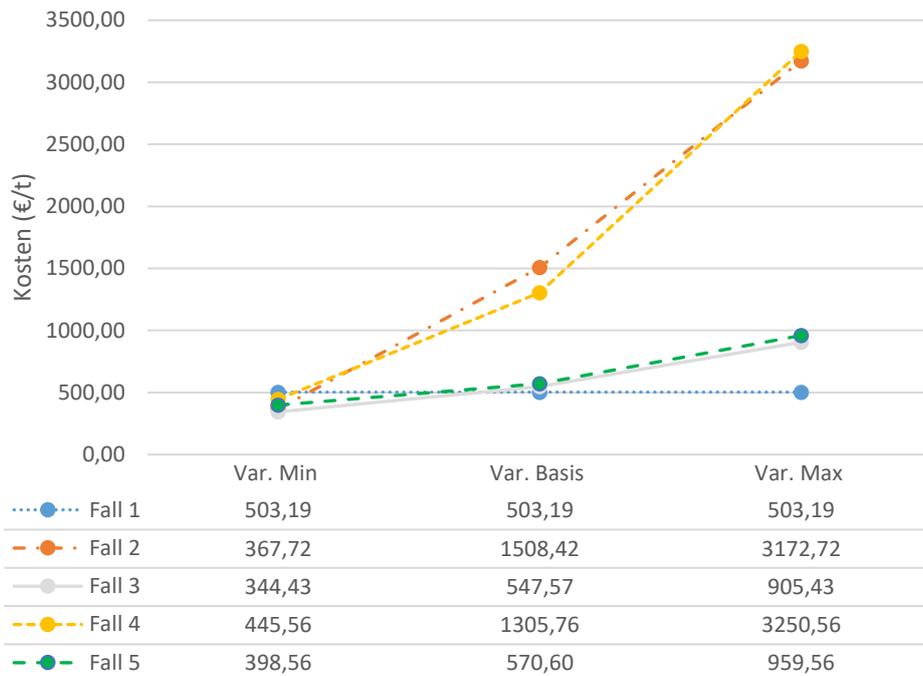
An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass die Anforderungen an die Deponien steigen, das bedeutet, dass nicht mehr jede Deponieklasse alle Baustoffe annimmt. Dies kann dazu führen, dass künftig zur Entsorgung von Mineralwolle über die Deponie (Fall 1) weitere Wege zurückgelegt werden müssen.

Abbildung 56

Ökonomischer Variantenvergleich für variierende Transportleistungen zwischen Baustelle und Mineralwollewerk bzw. Frittenwerk von min. 50 km, Basis 355 km bzw. 290 km und max. 800 km

Fall 1: Verwertung zur Entsorgung (Deponie), Fall 2: Verwertung innerhalb des Mineralwollewerks, Fall 3: wie 2 mit Sammelstelle und Komprimierung, Fall 4: Externe Verwertung im Frittenwerk, Fall 5: wie 4 mit Sammelstelle und Komprimierung

Variantenvergleich bei variierender Entfernung für Fall 1-5



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

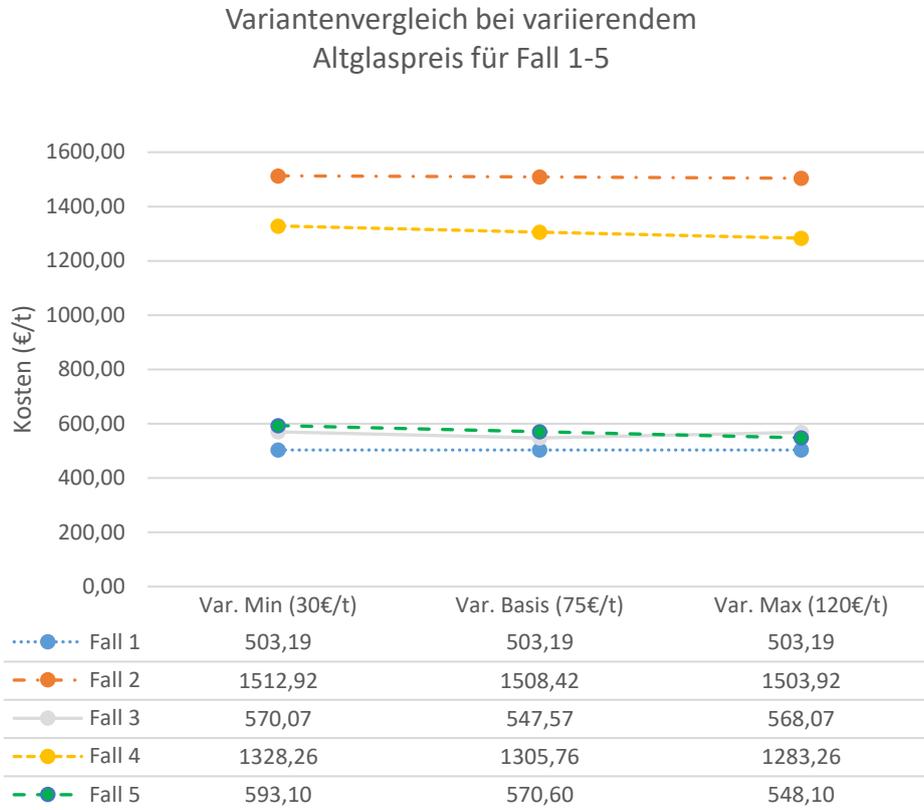
Wie bereits beschrieben schwanken die ermittelten Angaben zu Altglaspreisen um 400%. Aus diesem Grund wurde auch geprüft, wie sich ein minimaler und maximaler Preis auf die ökonomische Gesamtbewertung auswirken. Insbesondere unter den aktuellen Entwicklungen auf dem Glasmarkt, sind Materialengpässe und damit Preisschwankungen nicht ausgeschlossen.

Es wird festgestellt, dass insbesondere Fall 5, mit geringen Transportleistungen und einer hohen Recyclingquote (50% Altglas gegen Glasfitten) nach dem hier veranschlagten Kostenmodell bei hohen Altglaspreisen nahezu kostengleich wie die Deponieentsorgung zu bewerten ist (vgl. Abbildung 57). Insgesamt bleiben die Ergebnisse allerdings qualitativ gleich und das Modell kann diesbezüglich als robust bewertet werden.

Abbildung 57

Ökonomischer Variantenvergleich für einen Altglaspreis von min. 30 €/t, Basis 75 €/t und max. 120 €/t

Fall 1: Verwertung zur Entsorgung (Deponie), Fall 2: Verwertung innerhalb des Mineralwollewerks, Fall 3: wie 2 mit Sammelstelle und Komprimierung, Fall 4: Externe Verwertung im Frittenwerk, Fall 5: wie 4 mit Sammelstelle und Komprimierung



Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung

7. Fazit

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass Closed Loop Recycling für Mineralwolle, die im Schmelzwannenverfahren gefertigt wurde, umsetzbar ist. Mit Hilfe der spektroskopischen Untersuchungen konnten Methoden gefunden werden, die helfen Probleme im Umgang mit unbekanntem und teilweise verunreinigten Mineralwollproben aus dem Rückbau zu lösen.

Insgesamt wurden für 161 Mineralwollen Daten von insgesamt vier Methoden generiert. Dabei handelt es sich um die RFA und die NIR-Spektroskopie. Für beide Methoden kamen jeweils Laborgeräte mit hoher analytischer Präzision und mobile Geräte mit verminderter Präzision, aber im Fall der RFA schnellerer Messung und deutlich geringerem Aufwand bei der Probenvorbereitung zum Einsatz. Die Kalibrierung des Hand-RFA Geräts geht weit über die im Antrag formulierten Projektarbeiten hinaus. Motivation dafür waren (i) Probleme bei der Altersbestimmung, (ii) das Potenzial der RFA metallische Störstoffe erkennen und, wie hier gezeigt werden konnte, (iii) die Möglichkeit zur mobilen Untersuchung nativer Mineralwollen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Klassifizierung des Materials unbekannter Mineralwolle mit dem getesteten NIR-Handgerät AURA möglich ist. Es liegt ein Satz von 140 Kalibrierproben sowie darauf basierender chemometrischer Modelle vor, die es gestatten unbekannte Mineralwollen zu 94% korrekt zu klassifizieren. Getestet wurden unter anderem Validierproben unter Laborbedingungen inklusive wiederholte Messungen bekannter Wollen sowie unbekannte Wollen unter in situ Bedingungen im Technikum der TU Berlin. Die 6% nicht korrekt klassifizierten Materialien beziehen sich hauptsächlich auf Proben mit Vorhersagewerten, die keine eindeutige Zuordnung zu den Klassen GW oder SW gestatten und bei denen teilweise auf die Referenzanalytik keine klare Aussage erbracht wurde. Deshalb wurde ebenfalls die Aussagegenauigkeit der Referenzanalytik, der RFA, einer kritischen Prüfung unterworfen. Fehlerquellen sind hier die Kalibration sowie die Überlappungen der Massenanteile der Oxide für die Klassen GW und SW gemäß VDI3492, beides am Beispiel von Al_2O_3 detailliert dargestellt.

Im Rahmen der NIR-Untersuchungen mit dem Handgerät wurde weiterhin gezielt getestet, inwieweit die Untersuchung von 14 typischen Baustoffen wie Ziegeln, Putz oder Beton zu Fehlbestimmungen als Mineralwolle anhand der Spektren des NIR-Handgeräts führen könnten. Ebenfalls untersucht wurden Fasern organischen Ursprungs, die irrtümlicherweise als Mineralwolle gesammelt wurden. Unter Einsatz eines kalibrierten SIMCA-Modells gelang es mit einer Spezifität von 80% organische und mineralische Störstoffe zu erkennen. Erhöhter Kalibrieraufwand in Kombination mit separaten SIMCA-Modellen für zu erwartende Störstoffe würde die Spezifität weiter erhöhen. Hingegen ist die NIR-Reflexionsspektroskopie nicht geeignet für die Identifikation von Spuren metallischer Verunreinigungen, die jedoch für den Recyclingprozess sehr ungünstig wären. Hier wäre ein potenzielles Einsatzgebiet für zukünftige Untersuchungen mit dem mobilen RFA-Gerät.

Die Klassifizierung des Alters von Mineralwollen konnte aufgrund ihrer Komplexität und aufgrund ungenügender und möglicherweise auch unsicherer Referenzangaben im Rahmen der Projektzeit nicht erfolgreich bearbeitet werden. Die RFA bietet, wie der Fall der Hochaluminiumwollen zeigt, zumindest bei SW möglicherweise einen Ansatz zur Altersbestimmung. Bei GW ergab sich der Hinweis, dass auffällige Bindemittel zur Identifikation neuer GW über NIR-Untersuchungen führen könnten. In beiden Beispielen fielen jedoch Proben auf, die anhand der Referenzinformationen nicht in das vermutete Schema passten. Der Wert dieses Projekts liegt hier jedoch in den großen Datenmengen, die erhoben wurden und deren spätere Auswertung in Kombination mit mehr und validen Referenzinformationen eine Basis für eine Altersklassifizierung darstellen kann.

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten nach intensiver Auseinandersetzung mit dem Herstellprozess von Mineralwolle, einem Abriss zum Status Quo im End of life sowie potenziellen Recyclingstrategien zwei Ansätze herausgearbeitet werden, die für das Closed Loop Recycling von Mineralwollgedämmstoffen besonders gut geeignet scheinen. Zum einen ist es das interne Recycling über den Schmelzyklus. Zum anderen das Recycling mittels Glasfritten, die extern von einem Recyclingunternehmen oder dem

Mineralwollhersteller selbst aufbereitet und als Sekundärrohstoff zur Verfügung gestellt werden. Die Auseinandersetzung mit den beiden genannten Strategien zeigt, dass beide Vor- und Nachteile besitzen, die für die bis hier angestellten Untersuchungen und Überlegungen zusammengeführt werden sollen.

Das interne Recycling mit Schmelzzyklon ist für Prozessverschnitt sowie neue, ausgewählte Mineralwolle aus Baustellenverschnitten bereits Stand der Technik für manche Mineralwollhersteller. Die Qualität der Mineralwolle muss hier möglichst bereits dem Zielprodukt entsprechen, das bedeutet, dass sie chemisch der herzustellenden Mineralwolle bereits ähneln sollte. Zudem sollte die zu rezyklierende Mineralwolle unabhängig von der Recyclingstrategie nach Möglichkeit keine Verunreinigungen mehr beinhalten. Organische Verunreinigungen können technisch zwar über die Vortemperierung bzw. die Glasfrittenherstellung eliminiert werden, allerdings setzt die Verbrennung von organischem Material hohe Mengen an Emissionen, insbesondere NO_x , frei, die die zulässigen Grenzwerte (TA Luft) einer Glaswollanlage überschreiten würden. Für ein Frittenwerk bestünde als Abfallaufbereitungsanlage möglicherweise die Option höherer zulässiger Grenzwerte. Die für die Schmelzwanne generell herausgearbeiteten zulässigen Grenzwerte für Störstoffe stellt Tabelle 6 in Kapitel 4.1 dar. Untersuchte, entsorgte Dämmstoffproben eines Wertstoffhofs und einer Abbruchbaustelle zeigen, dass Mineralwollabfälle im unterschiedlichen Maße verunreinigt sind. Nahezu alle Verunreinigungen überschritten die im Recycling geforderten Grenzwerte. Eine vorgeschaltete Aufbereitungsanlage ist aus diesem Grund notwendig. Es wurde ein theoretisches Konzept angelehnt an das Behälterglasrecycling aufgestellt, welches geeignet ist, die Verunreinigungen von der Mineralwolle zu trennen. Zudem wurden erste realisierte Anlagen vorgestellt, die eine Zerkleinerung mit Teilschritten des theoretischen Konzepts verbinden (vgl. Kapitel 4.3). Trotz Aufbereitungsanlage wird empfohlen, bereits baustellenseitig so sortenrein wie möglich rückzubauen. Größtes Hindernis sind hierbei aktuell unlösliche Verbindungen und der hohe Zeit- und damit Kostenaufwand. Innerhalb dieses Projekts wurden exemplarische Konstruktionsalternativen für die gängigsten und bezogen auf ihr Dämmstoffvolumen maßgeblichen Bauteile entwickelt, die einen leichteren und (nahezu) sortenreinen Rückbau von Mineralwolle ermöglichen. Die ökologische und ökonomische Betrachtung solcher Alternativen sollte immer mitberücksichtigt werden, da die Alternativen in Teilen besser, aber auch in Teilen wesentlich schlechter abgeschnitten haben. Ausnahme bildet die Dachalternative, deren Umsetzbarkeit aus technischer Sicht weiter forciert werden könnte.

Für eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Umsetzung zeigte sich, dass sowohl für das Recycling mit Glasfritten als auch das interne Recycling, die logistischen Herausforderungen um den Transportprozess maßgeblich Einfluss auf die Maßnahme haben. In beiden Fällen ist es sinnvoll, möglichst früh eine Sammelstelle mit Komprimierung zwischen zu schalten. Sofern dies nicht bereits auf der Baustelle geschieht, empfiehlt es sich an Orten wie Wertstoffhöfen oder Deponien, da diese weit gestreut und in großer Anzahl vorhanden sind in Deutschland. Komprimierungsanlagen und das Aufstellen eines Logistikkonzepts verursachen hohe Investitionskosten für die beteiligten Akteure. Hier hat die Glasfrittenstrategie den Vorteil gegenüber dem internen Recycling, dass sie jede Mineralwolle unabhängig des Alters oder der Art verwerten kann. Durch die höheren Annahmehzahlen kann ein homogener Sekundärrohstoff hergestellt werden, ähnlich wie Altglas, der genau wie Altglas von allen Werken verwendet werden kann, die anforderungstechnisch auf einer Ebene mit Mineralwollherstellern oder darunter liegen. So könnten die Mineralwollfritten auch beispielsweise von der Schaumglasindustrie genutzt werden. Die Möglichkeit mehrere Abnehmer zu haben macht die notwendigen hohen Investitionen rentabler. Abhängig vom Altglaspreis kann es sich bei den Glasfritten durchaus um eine ökonomische Alternative handeln. Der dazu notwendige zweite Schmelzprozess ermöglicht eine klare Trennung zwischen Abfall und Sekundärrohstoff sowie die zuvor genannten Vorteile. Gleichzeitig ist er hauptsächlich dafür, dass die ökologische Betrachtung negativ gegenüber der jetzigen Mineralwolleherstellung sowie dem Schmelzzyklon ausfällt. Die Mehremissionen aus dem 2. Schmelzvorgang können durch das Einsparen von Materialien nicht kompensiert werden. Ursächlich hierfür ist vor allem, dass anders als in [126] keine Primärrohstoffe, sondern bereits ein lastenfreier Sekundärrohstoff ersetzt wird.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse stellen eine Grundlage dar anhand derer die im Rückbau, in der Aufbereitung, Transportlogistik und Mineralwollherstellung beschäftigten Akteuren aufgezeigt wird, an welchen Stellen Optimierungs- und Handlungsbedarf besteht, um ein Recycling von Mineralwolle im Schmelzwannenverfahren möglich zu machen.

Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Broszies, Tanja (Technische Universität Berlin)

Dr. Paul, Andrea (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)

Liestmann, Zoe (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)

Schaudienst, Falk (Technische Universität Berlin)

Prof. Vogdt, Frank U. (Technische Universität Berlin)

Weitere Mitwirkende

Kollowa, Thyra (Technische Universität Berlin)

Stuht, Lena (Technische Universität Berlin)

Dieken, Paula (Technische Universität Berlin)

Zimmermann, Nico (Technische Universität Berlin)

Ostermann, Markus (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)

Zänker, Steffen (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)

Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Saint Gobain Isover G+H AG, Bürgermeister-Grünzweig-Straße 1, 67059 Ludwigshafen

Carl Zeiss Spectroscopy GmbH, Carl-Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena

Danksagung

Unsere Arbeit insbesondere an rückgebauter Mineralwolle wäre nicht möglich gewesen ohne die großartige Unterstützung in Form von Probenmaterialbereitstellung durch

- die Ingenieurbüros: Dr. Schönwälder und Partner, Dipl. Ing. Godehard Fischer, CRP Bauingenieure GmbH, B&O CONCEPT Consulting GmbH, Jens Markert Gutachter & Bausachverständiger, Gut8er Wehetal GmbH, Bausachverständiger Eberhard Schenk, ContrinoConsulting Ingenieurbüro Bau und Umwelt und ganz besonder Herrn Timpe von TIR Konzept
- Die Architekturbüros: Henrich Rauschnig, Babara Anders Architekten und MARS ARCHITEKTEN
- die abh Abfallbehandlungsgesellschaft Havelland mbH, Wertstoffhof Falkensee

Vielmals möchten die Autoren sich auch bei den folgenden Unternehmen bedanken, die mit Ihren fachlichen Beiträgen und Einblicken in ihre Berufspraxis unsere Forschungsarbeit bereichert haben

- Herr Frank Pedersen von ACA Industry ApS
- Frau Zusanna Cetner von Tree Poland

Im Rahmen der Arbeit für dieses Projekt wurden beide Institutionen hausintern durch viele Kollegen und Kolleginnen fachlich und technisch unterstützt. Ohne die hausinterne Unterstützung wäre eine Vielzahl der Versuche nicht möglich gewesen. Insbesondere möchten wir uns daher bedanken bei dem

- Team der experimentellen Forschung, Institut Bauingenieurwesen, TUB
- Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie, Institut Bauingenieurwesen, TUB
- Fachgebiet Mech. Verfahrenstechnik u. Aufbereitung, Institut Prozess- u. Verfahrenstechnik, TUB

An der BAM danken wir

- ganz besonders Herrn Dr. Markus Ostermann für seine umfassende Expertise bei der Röntgen-fluoreszenzanalyse (RFA) von Mineralwollen, den Messungen an Lithiumborat Schmelztabletten sowie die Einweisung und Unterstützung bei der Präparation der Schmelztabletten und der Handhabung des RFA-Handgeräts
- Herrn Tobias Völker, Herrn Tim Klewe und Herrn Dr. Gerd Wilsch für die Kooperation auf dem Gebiet von Baustoff-Materialien, die im Rahmen des Projekts, „LIBS-ConSort“ Förderkennzeichen: 033R259, bearbeitet werden und die Materialien, die freundlicherweise durch die IAB Weimar GmbH ebenfalls für unsere Untersuchungen genutzt werden durften
- Frau Dr. Kristin Vogel (BAM) für die Abschätzungen zum Einfluss von Messunsicherheiten auf die Klassifizierungsgrenzen von Oxiden gemäß VDI3492.
- dem Fachbereich 1.4 unter Leitung von Herrn Dr. Michael Maiwald für die Sicherstellung der experimentellen Arbeiten und Herr Dr. Klas Meyer bei der Konstruktion der Glovebox

Unser besonderer Dank gilt weiterhin unseren Industriepartnern, die das Projekt nicht nur finanziell, sondern ebenfalls fachlich und technisch unterstützt haben.

- Bei der Saint Gobain Isover G+H AG danken wir Herrn Jürgen Trappmann für seinen Besuch, die Organisation einer Werksführung bei Saint Gobar Isover in Lübz sowie die Interviews für die er uns als Experte zur Verfügung stand.
- An der Zeiss Spectroscopy GmbH danken wir Herrn Dr. Torsten Büttner als Ansprechpartner für das AURA® NIR-Spektrometer und Herrn Jürgen Gobel für die gemeinsame Planung des Projekts, sowie Herrn Dr. Christian Korth für die großzügige Leihdauer, die die ursprünglich geplante Zeitspanne weit überstieg.

Literaturverzeichnis

- [1] Adediran, A.; Lemouagna, P.N.; Yliniemi, J. et al.: Recycling glass wool as a fluxing agent in the production of clay- and waste-based ceramics. In: *Journal of Cleaner Production* 289 (2021), S. 125673. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125673>.
- [2] Albrecht, W.: Recycling von Wärmedämmstoffen. In: *Bauphysik-Kalender 2019, Energieeffizienz*. (2019) S.121-137.
- [3] Almutairi, A.L.; Tayeh, B.A.; Adesina, A. et al.: Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. In: *Case Studies in Construction Materials* 15 (2021), e00733. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>.
- [4] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 905 - Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe; Ausgabe Mrz. 2016 - zuletzt geändert am 13.07.2021
- [5] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 521 - Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle; Ausgabe Feb. 2008
- [6] Barker, M., Rayens, W., Partial Least Squares for Discrimination. In: *DA: Journal of Chemometrics* Heft 17, 2003, S. 166–173, DOI <https://doi.org/10.1002/cem.785>.
- [7] Barnes, R. J., Dhanoa, M. S., Lister, S. J., Standard Normal Variate Transformation and De-trending of Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectra. *Applied Spectroscopy* 43, 1989, S. 772–777.
- [8] Baulinks, Verschnittrücknahme durch Rockwool zum Festpreis (27.3.2007) <https://www.baulinks.de/webplugin/2007/0461.php4>
- [9] Bellmann, B.; Schaefer, H. A.; Muhle, H.: Impact of variations in the chemical composition of vitreous mineral fibers on biopersistence in rat lungs and consequences for regulation. *Inhalation toxicology*, 2010, 22. Jg., Nr. 10, S. 817-827.
- [10] Berufsgenossenschaft Holz und Metall (Hrsg.), BGI 739-2 - Absauganlagen und Silos für Holzstaub und -späne, Brand- und Explosionsschutz, 2012
- [11] Bilaterales Meeting BAM, SG Isover, 13.05.2022 an der BAM.
- [12] Bougoul, S.; Ruy, S.; Groot, F. et al.: Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture. In: *Scientia Horticulturae* 104 (2005), Heft 4, S. 391-405. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.01.018>.
- [13] Bredikhin, P.A.; Kadykova, Y.: Waste Stone Wool as an Effective Filler for Polyethylene. In: *International Polymer Science and Technology* 44 (2017), Heft 9, S. 41-44. <https://doi.org/10.1177/0307174X1704400908>.
- [14] Broszies, T., Untersuchung zur Anwendung der Nahinfrarot-Spektroskopie für die Differenzierung von Glas- und Steinwolle, Masterarbeit an der TU Berlin, Fachgebiet Bauphysik und Baukonstruktionen in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2017 (Unveröffentlicht)
- [15] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: BBSR-Berichte KOMPAKT – Künstliche Mineralfaserdämmstoffe; Januar 2011.
- [16] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Stand: 24.02.2017
- [17] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen, Steckbrief BNB-N_2.1.1, Version V2015 (eigeführt 12/21)

- [18] BV GLAS. OST. Standardblatt T 120, „Qualitätsanforderungen für. Glasscherben zum Einsatz in der Behälterglasindustrie“. Ausgabe: 01. Juli 2013
- [19] Casassas, E., Marqués, I., Tauler R., Study of acid-base properties of fulvic acids using fluorescence spectrometry and multivariate curve resolution methods. *Analytica Chimica Acta*. 310, 1995, S. 473–484, DOI 10.1016/0003-2670(95)00140-u.
- [20] Castro-Cabado, M. M. et al.: Formaldehyde-free binder and use for mineral wool insulation products, EP2867292B1, 2013
- [21] Ceresana eK, Marktstudie Dämmstoffe: Europa-Report 5. Auflage, 2021
<https://www.ceresana.com/de/marktstudien/industrie/daemmstoffe-europa/ceresana-marktstudie-daemmstoffe-europa.html> , zuletzt besucht am: 22.11.2022
- [22] Cetner-Stzalkowska, Z.: W2L final conference, 2022, URL:
<https://www.wool2loop.eu/en/finalconference/>, zuletzt besucht am 23.02.23
- [23] Chemikalien-Verbotsverordnung vom 20. Januar 2017 (BGBl. I S. 94; 2018 I S. 1389), zuletzt geändert durch Artikel 300 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328)
- [24] Chen, G.: Method for treating waste rock wool, Patent CN1128243A, 1995
- [25] Cheng, A., Lin, W.-T., Huang, R.: Application of Rock Wool Waste in Cement-Based Composites. *Materials and Design*, 2011, 32, 636–642. [
- [26] Cong, P., Cheng, Y.: Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. In: *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 8 (2021), Heft 3, S. 283-314.
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>.
- [27] Cowles, C.R.: Burners for submerged combustion, US20160060154A1, 2016
- [28] Davidovits, J.: Synthesis of new high-temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites. In: *Plastics Technology- Recent Developments & Trends*, 1979.
- [29] Destatis - Statistisches Bundesamt – 32151 - Abfallerzeuger, Abfallmengen (gefährliche Abfälle): Deutschland, Jahre, Abfallarten (EAV 2- und 6-Steller), 02.03.2023.
- [30] Destatis - Statistisches Bundesamt - Bautätigkeit und Wohnungen,
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/bautaetigkeit-2050100207005.html>, 26.08.2022.
- [31] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): DENA-GEBÄUDEREPORT 2022. Zahlen, Daten, Fakten.
- [32] DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG: Preisliste Hochbau 2023. Für Fachbetriebe/Fachleute. Ausgabe 1/2023 Gladbeck.
- [33] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Wärmedämm-Verbundsystem mit gedübelten Mineralwolle-Dämmplatten für die Anwendung auf massiven mineralischen Untergründen "weber.therm circle", 2020
- [34] Deutsches Patentamt: Patentschrift DD 292939 A5. Verfahren und Anlage zur Aufbereitung von Mineralwolleplatten, 27.10.1983.
- [35] Duxson, P.; Provis, J.L.: Designing Precursors for Geopolymer Cements. In: *Journal of the American Ceramic Society* 91 (2008), Heft 12, S. 3864-3869. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02787.x>.
- [36] Eiffler, A.: Ermittlung und Beschreibung von Störstoffen im Recycling von Mineralwolle, 2023, Bachelorarbeit (unveröffentlicht)

- [37] Fehn, T.; Kugler, F.; Tübke, B. et al.: Charakterisierung und Störstoffanalyse von rückgewonnenen Stoffströmen aus Wärmedämmverbundsystemen. In: Chemie Ingenieur Technik 93 (2021), Heft 5, S. 771-780. <https://doi.org/10.1002/cite.202000215>.
- [38] Fehn, T.; Wolf, S.; Schreiber, A. et al.: Bestimmung der partikulären Eigenschaften von aufbereiteten Sekundärrohstoffen aus Wärmedämmverbundsystemen. In: Chemie Ingenieur Technik 93 (2021), Heft 11, S. 1792-1804. <https://doi.org/10.1002/cite.202100054>.
- [39] Fleckenstein, H., Hornung, H., Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen von Mineralwolle mittels Abfallmineralwolle als rezykliertes Grundmaterial, DE69410976T2, 1994
- [40] Gefahrstoffverordnung vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 21. Juli 2021 (BGBl. I S. 3115)
- [41] GGM - Gütegemeinschaft Mineralwolle e.V.: Güte- und Prüfbestimmungen für Erzeugnisse aus Mineralwolle; April 2021
- [42] Gröper, J., Lechner, A., Lack, D.: Verfahren zur Verwertung von Dämmmaterialabfällen aus Mineralwolle, DE102015120721, 2017
- [43] Grove-Rasmussen, S.: Verfahren und Vorrichtung zum Regeln der Herstellung von Mineralwolle mittels eines Kaskadenrotors, DE 603 03 936 T2, 2003
- [44] Handwerksblatt, Neue Dämmstoffe aus recycelter Steinwolle. Oktober 2022, <https://www.handwerksblatt.de/betriebsfuehrung/neue-daemmstoffe-aus-recycelter-steinwolle-1>
- [45] Hawkins, C.M. et al.: Bio-based binders for insulation and non-woven mats, EP3578528A1, 2010
- [46] Hera, G. et al: Comparative Environmental Life Cycle Analysis of Stone Wool Production Using Traditional and Alternative Materials. In: Waste Biomass Valor 8 (5), S. 1505–1520. DOI: 10.1007/s12649-016-9660-8
- [47] Hillebrandt, A. et al: Atlas Recycling - Gebäude als Materialressource, Detail, 2021
- [48] Hillenhagen, C.: Ermittlung und Optimierung von konstruktiven Schwachstellen an ausgewählten Gebäuden hinsichtlich der Rückbaufähigkeit von Konstruktionen mit Mineralwolle, 2023, Masterarbeit (unveröffentlicht)
- [49] Hof, J. et al: Verfahren zur Herstellung von plattenförmigen oder schalenförmigen Isolierkörpern aus Mineralwolle, DE 1077596 B, 1956
- [50] Hooshmand, S. et al.: Acoustic Panels Saint Gobain-Ecophon AB, W2L final conference, 2022, <https://www.wool2loop.eu/en/finalconference/>, zuletzt aufgerufen am: 01.03.23
- [51] Horgnies, M., Gutiérrez-González, S., Rodríguez, A., Calderón, V.: Effects of the use of polyamide powder wastes on the microstructure and macroscopic properties of masonry mortars, Cement and Concrete Composites, Volume 52, 2014, Pages 64-72, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.05.007>.
- [52] Hörner, M.: Der Bestand an Nichtwohngebäuden in Deutschland: Daten und Fakten, 2021.
- [53] Hünig, H.: Alterungsbeständiges Bindemittel für Mineralwolle sowie damit gebundenes Mineralwolleprodukt, DE102012217553B4, 2016
- [54] Hunt, G. R., Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics 42, 1977, S. 501–513, DOI <https://doi.org/10.1190/1.1440721>.
- [55] Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hrsg.): FMI Fachverband Mineralwolleindustrie e.V. Mineralwolle Dämmstoff im niedrigen Rohdichtebereich. Umwelt-Produktdeklaration, EPD-FMI-20210020-IBG1-DE, gültig bis 23.03.26

- [56] Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hrsg.): URSA GEO. Dämmstoff aus Glaswolle für den Dachausbau URSA Spannfilze – SF 40, SF 35, SF 35 PLUS und SF 32 PLUS. Umwelt-Produktdeklaration, EPD-URS-2012121-D
- [57] Jackson, J. E., *A User's Guide to Principal Components*, Wiley & Sons Inc., New York, 1991.
- [58] Jäger, Wolfram; Youssef, Hassan; Hartmann, Raik; Bakeer, Tammam; Kollna, Martin; Erler, Maik: Rezyklierbarer, demontierbarer, energiehocheffizienter, massiver Musterbau (ReDeMaM): Praktische Umsetzung eines Musterhauses in Trockenbauweise. BBSR-Online-Publikation 19/2022, Bonn, Juni 2022.
- [59] Ji, R.; Zheng, Y.; Zou, Z. et al.: Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature. In: *Construction and Building Materials* 215, S. 623-632. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226>
- [60] Jöhrens, J. et. al.: Roadmap OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030. Kurzfristig realisierbare Potenziale für den wirtschaftlichen Betrieb von OH-Lkw. **Analyse im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“ (2018)**
- [61] Jonschker, Gerhard. Sol-Gel-Technology in Praxis, Hannover, Germany: Vincentz Network, 2014. <https://doi.org/10.1515/9783748600350>
- [62] Karppinen, K.: Paroc-WIM (LIFE02 ENV/FIN/000328) - Waste injection into the stone wool melting furnace—LIFE02 ENV/FIN/000328, 2002.
- [63] Kaub, S.: Schadstoffe im Bauwesen, In: *Schadstoffe im Bauwesen*. Springer Vieweg, Wiesbaden. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34710-9_1
- [64] Kessler, W., *Multivariate Datenanalyse für die Pharma-, Bio- und Prozessanalytik*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2007.
- [65] Khale, D.; Chaudhary, R.: Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. In: *Journal of Materials Science* 42, 2007, Heft 3, S. 729-746. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>.
- [66] Kinnunen, P.; Yliniemi, J.; Talling, B. et al.: Rockwool waste in fly ash geopolymer composites. In: *Journal of Material Cycles and Waste Management* 19, 2017, Heft 3, S.1220-1227. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0514-z>.
- [67] Klose, G.-R.: Dämmstoffelement, DE102005043092 A1, 2006
- [68] Klose, G.-R.: Dämmstoffelement, DE102006028842A1, 2007
- [69] Knauf Insulation (Hrsg.): Die Herstellung von Mineralwolle. Ein Blick hinter die Kulissen. Online verfügbar unter <https://www.knaufinsulation-ts.com/de/unsere-kompetenzen/herstellung>, zuletzt aktualisiert am 2021, zuletzt geprüft am 01.03.23
- [70] Kohvakka, T.: Demonstration cases, W2L final conference, 2022, <https://www.wool2loop.eu/en/finalconference/>, zuletzt aufgerufen am: 01.03.23
- [71] Lin, W.-T.; Cheng, A.; Huang, R.; Wu, Y.-C.; Han, T.-Y. Steinwollabfälle als ergänzender zementgebundener Materialersatz in zementgebundenen Verbundwerkstoffen. *Berechnung. Konkr.* 2013, 11 , 93–104.
- [72] Loga T., Britta, S., Diefenbach, N., Born, R.: *Deutsche Wohngebäudetypologie, Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, zweite erweiterte Auflage*, 2015
- [73] Machado, A.: *Analyse von Geopolymeren aus alkalisch aktivierten Mineralfaserdämmstoffen*, Masterarbeit (unveröffentlicht)
- [74] Mamiński, M.Ł.; Król, M.E.; Jaskółowski, W. et al.: Wood-mineral wool hybrid particleboards. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 69 (2011), Heft 2, S. 337-339. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0470-6>.

- [75] Maria, S. B., et al. JRC REFERENCE REPORT. 2013, doi: 10.2791/69502
- [76] Martens, B., Thompson, M., Fearn, T., Principal component outlier detection and SIMCA – a synthesis. *Analyst* Band 119, 1994, Heft 12, S. 2777-2784, DOI 10.1039/an9941902777.
- [77] Martens, H.; Goldmann, D.; *Recyclingtechnik*, Fachbuch für Lehre und Praxis, 2. Auflage
- [78] Mueller, A.; Leydolph, B.; Stanelle, K.: Stoffliche Verwertung von Mineralwolleabfällen – Technologien für die Strukturumwandlung. In: *KERAMISCHE ZEITSCHRIFT*, S. 367–375. 2009
- [79] Naber, W.; Ungerer, H.-J.; Sistermann, K.: Verfahren zum Erschmelzen von silikatischen Rohstoffen, insbesondere zur Herstellung von Mineralwolle sowie Vorrichtung zur Vorwärmung des Rohstoffgemenges und Reinigungseinrichtung für die Wannenabgase zur Durchführung des Verfahrens. Angemeldet durch Grünzweig + Hartmann und Glasfaser AG am 20.02.1986. Veröffentlichungsnr: DE 36 05509 A1.
- [80] Nölle, G.: *Technik der Glasherstellung*, 3. überarbeitete Auflage, Stuttgart, dt. Verlag für Grundstoffindustrie, 1997
- [81] Ostermann, M., et al.: Einsatz der Röntgenfluoreszenzanalyse in der Prozessanalytik. In: *tm-Technisches Messen*, Band 78, Heft 12, 2011
- [82] Paul A., Boszies T., Ostermann M., Vogdt F. U., Maiwald M., Unterscheidung von Mineralwolle mit Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS), *Bauingenieur*, Band 95, 2020, Heft 12, S.463-472.
- [83] Paul, A.; Ostermann, M.; Hänel, M., Verfahren zur Unterscheidung von Mineralwollen und System zur Unterscheidung von Mineralwollen. Deutsche Patentanmeldung Nr. 102019101206.6 (2019) Inhaber: Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch die Bundesministerin für Wirtschaft und Energie, diese vertreten durch den Präsidenten der Bundesanstalt für Materialforschung und- Prüfung (BAM).
- [84] **Pavlin, M.; Horvat, B.; Frankovič, A. et al.: Mechanical, microstructural and mineralogical evaluation of alkali-activated waste glass and stone wool.** In: *Ceramics International* 47, 2021, Heft 11, S. 15102-15113. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.068>.
- [85] Pelin, K., Husgafvel-Pursiainen, M., Vallas, E., Linnainmaa, K., Cytotoxicity and anaphase aberrations induced by mineral fibres in cultured human mesothelial cells, *Toxic. In vitro* 6, 1992, Heft 5, S. 445 – 450, DOI [https://doi.org/10.1016/0887-2333\(92\)90051-R](https://doi.org/10.1016/0887-2333(92)90051-R).
- [86] Persönliche Interviews mit mehreren Werksleitern sowie dem Leiter des Bereichs Umwelt von Isover Saint Gobain und Rigips, online sowie Werksbegehung am 13.09.23 in Lübz, [Eigenes Gesprächsprotokoll]
- [87] Piña Ramírez, C.; Del Río Merino, M.; Viñas Arrebola, C. et al.: Analysis of the mechanical behaviour of the cement mortars with additives of mineral wool fibres from recycling of CDW. In: *Construction and Building Materials* 210, 2019, S. 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.062>.
- [88] **Pranckevičienė, J., Balkevičius, V., & Špokauskas, A. A.: Investigations on properties of sintered ceramics out of low-melting illite clay and additive of fine-dispersed nepheline syenite.** *Materials Science (Medžiagotyra)*, 16, 231-235, 2010
- [89] Provis, J.L.; van Deventer, J.: *Introduction to geopolymers*. In: *Geopolymers*. Elsevier, 2009
- [90] Ramirez, C., Feasibility of the use of mineral wool fibres recovered from CDW for the reinforcement of conglomerates by study of their porosity
- [91] Ramsey, M. H., Challenges for the estimation of uncertainty of measurements made in situ, *Accreditation and Quality Assurance*, 2020, DOI doi.org/10.1007/s00769-020-01446-4.

- [92] Ramsey, M. H., Ellison, S. L. R., Rostron, P., Eurachem/EUROLAB/CITAC/Nordtest/ AMC Guide: Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches, Eurachem, 2nd Edition, 2019, ISBN (978-0-948926-35-8), available from <http://www.eurachem.org>.
- [93] Remi, J. et al: Method and Device for Treating Fibrous Wastes for Recycling, US20080256981A1, 2008
- [94] Romaniega Piñeiro, S.; Del Río Merino, M.; Pérez García, C.: New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling. In: *Advances in Materials Science and Engineering 2015* (2015), S. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2015/854192>.
- [95] Rose, A., Sack, N., Nothacker, K., Gassman, A.: *Recycling von Flachglas im Bauwesen – Analyse des Ist-Zustandes und Ableitung von Handlungsempfehlungen*, F 3202, Fraunhofer IRB Verlag, 2020
- [96] Rossel, R. A. V.; McGlynn, R. N., McBratney, A. B., Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy, *Geoderma* 137, 2006, S. 70–82, DOI <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.07.004>.
- [97] Sack, W.: Glas, Glaskeramik und Sinterglaskeramik. In: *Chemie Ingenieur Technik*, Volume 37, Issue 11, P. 1085-1184, 1965, <https://doi.org/10.1002/cite.330371114>
- [98] Saint Gobain Isover G+H AG (Hrsg.), Pressemitteilung: ISOVER Recycling, la nouvelle offre de recyclage de déchets de laine de verre, 13.04.2018
- [99] Saint Gobain Isover G+H AG (Hrsg.): Herstellverfahren Mineralwolle. On-line verfügbar unter <https://www.isover.de/herstellverfahren-mineralwolle>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2021, zuletzt geprüft am 17.04.2021.
- [100] Saint Gobain Isover G+H AG (Hrsg.): Unkaschierte Glaswolle-Platten und –Filze. Umwelt-Produktdeklaration Saint-Gobain Isover. EPD-SGI-20160161-CAA1-DE. Gültig bis 19.12.2021
- [101] Sattler, T.; Galler, R.; Vollprecht, D.: Entwicklung innovativer Recyclingverfahren für Mineralwolleabfälle – Projekt RecyMin. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 164 (2019), Heft 12, S. 552-556. <https://doi.org/10.1007/s00501-019-00922-w>.
- [102] Schaeffer, H. A.; Langfeld, R.: Herstellung – Schmelzen und Formgebung von Glas. In: Helmut A. Schaeffer und Roland Langfeld (Hg.): *Werkstoff Glas. Alter Werkstoff mit großer Zukunft*. 2nd ed. 2020. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer (Technik im Fokus), S. 151–197.
- [103] Schmidt, H., Jonschker, G., Goedicke, S. et al. The Sol-Gel Process as a Basic Technology for Nanoparticle-Dispersed Inorganic-Organic Composites. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 19, 39–51 (2000). <https://doi.org/10.1023/A:1008706003996>
- [104] Schneider, S.: Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen 18 t Lastwagens E-FORCE von Feldschlösschen Getränke AG (2014).
- [105] Shi, C.; Krivenko, P.V.; Della Roy: *Alkali-Activated Cements and Concretes – Theory and application*. Taylor & Francis, London, 2006.
- [106] Siesler, H., *Introduction in Near-Infrared Spectroscopy*, Wiley-VCH, Weinheim 2002, S. 1-10.
- [107] Sjöstro, M., Lindberge, W., Persson, J.A., Martens, H., A multivariate calibration-problem in analytical-chemistry solved by partial least-squares models in latent-variables, *Analytica Chimica Acta* 150, 1918, Heft 1, S. 61 – 70, DOI 10.1016/S0003-2670(00)85460-4.
- [108] Stanelle, K., Leydolph, B., Anwendungspotentiale mineralischer Anfallstoffe in der Ziegelherstellung, **Fachtagung Recycling R'10, 2010**
- [109] Statistisches Bundesamt (19.10.2021): Lkw-Verkehr: Fachkräfte werden mit 14,21 Euro brutto die Stunde unterdurchschnittlich entlohnt. Zahl der Woche. Online verfügbar unter

- https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2021/PD21_42_p002.html, zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- [110] Statistisches Bundesamt (2022), Erdgaspreise für Nicht-Haushalte: Deutschland, Halbjahre, Jahresverbrauchsklassen, Preisarten. Stand: 05.03.2023
- [111] Statistisches Bundesamt (2022): Detaillierte Zusammensetzung der Arbeitskosten im Produzierenden Gewerbe und Dienstleistungsbereich. 2020. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitskosten-Lohnnebenkosten/Tabellen/strukturkostenart.html>, zuletzt aktualisiert am 04.07.2022, zuletzt geprüft am 31.10.2022.
- [112] Statistisches Bundesamt (2023): Erdgas- und Stromdurchschnittspreise. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-Strom-Durchschnittspreise/_inhalt.html, zuletzt geprüft am 06.02.2023.
- [113] Statistisches Bundesamt (Destatis), Preise - Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz), Preise für leichtes Heizöl, Motorenbenzin und Dieselkraftstoff – Lange Reihen ab 1976 bis Dezember 2022 -, 2023
- [114] Statistisches Bundesamt (Destatis): Bautätigkeit und Wohnungen, Bestand an Wohnungen. Fachserie 5, Reihe 3, 2022
- [115] Stefan Sims, Helfried Urban, Christian Stier: Deaktivierbare Klebstoffe zur Wiederverwertung von Wärmedämmverbundsystemen - WDVS-Deaktiv. Fraunhofer IRB, Stuttgart.
- [116] Stonys R, et al. Reuse of ultrafine mineral wool production waste in the manufacture of refractory concrete. *J Environ Manage.* 2016 Jul 1;176:149-56. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.03.045.
- [117] Strnad, V.: Procédé de fusion de matières contenant des fibres minérales, EP-A-0 389 314 A1, 1990
- [118] Telefonische Interviews mit dem Geschäftsführer von ACA Industry ApS, Februar 2023, [Eigenes Gesprächsprotokoll]
- [119] Terayama, T.: Treating method for waste rock wool and paper-making sludge. Patent JP2003326238A, 2002
- [120] UmweltWissen – Abfall Künstliche Mineralfasern, Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2018.
- [121] URSA Insulation, S.A. Madrid (Hrsg), PureOne by Ursa, 2010 <https://www.ursa.de/de-de/produkte/Documents/BR-pureone-leaflet.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.02.23
- [122] Utell, M., J., Maxim, L.D., Refractory ceramic fibers: Fiber characteristics, potential health effects and clinical observations, *Toxicology and Applied Pharmacology* 361, 20128, S. 113 – 117, DOI doi.org/10.1016/j.taap.2018.06.011.
- [123] Väntsi, O. und Kärki, T.: Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management.* 2014, Bd. 16, S. 62-72, 2014
- [124] VDI 3492: Messen von Innenraumlufiverunreinigungen -Messen von Immissionen - Messen anorganischer faserförmiger Partikel - Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren. Ausgabe 2013.
- [125] VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Document 02008R1272-20220301, Stand 2022
- [126] Vogdt, F.U., Fischer D., Schaudienst F., Schober M.: LifeCycle KMF - Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen, Fraunhofer IRB Verlag, 2019

-
- [127] Vollprecht, D.; Sattler, T.; Doschek-Held, K.; et al.: Innovative Deponierung sowie Recycling von Mineralwolleabfällen im Bergversatz, in der Zementindustrie und in der Mineralwolleindustrie. Berliner Konferenz, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, 6, Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen, Neuruppin: Thomé Kozmiensky, 2019, S. 481–492)
- [128] Wagner, E.; Hünig, H.: Formaldehydfreies Bindemittel; DE 10 2005 056 791 A1; 2005,
- [129] Weber, M.: Untersuchung zum Abtrag von Wärmedämmverbundsystem mit spanender Bürste Ausgabe 2021.
- [130] Weidmann, A.: Analyse und Gegenüberstellung verschiedener Herstellungsmethoden für Mineralwolldämmstoffe, 2021, Bachelorarbeit (unveröffentlicht).
- [131] Welsch, W. W.: Zur Herstellung von Glasfasern nach dem Schleuderblasverfahren geeignetes Glas, DE000001094937B, 1955
- [132] Wool2Loop 2020 Project, <https://www.wool2loop.eu/en/project/>
- [133] World Health Organization (Hrsg): Man-made mineral fibres. Geneva, 1988 (Environmental Health Criteria, No. 77).
- [134] Yap, Z.S., et al, Waste Mineral Wool and Its Opportunities—A Review, *Materials* (14, 5777, 2021)
- [135] Yliniemi, J.; Kinnunen, P.; Karinkanta, P. et al.: Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor. In: *Materials* (Basel, Switzerland), Vol. 9 (2016), Iss. 5. <https://doi.org/10.3390/ma9050312>
- [136] ZEDAL, Preisliste Deutschland, gültig ab 01.01.21, https://zedal.de/pdf/zedal_preisliste.pdf, zuletzt abgerufen am 06.02.22
- [137] Zeit, Strafprozess zu Woolrec wird neu verhandelt, 09.11.2021 https://www.zeit.de/news/2021-11/09/strafprozess-zu-woolrec-wird-neu-verhandelt?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F, zuletzt abgerufen am 06.03.23
- [138] Zimmermann, N.: Stoffstrom des Fensters in der End-of-Life Phase, 2023, Bachelorarbeit (unveröffentlicht).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 geschätzter Anteil am Dämmstoffabsatz in Deutschland für das Jahr 2023	8
Abbildung 2 Geschätzter prozentualer Anteil der EU Produktion nach Mitgliedsstaaten, Stand 2005	9
Abbildung 3 Standorte von Mineralwollfertigungsanlagen in Deutschland nach Angaben der Hersteller (SG Isover in Speyer, Bergisch Gladbach, Ladenburg und Lübz, Ursa in Delitzsch, Rockwool in Gladbeck, Flechtingen und Neuburg und Knauf Insulations in Bernburg und St. Egidien), "Ultimate" ist eine Produktbezeichnung der Firma ISOVER für eine Mineralwolle, die von den Rohstoffen her einer Steinwolle ähnelt, aber prozesstechnisch wie eine Glaswolle hergestellt wird, Grün: Werke mit Schmelzwannen, Orange: Werke mit Kupolofen,	10
Abbildung 4 Schematische Darstellung des Herstellprozesses von Glaswolle der Fa. SG Isover im Schmelzwannenverfahren; EF = Elektrofilter, in rot dargestellt 3 Stellen im Prozess, an denen Mineralwolle als Sekundärrohstoff hinzugefügt werden könnte. Die Rückführung von Mineralwolle aus dem Zuschnitt-Prozess kann je nach Hersteller variieren	15
Abbildung 5 Schematische Abbildung des Zerfaserungselements im Schleuderziehverfahren	19
Abbildung 6 Schematische Abbildung des Zerfaserungselements im Düsenblasverfahren	20
Abbildung 7 Schema Entsorgung von Mineralwolle	23
Abbildung 8 Abfallart (EAV/AVV) 170603* Anderes Dämmmaterial, vorwiegend MW in der Bundesrepublik nach [29]	25
Abbildung 9 Übersicht der befragten Deponien	26
Abbildung 10 durchschnittliche Deponiepreise für EAV 170603* nach Bundesländern	27
Abbildung 11 Schema derzeitiges End-of-Life-Szenario	28
Abbildung 12 Dreiecksdiagramm zur Einordnung von Mineralwolle im Vergleich mit anderen alkalisch aktivierbaren Materialien und Bindemitteln	32
Abbildung 13: TGA Analyse der Proben W3 (oben), W6 (mitte) und W7 (unten).	47
Abbildung 14 Darstellung der prozentualen Störstoffanteile [M.%] nach händischer Sortierung	48
Abbildung 15 Verteilung der Flächen des deutschen Gebäudebestands in Mio.m ² auf Wohn- und Nichtwohngebäude im Jahr 2021. nur NWG im Geltungsbereich des GEG	49
Abbildung 16 Anteil des Mineralwollvolumens im Gebäude aufgeteilt nach Bauteilgruppen, beispielhaft für ein EFH (rechts) und MFH (links)	50
Abbildung 17 Umweltindikatoren für 1m ² Fläche der optimierten Bauteile im Vergleich zur Ausgangsvariante, GWP (oben), PE _{GES} (unten)	57
Abbildung 18 Umweltindikatoren für 1m ² Fläche der optimierten Bauteile im Vergleich zur Ausgangsvariante, POCP (oben), AP (mitte), EP (unten)	58
Abbildung 19 Mineralwolleflocken der Probe W6 nach Durchgang Schneidemühle und Sieb <10mm. Die Kunststoffolie hatten das Sieb zuvor nicht passiert.	61
Abbildung 20 Schematische Darstellung von Aufbereitungsschritten zur Entfernung von Störstoffen aus Abbruchmineralwolle für künftige Wiederverwertung entsprechend der erwarteten Fraktionen	62
Abbildung 21 Siebklassifizierung der Mineralwollen W1z, W2z, W6z und W7z, das z steht für den vorangegangenen Zerkleinerungsprozess. Die Flocken wiesen eine maximale Größe von 10mm auf.	63
Abbildung 22 Mineralwollefraktionen >2mm und <4mm der Probe W7z	64

Abbildung 23: Schematische Darstellung einer bestehenden Mineralwollaufbereitungsanlage	64
Abbildung 24 oben links: angeliefertes Material nach grober Vorsortierung, oben rechts: Schneckenmühle zur Zerkleinerung der Mineralwolle unten links: zerkleinerte Mineralwollflocken fallen auf ein Förderband, unten rechts: Die Mineralwolle wird über ein Siebband separiert. Links befindet sich das Mineralwollmehl, rechts die Störstoffe.	65
Abbildung 25 prozentuale Kostenverteilung	67
Abbildung 26 Transportkosten in Abhängigkeit des Mineralwolleaufkommens	68
Abbildung 27 Wirtschaftlichkeit von gemieteten Komprimierungsanlagen	69
Abbildung 28 Konstruktionszeichnung der Glovebox mit Maßen in [mm] (A) sowie Foto der fertiggestellten Glovebox (B)	73
Abbildung 29 Links: NIR Prozessspektrometer Matrix-F mit lichtleitergekoppelten Transmissions- und Reflexionssonden, Mitte: Reflexionssonde positioniert für die Messung einer pulverförmigen Probe in Aluminiumschale, sowie rechts: Vergleich der spektralen Lage von NIR-Spektren des Matrix-F und AURA-NIR-Spektrometer	74
Abbildung 30 Links: Konstruierte Halterung zur Ablage des AURA bei der Probenmessung in der Glovebox, Mitte: Quarzglas als Container für die Mineralwolleproben während der Messung, Rechts: Abbildung des AURA	75
Abbildung 31 Links: Automatische Einwaage und Verhältnisbestimmung am „BOROMAT® 18 Material Doser“, Rechts, Mitte: Automatisierte Glasschmelze am „VITRIOX® Electric“	76
Abbildung 32 Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenzspektrometer Links: MagiX Pro, Mitte: Zetium Ultimate, Rechts: Massenanteile der Oxide die indikativ für Steinwolle (SW) oder Glaswolle (GW) sind nach VDI 3492 [124]	77
Abbildung 33 Links: RFA-Spektren mit den Elementen der 7 messbaren Oxiden illustriert anhand von Reinstoffen, Rechts: energiedispersives Röntgenfluoreszenzspektrometer NitonTM XL3t GOLDD+	78
Abbildung 34 Spektren der 161 Proben. Links: Matrix-F: gemessen in diffuser Reflexion, konvertiert in -log(R) Einheiten und Rechts: AURA: gemessen und dargestellt in Reflexionseinheiten (rechts). Farbcode für Kalibrierproben – SW (rot), GW (blau), Testproben (schwarz) davon nicht-mineralische Fasern (gelb)	84
Abbildung 35 Ergebnis der PLS-DA der AURA-Spektren nach Flächennormierung mit 4 Subplots: Scores Plot mit Farbcode für GW (blau) und SW (rot), (oben links), Spektrale Regressionskoeffizienten mit Varianz (schwarz) für 2 Faktoren (oben rechts), Erklärte Varianz der Zielvariablen y für Kalibrierung (blau) und Kreuzvalidierung (rot) (links unten), Modellvorhersagen gegen Referenzwerte mit Regressionsgeraden der Kalibrierung (blau) und Kreuzvalidierung (rot) inklusive Anstiege, Offset, R ² und RMSE (unten rechts)	85
Abbildung 36 PCA-Modelle für GW (A) und SW (B) als Grundlage einer SIMCA Klassifizierung. Die PCA-Modelle umfassen vier Subplots: Scores für PC1 und PC2 (oben links), spektrale Loadings der relevanten Hauptkomponenten (oben rechts), Influence Plots zur Identifizierung potenzieller Ausreißer und extremer Proben (unten links), kumulierte erklärte Varianz der Hauptkomponenten (unten rechts)	86
Abbildung 37 Links: Mineralwolleproben aus dem BigBag W1 auf einem Blech ausgebreitet und mit einer Plexiglasmaske zur Markierung von Messfeldern bedeckt, Mitte: schematische Darstellung der Messpositionen, Rechts: schematische Darstellung der Beprobung pro Teilfeld mit dem AURA	91
Abbildung 38 NIR-Spektren von Baustoffen (Mittelwertspektren, AURA) die Grundlage der Vorhersagen in Tabelle 26 waren	93
Abbildung 39 NIR-Spektren des Matrix-F an GW zwecks Visualisierung einer Gruppe neuer, brauner GW (schwarz) die sich durch typische Spektren auszeichnen. Dies trifft weiterhin auf die unbekannte Probe P004 und eine alte GW, P122, zu.	96

Abbildung 40 Links: Kalibrierkurve für Al_2O_3 („Omnia“) basierend auf 22 Proben (Einwaagen der Oxide), rechts: Al_2O_3 Gehalte von Mineralwollen ermittelt anhand von Schmelztabletten mit Grenzen für die Zuordnung zu GW und SW gemäß VDI 3492 [124]	97
Abbildung 41 Effekt einer Messunsicherheit (rechter Graph) auf die Klassifizierung von GW und SW basierend auf Al_2O_3 gemäß VDI 3492 [124]	99
Abbildung 42 PLS-DA der Oxide in Mineralwollen nach Bestimmung mit dem RFA-Handgerät. Erklärung der Plots analog Abbildung 35	102
Abbildung 43 Treibauspotential (GWP) in $\text{kgCO}_2\text{-Äqu.}/\text{m}^3$ (oben) und $\text{kgCO}_2\text{-Äqu.}/\text{kg}$ (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen	107
Abbildung 44 Gesamtprimärenergiebedarf (PE_{GES}) in MJ/m^3 (oben) und MJ/kg (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen	108
Abbildung 45 Ozonschichtabbaupotential (ODP) in $\text{kgR}_{11}\text{-Äqu.}/\text{m}^3$ (oben) und $\text{kgR}_{11}\text{-Äqu.}/\text{kg}$ (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen	109
Abbildung 46 Ozonbildungspotential (POCP) in $\text{kgC}_2\text{H}_4\text{-Äqu.}/\text{m}^3$ (oben) und $\text{kgC}_2\text{H}_4\text{-Äqu.}/\text{kg}$ (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen	110
Abbildung 47 Versauerungspotential (AP) in $\text{kgSO}_2\text{-Äqu.}/\text{m}^3$ (oben) und $\text{kgSO}_2\text{-Äqu.}/\text{kg}$ (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen	112
Abbildung 48 Eutrophierungspotential (EP) in $\text{kgPO}_4\text{-Äqu.}/\text{m}^3$ (oben) und $\text{kgPO}_4\text{-Äqu.}/\text{kg}$ (unten) für ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen	113
Abbildung 49 Sachbilanz des Szenarios IST-Zustand Mineralwolleherstellung in Schmelzwanne	114
Abbildung 50 Sachbilanz des Recyclingszenarios Glasfritten	116
Abbildung 51 Relativer Vergleich zwischen den Ökobilanzergebnissen einer Original EPD für Glaswolle zu der aufgestellten Ökobilanz für eine Glaswolleherstellung für PENRT (MJ/kg), PERT (MJ/kg), POCP (kg NMVOC eqv./kg), EP-T (mol N eqv./kg), EP-fw (kgP egv./kg), EP-m (kgN eqv./kg), GWP-total (kgCO ₂ eqv./kg), AP (mol H+ eqv./kg)	117
Abbildung 52 Ökobilanzieller Vergleich für PENRT (MJ/kg), PERT (MJ/kg), POCP (kg NMVOC eqv./kg), EP-T (mol N eqv./kg), EP-fw (kgP egv./kg), EP-m (kgN eqv./kg), GWP-total (kgCO ₂ eqv./kg), AP (mol H+ eqv./kg) nach DIN EN 15804 +A2 für Minerwolleherstellung ohne Recycling, mit 10% internem Recycling und 50% Recyclingquote durch Glasfritten	118
Abbildung 53 Kostenvergleich für Unterschiedliche Verwertungsoptionen von selektiv zurückgebauter Mineralwolle aufgeteilt nach Kostenanteilen.	121
Abbildung 54 Ökonomischer Variantenvergleich für eine Komprimierung der Mineralwolle ab Sammelstelle von min. 2:1, Basis 5:1 und max. 7,5:1 Fall 1: Verwertung zur Entsorgung (Deponie), Fall 2: Verwertung innerhalb des Mineralwollewerks, Fall 3: wie 2 mit Sammelstelle und Komprimierung, Fall 4: Externe Verwertung im Frittenwerk, Fall 5: wie 4 mit Sammelstelle und Komprimierung	122
Abbildung 55 Ökonomischer Variantenvergleich für einen Personaleinsatz von min. 10 €/h, Basis 14,7925 €/h bzw. 25 €/h und max. 80 €/h Fall 1: Verwertung zur Entsorgung (Deponie), Fall 2: Verwertung innerhalb des Mineralwollewerks, Fall 3: wie 2 mit Sammelstelle und Komprimierung, Fall 4: Externe Verwertung im Frittenwerk, Fall 5: wie 4 mit Sammelstelle und Komprimierung	123
Abbildung 56 Ökonomischer Variantenvergleich für variierende Transportleistungen zwischen Baustelle und Mineralwollewerk bzw. Frittenwerk von min. 50 km, Basis 355 km bzw. 290 km und max. 800 km Fall 1: Verwertung zur Entsorgung (Deponie), Fall 2: Verwertung innerhalb des Mineralwollewerks, Fall 3: wie 2 mit Sammelstelle und Komprimierung, Fall 4: Externe Verwertung im Frittenwerk, Fall 5: wie 4 mit Sammelstelle und Komprimierung	124

Abbildung 57 Ökonomischer Variantenvergleich für einen Altglaspreis von min. 30 €/t, **Basis 75 €/t und max. 120 €/t** Fall 1: Verwertung zur Entsorgung (Deponie), Fall 2: Verwertung innerhalb des Mineralwollewerks, Fall 3: wie 2 mit Sammelstelle und Komprimierung, Fall 4: Externe Verwertung im Frittenwerk, Fall 5: wie 4 mit Sammelstelle und Komprimierung 125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht über die größten Hersteller von Mineralwolle innerhalb der EU, Stand: 2005	8
Tabelle 2 Hauptbestandteile der mineralischen Fasern von Steinwolle, Glaswolle und Schlackenwolle	11
Tabelle 3 Physikalisch-chemische Unterschiede zwischen Glas- und Steinwolle	12
Tabelle 4 Ausgangs- und Zusatzstoffe in der Mineralwollproduktion in % als Zusammentrag aus diversen Quellen	17
Tabelle 5 Nettokosten 2023 der Hersteller-von Mineralwolle für BigBags nach [23]	24
Tabelle 6 Übersicht über Störstoffe in der Mineralwollindustrie (Schmelzwanne)	43
Tabelle 7 Grenzwerte für Störstoffe zum Recycling in der Behälterglas- und Mineralwollindustrie	44
Tabelle 8 Übersicht über je einen von drei Probensätzen der Proben W1-W7, mit Differenzierung in SW/GW und Angabe Glühverlust [550°C für 1h]	45
Tabelle 9 Übersicht über typische konstruktive Eckdaten im Wohnungsneubau	50
Tabelle 10 Sensitivitätsanalyse zu den Mineralwolle-Mengen der MFH (oben) und EFH (unten) nach Bauteilen differenziert, fett markiert die betrachtete Basisvariante.	51
Tabelle 11 konstruktive Optimierung hinsichtlich des Mineralwollrecyclings einer massiven Außenwand	53
Tabelle 12 konstruktive Optimierung hinsichtlich des Mineralwollrecyclings einer massiven Geschosdecke	54
Tabelle 13 konstruktive Optimierung hinsichtlich des Mineralwollrecyclings eines Flachdachs	55
Tabelle 14 Vergleichende Darstellung der Herstellkosten für ein Basisbauteil und einer für den Rückbau von Mineralwolle optimierte Konstruktionsvariante	59
Tabelle 15 Abfallaufkommen (EAV/AVV) 170603* Auswahl Bundesländer 2016	66
Tabelle 16 Vergleich angesetztter Kosten	67
Tabelle 17 Im Projekt verwendete Geräte	71
Tabelle 18 Im Projekt verwendete Software	71
Tabelle 19 Im Projekt verwendete Chemikalien	72
Tabelle 20 Massenanteil der verwendeten Oxide in den Kalibriertabletten K1 – K18	77
Tabelle 21 Vergleich der RFA-Untersuchungen mittels Laborgeräten und Handgerät	79
Tabelle 22 Überblick über Probenmaterialien hinsichtlich der Bearbeitung der Fragestellungen mittels NIR: 1 – Klassifizierung des Materials, 2 – Klassifizierung des Alters, 3 – Identifikation von Störstoffen	82
Tabelle 23 Ergebnisse der Vorhersagen für „unbekannte“ Proben anhand der in Abbildung 35 und Abbildung 36 vorgestellten PLS-DA bzw. PCA-Modelle über SIMCA-Klassifizierung. Die Tabelle untergliedert sich in die Probensätze „Validierproben“, „BigBags“ und „Proben, die kein Bestandteil des Kalibriersatzes waren“ sowie „Wiederholungsmessungen“. Referenzwerte in Klammern bedeuten, dass die Klassifizierung gemäß VDI 3492 [124] nur einen sehr geringen Score aufwies, und „unsicher“, dass keine klare Zuordnung zum Material getroffen werden konnte.	88
Tabelle 24 Referenzanalytik und Vorhersagen verschiedener Klassifizierungsmodelle für die NIR-Spektren. „raw“ bezeichnet unbehandelte Spektren, SG-die Nutzung erster Ableitung kombiniert mit einem Polynom nach Savitzky-Golay	89

Tabelle 25 Vorhersagen für BigBag-Proben W1, Details siehe Abbildung 37	92
Tabelle 26 Ergebnisse der Vorhersagen für „unbekannte“ Proben, die keine Mineralwollen darstellen, anhand der in Abbildung 35 und Abbildung 36 vorgestellten PLS-DA bzw. PCA-Modelle	94
Tabelle 27 Mineralwollen mit einem Massenanteil > 18% Al_2O_3	98
Tabelle 28 Messbereiche der Hand-RFA mit Lage der Hauptpeaks der zu untersuchenden Oxide, blau unterlegt sind jene Oxide, die sich zuverlässig in Mineralwolleproben vorhersagen lassen	101
Tabelle 29 Links: Vorhersagen mittels PLS-DA für die schichtweise Hand-RFA Messung an einer kompakten Mineralwolleplatte der Probe KD2 (Isover), Rechts: Foto der Platte mit Plexiglasschablone zur Festlegung der Messfelder	103
Tabelle 30 Ausgewählte Mineralwoll-Umweltproduktdeklarationen	106
Tabelle 31 Rohstoffeinsatz für Mineralwolle und verwendete ecoinvent-Datensätze	117
Tabelle 32 Eingabewerte zur Kalkulation der Kosten für ausgewählte Mineralwollrecyclingstrategien	120
Tabelle 33 Weiterführende Informationen zu den Proben P001-P161: Farbe, Homogenität, Dichte, Beschichtung (1: vorhanden, 0: nicht vorhanden)	160
Tabelle 34 Übersicht über zur Verfügung stehende Daten	163

Anlagen

- A. Ökobilanzergebnisse zur Bauteilvarianten für erhöhte Trennbarkeit von Mineralwolle
- B. Überprüfung von Nachhaltigkeitskriterien nach BNB und DGNB (ohne Ökonomie und Ökologie)
- C. Weiterführende Informationen zu den Proben P001-P160 sowie mit unterschiedlichen Analysemethoden erhaltene Ergebnisse

A Ökobilanzergebnisse zur Bauteilvarianten für erhöhte Trennbarkeit von Mineralwolle

Indikator	Einheit	Herstellung	Entsorgung	Instandhaltung	Gesamt A-C	Recyclingpotential	Gesamt A-D
Außenwand mit WDVS							
GWP	kg CO ₂ -Äqv.	1,87E+00	1,19E-01	3,95E-01	2,39E+00	-2,24E-02	2,36E+00
ODP	kg R11-Äqv.	2,50E-10	1,04E-15	1,32E-12	2,51E-10	-2,62E-15	2,51E-10
POCP	kg Ethen-Äqv.	-2,93E-05	4,88E-05	7,63E-05	9,58E-05	3,91E-06	9,97E-05
AP	kg SO ₂ -Äqv.	2,21E-03	5,48E-04	1,16E-03	3,92E-03	-4,89E-05	3,87E-03
EP	kg PO ₄ -Äqv.	4,44E-04	8,81E-05	1,69E-04	7,02E-04	-9,43E-06	6,93E-04
PE Ges.	MJ	1,68E+01	1,65E+00	5,19E+00	2,37E+01	-3,86E-01	2,33E+01
PENRT	MJ	1,40E+01	1,49E+00	4,33E+00	1,98E+01	-3,03E-01	1,95E+01
PERT	MJ	2,86E+00	1,61E-01	8,63E-01	3,89E+00	-8,31E-02	3,80E+00
Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade							
GWP	kg CO ₂ -Äqv.	2,61E+00	9,11E-02	2,47E-02	2,72E+00	-1,20E-01	2,60E+00
ODP	kg R11-Äqv.	2,49E-10	4,04E-15	3,71E-16	2,49E-10	-1,81E-14	2,49E-10
POCP	kg Ethen-Äqv.	8,58E-05	4,99E-05	1,02E-05	1,46E-04	-1,46E-05	1,31E-04
AP	kg SO ₂ -Äqv.	3,50E-03	5,65E-04	8,67E-05	4,15E-03	-3,59E-04	3,79E-03
EP	kg PO ₄ -Äqv.	5,68E-04	9,05E-05	7,24E-06	6,66E-04	-3,26E-05	6,33E-04
PE Ges.	MJ	3,05E+01	1,67E+00	6,14E-01	3,28E+01	-2,14E+00	3,06E+01
PENRT	MJ	2,61E+01	1,51E+00	5,45E-01	2,82E+01	-1,66E+00	2,65E+01
PERT	MJ	4,38E+00	1,62E-01	6,85E-02	4,61E+00	-4,82E-01	4,12E+00
konventionelles Flachdach							
GWP	kg CO ₂ -Äqv.	2,70E+00	1,02E-01	3,17E-01	3,12E+00	-7,26E-02	3,05E+00
ODP	kg R11-Äqv.	3,93E-14	5,88E-16	2,91E-15	4,28E-14	-1,60E-15	4,12E-14
POCP	kg Ethen-Äqv.	5,77E-04	5,09E-05	9,48E-05	7,23E-04	-6,28E-07	7,22E-04
AP	kg SO ₂ -Äqv.	6,63E-03	5,40E-04	5,77E-04	7,74E-03	-8,96E-05	7,65E-03
EP	kg PO ₄ -Äqv.	9,28E-04	1,16E-04	1,33E-04	1,18E-03	-1,72E-05	1,16E-03
PE Ges.	MJ	3,62E+01	2,11E+00	1,44E+01	5,28E+01	-1,33E+00	5,14E+01
PENRT	MJ	2,91E+01	1,94E+00	1,38E+01	4,48E+01	-1,04E+00	4,38E+01
PERT	MJ	7,20E+00	1,73E-01	5,69E-01	7,94E+00	-2,95E-01	7,65E+00
flach geneigtes Dach							
GWP	kg CO ₂ -Äqv.	-6,11E-01	1,56E+00	4,21E-01	1,37E+00	-9,15E-01	4,55E-01
ODP	kg R11-Äqv.	1,67E-13	2,41E-16	2,13E-15	1,69E-13	-1,04E-12	-8,68E-13
POCP	kg Ethen-Äqv.	2,87E-04	3,59E-06	1,21E-04	4,12E-04	-6,16E-06	4,06E-04
AP	kg SO ₂ -Äqv.	2,98E-03	4,15E-05	1,07E-03	4,09E-03	-3,97E-04	3,69E-03
EP	kg PO ₄ -Äqv.	5,08E-04	5,25E-06	1,04E-04	6,17E-04	-9,96E-05	5,17E-04
PE Ges.	MJ	3,32E+01	-1,64E+01	6,09E+00	2,29E+01	-8,15E+00	1,47E+01
PENRT	MJ	1,29E+01	-2,54E-01	5,45E+00	1,81E+01	-1,34E+01	4,67E+00
PERT	MJ	2,03E+01	-1,62E+01	6,48E-01	4,80E+00	5,28E+00	1,01E+01

Indikator	Einheit	Herstellung	Entsorgung	Instandhaltung	Gesamt A-C	Recycling-potential	Gesamt A-D
Stahlbetondecke mit schwimmendem Zementestrich							
GWP	kg CO2-Äqv.	2,71E+00	9,94E-02	0,00E+00	2,81E+00	-1,82E-02	2,79E+00
ODP	kg R11-Äqv.	1,61E-13	5,73E-16	0,00E+00	1,62E-13	-3,52E-16	1,61E-13
POCP	kg Ethen-Äqv.	5,50E-04	5,47E-05	0,00E+00	6,05E-04	3,96E-06	6,08E-04
AP	kg SO2-Äqv.	4,62E-03	6,22E-04	0,00E+00	5,24E-03	-4,30E-05	5,20E-03
EP	kg PO4-Äqv.	7,15E-04	9,68E-05	0,00E+00	8,12E-04	-8,38E-06	8,04E-04
PE Ges.	MJ	3,40E+01	1,86E+00	0,00E+00	3,58E+01	-3,13E-01	3,55E+01
PENRT	MJ	2,51E+01	1,68E+00	0,00E+00	2,68E+01	-2,43E-01	2,66E+01
PERT	MJ	8,86E+00	1,81E-01	0,00E+00	9,04E+00	-6,94E-02	8,97E+00
Stahlbetondecke mit schwimmendem Trockenestrich (Gipsfaser)							
GWP	kg CO2-Äqv.	2,51E+00	7,27E-02	0,00E+00	2,59E+00	-1,82E-02	2,57E+00
ODP	kg R11-Äqv.	4,83E-14	4,22E-16	0,00E+00	4,88E-14	-3,52E-16	4,84E-14
POCP	kg Ethen-Äqv.	5,37E-04	4,06E-05	0,00E+00	5,77E-04	3,96E-06	5,81E-04
AP	kg SO2-Äqv.	4,46E-03	4,51E-04	0,00E+00	4,91E-03	-4,30E-05	4,87E-03
EP	kg PO4-Äqv.	6,98E-04	7,30E-05	0,00E+00	7,71E-04	-8,38E-06	7,62E-04
PE Ges.	MJ	3,44E+01	1,39E+00	0,00E+00	3,58E+01	-3,13E-01	3,55E+01
PENRT	MJ	2,51E+01	1,26E+00	0,00E+00	2,64E+01	-2,43E-01	2,62E+01
PERT	MJ	9,27E+00	1,31E-01	0,00E+00	9,40E+00	-6,94E-02	9,33E+00
Stahlbetondecke mit schwimmendem Trockenestrich (OSB)							
GWP	kg CO2-Äqv.	2,05E+00	5,54E-01	0,00E+00	2,61E+00	-1,43E-01	2,46E+00
ODP	kg R11-Äqv.	5,13E-14	4,69E-16	0,00E+00	5,18E-14	-7,77E-15	4,40E-14
POCP	kg Ethen-Äqv.	8,29E-04	3,73E-05	0,00E+00	8,66E-04	-1,25E-05	8,54E-04
AP	kg SO2-Äqv.	4,62E-03	4,08E-04	0,00E+00	5,03E-03	-2,42E-04	4,79E-03
EP	kg PO4-Äqv.	7,30E-04	6,84E-05	0,00E+00	7,98E-04	-4,34E-05	7,55E-04
PE Ges.	MJ	4,19E+01	-4,01E+00	0,00E+00	3,79E+01	4,46E-01	3,83E+01
PENRT	MJ	2,70E+01	9,73E-01	0,00E+00	2,80E+01	-3,30E+00	2,47E+01
PERT	MJ	1,49E+01	-4,98E+00	0,00E+00	9,88E+00	3,75E+00	1,36E+01

B Überprüfung von Nachhaltigkeitskriterien nach BNB und DGNB (ohne Ökonomie und Ökologie)

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungs- bereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
2	Soziokulturelle (und funktionale) Qualität							
3	3.1.1/ SOC1.1	Thermischer Komfort	Operative Temperatur im Winter ^{DGNB2}	BNB, DGNB	Ja	Oberflächen- /Lufttemperatur	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	Chemische Zusammensetzung, Faserverhalten und in Bindemittelanteil ändern sich möglicherweise
4			Zugluft im Winter (Draught Risk DR) ^{DGNB2}	BNB, DGNB	Ja (indirekt)	Lufttemperatur	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	siehe Zeile 3
5			Strahlungstemperatur-asymmetrie und Fußbodentemperatur im Winter	BNB, DGNB	Ja	Oberflächen- temperatur	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	siehe Zeile 3
6			Raumluftfeuchte im Winter	BNB, DGNB	Nein, (ggf. indirekt)		Sorptionsverhalten, Diffusionsoffenheit	Einfluss unklar
7			Operative Temperatur im Sommer ^{DGNB2}	BNB, DGNB	Ja (indirekt)	Oberflächen- /Lufttemperatur, U-Wert	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert / Rohdichte	siehe Zeile 3
8				DGNB Shoppingce nter Mietbereich	Ja (indirekt)	Heizleistung flächenbezogen	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	
9			Zugluft im Sommer (Draught Risk DR)	BNB, DGNB	Ja (indirekt)	Lufttemperatur	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	
10			Strahlungstemperatur-asymmetrie und Fußbodentemperatur im Sommer	BNB, DGNB	Ja	Oberflächen- temperatur	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	
11			Raumluftfeuchte im Sommer	BNB, DGNB	Nein siehe RL im Winter			-
12			Agenda 2030 Bonus - Klimaanpassung	DGNB	Prüfen!			
13	3.1.3/ SOC1.2	Innenraumluft- hygiene	Flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Formaldehyd	BNB, DGNB	Ja	Raumluftqualität	Emissionen aus Dämmstoff	Möglicherweise verändert sich das Faserverhalten / Mech. Eigenschaften, so dass mehr / anderes Bindemittel notwendig wird.

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungsbereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
14				DGNB Shoppingcenter, Geschäftshaus, Logistik, Produktion, Verbrauchermarkt, Versammlungsstätten	Ja	Deklaration emissionsarmer Bauprodukte	Emissionen aus Dämmstoff	
15			Kohlendioxidgehalt	BNB	Nein			- (i. A. v. Luftwechsel)
16			Mikrobiologische Situation	BNB	Nein			-
17			Geruchliche Situation (Bewertung zurückgestellt)	BNB	Ja	Raumluftqualität	Emissionen aus Dämmstoff	Möglicherweise verändert sich das Faserverhalten / Mech. Eigenschaften, so dass mehr / anderes Bindemittel notwendig wird. Harnstoffmodifizierte s Bindemittel riecht
18			Agenda 2030 Bonus – Schadstoffreduktion in der Innenraumluft, Gesundheit und Wohlbefinden	DGNB	Nein			
19			Lüftungsrate	DGNB	Nein			
20			3.1.4/ SOC1.3	Akustischer Komfort	Nachhallzeit	BNB	Möglich, vermutlich aber vernachlässigbar	Absorptionseigenschaften der Oberflächen, Lufttemperatur für Leistungsdämpfungskoeffizient in Luft nach DIN EN 12354-6
21			Raumakustikkonzepte	DGNB	Nein			

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungsbereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
22			Einzelbüros und Mehrpersonenbüros bis zu 40 m ²	DGNB	Vermutlich vernachlässigbar	Nachhallzeit		
23			Mehrpersonenbüros größer 40 m ²	DGNB	Vermutlich vernachlässigbar	Nachhallzeit		
24			Räume nach DIN 18041:2016-03 mit besonderen Anforderungen an die Sprachverständlichkeit	DGNB	Vermutlich vernachlässigbar	Nachhallzeit, weitere raumakustische Kenngrößen		
25			Räume mit Empfehlungen nach DIN 18041:2016-03 mit besonderen Anforderungen an die Lärminderung und/oder den raumakustischen Komfort	DGNB	Nein	A/V-Verhältnis im Frequenzbereich 250 – 2.000 Hz		
26			Agenda 2030 Bonus – Stressreduktion, Gesundheit und Wohlbefinden	DGNB	i. A. der Indikatoren 2-5 des DGNB			
27			3.1.5/ SOC1.4	Visueller Komfort	Tageslichtverfügbarkeit Gesamtgebäude (quant.)	BNB, DGNB	Nein	
28	Tageslichtverfügbarkeit ständige Arbeitsplätze (quant.) ^{BNB2}	BNB, DGNB			Nein			-
29	Sichtverbindung nach außen (quant.) ^{BNB2}	BNB, DGNB			Nein			-
30	Blendfreiheit Tageslicht (qual.) ^{BNB1}	BNB, DGNB			Nein			-
31	Blendfreiheit Kunstlicht (quant.)	BNB			Nein			-
32	Kunstlicht	DGNB			Nein			
33	Lichtverteilung (qual.)	BNB			Nein			-
34	Farbwiedergabe (quant.) ^{BNB1}	BNB			Nein			-
35	Farbwiedergabe Tageslicht	DGNB			Nein			
36	Besonnung	DGNB Wohnen, Hotel, Gesundheitsbauten			Nein			
37	Lichtverteilung und Anpassbarkeit der Beleuchtung	BNB Unterrichts- und			Nein			

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungs- bereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
				Laborgebäu- de				
38	3.1.6/ SOC1.5	Einflussnahm- emöglich- keiten durch Nutzer	Lüftung ^{BNB2, DGNB2}	BNB, DGNB	Nein			-
39			Sonnenschutz ^{BNB2}	BNB	Nein			-
40			Blendschutz ^{BNB2}	BNB	Nein			-
41			Sonnenschutz und Blendschutz ^{DGNB2}	DGNB	Nein			
42			Temperaturen während der Heizperiode ^{BNB2, DGNB2}	BNB, DGNB	Nein			-
43			Temperaturen außerhalb der Heizperiode ^{BNB2, DGNB2}	BNB, DGNB	Nein			-
44			Steuerung des Tageslichtes ^{BNB2}	BNB	Nein			-
45			Steuerung des Kunstlichtes ^{BNB2, DGNB2}	BNB, DGNB	Nein			-
46			Bedienfreundlichkeit	BNB	Nein			-
47			Funktionskonzept der Haustechnik	BNB Unterrichts- gebäude	Nein			
48		Innovationsraum	DGNB	Nein				
49	3.1.7/ SOC1.6	Aufenthalts- qualitäten	Anzahl der kommunikationsfördernden Aufenthaltsbereiche und der Sitzmöglichkeiten (quantitativ)	BNB	Nein			-
50			Aufenthaltsqualität der kommunikationsfördernden Bereiche (qualitativ)	BNB	Nein			-
51			Anzahl und Vielfalt Sitzgelegenheiten	BNB Unterrichts- gebäude	Nein			
52			Anzahl und Vielfalt Spiel- und Sportmöglichkeiten	BNB Unterrichts- gebäude	Nein			
53			Zuordnung von Freibereichen zu Innenräumen	BNB Unterrichts- gebäude	Nein			
54			Ausstattungsmerkmale	BNB Unterrichts- gebäude, DGNB	Nein			
55			Kommunikationsfördernde Angebote (Innen)	DGNB	Nein			

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungs- bereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
56			Zusätzliche Angebote für die Nutzer	DGNB	Nein			
57			Familien-, Kinder- und Seniorenfreundlichkeit	DGNB	Nein			
58			Aufenthaltsqualität innere Erschließung	DGNB	Nein			
59			Gestaltungskonzept Außenanlagen	DGNB	Nein			
60			Flächen im Außenbereich	DGNB	Nein			
61	3.1.8/ SOC1.7	Sicherheit	Übersichtliche Wegführungen, Stellplätze, Beleuchtung Wege, Beleuchtung Stellplätze, Technische Sicherheitseinrichtungen, Reduktion von Brandgasrisiken	BNB	Keine Brandgasrisiken - weitere Punkte nicht relevant			-
62			Übersichtliche Wegführungen, Stellplätze, Sicherheitsbereiche, Beleuchtung Wege, Beleuchtung Stellplätze, Beleuchtung Sicherheits- und Gefahrenbereiche, Technische Sicherheitseinrichtungen, Reduktion von Brandgasrisiken	BNB Laborgebäude	Keine Brandgasrisiken - weitere Punkte nicht relevant			
63			Sicherheitsempfinden und Schutz vor Übergriffen: Grad der Einsehbarkeit, Grad der Ausleuchtung, Anzahl technische Sicherheitseinrichtungen, Präventive Schutzmaßnahmen	DGNB	Nein			
64	3.1.9	Innenraum- qualität	Aufenthaltsqualität der Erschließungsflächen	BNB Unterrichts gebäude	Nein			
65			Innere Sichtbeziehungen		Nein			
66			Flexibilität der Raumnutzung		Nein			
67			Aufbewahrungsmöglichkeiten		Nein			
68	3.2.1/ SOC2.1	Barriere- freiheit		BNB, DGNB	Nein			-
69	3.2.4	Zugäng- lichkeit	Grundsätzliche Zugänglichkeit des Gebäudes	BNB	Nein			-
70			Öffnung der Außenanlagen für die Öffentlichkeit	BNB	Nein			
71			Öffnung gebäudeinterner Einrichtungen für die Öffentlichkeit	BNB	Nein			

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungs- bereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
72			Möglichkeit der Anmietung von Räumlichkeiten innerhalb des Gebäudes durch Dritte	BNB	Nein			
73			Nutzungsvielfalt der öffentlich zugänglichen Bereiche innerhalb des Gebäudes	BNB	Nein			
74			Qualitative Merkmale der Zugänglichkeit des Gebäudes	BNB Unterrichts- gebäude	Nein			
75			Nutzungsmerkmale des Gebäudes	BNB Unterrichts- gebäude	Nein			
76			Qualitative Aspekte der Zugänglichkeit der Freiflächen	BNB Unterrichts- gebäude	Nein			
77	3.2.5	Mobilitäts- infrastruktur	Anzahl der Fahrradstellplätze	BNB	Nein			-
78			Anzahl der Lademöglichkeiten und Carsharing-Stellplätze	BNB	Nein			
79			Qualitative Anforderungen an Fahrradstellplätze	BNB	Nein			
80	3.3.1	Gestalterische und städtebau- liche Qualität	Planungswettbewerb	BNB	Nein			-
81			Auszeichnung mit einem Architekturpreis	BNB	Nein			
82			Unabhängiges Expertengremium	BNB	Nein			
83			Sonderfall Mindest-anforderung Grenzwert	BNB	Nein			
84	3.3.2	Kunst am Bau	Mindestanforderung	BNB	Nein			-
85			Bereitstellung von Mitteln im Rahmen der Bauaufgabe	BNB	Nein			
86			Umsetzung des Leitfadens Kunst am Bau	BNB	Nein			
87			Öffentlichkeitsarbeit, Rezeption der Kunst am Bau	BNB	Nein			
88	BNB-AA – V2016 (Außenanlagen)							
89	3.1.1	Aufenthalts- qualitäten	Anzahl der Sitzmöglichkeiten		Nein			
90			Besonnungsdauer der Sitzbereiche		Nein			
91			Ausstattungsmerkmale		Nein			
92	3.2.1		Barrierefreie Stellplätze		Nein			

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungs- bereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
93		Barrierefrei- heit und Orientierung	Barrierefreie Zugänglichkeit		Nein			
94			Barrierefreie Sitzbereiche		Nein			
95			Orientierung		Nein			
96	3.2.2	Fußgänger- und Fahrrad- komfort	Hauptwegebreite		Nein			
97			Beleuchtung		Nein			
98			Anzahl der Fahrradstellplätze		Nein			
99			Qualitative Anforderungen		Nein			
100	3.3.1	Planungswett- bewerb und gestalterische Qualität	Planungswettbewerb (qualitativ)		Nein			
101			Alternativnachweis		Nein			
102	3.3.2	Umgang mit Infrastruktur- einrichtun- gen	Gestalterische Anpassung und Einbindung von Infrastruktureinrichtungen (qualitativ)		Nein			
103			Organisation und Lage von Infrastruktur (qualitativ)		Nein			
104	Technische Qualität							
105	4.1.1/ TEC1.2	Schallschutz	Luftschallschutz gegenüber Außenlärm <small>BNB2</small>	BNB, DGNB	Ja	Schalldämmmaß	Dynamische Steifigkeit	mechanische Eigenschaften könnten sich verändern
106			Luftschallschutz gegenüber Arbeitsräumen im eigenen und fremden Bereich <small>BNB2, DGNB2</small>	BNB, DGNB	Ja	Schalldämmmaß	Dynamische Steifigkeit	mechanische Eigenschaften könnten sich verändern
107			Trittschallschutz gegenüber Arbeitsräumen im eigenen und fremden Bereich <small>BNB2</small>	BNB, DGNB	Ja	Schallpegel	Dynamische Steifigkeit	mechanische Eigenschaften könnten sich verändern
108			Schallschutz gegenüber haustechnischen Anlagen <small>BNB2</small>	BNB, DGNB	Ja		Dynamische Steifigkeit	mechanische Eigenschaften könnten sich verändern
109			Schallschutz Geschosshäuser	DGNB	Ja (Einhaltung DIN 4109 und DEGA			

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungs- bereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
					Schallschutz- ausweis)			
110			Schallschutz bei besonderen Bauwerken	DGNB Versammlungs-stätten Typ II	Nein (nur Konzept)			
111	4.1.2/ TEC1.3	Wärme- und Tauwasser- schutz (Qualität der Gebäude- hülle)	Bauteilbezogene mittlere Wärmedurchgangskoeffizienten	BNB, DGNB	Ja	Wärmestrom	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	Technische Eigenschaften
112			Höchstwert des spezifischen Transmissionswärmeverlusts	DGNB Wohnen	Ja	Wärmestrom	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	Technische Eigenschaften
113			Wärmebrückenzuschlag	BNB, DGNB	Ja	Wärmestrom	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	Technische Eigenschaften
114			Klassen der Luftdurchlässigkeit	BNB, DGNB	Nein			-
115			Tauwassermenge innerhalb der Konstruktion	BNB	Ja	Wärmestrom	Wärmeleitfähigkeit / U-Wert	Technische Eigenschaften
116			Luftwechsel	BNB, DGNB	Nein			-
117			Sonneneintragskennwert	BNB	Nein			-
118			Sommerlicher Wärmeschutz: Vereinfachtes Verfahren und Simulation	DGNB	Nein (allenfalls indirekt in Simulation)	speicherfähige Masse	Rohdichte	Ggf. Anpassung der Zerkleinerung notwendig oder höhere Bindemittelanteil, unreinere Glasschmelze
119			Agenda 2030 Bonus - Klimaanpassung	DGNB	Nein			
120			4.1.3	Reinigung und Instand- haltungs- freundlichkeit	Tragkonstruktion	BNB	Nein	
121	Nichttragende Konstruktion außen, inkl. Fenster, Außentüren	BNB			Nein			-
122	Nichttragende Konstruktion innen	BNB			Nein			-
123	TEC1.5	Reinigungs- freundlichkeit	Zugänglichkeit der Außenglasflächen	DGNB	Nein			
124			Außen- und Innenbauteile	DGNB	Nein			
125			Bodenbelag	DGNB	Nein			
126			Schmutzfangzone	DGNB	Nein			
127			Hindernisfreier Grundriss	DGNB	Nein			
128			Oberflächen	DGNB	Nein			
129			Konzept zur Sicherstellung der Reinigungsfreundlichkeit	DGNB	Nein			

	Abk. [BNB/DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungsbereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
130	4.1.4	Rückbau, Trennung und Verwertung		BNB	Ja	Verwertbarkeit	Dämmstoff ist nun recyclingfähig	
131	TEC1.6	Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit	Recyclingfreundlichkeit	DGNB	Ja	Verwertbarkeit	Dämmstoff ist nun recyclingfähig	
132			Rückbaufreundlichkeit	DGNB	Nein			
133			Rückbaubarkeit, Umbaubarkeit und Recycling-freundlichkeit in der Planung	DGNB	Nein			
134	4.1.5	Widerstandsfähigkeit gegen Naturgefahren		BNB	Nein			
135	4.1.6	Bedienungs- und Instandhaltungsfreundlichkeit der TGA		BNB	Nein			-
136	TEC1.4	Einsatz und Integration der Gebäudetechnik	Passive Systeme	DGNB	Nein			
137			Anpassbarkeit der Verteilung auf Betriebstemperaturen für eine Einbindung von regenerativen Energien	DGNB	Nein			
138			Zugänglichkeit der TGA	DGNB	Nein			
139			Integrierte Systeme	DGNB	Nein			
140			Agenda 2030 Boni – Nutzung erneuerbarer Energieträger und Energieerzeugung	DGNB	Nein			
141	4.1.7	Systemqualität der TGA	u. a. Wärmedämmung der Warmwasserleitungen, Wärmedämmung der Leitungen zur Wärmeversorgung, Dämmung von Armaturen/Abgängen/etc. für Kälteerzeugung	BNB Laborgebäude	ja	Erfüllung der Dämmstandards	Wärmeleitfähigkeit	Sofern WLГ 035 nicht erreicht werden kann, ggf. dickere Dämmung notwendig.
142	TEC1.7	Immissionsschutz	Lärm-Immissionen - Immissionsrichtwerte	DGNB	Nein			
143			Lichtverschmutzung	DGNB	Nein			
144	TEC3.1	Mobilitätsinfrastruktur		DGNB	Nein			

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungsbereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
145	BNB-AA – V2016 (Außenanlagen)							
146	4.1.1	Pflege und Unterhalt	Instandhaltungsfreundlichkeit von technischen Anlagen		Nein			
147			Revisionierbarkeit von Bauteilen und Materialien		Nein			
148			Bewirtschaftung von Außenanlagen		Nein			
149	4.1.2	Wiederverwendung und Recycling	Wiederverwendung von Materialien in der Bauphase – befestigte Flächen, KG 520 (Deckschichten und Oberbau)		Nein			
150			Verwendung von güteüberwachten recycelten Materialien in der Bauphase - befestigte Flächen und Dachbeläge, KG 520 und KG 576 (Deckschichten und Oberbau, Substrate)		Nein			
151			Wiederverwendungs- und Recyclingpotenzial der verbauten Materialien in der Rückbauphase		Nein			
152	4.1.3	Nachhaltige Materialien und Bauweisen	Schwachstellen schützende Maßnahmen		Nein			
153			Ressourcenschonende Materialien und nachhaltige Bauweisen		Nein			
154	Prozessqualität							
155	5.1.1 / PRO1.1	Projektvorbereitung		BNB, DGNB	Nein			-
156	5.1.2	Integrale Planung		BNB	Nein			-
157	5.1.3	Komplexität und Optimierung der Planung		BNB	Nein			-
158	5.1.4	Ausschreibung und Vergabe		BNB	Nein			-
159	5.1.5	Voraussetzungen für eine optimale Bewirtschaftung		BNB	Nein			-

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungs- bereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
160	PRO1.5	Dokumentati- on für eine nachhaltige Bewirtschaf- tung		DGNB	Nein			
161	5.2.1 / PRO2.1	Baustelle/Bau prozess		BNB, DGNB	Nein			-
162	5.2.2 / PRO2.2	Qualitätssiche - rung d. Bauaus- führung		BNB, DGNB	Nein			-
163	5.2.3 / PRO2.3	Systematisch. Inbetrieb- nahme		BNB, DGNB	Nein			-
164	PRO1.4	Sicherung der Nach- haltigkeit- saspekte in Ausschrei- bung und Vergabe		DGNB	Nein			
165	PRO1.6	Verfahren zur städtebau- lichen und gestalte- rischen Konzeption		DGNB	Nein			
166	PRO2.4	Nutzerkom- munikation		DGNB	Nein			
167	PRO2.5	FM-gerechte Planung		DGNB	Nein			
168	BNB-AA – V2016 (Außenanlagen)							
169	5.1.1	Projektvorbe- reitung und Bestands- aufnahme			Nein			
170	5.1.3	Integration nachhaltiger			Nein			

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungs- bereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
		Aspekte in Planung und Ausschreibung						
171	5.3.1	Bewirtschaftungsqualität von Außenanlagen			Nein			
172	Standortqualität							
173	6.1.1	Risiken am Mikrostandort	Risiken aus Man-Made-Hazards (Unfälle)	BNB	Nein			-
174			Risiken aus Wetter und Natur (Erdbeben, Lawinen, Sturm, Hochwasser)	BNB	Nein			-
175	6.1.2	Verhältnisse am Mikrostandort	Außenluftqualität	BNB	Nein			-
176			Außenlärmpegel	BNB	Nein			-
177			Baugrundverhältnisse, Bodenbelastungen	BNB	Nein			-
178			Elektromagnetische Felder	BNB	Nein			-
179			Vorkommen von Radon	BNB	Nein			-
180			Stadt- und Landschaftsbild / Sichtbeziehungen	BNB	Nein			-
181	SITE1.1	Mikrostandort	Erdbeben, Vulkanausbruch, Lawinen, Sturm, Hochwasser, Starkregen, Hagel, Erdbeben/Bodensenkung, Sturmflut/Tsunami, Besondere Klimaextreme, Waldbrände, Luftqualität, Außenlärm, Radon	DGNB	Nein			
182			Agenda 2030 Bonus – zukunftsgerichtete Klimafolgenrisikoanalyse und Anpassungsmaßnahmen	DGNB	Nein			
183	6.1.3	Quartiersmerkmale		BNB	Nein			-
184	SITE1.2	Ausstrahlung und Einfluss auf das Quartier		DGNB	Nein			
185	6.1.4 / SITE1.3	Verkehrs- anbindung		BNB, DGNB	Nein			-

	Abk. [BNB/ DGNB]	Kriterium	Indikator/en	Geltungsbereich	Einfluss durch Dämmstoff	Einfluss auf	Beeinflussende Eigenschaft des Dämmstoffs	Welcher Einfluss über Recycling zu erwarten?
186	6.1.5 / SITE1.4	Nähe zu nutzungsrelevanten Einrichtungen		BNB, DGNB	Nein			-
187	6.1.6	Anliegende Medien / Erschließung		BNB	Nein			-
188	BNB-AA – V2016 (Außenanlagen)							
189	6.1.1	Verhältnisse und Risiken am Mikrostandort			Nein			
190	6.1.2	Angebotsvielfalt an Freiraumtypen			Nein			
191	6.1.3	Einbindung und Zugänglichkeit			Nein			
	¹ Bei mindestens einem anderen Gebäudetyp (als Verwaltungs- und Bürogebäude) gilt das Teilkriterium für andere ausgewählte Raumarten. Die Anforderungen der Gebäudetypen sind ggf. anders. Der Einfluss des Teilkriteriums bleibt gleich. ² Bei mindestens einem anderen Gebäudetyp (als Verwaltungs- und Bürogebäude) gilt das Teilkriterium für andere ausgewählte Raumarten. In Abhängigkeit der Raumart eines Gebäudetyps sind die Anforderungen unterschiedlich. Der Einfluss des Teilkriteriums bleibt gleich.							

C Weiterführende Informationen zu den Proben P001-P160 sowie mit unterschiedlichen Analysemethoden erhaltene Ergebnisse

Tabelle 33

Weiterführende Informationen zu den Proben P001-P161: Farbe, Homogenität, Dichte, Beschichtung (1: vorhanden, 0: nicht vorhanden)

Probe	Farbe	Homogenität	Dichte	Glühverlust	Beschichtung
P041	gelb	inhomogen	gering	10,98	0
P042	orange	inhomogen	gering-mittel	10,62	0
P043	grünbraun	homogen	gering	n.a.	1
P044	weiß	homogen	gering	2,63	0
P045	braun	inhomogen	gering	10,65	1
P046	braun	inhomogen	gering	6,98	0
P047	gelb	homogen	gering-mittel	7,56	1
P048	braungrün	homogen	gering	1,69	0
P049	braungrün	homogen	gering	2,06	1
P050	graugrün	homogen	gering	0,21	0
P051	braungrün	homogen	gering-mittel	3,41	1
P052	gelb	inhomogen	gering	7,85	0
P053	grüngrau	inhomogen	gering	1,76	0
P054	orange hell	inhomogen	gering	8,24	1
P055	gelb	homogen	gering	9,87	0
P056	orangegrau	inhomogen	gering	7,56	0
P057	hellorange	leicht inhomogen	fest	9,27	1
P058	hellgelb	inhomogen	gering	n.a.	0
P059	graugrün	homogen	gering	3,98	0
P060	gelb	sehr inhomogen	gering	5,51	1
P061	gelb	homogen	gering-mittel	11,77	1
P062	braun	sehr inhomogen	gering	11,17	1
P063	gelb	leicht inhomogen	gering	n.a.	0
P064	graugrün	homogen	gering	2,02	0
P065	grau	homogen	gering	n.a.	0
P066	gelb	homogen	gering-mittel	7,61	0
P067	gelb	homogen	gering-mittel	10,82	0
P068	graugrün	inhomogen	gering mittel	3,08	0
P069	gelb	leicht inhomogen	gering mittel	10,59	0
P070	gelb	inhomogen	gering	10,71	0
P071	grau grün	homogen	hoch	3,22	0
P072	braun	homogen	gering	11,91	0
P073	gelb	homogen	gering	7,45	0
P074	hellgrau	homogen	gering	1,09	0
P075	gelb	leicht inhomogen	gering	8,29	0
P076	braungrau	leicht inhomogen	mittel-fest	7,22	1
P077	gelb	leicht inhomogen	gering	9,12	1
P078	grau	homogen	gering	0,68	0
P079	graugrün	homogen	fest	5,82	1
P080	braungrau	homogen	fest	2,43	0
P081	braungrau	leicht inhomogen	fest	3,42	0
P082	braungrau	leicht inhomogen	fest	n.a.	1
P083	braungrau	homogen	fest	2,13	0
P084	braungrau	homogen	fest	6,72	1
P085	braungrau	homogen	fest	2,84	0
P086	braungrau	homogen	fest	4,25	0
P087	braungrau	homogen	mittel-fest	4,74	1
P088	braungrau	homogen	mittel fest	3,13	0
P089	braungrau	homogen	mittel	3,21	0
P090	braungrau	homogen	w weich	2,93	0

Probe	Farbe	Homogenität	Dichte	Glühverlust	Beschichtung
P091	braungrau	homogen	fest	5,81	1
P092	braungrau	homogen	fest	4,35	1
P093	braungrau	homogen	w eich - mittel	2,16	0
P094	braungrau	homogen	fest	4,04	1
P095	braungrau	homogen	fest	2,68	0
P096	braungrau	homogen	gering	2,93	1
P097	braungrau	homogen	fest	3,92	1
P098	braungrau	homogen	w eich	1,86	0
P099	braungrau	homogen	w eich	2,44	0
P100	braungrau	homogen	fest	4,4	1
P101	braungrau	homogen	fest	3,49	0
P102	braungrau	homogen	mittel	3,35	0
P103	braungrau	homogen	fest - mittel	3,54	0
P104	braungrau	homogen	fest	3,27	0
P105	braungrau	homogen	fest	3,65	0
P106	braungrau	homogen	fest mittel	3,8	0
P107	braungrau	homogen	fest	5,44	1
P108	braungrau	homogen	mittel fest	4,33	1
P109	braungrau	homogen	fest	3,22	0
P110	braungrau	homogen	fest	4,23	1
P111	braungrau	leicht inhomogen	w eich	3,9	1
P112	gelbgrün	inhomogen	mittelfest	4,64	0
P113	gelbgrün	inhomogen	mittelfest	4,8	0
P114	gelb	homogen	w eich-mittel	8,19	0
P115	hellgrau	homogen	w eich	0,67	0
P116	weiß	homogen	w eich	1,76	0
P117	gelb	homogen	mittel	n. a.	0
P118	weiß	homogen	w eich	3,01	0
P119	weiß	homogen	w eich	8,27	0
P120	braun	homogen	mittel	1,59	0
P121	hellbraun	homogen	w eich	6,26	0
P122	braun	inhomogen	w eich	5,9	0
P123	gelb	homogen	w eich	8,27	0
P124	grünbraun	homogen	fest	2,61	1
P125	braungrün	homoge	w eich	1,2	0
P126	olivegrün	homogen	w eich	0,07	0
P127	hellgrau	homogen	w eich	-0,33	0
P128	olivegrün	homogen	w eich	-0,28	0
P129	weiß	homogen	w eich	5,84	0
P130	gelb	homogen	mittel	10,58	0
P131	gelb	homogen	mittel	9,83	0
P132	grau	homogen	w eich	5,87	0
P133	orange	inhomogen	w eich	0,46	0
P134	gelb	homogen	w eich	7,64	0
P135	grau	homogen	w eich	4,17	0
P136	gelb	homogen	w eich	0,31	0
P137	blau	inhomogen	mittel	8,97	0
P138	braungrau	homogen	mittel	0,73	0
P139	weiß	homogen	mittel	0,87	0
P140	gelb	homogen	w eich	1,69	0

Probe	Farbe	Homogenität	Dichte	Glühverlust	Beschichtung
P141	gelb	homogen	w eich	7,89	0
P142	gelb	homogen	w eich	7,95	0
P143	gelb	homogen	w eich-mittel	6,94	0
P144	gelb	homogen	w eich-mittel	9,33	0
P145	gelb	leicht inhomogen	w eich	7,74	0
P146	hellgelb	homogen	w eich	9,73	0
P147	braun	homogen	w eich	4,99	1
P148	orange braun	homogen	hart	0,96	1
P149	w eiß	homogen	w eich	4,04	0
P150	braungrau	homogen	w eich	0,72	0
P151	braun	leicht inhomogen	w eich	-0,14	1
P152	gelb	homogen	w eich	8,13	0
P153	hellgrau	homogen	hart, haarig	6,8	0
P154	braungrün	homogen	w eich	2,75	0
P155	w eiß-gelb	inhomogen	w eich	n.a.	0
P156	braungrün	homogen	w eich	0,26	0
P157	gelb	homogen	w eich	7,38	1
P158	hellgrau	homogen	hart	2,2	0
P159	graugrün	homogen	w eich	2,97	0
P160	graugrün	homogen	w eich	1,86	1
P161	graugrün	homogen	fest	9,31	0

Quelle: Tabelle TU/BAM

Tabelle 34

Übersicht über zur Verfügung stehende Daten

a) Übersicht über die verfügbare Produktinformationen der 161 durch die TU Berlin zur Verfügung gestellten Mineralwollen (Material: Glaswolle – GW, Steinwolle -SW, 0 – unbestimmt, Alter: „alt“ oder „neu“) sowie die Ergebnisse der eingesetzten Analysemethoden zur Materialcharakterisierung: RFA-Referenzuntersuchungen, NIR-Spektroskopie mit den Geräten „AURA“ und „Matrix-F“, sowie mittel RFA-Handgerät Niton™

Probe 1-161	Produktinformation		RFA	NIR	RFA
	Material	Alter	Referenz	AURA	„Hand“
P001	SW	neu	SW	SW	SW
P002	GW		GW	GW	GW
P003			SW	SW	SW
P004			GW	GW	GW
P005			SW	SW	SW
P006			SW	SW	SW
P007			GW	GW	GW
P008			SW	SW	SW
P009			(SW)	SW	SW
P010	GW	neu	GW	GW	GW
P011	Mix	neu	SW	SW	SW
P012	GW	neu	GW	GW	GW
P013	Mix	neu	SW	SW	SW
P014	Mix	neu	SW	SW	SW
P015	SW	neu	SW	SW	SW
P016	SW	neu	SW	SW	SW
P017	SW	neu	SW	SW	SW
P018	GW	neu	GW	GW	GW
P019		alt	SW	SW	SW
P020		alt	SW	SW	SW
P021		alt	SW	SW	SW
P022		neu	GW	GW	GW
P023		neu	GW	GW	GW
P024	GW	neu	GW	GW	GW
P025		neu	GW	GW	GW
P026		neu	GW	GW	GW
P027	SW	neu	SW	SW	SW
P028		neu	GW	GW	GW
P029		neu	GW	GW	GW
P030		neu	GW	GW	GW
P031		alt	SW	SW	SW
P032			SW	SW	SW
P033			SW	SW	SW
P034			SW	SW	SW
P035			SW	SW	SW

Probe 1-161	Produktinformation		RFA	NIR	RFA
	Material	Alter	Referenz	AURA	„Hand“
P036			SW	SW	SW
P037			SW	SW	SW
P038			SW	SW	SW
P039			SW	SW	(SW)
P040			SW	SW	SW
P041			GW	GW	GW
P042			GW	GW	GW
P043			SW	SW	n.d.
P044			GW	GW	GW
P045	GW	neu	GW	GW	GW
P046	GW	neu	GW	GW	GW
P047			GW	GW	GW
P048			SW	SW	SW
P049			SW	SW	n.d.
P050			SW	SW	SW
P051			SW	SW	SW
P052			GW	GW	GW
P053			SW	SW	SW
P054			GW	GW	GW
P055			GW	GW	GW
P056			SW	SW	SW
P057			GW	GW	GW
P058			GW	GW	GW
P059			SW	SW	SW
P060			GW	GW	GW
P061		alt	GW	GW	GW
P062			GW	GW	GW
P063			GW	GW	GW
P064			SW	SW	SW
P065			SW	SW	SW
P066			GW	GW	GW
P067			GW	GW	GW
P068			SW	SW	SW
P069			GW	GW	GW
P070			GW	GW	GW

Probe 1-161	Produktinformation		RFA	NIR	RFA
	Material	Alter	Referenz	AURA	„Hand“
P071			SW	SW	SW
P072			GW	GW	GW
P073			GW	GW	GW
P074			unsicher	SW	unsicher
P075			GW	GW	GW
P076			SW	SW	SW
P077			n.d.	GW	GW
P078			SW	SW	SW
P079			unsicher	SW	SW
P080	Rockw ool		n.d.	SW	SW
P081	Rockw ool		SW	SW	SW
P082	Rockw ool		n.d.	SW	SW
P083	Rockw ool?		SW	SW	SW
P084			SW	SW	SW
P085			SW	SW	SW
P086	Rockw ool		SW	SW	SW
P087	Rockw ool		SW	SW	SW
P088	Rockw ool		SW	SW	SW
P089	Rockw ool		SW	SW	SW
P090	Rockw ool		SW	SW	SW
P091	Rockw ool?		SW	SW	SW
P092	Rockw ool		SW	SW	SW
P093	Rockw ool		SW	SW	SW
P094	Rockw ool		SW	SW	SW
P095	Rockw ool		SW	SW	SW
P096	Rockw ool		SW	SW	SW
P097	Rockw ool		SW	SW	SW
P098	Rockw ool		SW	SW	SW
P099	Rockw ool		SW	SW	SW
P100	Rockw ool		SW	SW	SW
P101	Rockw ool		n.d.	SW	SW
P102	Rockw ool		SW	SW	SW
P103	Rockw ool		SW	SW	SW
P104	Rockw ool		SW	SW	SW
P105	Rockw ool		SW	SW	SW

Probe 1-161	Produktinformation		RFA	NIR	RFA
	Material	Alter	Referenz	AURA	„Hand“
P106	Rockw ool		SW	SW	SW
P107	Rockw ool		SW	SW	SW
P108	Rockw ool		SW	SW	SW
P109	Rockw ool		SW	SW	SW
P110	Rockw ool		SW	SW	SW
P111	Rockw ool		SW	SW	SW
P112			SW	SW	SW
P113			SW	SW	SW
P114			GW	GW	GW
P115			SW	GW	SW
P116			SW	SW	SW
P117			n.d.	GW	GW
P118			GW	GW	GW
P119			GW	GW	GW
P120			SW	SW	SW
P121			GW	GW	GW
P122			GW	GW	GW
P123			GW	GW	GW
P124			SW	SW	SW
P125			SW	SW	SW
P126			SW	SW	SW
P127			SW	GW	SW
P128			SW	SW	SW
P129			GW	GW	GW
P130			GW	GW	GW
P131			GW	GW	GW
P132			SW	SW	n.d.
P133			GW	GW	GW
P134			GW	GW	GW
P135			SW	SW	SW
P136			GW	GW	GW
P137			GW	GW	n.d.
P138			SW	SW	SW
P139			GW	GW	GW

Probe 1-161	Produktinformation		RFA	NIR	RFA
	Material	Alter	Referenz	AURA	„Hand“
P140			GW	GW	GW
P141			GW	GW	GW
P142	GW		GW	GW	GW
P143	GW		GW	GW	GW
P144			GW	GW	GW
P145			GW	GW	GW
P146			GW	GW	GW
P147			SW	SW	SW
P148			SW	SW	SW
P149			unsicher	SW	unsicher
P150			SW	SW	SW
P151			GW	GW	GW
P152			GW	GW	GW
P153			GW	keine Mineralwolle	unsicher
P154			SW	SW	SW
P155			GW	keine Mineralwolle	GW
P156			SW	SW	SW
P157			GW	GW	GW
P158			GW	GW	GW
P159			SW	SW	SW
P160			SW	SW	SW
P161			SW	SW	SW

Quelle: Tabelle TU Berlin/BAM

Tabelle 34

b) Übersicht zu W1-W7 durch die TU Berlin zur Untersuchung überlassenen Mineralwollen

Probe W	Produktinformation		RFA Referenz	NIR AURA	RFA „Hand“
	Material	Alter			
W1A-1			SW	SW	n.d.
W1A-2			GW	GW	n.d.
W2A		neu?	SW	SW	n.d.
W3A			(SW)	SW/unsicher	n.d.
W4A			(SW)	SW/unsicher	n.d.
W5A-1			n.d.	SW	n.d.
W5A-2			(GW)	GW	n.d.
W6A-1			GW	GW	n.d.
W6A-2			GW	GW	n.d.
W6A-3			GW	GW	n.d.
W7A		alt?	SW	SW	n.d.

Quelle: Tabelle TU Berlin/BAM

Tabelle 34

c) Übersicht zu Mineralwollen mit bekannten (Produkt)informationen; Proben DP3, FSP2, KD2 und TS15 wurden freundlicherweise durch Herrn DR. J. Trappmann im Juni 2022 zur Verfügung gestellt, zwei „alte“ Steinwollen aus DDR-Produktion durch den örtlichen Dachdecker (Bungalow, Dachboden).

Probe	Produktinformation		RFA Referenz	NIR AURA	RFA „Hand“
	Material	Alter			
DP3	SW		n.d.	SW	n.d.
FSP2	GW		n.d.	GW	n.d.
KD2	GW		n.d.	GW	n.d.
TS15	GW		n.d.	GW	n.d.
Bungalow	SW	alt	n.d.	SW	n.d.
Dachboden	SW	alt	n.d.	SW	n.d.

Quelle: Tabelle TU Berlin/BAM