



HINDERNISSE IM MINERALWOLLERECYCLING ERGEBNISSE AUS DEM FORSCHUNGSPROJEKT REMELTING MIWO

Tanja Broszies, Prof. Frank U. Vogdt

Technische Universität Berlin, Deutschland, E-Mail: bauphysik@tu-berlin.de

Kurzfassung

Mineralwolle ist einer der verbreitetsten Dämmstoffe im Bauwesen. Aktuell wird sie fast ausschließlich deponiert, obwohl ein Recycling technisch möglich ist. Gründe dafür sind insbesondere die unbekannte Mineralwollchemie und die anhaftenden Störstoffe aus dem Rückbau. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Remelting Miwo“ konnten alle wichtigen Störstoffe für ein closed-loop Recycling identifiziert und mit Grenzwerten versehen werden. Tests an Proben eines Wertstoffhofs zeigen, dass diese Grenzwerte regelmäßig überschritten werden. Ein theoretisches Konzept zur Aufbereitung rückgebauter Mineralwolle befindet sich aktuell in der Testphase. Mittels Nahinfrarotspektroskopie wurde eine Möglichkeit gefunden Glas- und Steinwolle zerstörungsfrei schnell zu differenzieren.

Mineral wool is a widely used insulation material in the construction industry. At present, it is almost exclusively landfilled, although recycling is technically possible. The main reasons for this are the unknown mineral wool chemistry and the adhering impurities from deconstruction. As part of the "Remelting Miwo" research project, all important contaminants for closed-loop recycling were identified and assigned limit values. Tests on deconstructed samples show that these limit values are regularly exceeded. A theoretical concept for mineral wool processing is currently in the test phase. Using near-infrared spectroscopy, it is possible to differentiate between glass wool and rock wool quickly and non-destructively.

Einleitung

Wachsende Anforderungen an Wärme-, Brand- und Schallschutz im Neu- sowie Altbau führen zu einem stetig ansteigenden Dämmstoffeinsatz im Bauwesen. Mineralwolle hat dabei einen Marktanteil von ca. 50 Prozent (Deutsche Energie-Agentur, 2022). Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Remelting Miwo“ (Broszies et al, 2023) wurde vom Team der Technischen Universität Berlin analysiert, ob das Recycling von Mineralwolle unter Nutzung des Schmelzwannenverfahrens im volumenrelevanten

Umfang wirtschaftlich sowie ökologisch sinnvoll und umsetzbar ist. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die technische Umsetzbarkeit des Recyclings und Störstoffe gelegt.

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 (BBSR, 2011) und grundsätzlich in Glas- und Steinwolle unterschieden wird. Während für Steinwolle (SW) vor allem Natursteine u.a. Basalt, Diabas oder Dolomit verwendet werden, sind es für Glaswollen (GW) Altglas und Glasrohstoffe wie Quarzsand, Feldspat, Kalk und weitere. Aus den Rohstoffen ergeben sich typische chemische Oxidzusammensetzungen. Mineralwolle wird als Faserstoff hinsichtlich einer möglichen Krebsgefährdung als potentiell karzinogen eingestuft (EU-VO Nr.1272/2008). Aus diesem Grund muss die gesundheitliche Unbedenklichkeit für Mineralwolle vor Inverkehrbringen nachgewiesen werden. Der Nachweis der Unbedenklichkeit eines spezifischen Mineralwolle-Produktes erfolgt in Deutschland über die Güte- und Prüfbestimmungen der Gütegemeinschaft e.V. anhand biologischer Tests, die dann eine definierte chemische Zusammensetzung der Faser freizeichnen (GGM, 2021). Eine Einhaltung dieser Zusammensetzung ist für Mineralwollhersteller daher von großer Bedeutung und bei einem möglichen Recyclingprozess zu berücksichtigen. Produktfremde Mineralwollen und Störstoffe beeinflussen die Oxidzusammensetzung des Endprodukts und müssen daher möglichst bekannt sein. Geringfügige Mengen an Störstoffen haben zudem großen Einfluss auf die Anlagentechnik.

Technische Anforderungen an den Recyclingprozess und Störstoffe

Die Herstellung von Glas- und Steinwolle verläuft in groben Schritten identisch: Gemenge der Rohstoffe, Schmelze, Zerkleinerung der Glasschmelze, Bindemittelauftrag, Aushärtung und Zuschnitt. Im

Detail sind jedoch einige Spezifikationen zu beachten, die auch dazu führen, dass Glas- und Steinwollen bei einem späteren Recycling nicht zusammengeführt werden können. Im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes wurde das Schmelzwannenverfahren begutachtet, welches typischerweise für Glaswollen verwendet wird, aber auch zur Erzeugung von Steinwollen geeignet ist. Die genaue Auseinandersetzung mit dem Prozess ist notwendig, da sich hieraus bestimmte Anforderungen an die einzubringende Rohstoffqualität ergeben. Als technische Störstoffe wurden alle Stoffe erfasst, die einen negativen Einfluss auf die chemische Zusammensetzung, die Anlagentechnik, Emissionsgrenzwerte oder Gesundheit haben. Die identifizierten Störstoffe werden nachfolgend beschrieben.

Nichteisen- sowie Eisenmetalle schmelzen und/oder reagieren bei den Temperaturen in der Schmelzwanne. Folgen daraus sind Schäden an der Schmelzwanne oder eine veränderte Produktchemie. Im Bauwesen treten Metalle beispielsweise in Form von Bewehrungsseisen, Kupferrohren, Edelstahlkonsolen, Schrauben und Nägeln, aber auch als Aluminiumkaschierungen der Mineralwolle selbst auf.

Keramik, Steine und Porzellane (KSP) schmelzen nicht oder für den Prozess zu langsam in der Glasschmelze auf (Martens et al, 2016). 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 sind und die chemische Zusammensetzung möglichst der Zielchemie entspricht. Für die üblichen Verwendungen der Mineralwollämmstoffe im Bauwesen sind mit folgenden KSP-Fractionen zu rechnen: mineralischer Bauschutt, mineralische Putzanhaftungen und Sanitärkeramikbruch. Mineralwolle kann entweder durch Beschichtungen oder durch unsaubere Stoffselektierung im Rückbau mit diesen Materialien in Kontakt kommen. Glaskeramik schmilzt ebenfalls nicht ausreichend bei den in der Schmelzwanne herrschenden Temperaturen auf. Visuell können viele Glaskeramiken meist weder vom menschlichen Auge noch von optischen Geräten zweifelsfrei erkannt werden (Ostermann et al, 2011)

Der in organischen Stoffen enthaltene Kohlenstoff wirkt sich negativ auf den Schmelzprozess aus. Ein Eintrag in den Kupolofen, welcher typischerweise für Steinwollen verwendet wird, ist möglich, jedoch kann die Schmelze das Feuerfestmaterial des Ofens stärker angreifen. In den Glasschmelzwannen sollte der Kohlenstoffanteil möglichst vollständig reduziert werden (Fleckenstein et al, 1994), 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. Die organischen Stoffe wirken wie ein Reduktionsmittel im Schmelz- und Läuterungsprozess der Glasschmelze (Remi et al, 2008).

Wasser in zu hohen Mengen wirkt sich aufgrund der Verdunstungsenthalpie ungünstig auf den Schmelzprozess aus und erhöht den Energiebedarf in der Schmelzwanne (Remi et al, 2008).

Sulfate und Chloride können zu Bewehrungskorrosion oder treibenden Prozessen führen, die Betone angreifen. Da Dämmstoffe beispielsweise als Vorsatzkonstruktion mit Betonen in Kontakt stehen, stellt auch ein entsprechender Sulfat- oder Chloridgehalt einen Störstoff dar. 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.

Generell stellen auch alle bautypischen Schadstoffe, die auf einer Abbruchbaustelle zu erwarten sind, Störstoffe dar, die aus gesundheitsschutztechnischen Gründen ein Recycling der Mineralfasern grundsätzlich ausschließen. Interessanterweise sind ausgerechnet „alte KMF“, die aufgrund ihrer lungengängigen Fasergeometrie (WHO-Fasern) und ihrer Oxidzusammensetzung als potentiell karzinogen eingestuft werden, durch das erneute Aufschmelzen in einem closed-loop Recycling von einem Schadstoff in einen potentiellen Sekundärrohstoff umwandelbar (Broszies et al, 2023).

Aus Gründen der Oxidzusammensetzung und der unterschiedlichen Anlagenspezifikationen wie Schmelztemperatur und Zerfaserungsdüsen dürfen Glaswollen nicht in den Steinwollprozess gelangen und umgekehrt (Broszies et al, 2023). Basierend auf Vorarbeiten aus dem Projekt LifeCycleKMF (Vogdt et al, 2019) wurde die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) als mögliches Verfahren zur Unterscheidung von GW und SW identifiziert (Paul et al, 2020).

Möglichkeiten der Aufbereitung

Es wurde festgestellt, dass es große Schnittmengen in der Störstoffdefinition von Mineralwolle zur Behälterglasindustrie gibt. Angelehnt an die dortigen Aufbereitungsanlagen wurde auf dieser Grundlage ein theoretisches Konzept entwickelt, mit dessen Hilfe Störstoffe von Mineralwolle separiert werden können (vgl. Abb. 1). Ferromagnetische Störstoffe wie bspw. Eisenwerkstoffe und niedrig- bis mittellegierte Stähle können über einen Magnetabscheider entfernt werden. Denkbar sind Trommel- oder Überbandscheider. Nach (Martens et al, 2016).

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 (Cetner-Stzalkowska, 2022) hin: Zu feuchte Proben verklumpen, wohingegen zu trockene Proben eine unerwünschte Staubbildung verursachen. Da Feuchte selbst allerdings 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 von der Mineralwolle getrennt werden. Diese Technik, die über die magnetische Wirkung mit elektromagnetischen Feldern arbeitet, ist nach (Martens et al, 2016) besonders gut für aluminiumhaltige Materialien und für Partikelgrößen > 6 mm 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 ist dabei Glaskeramik, welche optisch wie Glas aussieht, aber einen Störstoff darstellt (Martens et al, 2016). Gut erkannt werden kann die Glaskeramik, wenn bei der KSP-Abscheidung auch Röntgenfluoreszenz eingesetzt wird (Ostermann et al, 2011). Wird ein Störstoff erfasst, dann wird dieser in der Regel mit Druckluft aussortiert.

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 der Dichtesortierung ist die Windsichtung. In der Regel fällt dabei das zu reinigende Gut nach unten, während durch gezielte Luftströme leichtere organische Stoffe seitlich oder nach oben 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 unerwünschte Feuchte entfernen. Alternativ können die Proben energieärmer, dafür zeitaufwändiger auch durch geschützte Lagerung trocknen.

Generell liegt die Herausforderung bei allen benannten Prozessen in der Faserform der

Mineralwollen, die zu einem gänzlich anderen Verhalten als übliche mineralische Baustoffe führen. Die Eignung der Methoden ist durch Versuchsreihen noch nachzuweisen.

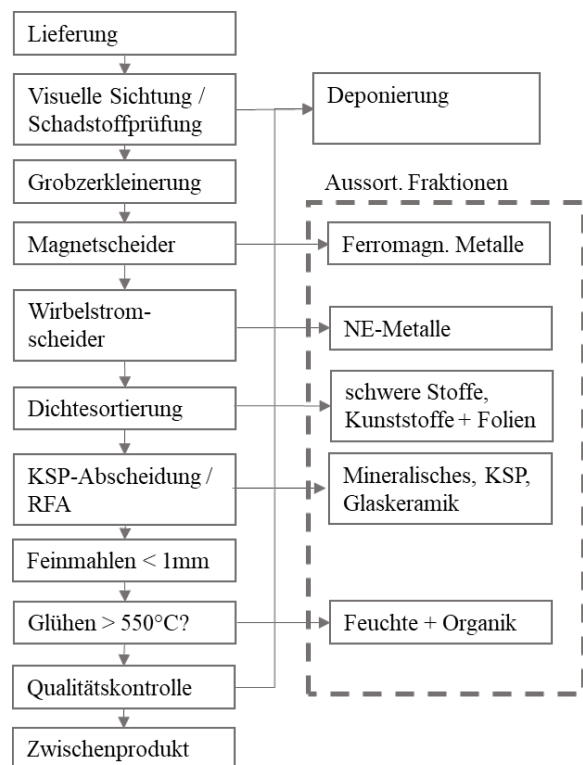


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Aufbereitungsschritten mit Ablaufreihenfolge zur Entfernung von Störstoffen aus Abbruchmineralwolle für künftiges closed-loop Recycling entsprechend der erwarteten Störstofffraktionen

Grenzwerte für Störstoffe für die Mineralwolleherstellung in der Schmelzwanne

In Zusammenarbeit mit der Saint Gobain Isover G+H AG wurden für die zuvor genannten Störstoffe Grenzwerte festgelegt, innerhalb derer keine negativen Einflüsse auf die Mineralwollchemie oder die Anlagentechnik mit Schmelzwanne zu erwarten sind. Diese Werte wurden mit verfügbaren Grenzwerten aus der Behälterglasindustrie verglichen (vgl. Tab. 1). Die Grenzwerte für das Mineralwollrecycling bewegen sich in ähnlichen Bereichen wie beim Recycling von Altglasscherben in der Behälterglasindustrie. Nach eigenen Aussagen gilt die Dämmstoffindustrie (bspw. Mineralwolle und Schaumglas) innerhalb der Glaskaskade als anspruchsloser bezüglich der Qualitätsanforderungen an Altglasscherben als die Behälterglasindustrie oder die Flachglasindustrie. Diese Aussage kann durch Tabelle 1 bestätigt werden. Deutlich höher liegen nur die Grenzwerte für KSP und Organik.

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. Stoffe⁴⁾	≤ 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

Tabelle 1: Grenzwerte für Störstoffe zum Recycling in der Behälterglas- (BV Glas, 2013) - und Mineralwollindustrie

Zur Evaluierung, welcher Verunreinigungsgrad bei Mineralwolle, die auf der Baustelle entsorgt wird, zu erwarten ist, wurden sechs Proben von einem Wertstoffhof sowie eine Probe aus dem Rückbauvorhaben einer Dachgeschosssanierung händisch sortiert und gewogen. Die sieben betrachteten Rückbauproben enthielten verschiedene Dämm- und Störstoffe teilweise innerhalb des gleichen BigBags. Sie wurden per NIRS in Steinwolle und Glaswolle differenziert. In den sieben Probensätzen befinden sich sieben Steinwollen und sechs Glaswollen.

Der Glühverlust der einzelnen, reinen Mineralwollen bei 550°C und 1h Glühzeit wurde ermittelt, um Informationen über den nicht händisch aussortierbaren organischen Anteil an der Mineralwolle zu erhalten. Hauptsächlich zählen hierzu die produkteigenen Bindemittel. Die ermittelten Masseverluste lagen zwischen 0,53 %- 8,9 % und damit im üblichen Bereich für Bindemittel. Der Mittelwert für Glaswollen im Probensatz betrug 7,72 M.-%, der für Steinwollen 3,22 M.-%. Der Bindemittelanteil ist hier als kritisch zu werten, da dieser allein bereits die vorgegebenen Grenzwerte aus Tabelle 1 für vier von sechs Glaswollen überschreitet. Eine thermische Vorbehandlung der Mineralwollfasern ist daher für die Wiedereinführung in die Schmelzwanne ungeachtet der vorhergehenden Aufbereitungsqualität notwendig. Beispielhaft werden nachfolgend die an den sieben Rückbauproben festgestellten Verunreinigungen mit Metallen, KSP-Fractionen und Organik ohne produkteigenes Bindemittel beschrieben und dargestellt (vgl. Abb. 2). Die händische Sortierung ergab bei fünf von sieben Mineralwollproben (W1-W5) einen Massenanteil organischer

Verunreinigungen < 1 %. Eine entsprechende Aufbereitung vorab scheint nicht notwendig, da wie oben beschrieben 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. Eine Auswertung mittels Thermogravimetrischer Analyse (TGA) zeigte, dass bei den Proben W1-W6 die organischen Störstoffe überwiegend durch die händische Sortierung entfernt werden konnten. Der Masseverlust von Probe W7 innerhalb der TGA im Temperaturbereich der Holzpyrolyse (350°C-450°C) betrug ca. 4 M.-% unter Stickstoff, so dass die 4 M.-% (Tab. 2) aus der händischen Sortierung die Verunreinigung unterschätzen. Die Auswertung der Sortierung metallischer Bestandteile zeigt, dass sofern Metalle in den Probensätzen vorhanden waren, diese aufgrund ihrer hohen Rohdichte die Grenzwerte aus Tabelle 1 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 > 20 mm 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.

Eine vorgeschaltete Aufbereitungsanlage wird aufgrund der vorgestellten Erkenntnisse als sinnvoll bewertet. Mögliche Prozessschritte hierzu wurden beschrieben. Trotz Aufbereitungsanlage wird empfohlen, bereits baustellenseitig so sortenrein wie möglich rückzubauen. Größtes Hindernis sind hierbei aktuell unlösliche Verbindungen zwischen Baustoffschichten oder Bauteilen und der hohe Zeit- und damit Kostenaufwand im selektiven Rückbau.

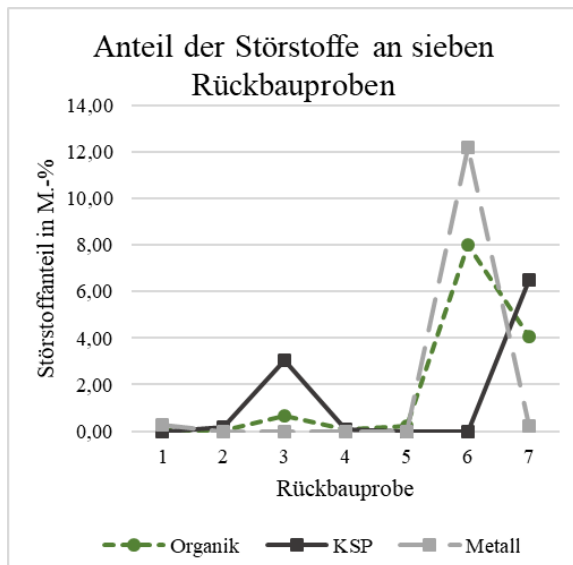


Abbildung 2: Darstellung der Massenanteile der Störstoffe für Metalle, KSP-Fractionen und Organik ohne produkteigenes Bindemittel in [%] für sieben Rückbauproben nach händischer Sortierung

Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass closed-loop Recycling für Mineralwolle, die im Schmelzwannenverfahren gefertigt wurde, technisch möglich und auch umsetzbar ist. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich generell auf den Kupolofen übertragen, der innerhalb der beiden Schmelzverfahren als robuster gilt.

Es wurden Grenzwerte erarbeitet innerhalb derer Mineralwolle in den jeweiligen Herstellungsprozess für Glas- oder Steinwolle zurückgeführt werden kann. Tests an realen Rückbauproben zeigen, dass diese Grenzwerte regelmäßig überschritten werden und daher eine technische Aufbereitung ähnlich zur Aufbereitung von Behälterglas sinnvoll sein kann. Vielversprechende, theoretische Überlegungen hierzu wurden angestellt. Zur Verifizierung des Aufbereitungskonzepts sind umfangreiche Tests notwendig, für deren Validierung zuvor Referenzmethoden ermittelt werden müssen.

Danksagung

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.

Ein besonderer Dank gilt unseren Verbundpartnern der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), insbesondere dem Fachbereich 1.4

Prozessanalytik, für ihre Projektbeiträge zur Spektroskopie und chemometrischen Datenanalyse.

Für die fachliche und technische Unterstützung bedanken wir uns bei unserem Forschungspartner Saint Gobain Isover G+H AG und bei Zeiss Spectroscopy GmbH.

Literatur

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung 2011. BBSR-Berichte KOMPAKT – Künstliche Mineralfaserdämmstoff, 2011, Bonn.

Broszies, T., Paul, A., Liestmann Z., Schaudienst F., Vogdt F. U. 2023. Recycling von Mineralwolle, die im Schmelzwannenverfahren hergestellt wurde.

Bundesverband Glasindustrie e.V. 2013. Standardblatt T 120, „Qualitätsanforderungen für Glasscherben zum Einsatz in der Behälterglasindustrie“. Ausgabe: 01. Juli 2013

Cetner-Stzalkowska, Z. 2022. W2L final conference, 2022, URL: www.wool2loop.eu/en/finalconference, zuletzt besucht am 20.12.23

Deutsche Energie-Agentur 2022. DENA-Gebäudereport 2022. Zahlen, Daten, Fakten.

Fleckenstein, H., Hornung, H. 1994. Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen von Mineralwolle mittels Abfallmineralwolle als rezykliertes Grundmaterial, Patent DE69410976T2

GGM 2021. - Gütegemeinschaft Mineralwolle e.V.: Güte- und Prüfbestimmungen für Erzeugnisse aus Mineralwolle; April 2021

Martens, H.; Goldmann, D. 2016; Recyclingtechnik, Fachbuch für Lehre und Praxis, 2. Auflage, 2016

Ostermann, M., Kühn, A., Bjeoumikhov, A., Wedell, R. 2011. Einsatz der Röntgenfluoreszenzanalyse in der Prozessanalytik. In: tm-Technisches Messen, Band 78, Heft 12, 2011

Paul, A., Broszies, T., Ostermann, M., Maiwald, M., Vogdt, F. U. 2020. Unterscheidung von Mineralwolle mit Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS). In: Bauingenieur Band 95, Heft 12, 2020

Remi, J., Biagio, P., Stephane, M., Laurent, J. 2008. Method and Device for Treating Fibrous Wastes for Recycling, Patent US20080256981A1

Vogdt, F. U., Fischer, D., Schaudienst, F., Schober, M. 2019. LifeCycleKMF - Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten aus künstlichen Mineralfaserdämmstoffen, 2019