



Abschlussbericht zu dem Projekt

DBU AZ 24946-23

gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

“ENTWICKLUNG EINES NEUARTIGEN VERFAHRENS ZUM UMWELTGERECHTEN BEHANDELN UND VERWERTEN KANZEROGENER MINERALWOLLE AUF DER BASIS DER MULTI-MODE-MIKROWELLENTECNOLOGIE”

Forschungseinrichtungen:

Institut für Fertigteiletechnik und Fertigungsbau Weimar eV.
Cranachstr. 46, 99423 Weimar
Projektleiter: Dr.-Ing. B. Leydolph

Bauhaus-Universität Weimar
Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung
Coudraystr. 7, 99421 Weimar
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. A. Müller

Industriepartner:

Reimann Umweltschutz GmbH
Schöne Aussicht 15, 99869 Seebergen
Projektleiter: M. Reimann

MWT Gesellschaft für industrielle Mikrowellentechnik mbH
Hinter dem Entenpfuhl 17, 65606 Elz
Projektleiter: R. Schulze

Förderungszeitraum: 11.07.2007 – 10.07.2008



Reimann
Umweltschutz GmbH

Tel. 036256 / 21573
Fax. 036256 / 20254

marco.reimann@firma-reimann.de



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	9
Einleitung	14
1	Arbeitspaket 1 17
1.1	Voruntersuchungen der Mineralwolle 17
1.2	Materialkennwerte Mineralwolle 18
1.2.1	Materialkennwerte Mineralwolle mit einem Kanzerogenitätsindex [KI] größer oder gleich 40 18
1.2.1.1	Saint-Gobain Isover G+H AG 19
1.2.1.2	Deutsche Rockwool Mineralwoll GmbH & CO. OHG [8] 20
1.2.1.3	Knauf Insulation GmbH & Co.KG 20
1.2.1.4	Heraklith 21
1.2.1.5	Knauf Insulation GmbH 21
1.2.2	2.2 Materialkennwerte Mineralwolle mit einem Kanzerogenitätsindex [KI] kleiner 40 22
2	Arbeitspaket 2 24
2.1	Charakterisierung des Ausgangsmaterials 24
2.2	Ermittlung der Schmelztemperatur 25
2.2.1	Untersuchungen im Muffelofen 26
2.2.2	Untersuchungen mittels Heitztischmikroskopie 26
2.3	Behandlung der Mineralwolle mittels Multi-Mode-Mikrowellentechnologie 28
2.3.1	Multi-Mode-Mikrowellenanlage 28
2.3.2	Mikrowellenbehandlung der Mineralwolle 29
2.3.2.1	Versuchsserie I 29
2.3.2.2	Versuchsserie II 32
2.3.2.3	Untersuchungen zum Einfluss der organischen Bestandteile auf die Verschlackung 33
2.3.2.4	Untersuchungen und Auswahl geeigneter Suszeptoren für die Verschlackung 34
2.3.2.5	Versuchsserie III 40
2.4	Untersuchungen am Ausgangsmaterial und an den verschlackten Probenrückständen 42
2.4.1	Chemische Zusammensetzung mittels ICP-OES 42
2.4.2	Thermoanalytische Messungen mittel DSC-TG 43
2.4.3	Infrarot - Spektroskopie FTIR 45
2.4.4	Physikalische Kenngrößen 47
2.4.5	Eluatuntersuchungen 48
2.5	Abgasuntersuchung 49

3	Arbeitspaket 3	51
3.1	Logistik bei der Verwertung/Beseitigung von Mineralwolleabfällen	51
3.2	Produktionsabfälle - Logistikkonzept	52
3.3	Bauabfälle - Logistikkonzept	52
3.3.1	Sammlung der Mineralwolle auf Deponien und Recyclinghöfen	56
3.3.2	Baustellenabfallrücknahmesystem Fa. Rockwool	57
4	Arbeitspaket 4	58
4.1	Verfahrensentwicklung zur Mineralwollebehandlung mit minimaler Faserfreisetzung	58
4.1.1	Beschreibung der Verfahrensschritte	59
5	Arbeitspaket 5	62
5.1	Entwicklung Multi-Mode-Mikrowellentechnik	62
5.1.1	Kapazitätsplanung für eine Anlage zur Mineralwollebehandlung	62
5.1.2	Konstruktion Mikrowelleneinheit	63
5.1.3	Multi-Mode-Mikrowellenverfahren	65
6	Arbeitspaket 6	66
6.1	Lastenheft	66
7	Ökologische, technologische, ökonomische Bewertung	67
8	Verbreitung der Vorhabensergebnisse	69
9	Fazit	69
	Literatur/Quellenverzeichnis	70

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Mineralwollematten.....	14
Bild 2: Lose Mineralwolle	14
Bild 3: Muffelofen	25
Bild 4: Heiztischmikroskop (links) und Heiztisch (rechts).....	25
Bild 5: Umwandlung der Mineralwolle (Probe A) in Abhängigkeit von der Temperatur.....	26
Bild 6: Brennregime für die Untersuchungen mittels Heiztischmikroskopie	27
Bild 7: Multi-Mode-Mikrowellenanlage	29
Bild 8: Probe A-1 vor (links) und direkt nach 2 min Mikrowellenbehandlung (Mitte), sowie im abgekühlten Zustand (rechts).....	30
Bild 9: Unterseite der Probe A-1 nach nochmaliger Mikrowellenbehandlung von 2 min	31
Bild 10: Mit Wasser besprühte Mineralwolleprobe A-2 nach zwei Behandlungsdurchgängen von jeweils 2 min	31
Bild 11: Mineralwollematerialien B und C im Vergleich mit Material A nach Einwirkung von Mikrowellenenergie	32
Bild 12: Unbehandeltes und temperaturbehandeltes (400 °C) Mineralwollematerial A vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung von 6 min (rechts).....	33
Bild 13: Unbehandeltes und temperaturbehandeltes (700 °C) Mineralwollematerial A vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung von 6 min (rechts).....	34
Bild 14: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Kronofloc-Filterkuchen 1 , Siliciumcarbid 2 , Kronocarb 3 und Graphitspray 4	36
Bild 15: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Kronofloc-Filterkuchen 1 , Siliciumcarbid 2 , Kronocarb 3 und Graphitspray 4 direkt nach der Mikrowellenbehandlung.....	37
Bild 16: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Kronofloc-Filterkuchen vor und nach der Mikrowellenbehandlung.....	37
Bild 17: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Siliciumcarbid vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung (rechts).....	37
Bild 18: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Kronocarb vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung (rechts)	37
Bild 19: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Graphitspray vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung (rechts).....	38
Bild 20: Verschlacktes Probeninneres der mit Suszeptoren präparierten Mineral- wolle C nach der Mikrowellenbehandlung.....	38

Bild 21: Präparation der Mineralwolle B mit Kronocarb.....	39
Bild 22: Plattenoberseite (Material B mit Kronocarb) nach Mikrowellenbehandlung.....	39
Bild 23: Plattenunterseite (Material B mit Kronocarb) nach Mikrowellenbehandlung.....	40
Bild 24: Präparierte Mineralwolle mit Eisen(III)-oxid.....	40
Bild 25: Teilweise erfolgte Verschlackung.....	41
Bild 26: Mineralwolle B mit Eisen(III)-oxid vor und nach der Mikrowellenbehandlung.....	41
Bild 27: Thermoanalyse Mineralwolle A und B bis 1000 bzw. 1350 °C an Luft.....	44
Bild 28: Thermoanalyse Schlacke A und B bis 1000 °C an Luft.....	45
Bild 29: FTIR-Spektrum der Mineralwollen A und B.....	46
Bild 30: FTIR-Spektrumauszug der gelösten organischen Bestandteile der Mineralwollen A und B.....	46
Bild 31: FTIR-Spektrum der Schlackenrückstände von Mineralwolle A und B.....	47
Bild 32: Schlackenrückstände der Mineralwolle A	48
Bild 33: Schlackenrückstände der Mineralwolle B mit Kronocarb	48
Bild 34: Mineralwollensäcke der Fa. ASV Vallet e.K. [22].....	54
Bild 35: Mineralwollensäcke [23].....	54
Bild 36: Mineralfaserabfallsack mit Bezeichnung [24].....	54
Bild 37: Deckelmulde [25].....	54
Bild 38: Deckelnormmulde [26].....	54
Bild 39: Transport der Big Bags mittels Kran (Foto Held, Ilmenau).....	55
Bild 40: Transport der Big Bags mittels Karren der Fa. Berufsbekleidung Fricke [24]	55
Bild 41: Ausbau Mineralwolle (Foto Held, Ilmenau)	55
Bild 42: Sammlung kanzerogener Mineralwolle	56
Bild 43: Logistiksystem Fa. Rockwool [29].....	57
Bild 44: Sammeln der Steinwolleabfälle [29].....	57
Bild 45: Verfahrensablauf.....	58
Bild 46: Mineralwolleematten	59
Bild 47: Mineralwolleabfälle auf der Baustelle.....	59
Bild 48: : Mineralwollgemisch bei der Anlieferung bei Woolrec [31].....	59
Bild 49: Kunststoffsäcke mit Mineralwolle [33].....	59
Bild 50: Schneidaggregat [32]	Bild 51: Werkzeug (Messer) [32].....
Bild 52: Schredderanlage [32].....	60
Bild 53: Kapazitätsplanung	62

Bild 54: Mikrowellenanlage Aufsicht.....	63
Bild 55: Mikrowellenanlage Front.....	64
Bild 56: Strahlungsausrichtung	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Steinwolle Dämmplatte [7].....	20
Tabelle 2: Glaswolle Dämmplatte [7]	20
Tabelle 3: Steinwolle Dämmplatte [10].....	21
Tabelle 4: Abmessungen Thermolan [9].....	22
Tabelle 5: Produkteigenschaften Thermolan [9]	22
Tabelle 6: Mineralwollematerialien.....	24
Tabelle 7: Heitzschmikroskopie des Probenmaterials A (40x Vergrößerung)	27
Tabelle 8: Heitzschmikroskopie des Probenmaterials B (40x Vergrößerung)	28
Tabelle 9: Effekt der Mikrowellenerwärmung bei Feststoffen [15].....	35
Tabelle 10: Oxidchemische Zusammensetzung von Mineralwolle u. deren Schlacken.....	43
Tabelle 11: Rein- und Rohdichten von Mineralwolle und deren Schlacken	47
Tabelle 12: Durchschnittswerte der Abgase während der Mikrowellenbehandlung von Mineralwolle.....	49
Tabelle 13: Abgasmesswerte im Vergleich zu den Grenzwerten.....	49

Zusammenfassung

Das Ziel des Vorhabens bestand in der Entwicklung eines technischen Verfahrens zur strukturellen Umwandlung der Mineralwolle. Der Gefahrstoff sollte durch die gezielte Behandlung durch Multi-Mode-Mikrowellen verschlackt werden. Im Vorprojekt „Grundlagen/Vorarbeiten“ wurde die technische Realisierbarkeit des Vorhabens untersucht. Das Arbeitspaket 1 beinhaltete Voruntersuchungen zur Mineralwolle wie die Analyse der Mineralwollearten und deren Eigenschaften (Bindemittel, Schlichte, Rohdichte, Plattendicke, Wärmeleitfähigkeit). Im Arbeitspaket 2 wurden Laboruntersuchungen zur Charakterisierung der Mineralwolle durchgeführt. Es erfolgte die Ermittlung der Schmelztemperatur bei Mikrowellenbehandlung, sowie die Ermittlung technischer Parameter (Stärke, Dauer), die Untersuchung der Faserumwandlung, mikroskopische Untersuchungen, Untersuchung und Auswahl geeigneter Additive für die Verschlackung, die Eluat-Untersuchung und die Untersuchung zur Aufbereitung der Schlacke. Weiterhin wurden Abgasanalysen durchgeführt. Das Arbeitspaket 3 beinhaltete Untersuchungen zum Logistikkonzept, wie die Sammlung der Produktionsabfälle (Verpackung/Transport/Annahme) und der Bauabfälle (Sammlung/Verpackung/Transport/Annahme). Im Arbeitspaket 4 erfolgte die Verfahrensentwicklung zur Mineralwollebehandlung. Zielstellung war hierbei eine minimale Faserfreisetzung während aller technologischen und logistischen Prozesse (Mineralwolle-Annahme, Beschickung der Mikrowelle, Austrag des Endproduktes, Lagern, Verpacken, mobiles System). Das Arbeitspaket 5 beinhaltete die Entwicklung der Multi-Mode-Mikrowellentechnik, die Ermittlung des Fassungsvermögens, das Aufbringen der notwendigen Leistung zur Verschlackung, die Ermittlung und Anordnung der Magnetonen sowie Planung, Entwurf und Konstruktion der Mikrowelleneinheit für die Mineralwollebehandlung. Im Arbeitspaket 6 erfolgte die Erarbeitung eines Lastenheftes als Grundlage für die weiterführenden Arbeiten, d.h. eine Zusammenstellung der Forderungen an eine Anlage. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass die Verschlackung von Mineralwolle mittels Mikrowellenbehandlung möglich ist. Aufgrund der großen Schwankungen der Zusammensetzung der Mineralwollearten ist der Einsatz von Suszeptoren notwendig. Die Mineralwollebehandlung sollte in folgenden Verfahrensschritten erfolgen: Vornässen der angelieferten Mineralwolle, Sortierung mit Eisen- und Nichteisenerkennung und Abscheidung, mehrstufige Zerkleinerung, nachgeschaltete 2. Sortierstufe mit Eisen- und Nichteisenerkennung und Abscheidung, Mischen mit Suszeptoren, Pressen des Mineralwolle-Suszeptoren-Gemisches, Mikrowellenbehandlung und abschließende Aufbereitung der Schlacken durch Mahlen oder die Rückführung in den Produktionsprozess. Die Mikrowellenanlage sollte im Durchlaufverfahren konzipiert werden. Das Aufgabegut ist während der Mikrowellenbehandlung ausreichend umzuwälzen, um alle Bereiche zu beanspruchen. Die entstehenden Dämpfe aus den Bindemitteln sind mit geeigneten Techniken zu entfernen, d.h. die Anlage ist mit einer Nachverbrennung auszustatten.

Die gestellten Projektziele konnten durch die Projektpartner erreicht werden. Die positiven Ergebnisse des Vorprojektes konnten die technische Machbarkeit des Vorhabens „Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zum umweltgerechten Behandeln und Verwerten kanzerogener Mineralwolle auf der Basis der „Multi-Mode-Mikrowellentechnologie“ bestätigen und bilden die Grundlage für die Weiterführung des Projektes. Im nächsten Schritt ist die technische Umsetzung des Mineralwolle-Behandlungsverfahrens geplant. Hierfür ist die Mitwirkung der Deutschen Dämmstoffindustrie notwendig, da die Anlagentechnik nicht durch die beteiligten Projektpartner finanziert werden kann.

Einleitung

Ziel der Forschungsarbeit ist es, ein Verfahren zum umweltgerechten Behandeln und Verwerten kanzerogener Mineralwolle zu entwickeln.

Mineralwolle, die vor 1996 verwendet worden ist, gehört zur sogenannten „alten“ Mineralwolle, die nicht die Kriterien des Anhangs IV Nr. 22 Abs. 2 der Gefahrstoffverordnung erfüllt und als krebserzeugend (Kategorie 2) oder krebverdächtig (Kategorie 3) gilt. Des Weiteren ist bei den alten Mineralwolleprodukten in der Regel eine Alterung der Fasern (Versprödung, Zersetzung der Zusatzstoffe) vorhanden, die die Lungengängigkeit und damit die gesundheitsgefährdende Wirkung verstärkt. Es ist davon auszugehen, dass Faserstäube freigesetzt werden, die nach TRGS 905 als krebserzeugend Kategorie 2 (K2) zu bewerten sind.

Der Umgang mit „alten“ Mineralwolle-Dämmstoffen ist heute nur noch im Zuge von Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten möglich bzw. zulässig (siehe Bild 1, Bild 2). Für solche Arbeiten an „alten“ Mineralwolle-Produkten ist die TRGS 521 zwingend anzuwenden. Beim Abbruch von Gebäuden dürfen gefährliche Faserstäube grundsätzlich nicht freigesetzt werden, soweit dies nach dem Stand der Technik möglich ist. Die Arbeitsverfahren und Geräte müssen ein staubarmes Entfernen gewährleisten. Analog zum Gefahrstoff Asbest sind umfangreiche Schutzmaßnahmen, wie Atemschutz, Schutzanzug, staubarme Bearbeitung sowie Maßnahmen zur Faserstaubminimierung, Abfallkennzeichnung, Gefahrstoffentsorgung etc. zu treffen.



Bild 1: Mineralwolle-Matten



Bild 2: Lose Mineralwolle

Im Rahmen von Gebäuderückbau und Sanierung fallen in Deutschland jährlich ca. 200.000 – 300.000 Tonnen Mineralwolleabfälle an, die auf Deponien verbracht werden.

Mineralwolle ist eine Sammelbezeichnung für eine Gruppe der synthetischen glasierten Fasern, die aus silikatischen Schmelzen hergestellt werden. Als Ausgangsmaterialien der „alten“ Mineralwolle dienen Sediment oder Eruptivgesteine (Basalt, Schiefer, Diabas). Die Mineralfasern bestehen vorwiegend aus den Oxiden SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , deren chemische Beständigkeit ist sehr gut. Diese „alten“ Mineralfaserprodukte können lungengängige Fasern freisetzen, die biobeständig sind und tumorbildende Wirkung besitzen. Zu den gesundheitlich relevanten, lungengängigen Fasern zählen Fasern folgender Gestalt: Länge $> 5\mu\text{m}$, Durchmesser $< 3\mu\text{m}$, Verhältnis von Länge zu Durchmesser > 3 . Diese Faserabmessungen sollten nach der Empfeh-

lung der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zur Vorbeugung von Lungenkrankheiten berücksichtigt werden. Bei neuen Dämmstoffen aus Mineralwolle wurde sowohl die Fasergeometrie (Reduzierung des lungengängigen Faseranteils) als auch die chemische Zusammensetzung (Reduzierung der Biobeständigkeit) soweit verändert, dass diese inzwischen als nicht krebserzeugend eingestuft werden können.

Bisher gibt es kein sicheres Verfahren zur Verwertung gebrauchter Mineralwolle ähnlich der Asbestverwertung. Es ist nur eine Verbringung des aufgemahlten Gefahrstoffes im Ziegelton bekannt. Durch die vorgeschaltete Aufmahlung besteht hier ein besonders hohes Faserfreisetzungsrisko. Eine aufwendige Absaugung und Filtertechnik ist dabei erforderlich. Dieses Verfahren wurde von der Wool.rec GmbH in Braunfels und der Universität Gießen entwickelt. Bei dem Verfahren werden die Mineralwolleabfälle geschreddert und anschließend mit einer Tonsuspension und Melasse gemischt. Dieses Gemisch wird gepresst, anschließend konfektioniert und als Zusatzstoff für die Herstellung von Ziegeln eingesetzt. Die endgültige Umwandlung des Gefahrstoffes und die Zerstörung der Faserstruktur erfolgt erst im Prozess des Ziegelbrandes.

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines technischen Verfahrens zur strukturellen Umwandlung der Mineralwolle. Der Gefahrstoff soll durch die gezielte Behandlung durch Multi-Mode-Mikrowellen verschlackt werden. Die Schlacke kann nachfolgend durch Exzentrerschwingmühlen aufgemahlen werden. Das Feinmaterial kann aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung (Hauptoxide SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO) im Rahmen der Zementproduktion (Hauptoxide analog Zementrohmehl), der Betonherstellung, bei der Produktion von Calciumsilikathydratprodukten, in der Ziegelproduktion oder im Asphalt eingesetzt werden.

Das Verfahren besitzt hinsichtlich der Faserfreisetzung entscheidende Vorteile, da der Gefahrstoff erst nach der Verschlackung und damit nach der Zerstörung der Faserstruktur vermahlen wird. Die vermahlene Schlacke ist faserfrei und damit kein Gefahrstoff mehr. Sie kann somit in der Baustoffproduktion eingesetzt werden.

Durch die Verfahrensentwicklung können Deponien entlastet und der Gefahrstoff in einen Rohstoff überführt werden. Vielfältige Anwendungspotentiale werden bei Verfahrenseinführung, besondere in der Baustoffindustrie, erwartet. Aufgrund der chemischen Mineralwollezusammensetzung wird hier eine Verwertung im Zement, Beton, Mörtel, Kalksandstein, Porenbeton, Ziegel und Asphalt gesehen. Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz schreibt vor, Abfälle zu verwerten, sofern dies technisch machbar, wirtschaftlich zumutbar und ungefährlich ist. Das Vorhaben leistet somit einen Beitrag zu den Forderungen aus Politik und Wirtschaft.

Das Verfahren basiert auf der strukturellen Umwandlung der Mineralwollefasern durch folgende Hauptverfahrensschritte:

- Verschlackung der Mineralwolle durch Multi-Mode-Mikrowellenbehandlung
- Aufmahlung der Schlacke
- Verwertung in Baustoffen

Der entscheidende Vorteil des Verfahrens ist die Herabsetzung der Faseremissionen bereits zu Beginn der Prozesskette (vorgeschaltete Verschlackung) und die Erzielung eines faserfreien Endproduktes. Das Entwicklungsziel ist die irreversible Mineralfa-

serzerstörung, d.h. die Umwandlung des Gefahrstoffes in einen Rohstoff, die effiziente, umweltgerechte Verfahrensentwicklung für die variable Umwandlung /Verwertung der Gefahrstoffe Asbest und Mineralwolle mit einer technischen Anlage, die Entwicklung potentieller Sekundärrohstoffe mit wirtschaftlicher Nutzung, ohne zusätzliche Umweltbelastungen durch Faseremissionen, Abwässer oder Abfälle und die Entlastung von Deponien.

Für die Untersuchung der Machbarkeit des Forschungsvorhabens wurde ein Vorprojekt „Grundlagen/Vorarbeiten“ mit nachfolgenden Arbeitspaketen konzipiert.

Das **Arbeitspaket 1** beinhaltet Voruntersuchungen wie die Analyse und Eigenschaftsermittlung der Mineralwollearten (Bindemittel, Schlichte, Rohdichte, Plattendicke, Wärmeleitfähigkeit).

Im **Arbeitspaket 2** werden Laboruntersuchungen an Mineralwolle durchgeführt. Es erfolgt die Ermittlung der Schmelztemperatur bei Mikrowellenbehandlung, Ermittlung der Stärke und Dauer, Untersuchung der Faserumwandlung, mikroskopische Untersuchungen, Untersuchung und Auswahl geeigneter Additive für die Verschlackung, die Eluatuntersuchung und die Untersuchungen zur Aufbereitung der Schlacke.

Arbeitspaket 3 beinhaltet Untersuchungen zum Logistikkonzept wie die Sammlung der Produktionsabfälle (Verpackung/Transport/Annahme) und der Bauabfälle (Sammlung/Verpackung/Transport/Annahme).

Im **Arbeitspaket 4** erfolgt die Verfahrensentwicklung zur Mineralwollebehandlung mit der Zielstellung einer minimalen Faserfreisetzung, d.h. Mineralwolle-Annahme, Beschickung Mikrowelle, Austrag Endprodukt, Lagern, Verpacken, mobiles System.

Das **Arbeitspaket 5** beinhaltet die Entwicklung der Multi-Mode-Mikrowellentechnik, Ermittlung Fassungsvermögen, notwendige Leistung zur Verschlackung, Ermittlung Anordnung Magnetronen, Planung, Entwurf und Konstruktion der Mikrowelleneinheit für die Mineralwollebehandlung.

Im **Arbeitspaket 6** erfolgt die Erarbeitung eines Lastenheftes als Grundlage für die weiterführenden Arbeiten, d.h. eine Zusammenstellung der Anforderungen an eine Anlage.

Die Dokumentation der Ergebnisse wird in Form eines gemeinsamen Abschlussberichtes zusammengefasst.

1 Arbeitspaket 1

1.1 Voruntersuchungen der Mineralwolle

Als künstliche Mineralfasern bezeichnet man anorganische Synthefasern. Sie werden aus der mineralischen Schmelze über unterschiedliche Düsen- oder Schleuderverfahren gewonnen.

Ein Bereich der künstlichen Mineralfasern umfasst die mineralischen Wollen. Dazu zählen Glas-, Stein- und Schlackenwollen.

Für die Herstellung verwendet man Gläser, vulkanische Gesteine oder Kalksteine. Mineralwollen werden mit Binde- und Schmelzmitteln versehen. Diese Zusatzstoffe gewährleisten eine dauerhafte Wasserabweisung. Sie wirken als Gleitmittel, verbessern die Griffbarkeit und binden die Fasern im Verband. Auch lose Mineralwolle enthält grundsätzlich Schmelzmittel, um die Verarbeitung zu vereinfachen. Glaswollen enthalten deutlich mehr Bindemittel als Steinwollen. Als Bindemittel kommen in Wasser weitgehend gelöste Gemische aus Kunstharzverbindungen (z. B. Phenolharze und Harnstoff-Formaldehydharze) zum Einsatz. Mineralöle, Öl-Wasser-Emulsionen, Silikonöle oder Silikonharze werden als Schmelzmittel verwendet.

Seit 1980 sind künstliche Mineralfasern und damit auch Fasern aus Mineralwolle-Dämmstoffen mit Durchmessern kleiner $1\ \mu\text{m}$ als 'Stoffe mit begründetem Verdacht auf ein Krebs erzeugendes Potential' eingestuft.

Im Sinne der TRGS 521 [1] sind alte Mineralwollen biopersistente künstliche Mineralfasern nach Anhang IV Nr. 22 der Gefahrstoffverordnung. [2]

Für alte Mineralwolle gilt seit Juni 2000 das Herstellungs- und Verwendungsverbot. Bei Mineralwolleprodukten, die vor 1996 eingebaut wurden, muss von der Einstufung als krebserzeugende Kategorie 2 nach TRGS 905 [3] ausgegangen werden. Diese Einstufung kann nur mit einem Einzelnachweis widerlegt werden.

Dämmstoffhersteller in Deutschland produzieren nur noch Produkte mit ungefährlichen Fasern nach dem RAL-Gütezeichen. Diese lösen sich beim Einatmen sehr schnell im Körper auf und verlieren ihre Krebs erzeugende Wirkung. [4]

1.2 Materialkennwerte Mineralwolle

Die Bewertung der glasigen WHO-Fasern erfolgt nach den Kategorien für krebserzeugende Stoffe in Anhang VI Nr. 4.2.1 der RL 67/548/EWG und auf der Grundlage des Kanzerogenitätsindex KI, der sich für die jeweils zu bewertenden WHO-Fasern aus der Differenz zwischen der Summe der Massengehalte (in v.H.) der Oxide von Natrium, Kalium, Bor, Calcium, Magnesium, Barium und dem doppelten Massengehalt (in v.H.) von Aluminiumoxid ergibt. [3]

$KI = S_{Na,K,B,Ca,Mg,Ba-Oxide} - 2 \times Al-Oxid$

a) Glasige WHO-Fasern mit einem Kanzerogenitätsindex $KI = 30$ werden in die Kategorie 2 eingestuft.

b) Glasige WHO-Fasern mit einem Kanzerogenitätsindex $KI > 30$ und < 40 werden in die Kategorie 3 eingestuft.

c) Für glasige WHO-Fasern erfolgt keine Einstufung als krebserzeugend, wenn deren Kanzerogenitätsindex $KI = 40$ beträgt.

1.2.1 Materialkennwerte Mineralwolle mit einem Kanzerogenitätsindex [KI] größer oder gleich 40

Mineralwolle wird aus heimischen mineralischen Rohstoffen wie Kalkstein, Feldspat, Dolomit, Basalt, Diabas, Sand und Zement, sowie aus Recyclingmaterialien, wie z. B. Altglas hergestellt. Bis zu 7 % der Mineralwolle sind organische Stoffe und Bindemittel. Diese sind im wesentlichen Kunstharze. [5]

Mineralwolle-Dämmstoffe müssen die Freizeichnungsanforderungen der Note Q der EG-Richtlinie 97/69/EG, den Anhang IV Nr. 22 der Gefahrstoffverordnung und den Abschnitt 23 im Anhang zu §1 der Chemikalien-Verbotsverordnung erfüllen.

Mineralfaserdämmstoffe sind die am weitest verbreiteten Dämmprodukte mit einem umfangreichen Anwendungsspektrum von der Dach-, Kern- und Zwischenständerdämmung bis zu Wärmedämmverbundsystemen.

Dämmstoffe werden zur Wärme- und Schalldämmung eingesetzt. Dabei werden sie nach Anwendungstypen eingeteilt. Die Typkurzbezeichnung gibt Aufschluss über die zulässige Verwendung in Bauwerken.

Die Dämmstoffe enthalten über 90% künstliche Mineralfasern (KMF), Kunstharz (aus Phenol, Harnstoff und Formaldehyd), Öle und weitere Zusätze. Durch die Variabilität der Rohstoffe und Zusatzstoffe sowie auch durch die unterschiedlichen Herstellungsverfahren ergibt sich eine breite Palette von Mineralfaserdämmstoffen: [6]

Glaswolle	Wärmeleitfähigkeit $\lambda(R)$: 0,035-0,045 W/(m·K) spez. Wärmespeicherkapazität c : 840-1.000 J/(kg·K) Wasserdampfdiffusionswiderstand μ : 1-2 Baustoffklasse: A 2 nichtbrennbar
-----------	---

	Rohdichte ρ : 20-153 kg/m ³ Primärenergiegehalt: 250-500 kWh/m ³
Steinwolle	Wärmeleitfähigkeit $\lambda(R)$: 0,035-0,045 W/(m·K) spez. Wärmespeicherkapazität c: 840 J/(kg·K) Wasserdampfdiffusionswiderstand μ : 1-2 Baustoffklasse: A 1, A 2 nichtbrennbar Rohdichte ρ : 22-200 kg/m ³ Primärenergiegehalt: 150-400 kWh/m ³
Schlackenwolle	Wärmeleitfähigkeit $\lambda(R)$: 0,035-0,040 W/(m·K) spez. Wärmespeicherkapazität c: 840-1.000 J/(kg·K) Wasserdampfdiffusionswiderstand μ : 1-2 Baustoffklasse: A 1 nichtbrennbar Rohdichte ρ : 80-220 kg/m ³

Derzeit werden auf dem deutschen Markt verschiedene Mineralwolleprodukte angeboten. In den nachfolgenden Abschnitten werden Hersteller bedingte Angaben der Mineralwolleprodukte aufgeführt.

1.2.1.1 Saint-Gobain Isover G+H AG

Die Saint-Gobain Isover G+H AG [7] stellt Dämmstoffe für Wände, Dächer und Decken her. Sie werden nach dem RAL-Gütezeichen der Gütegemeinschaft Mineralwolle e. V. produziert.

Die Glaswolle von Isover besteht bis zu 97 % aus natürlichen mineralischen Rohstoffen:

- Bis zu 70 % aus Altglas
- Zu 0,5 – 0,7 % aus Bindemitteln (Bakelit)
- Zu 0,5 % aus Mineralöl
- Quarzsand
- Schmelzpunkt unter 1000° C
- Rohdichte von 10 – 100 kg/m³
- Wärmeleitfähigkeit 0,040 W/(mK)
- Dicken von 120 – 240 mm

Die Steinwolle besteht bis zu 97 % aus natürlichen mineralischen Rohstoffen

- Bis zu 30 % aus Altglas
- Zu 0,5 – 0,7 % aus Bindemitteln (Bakelit)
- Zu 0,5 % aus Mineralöl
- Feldspat, Dolomit, Sand, Kalk
- Schmelzpunkt über 1000° C
- Rohdichte von 25 – 210 kg/m³

Tabelle 1: Steinwolle Dämmplatte [7]

Lieferform			
Dicke	R _D	Breite	Länge
mm	m ² K/W	mm	mm
120	3,05	600	1200
100	2,55	600	1200
80	2,05	600	1200
60	1,50	600	1200

Tabelle 2: Glaswolle Dämmplatte [7]

Lieferform			
Dicke	R _D	Breite	Länge
mm	m ² K/W	mm	mm
120	3,20	600	1250
100	2,70	600	1250
80	2,15	600	1250
60	1,60	600	1250

1.2.1.2 Deutsche Rockwool Mineralwool GmbH & CO. OHG [8]

Diabas/Basalt sowie Betonformsteine werden mittels Koks als Energieträger im Kuppelofen bei ca. 1.400 - 1.500 °C geschmolzen und im Walzenspinnerverfahren zerfasernd. Gleich danach werden Schmelzmittel (Mineralöle) und Bindemittel (harnstoffmodifiziertes Phenol-Formaldehyd-Harz) in wässriger Lösung aufgesprüht. Das Bindemittel dient der Gewährleistung von Bindung und Formstabilität, das Schmelzmittel der Staubminderung und Hydrophobierung. Der in der wässrigen Lösung ebenfalls enthaltene Haftvermittler unterstützt die Anhaftung des Bindemittels an den Fasern. Die Rohwolle wird in Sammelkammern, welche unter Unterdruck stehen, auf Transportbändern abgelegt. Das Rohvlies wird kontinuierlich ausgetragen und Härteöfen zugeführt, in denen 200-300 °C heiße Luft durch die Wollmasse gesaugt wird, wobei sich die Bindemittel zu Duroplasten vernetzen. Anschließend werden Kaschierungen aufgebracht oder das Vlies wird mit Drahtgeflecht versteppt. Schließlich wird das Produkt mittels Sägen in Form gebracht.

Die während des Produktionsbetriebes entstehenden Abluftmengen werden mechanisch gefiltert und überwiegend thermisch nachverbrannt. Über Wärmetauscher wird der hierbei freigesetzte Wärmeinhalt zur Vorwärmung des Ofenwindes verwendet. Die abgeschiedenen Stäube können als Rohstoff erneut genutzt werden. Das Prozesswasser wird intern gereinigt und zu einem erheblichen Teil wieder in den Prozess zurückgeführt.

Abmessungen: Diverse Längen und Breiten, Dicken bis zu 260 mm.

Rohdichte: 20 - 200 Kg/m³

Wärmeleitfähigkeit: 0,040 W/(mK)

1.2.1.3 Knauf Insulation GmbH & Co.KG

Die Knauf Insulation GmbH und die Deutsche Heraklith GmbH wurden von der Knauf Insulation GmbH & Co.KG [9] übernommen.

1.2.1.4 Heraklith

Steinwolle-Dämmplatte

Schmelzpunkt >1000° C

Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(mK), 0,040 W/(mK) und 0,045 W/(mK)

Dicke von 60 – 200 mm

Tabelle 3: Steinwolle Dämmplatte [10]

Bezeichnung	Abmessungen			Gewicht (kg/m ²)	Wärmedurchlasswiderstand	Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl Z
	Dicke in mm	Länge in mm	Breite in mm			
Heralan FPL-035 60 mm	60	1200	625	3,12	1,71	1
Heralan FPL-035 80 mm	80	1200	625	4,16	2,29	1
Heralan FPL-035 100 mm	100	1200	625	5,2	2,86	1
Heralan FPL-035 120 mm	120	1200	625	6,24	3,43	1
Heralan FPL-035 140 mm	140	1200	625	7,28	4,00	1
Heralan FPL-035 160 mm	160	1200	625	8,32	4,57	1
Heralan FPL-035 180 mm	180	1200	625	9,36	5,14	1
Heralan FPL-035 200 mm	200	1200	625	10,4	5,71	1

Heralan PL

Druckbelastbare Steinwolle-Lamelle zur Wärme- und Schalldämmung, sowie vorbeugender Brandschutz zur Verwendung in Wärmedämm-Verbundsystemen. Nichtbrennbar -A1- nach DIN EN 13501-1. Wasserabweisend, diffusionsoffen, chemisch neutral, alterungsbeständig, dimensions- und formstabil. Sehr hohe Abreißfestigkeit durch zum Bauteil ausgerichtete Faserstruktur. Auch für gebogene Bauteile geeignet. Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit: 0,041 W/mK. Gesundheitlich unbedenklich nach „RAL“ Gütezeichen. [10]

1.2.1.5 Knauf Insulation GmbH

Knauf Insulation GmbH stellt Dämmstoffe für Wände, Dächer und Decken her. Sie werden nach dem RAL-Gütezeichen der Gütegemeinschaft Mineralwolle e. V. produziert.

Das Produkt Thermolan ist eine gebundene Glaswolle, nichtbrennbar, unverrottbar, form- und alterungsbeständig.

Tabelle 4: Abmessungen Thermolan [9]

Dicke	Breite	Länge
[mm]	[mm]	[mm]
50	1.200	12.000
60	1.200	10.000
80	1.200	8.000
100	1.200	7.000
120	1.200	6.000
140	1.200	5.000
160	1.200	4.500
180	1.200	4.000
200	1.200	3.500

Tabelle 5: Produkteigenschaften Thermolan [9]

Produkteigenschaft	Einheit	Messwerte	Normen
Hydrophobierung		ja	EN 13162
Kaschierung/Beschichtung			
Nennwert der Wärmeleitfähigkeit	?D [W/mK]	0,035	EN 13162
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	? [W/mK]	0,035	DIN V 4108-4
Wärmeleitfähigkeitsgruppe	WLG	35	
Zusammendrückbarkeit	CPi [mm]		EN 13162
Dynamische Steifigkeit	SD (s ⁻¹) [MN/m ³]		EN 29052-1
Brandverhalten (Euroklasse)		A1	EN 13501
Temperaturbeständigkeit		bis 150 °C	
Spezifische Wärmekapazität	c [kJ/(kgK)]	0,85	
Wasserdampfdiffusionswiderstand	MU (μ)	~ 1	EN 12086

Das Produkt Heralan ist eine Steinwollgedämmplatte, nichtbrennbar, Wasser abweisend, unverrottbar, form- und alterungsbeständig.

Es wird beispielsweise in den Dicken 60, 80, 100 und 120 mm mit einer Länge von 1200 mm und einer Breite von 625 mm geliefert.

1.2.2 2.2 Materialkennwerte Mineralwolle mit einem Kanzerogenitätsindex [KI] kleiner 40

In der ehemaligen DDR wurden zur Dämmung der Gebäude verschiedene Dämmstoffe eingesetzt. Auf Grundlage der Rohstoffvorkommen, Importbedingungen und staatlicher Vorgaben differierte die Materialbasis erheblich.

Mineralwollgedämmstoffe „Kamilit“ [4]

Grundstoff: Schlackenwolle, kurzfasrig aus metallurgischen Schlacken sowie Naturstein, Mineralöl als Schmelze, Kunstharzbinde

Stoffbasis: SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃ und andere in teilweise unterschiedlichen Anteilen

Anwendungsgebiete: Kaltdachunterschaltung, schwere und leichte Außenwandelemente, Fußböden, Rohrumhüllungen, Schallabsorption

Glasfasern

Grundstoff: Glasfasern von ca. 6 mm Dicke, mit oder ohne Auflage

Stoffbasis: SiO_2 , CaO , Na_2O (Al_2O_3 , MgO)

Anwendungsgebiet: Kaltdachunterschaltung, leichte Außenwandelemente, Rohrumhüllungen, Schallschluckstoff

In künstlichen Mineralfasern wurden z. B. Kunstharze als Bindemittel verwendet. Diese PF (Phenol-Formaldehyd)- und die UF-(harnstoffmodifizierten Phenol-Formaldehyd)-Harze dienen der Stabilisierung der Fasern. In diesen organischen Bindemitteln ist meist der Gefahrstoff Formaldehyd enthalten.

Die Beseitigung von Mineralfaserabfällen hat in Abhängigkeit der Gehalte an organischen Zusatzstoffen bzw. schädlichen Verunreinigungen zu erfolgen. Als organische Anteile kommen neben Kartonkaschierungen vor allem Bindemittel wie z.B. Phenolharze und Formaldehydharze, Schmelzmittel wie z.B. Mineralöle oder Klebstoffe in Betracht. Gibt es zu den Mineralwollereststoffen keine Herstellerangaben und kann ein relevanter Anteil an organischen Stoffen nicht sicher ausgeschlossen werden, sind Analysen über die Inhaltsstoffe durchzuführen.

Als Rohstoff wurde beispielsweise im Mineralwollewerk Bad Berka ausschließlich (mit Ausnahme einiger Versuche) Basalt aus der Rhön eingesetzt, der im Mittel folgende chemische Zusammensetzung hatte:

SiO_2 41,0 %, Al_2O_3 12,2 %, Fe_2O_3 12,2 %, CaO 12,5 %, MgO 13,2 %, TiO_2 2,4 %, Na_2O 2,5 %, K_2O 1,4 %. [11].

Selbstverständlich schwanken die Zusammensetzungen natürlicher Rohstoffe, so dass Einzelanalysen differieren. Außerdem sind weitere Spurenelemente enthalten.

Als Bindemittel wurde, wie auch noch heute, ein Phenol-Formaldehyd-Kunstharz verwendet, das als ausgehärteter Kunststoff mit ca. 1,5 bis 3,5 % im Fertigprodukt enthalten war. In sehr geringen Mengen wurde den meisten Produkten zur Staubbindung noch ein so genanntes HDZ-Öl zugesetzt. Ein nicht geringer Anteil waren Produkte für den Schiffbau, bei denen kein Öl zugesetzt wurde.

Da in der späteren DDR-Zeit keine Energieträger mehr für die Vorwärmung des Ofenwindes zur Verfügung standen, waren die Schmelztemperaturen mit ca. 1300 °C relativ niedrig.

In Bad Berka wurden mit Ausnahme von gerollten Filzen fast ausschließlich Mineralwolleplatten in den Dicken 40 bis 120 mm, den Dichten 50 bis 170 kg/m³ und dem Format 1000 x 500 mm hergestellt. Hinzu kamen einige Sonderformate und nachträglich gesägte Platten geringerer Dicke (Trittschalldämmplatten).

Die Wärmeleitfähigkeit war geringfügig schlechter als heute. Die Produkte waren den Wärmeleitfähigkeitsgruppen 040 und 045 zugeordnet.

2 Arbeitspaket 2

2.1 Charakterisierung des Ausgangsmaterials

Die untersuchten Mineralwollematerialien wurden von der Firma Reimann Umweltschutz GmbH Seebergen zur Verfügung gestellt. Hierbei handelte es sich um ausgebaute Materialproben, die nach Anhang IV Nr. 22 Abs. 2 der Gefahrenstoffverordnung in die Kategorie „alte“ Mineralwolle einzuordnen waren. Eine Charakterisierung bezüglich der Herkunft sowie des Verwendungszweckes war zum größten Teil nicht mehr möglich. Die untersuchten Materialien sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Mineralwollematerialien

Materialbezeichnung	Erläuterungen	Foto
Probe A	Mineralwolle als gepresste Plattenformate; Plattenstärke von 6,0 cm; Rohdichte: 0,15 g/cm ³ Farbe – Olivgrün	
Probe B	Mineralwolle in Form von losen Flocken; Farbe – Blassgelb/grün	
Probe C	stark verpresstes Dämmmaterial für Rohrverkleidungen; Stärke 5,0 cm bei einem Außen- bzw. Innendurchmesser von 15,0 bzw. 5,0 cm; Rohdichte: 0,05 g/cm ³ Farbe – Dunkelgrün	
Probe D	Dämmmaterial in Form von Rohrverkleidungen; Rohdichte: 0,05 g/cm ³ Farbe – Gelb	

2.2 Ermittlung der Schmelztemperatur

Zur Ermittlung der Schmelztemperatur wurden zwei verschiedene Untersuchungsmethoden angewandt. Zum einen erfolgten die Untersuchungen durch Schmelzen der Mineralwolle im Muffelofen mit elektronischer Temperatur - Programmregelung der Firma Nabertherm (Bild 3: Muffelofen) im Technikum des Institutes für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar.



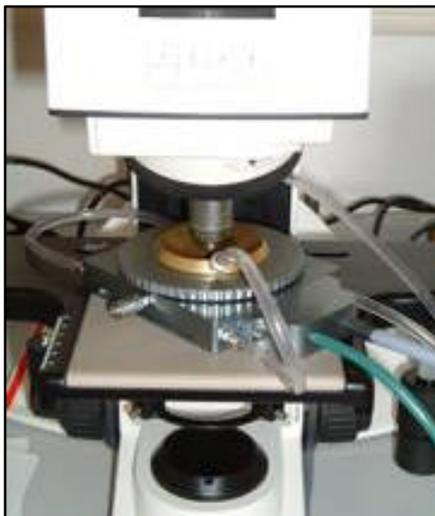
Gerätedaten Muffelofen Modell N 150/H:

Außenmaße:	750 x 1120 x 1080 mm
Prozessraum:	450 x 560 x 600 mm
Nutzvolumen:	150 Liter
Maximaltemperatur:	1340 °C
Leistung:	14 kW
Anschluss:	380 V 3/N 21,3 A 50 Hz
Baujahr:	1989

- Beheizung von beiden Seiten, Rückwand, Tür und Boden
- gleichmäßige Temperaturverteilung (± 10 °C)

Bild 3: Muffelofen

Zum anderen konnte durch die Anwendung der Heitzschmikroskopie, an der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung der Bauhaus-Universität Weimar, neben der Ermittlung der Schmelztemperatur auch der Verlauf des Schmelzprozesses fototechnisch dokumentiert werden (Bild 4).



Gerätedaten Heitzschmikroskop:

Temperatur:	RT – 1500 °C
Aufheizrate:	1 – 50 K/min
Temperaturreglung:	1 K
Gehäuse:	wassergekühlt
min. Arbeitsabstand:	6 mm
Probengröße:	max. Ø 7 mm; max. Dicke 1 mm
Probenmasse:	max. 200 mg



Bild 4: Heitzschmikroskop (links) und Heitzsch (rechts)

2.2.1 Untersuchungen im Muffelofen

Die Ermittlung der Schmelztemperatur erfolgte für das Probenmaterial A. Hierzu wurden in drei Schmelztiiegeln kleinere Mineralwollestücken zu ca. 1,0 g eingewogen und auf verschiedene Maximaltemperaturen von 500 bis 1200 °C erhitzt. Die Haltezeit der Maximaltemperatur betrug jeweils 20 min. Die Auswertung erfolgte über die Bestimmung der Masse und die augenscheinliche Begutachtung des Probekörpervolumens sowie der Farbe.

Im Ergebnis war festzustellen, dass ein Masseverlust von durchschnittlich $7,6\% \pm 0,5\%$ für die Temperaturbehandlung der Mineralwolle bereits bei 500 °C eingetreten ist. Dies entspricht den in dieser Größenordnung herstellungsbedingten organischen Bestandteilen, den Binde- und Schmelzmittelmengen [12], [13]. Unbeeinträchtigt blieben dagegen das Volumen und die Farbe. Eine Erhöhung der Maximaltemperatur bis auf 1200 °C führte zu keinen weiteren Masseverlusten. Indessen waren Veränderungen hinsichtlich des Volumens und der Farbe zu beobachten. Ab einer Temperatur von 900 °C setzten erste Schwindprozesse ein. Die Farbe der Mineralwolleproben änderte sich mit steigender Temperatur auf 1100 °C von Olivgrün auf leuchtendes Orange/Rot.



Bild 5: Umwandlung der Mineralwolle (Probe A) in Abhängigkeit von der Temperatur

Bei einer Temperatur von 1150 °C konnte der Schmelzbeginn festgestellt werden. Die Mineralwolleproben wiesen keine Faserstruktur mehr auf, sondern eine glasige, gesinterte Oberfläche. Mit der Verschlackung der Proben fand ein weiterer Farbumschlag auf Rotbraun statt. Eine vollständige Schmelze der Mineralwolleproben A ergab sich durch die Temperaturerhöhung auf 1200 °C (Bild 5).

2.2.2 Untersuchungen mittels Heitzischmikroskopie

Die Untersuchungen zur Bestimmung des Schmelzverhaltens von „alter“ Mineralwolle wurden ebenfalls an dem Probenmaterial A, als Vergleich zu den Beobachtungen mittels Muffelofen und zusätzlich am Probenmaterial B durchgeführt. Die Probenpräparation macht die Anpassung an die vorgegebenen Geräteparameter sowie den Prozessraum erforderlich. Dies bedeutete, dass im Gegensatz zu den Untersuchungen im Muffelofen nur vereinzelte Faserbündel unterschiedlicher Faserdichten und Massen von wenigen Milligramm untersucht werden konnten. Ebenso unterscheidet sich das Brennregime von den vorangegangenen Schmelzuntersuchungen (Bild 6).

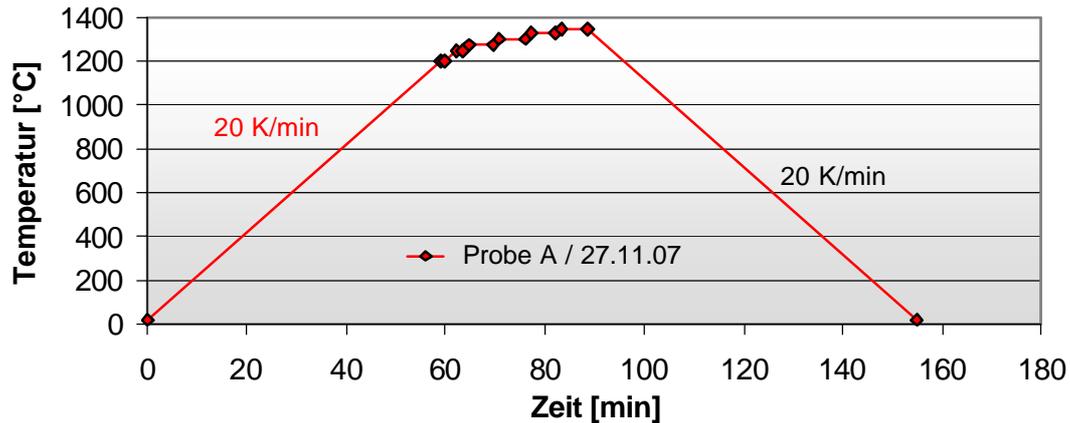
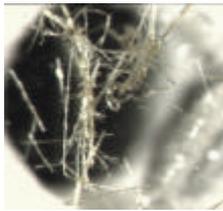
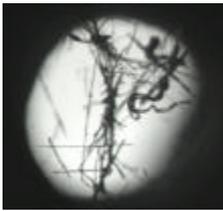
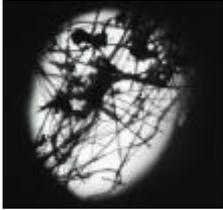


Bild 6: Brennregime für die Untersuchungen mittels Heitzschmikroskopie

Die festgelegte Aufheiz- und Abkühlrate betrug 20 K/min. In der Aufheizphase wurden bei bestimmten Temperaturen Haltezeiten von bis zu 5 min eingeschoben, um die Veränderungen des Probenmaterials fototechnisch festzuhalten. Die in Anlehnung an die Schmelztemperatur-Untersuchungen mittels Muffelofen zunächst eingestellte Maximaltemperatur von 1250 °C musste auf 1350 °C erhöht werden, um Schmelzerscheinungen der Faserbündel zu erzielen. Die Maximaltemperatur wurde 5 min gehalten. Als Bewertungskriterium dieser Methode zur Ermittlung der Schmelztemperatur dienten die mikroskopischen Aufnahmen der Faserbündel (Tabelle 7 und Tabelle 8). Eine Feststellung der Probenmasse mittels Wägung konnte nicht vorgenommen werden. Analog zu den Untersuchungen im Muffelofen zeigten beide Mineralwolleproben unter dem Mikroskop Anfänge erster Schwindungen im Temperaturbereich von 800 - 900 °C auf. Mit steigender Temperatur nahm die Intensität des Schwindprozesses zu.

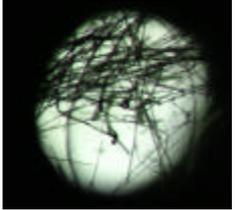
Tabelle 7: Heitzschmikroskopie des Probenmaterials A (40x Vergrößerung)

Auflicht/Durchlicht	Durchlicht	Durchlicht/Auflicht
Probe A_V3		
		
Ausgangszustand bei Raumtemperatur	Schmelzbeginn bei 1275 °C	Endzustand bei 1350 °C und Raumtemperatur
Probe A_V5		
		
Ausgangszustand bei Raumtemperatur	Schmelzbeginn bei 1300 °C	Endzustand bei 1350 °C und Raumtemperatur

Die weitere Auswertung der Probe A in Bezug auf den Schmelzprozess ergab, dass sich in Abhängigkeit der Dichte der untersuchten Faserbündel der Schmelzbeginn bei verschiedenen Temperaturen einstellte. Während der Schmelzbeginn für die Probe mit der geringsten Faserdichte bereits bei 1275 °C einsetzte, verschob sich dieser für das kompakteste Faserbündel auf eine Temperatur von 1350 °C.

Mit einem Schmelzbeginn bei Temperaturen zwischen 1280 und 1300 °C lässt sich die Materialprobe B (Tabelle 8) in den Schmelztemperaturbereich der Probe A einordnen.

Tabelle 8: Heitzschmikroskopie des Probenmaterials B (40x Vergrößerung)

Auflicht/Durchlicht	Durchlicht	Durchlicht/Auflicht
Probe B_V1		
		
Ausgangszustand bei Raumtemperatur	Schmelzbeginn bei 1300 °C	Endzustand bei 1350 °C und Raumtemperatur

Die Temperaturbehandlung der Mineralwolle bis zur Schmelze mittels Heitzschmikroskop bewirkte ebenso eine Farbveränderung wie die vorangegangenen Schmelzuntersuchungen im Muffelofen. Probe A veränderte ihre Farbe von Olivgrün auf Rotbraun. Die Probe B wies ein blasses Gelb/Grün im Ausgangszustand und ein leuchtendes Gelb nach der Temperaturbehandlung auf.

2.3 Behandlung der Mineralwolle mittels Multi-Mode-Mikrowellentechnologie

2.3.1 Multi-Mode-Mikrowellenanlage

Die Mineralwollebehandlung mittels Mikrowellenstrahlung erfolgte in der Versuchsanlage der Firma Reimann Umweltschutz GmbH, welche im IFF – Technikum aufgebaut wurde (Bild 7). Die Anlage arbeitet mit 12 Magnetronen, 6 je Seite. Durch Öffnungen an den Kammerseitenwänden strahlen die Magnetronen die erzeugten Mikrowellen direkt in den Kammerinnenraum ab. Hierdurch entsteht im Gegensatz zur Haushaltsmikrowelle keine gerichtete, sondern eine wilde Strahlung, die zu einer gleichmäßigen Erwärmung des Mikrowellengutes führen soll.



Gerätedaten Mikrowellenanlage Typ LK 14,4:

Hersteller:	MWT GmbH; Elz
Baujahr:	2001
Spannung:	480/230 V/50 Hz
Anschluss:	35 kW
Frequenz:	2450 MHz
Prozessraum:	ca. 550 x 600 x 1000 mm ³
Leistung:	50 %; 75 %, 100 %

- arbeitet mit jeweils 6 Magnetronen auf jeder Seite
- automatisch oder manuell einschaltbar
- Abgasventilatoren

Bild 7: Multi-Mode-Mikrowellenanlage

2.3.2 Mikrowellenbehandlung der Mineralwolle

2.3.2.1 Versuchsserie I

Die Untersuchungen zur Umwandlung der Mineralfaserstruktur erfolgten in der Versuchsserie A am gepressten, plattenformatigen Probenmaterial A und unter folgenden Geräteparametern:

Mikrowellenleistung:	100 % (Nutzung aller 12 Magnetronen),
Mikrowellenlüftung:	Stufe 3.

Die Dauer der Mikrowellenbehandlung wurde zunächst auf 2 min festgelegt. Die Nutzung der Mikrowellenanlage erfolgte im automatischen Betriebsmodus, d. h. der Prozessraum wird mit Auslösen des Startsignals geschlossen und nach erfolgter Mikrowellenbestrahlung automatisch wieder geöffnet.

Zur Charakterisierung des Ausgangszustandes der zu untersuchenden Proben wurden diese gewogen, ausgemessen und visuell bzw. fototechnisch erfasst. Als sogenannter „Mikrowellenteller“ diente ein Blech, auf dem die Probe über das Rollenband der Mikrowelle in den Prozessraum eingeführt und mittig platziert wurde.

Anhand der Rückwaage der Proben sowie der visuellen Betrachtung der Probenmerkmale Volumen und Farbe erfolgte nach abgeschlossener Mikrowellenbehandlung die Bewertung des Versuches.

1. Versuch

Bereits während der Mikrowellenbehandlung konnte anhand des Arbeitsgeräusches der Anlage sowie der Entstehung von Abgasen auf eine Reaktion der Mineralwolle infolge der Bestrahlung geschlussfolgert werden. Bestätigt wurde diese Annahme durch den glühenden Probenzustand direkt nach der Mikrowellenbehandlung (Bild 8). Die Probe musste sich durch die Bestrahlung der Mikrowellen, zumindest im Probeninneren auf Temperaturen über 1200°C erhitzt haben.



Bild 8: Probe A-1 vor (links) und direkt nach 2 min Mikrowellenbehandlung (Mitte), sowie im abgekühlten Zustand (rechts)

Wie bereits bei den Untersuchungen zum Schmelzverhalten konnte auch hier ein Masseverlust von ca. 6,8 % entsprechend der Größenordnung der zugesetzten organischen Bestandteile, den Binde- und Schmelzmittelmengen festgestellt werden. Ebenso war eine Abnahme des Probenvolumens und Farbveränderungen zu verzeichnen. Die verschiedenen Färbungen deuten auf eine nicht gleichmäßige Erwärmung des Probenmaterials bzw. auf die Ausbildung unterschiedlicher Temperaturbereiche hin. Die Unterseite des behandelten Probekörpers zeigte durch die abschottende Wirkung des Bleches keinerlei Veränderungen infolge der Mikrowellenbehandlung. Aus diesem Grund erfolgte eine nochmalige Behandlung des gewendeten Probekörpers A-1 von 2 min. Das Ergebnis verdeutlicht das Bild 9. Durch die Erwärmung des Mikrowellengutes von Innen nach Außen erfolgte im Probekörperinneren infolge der erreichten Temperaturen von über 1200 C° eine Umwandlung der Fasern in Schlacke. Die teilweisen bzw. punktuellen Umwandlungen der Oberfläche des Probekörpers (eingebraunte Löcher; rot gekennzeichnet) der untersuchten Mineralwolle weisen zum einen auf Energieüberlagerungen (Bündelung der Strahlung), sogenannte „Hot Spots“ hin. Zum anderen ergibt sich bei sehr hohen Temperaturen, wie es die benötigte Schmelztemperatur von ca. 1200 °C darstellt, nach Lühken [14] eine signifikante Differenz zwischen Oberflächen- und Innentemperatur, die eine vollständige Umwandlung der Mineralwolleoberfläche verhindert. Ein weiterer Masseverlust ist nicht eingetreten.



Bild 9: Unterseite der Probe A-1 nach nochmaliger Mikrowellenbehandlung von 2 min

2. Versuch

In einem zweiten Versuch wurde mit Hilfe von aufgesprühtem Wasser versucht, die Wirkung der Mikrowellen zu verstärken, um auch die Probekörperoberfläche zu verschlacken. Den Hintergrund bildete hierbei die sehr gute Anregbarkeit von Wassermolekülen durch Mikrowellenstrahlung. Die oben genannten geräte- und verfahrenstechnischen Einstellungen und Parameter wurden beibehalten.

Analog zur vorangegangenen Mikrowellenbehandlung konnte keine vollständige Verschlackung erreicht werden. Eine Umwandlung der Mineralwolle fand wiederum nur im Inneren des Probekörpers statt (Bild 10). Die Erhitzung der Probekörperoberfläche auf 100 °C durch das aufgesprühte Wasser bewirkte keine Verbesserung hinsichtlich der Verschlackung der Mineralwolleoberflächen. Es müssen, wie bei der Ermittlung der Schmelztemperatur festgestellt wurde, Temperaturen von ca. 1200 °C erzeugt werden, damit ein Schmelzprozess bzw. eine Verschlackung der Mineralwolle eintritt. Die bereits gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf Masseverlust (6,7 %), Schwindverhalten und Farbausildung sowie die Entstehung von Hot Spots konnten in diesem Versuch bestätigt werden (Bild 10).

Die Probenunterseite wies nach dem 1. Behandlungsdurchgang keine Veränderungen auf, so dass auch hier ein 2. Durchgang erfolgte.



Bild 10: Mit Wasser besprühte Mineralwolleprobe A-2 nach zwei Behandlungsdurchgängen von jeweils 2 min

2.3.2.2 Versuchsserie II

In dieser Serie wurde das Reaktionsverhalten der anderen Mineralwollematerialien (B, C, D) zunächst bei gleichen geräte- und verfahrenstechnischen Einstellungen untersucht.

Im Ergebnis zeigten alle drei Materialien unter diesem Versuchsregime keinerlei Reaktionen auf die Mikrowellenbehandlung. Die Probenzustände entsprachen nach der Behandlung den Ausgangszuständen der Mineralwollematerialien - keine Masseverluste, keine Schwindungen und keine Farbveränderungen waren festzustellen. Um eventuelle verfahrenstechnische Fehler auszuschließen, wurde eine Wiederholung der Versuche mit jeweils einem Stück des Materials A durchgeführt, sodass die Mikrowellenwirkung auf die Mineralwollematerialien B, C und D parallel zu der Wirkung auf das Material A erfolgte. Das Ergebnis dieser Versuche bestätigte die zuvor gewonnene Erkenntnis, dass sich nicht jede Mineralwolle mittels Mikrowellenenergie erhitzen und in Schlacke umwandeln lässt.

Als Beispiel für die Unwirksamkeit der Mikrowellenstrahlung auf Mineralwolle stehen die in Bild 11 dargestellten Materialien B und C.

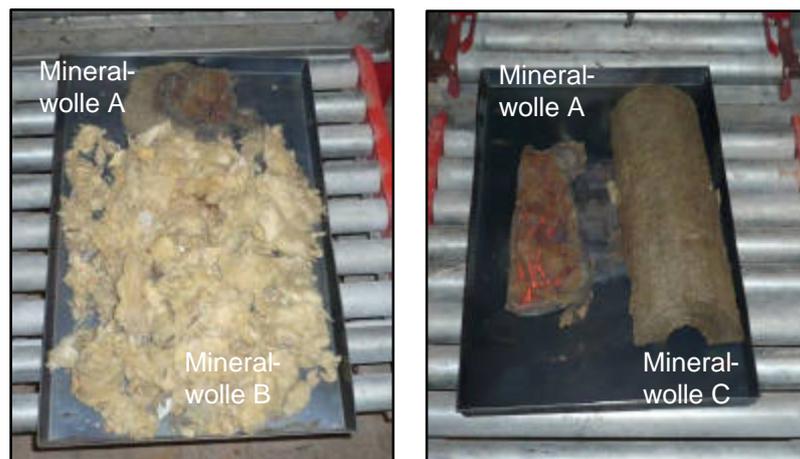


Bild 11: Mineralwollematerialien B und C im Vergleich mit Material A nach Einwirkung von Mikrowellenenergie

Im Gegensatz zum Material A, das durch Schmelzen des Inneren, mit Schwindung und Farbveränderungen auf die Mikrowellen reagierte, lagen die anderen Materialien nach der Behandlung unverändert wie im Originalzustand vor.

Durch Veränderungen der verfahrenstechnischen Parameter, wie Erhöhung der Behandlungsdauer von 2 auf 5 min, Vergrößerung der Oberfläche durch Zerkleinerung des Probenmaterials und auch die Tränkung des Materials mit Wasser führten zu keinem anderen Ergebnis.

2.3.2.3 Untersuchungen zum Einfluss der organischen Bestandteile auf die Verschlackung

Als mögliche Ursache, dass nicht alle Mineralwollematerialien in der Mikrowelle zu verschlacken waren, wurde zunächst der Einfluss der organischen Bestandteile untersucht. Als Arbeitshypothese wurde angenommen, dass die organischen Bestandteile bei bestimmten Einsatzbedingungen z. T. ausgetrieben bzw. zersetzt werden.

Bei den Materialien C und D, die als Rohrdämmungsmaterial für Wasserrohre eingesetzt wurden, wirkten über den Nutzungszeitraum Temperaturen von mehr als 70 °C auf die Mineralwolle ein. Das Material B wurde wahrscheinlich als Dämmung im Dachbereich bzw. im Dremmel eingesetzt. Dort können durch Aufheizen infolge der Sonneneinstrahlung ebenfalls hohe Temperaturen erreicht werden. Dieser Temperatureinfluss kann zu Veränderungen der organischen Bestandteile in den Mineralwollen geführt haben. Das Material A war womöglich keinem solchen Temperatureinfluss ausgesetzt, sodass die Organik unverändert vorliegt.

Durch eine Temperaturvorbehandlung der Mineralwolle A im Muffelofen sollte der mögliche Einfluss der Einsatzbedingungen nachgewiesen werden. Hierfür wurden Probekörperhälften im Muffelofen auf 400 °C bzw. 700 °C erwärmt und diese Temperaturen 5 h gehalten. Die hohen Temperaturen wurden gewählt, um den Zeiteinfluss, der sich aus der Nutzungsdauer ergibt, auszugleichen. Für die mit 400 °C behandelte Mineralwolleprobe ergaben sich ein Masseverlust von 6,32 % und eine Farbveränderung von Olivgrün auf Grau/Grün. Die Temperaturbehandlung von 700 °C führte zu einem ähnlichen Masseverlust, der bei 6,44 % lag und einem Farbumschlag von Olivgrün auf Rot/Orange. Die Mikrowellenbehandlung wurde mit jeweils einer temperaturbehandelten und einer unbehandelten Mineralwolleprobe des gleichen Materials durchgeführt, sodass die Mikrowellenstrahlung auf die temperaturbehandelten Proben parallel zu der Wirkung auf das unbehandelte Material untersucht werden konnte. Die Mikrowellenbehandlung erfolgte in zwei Durchgängen von jeweils 3 min.

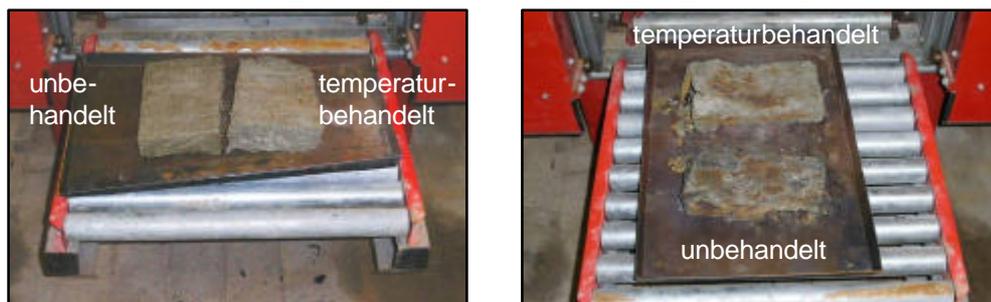


Bild 12: Unbehandeltes und temperaturbehandeltes (400 °C) Mineralwollematerial A vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung von 6 min (rechts)

Das Ergebnis zeigte, dass der Effekt der Mikrowellenstrahlung auf die Mineralwolle durch die vorhergehende Temperaturbehandlung von 400 °C gemindert wurde (Bild 12, rechts). Eine Verschlackung der Mineralfasern trat ein, aber nicht in dem Ausmaß, wie es für die unbehandelte Mineralwolle festgestellt wurde. Mit der Erhöhung der Behandlungsdauer ist eine bessere Faserumwandlung zu erwarten.

Die Temperaturbehandlung von 700 °C bewirkte indessen, dass eine Anregung der Mineralwolle durch Mikrowellenstrahlung nicht mehr möglich war, sodass keine Umwandlung der Mineralfasern in Schlacke erfolgte (Bild 13, rechts).

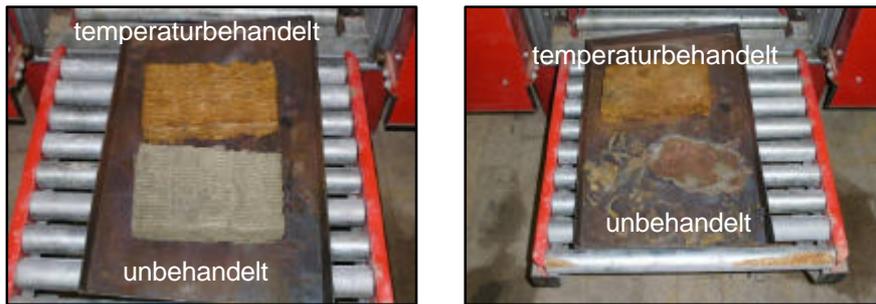


Bild 13: Unbehandeltes und temperaturbehandeltes (700 °C) Mineralwollematerial A vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung von 6 min (rechts)

Die Arbeitshypothese, dass die organischen Bestandteile der Mineralwolle Einfluss auf die Verschlackbarkeit haben, wird also z. T. bestätigt. Mineralwolle ohne Organik lässt sich deutlich schlechter verschlacken als solche, die Binde- und Schmelzmittel enthält.

2.3.2.4 Untersuchungen und Auswahl geeigneter Suszeptoren für die Verschlackung

Aufgrund der oben genannten Ergebnisse war es notwendig, geeignete Materialien zu finden, die auf Mikrowellenenergie reagieren. Durch Zusammenwirkung dieser mit der Mineralwolle sollte die beabsichtigte Wirkung der Mikrowellenbehandlung auf die Mineralwolle erreicht werden.

Mikrowellen - Suszeptoren sind solche Materialien, die die Mikrowellenstrahlung absorbieren und deren Energie in Wärme umwandeln. Einflussgrößen auf die Absorption haben die spezifische Wärmekapazität des Materials, seine Dielektrizitätskonstante und seine dielektrische Verlustrate sowie die spezifische Emissionsrate. Einen weiteren Einflussfaktor bei Feststoffen bildet die Morphologie. [14]

In der nachfolgenden Tabelle 9 ist das Verhalten verschiedener Feststoffe bei Mikrowellenerwärmung aufgeführt. Eine Behandlung beispielsweise von Kohlenstoff führte nach 1 min zu einer Temperatur von 1283 °C. Die gemessenen Daten sind jedoch differenziert zu betrachten, da keine Angaben zur Morphologie oder Modifikation des jeweiligen Stoffes gemacht wurden. Untersuchungen zur Mikrowellenerwärmung von Flüssigkeiten sind in Literatur „Applications of Microwave Dielectric Heating Effects to Synthetic Problems in Chemistry“ von Mingos/Baghurst [15] nachzulesen.

Bei Betrachtung der erreichten Temperaturen für die aufgeführten Feststoffe in Verbindung mit der Schmelztemperatur von Mineralwolle bei ca. 1200°C scheint Kohlenstoff (C) ein geeigneter Mikrowellen - Suszeptor zu sein. Hierbei ist zu beachten, dass Graphit in Pulverform ein äußerst guter Suszeptor ist, Diamant ist mikrowellentransparent [14].

Tabelle 9: Effekt der Mikrowellenerwärmung bei Feststoffen [15]

Reihe A (25 g Proben bei 1000 Watt)*			Reihe B (5-6 g Proben bei 500 Watt)*		
Feststoff	Temperatur T [°C]	Zeit t [min]	Feststoff	Temperatur T [°C]	Zeit t [min]
Al	577	6	CaO	83	30
C	1283	1	CeO ₂	99	30
CO ₂ O ₃	1290	3	CuO	701	0,5
CuCl	619	13	Fe ₂ O ₃	88	30
FeCl ₃	41	4	Fe ₃ O ₄	510	2
MnCl ₂	53	1,75	La ₂ O ₃	107	30
NaCl	83	7	MnO ₂	321	30
Ni	384	1	PbO ₂	182	7
NiO	1305	6,25	PbO ₄	122	30
SbCl ₃	224	1,75	SnO	102	30
Sn Cl ₂	476	2	TiO ₂	122	30
SnCl ₄	49	8	V ₂ O ₅	701	9
ZnCl ₂	609	7	WO ₃	532	0,5

* Beginn bei Raumtemperatur

Pyrometrische Untersuchungen zeigten, dass die Bestrahlung von gekörnter Aktivkohle mit Mikrowellen bereits nach kurzer Zeit zu Temperaturen von ca. 1200 °C führte. Die sehr gute Suszeptibilität der Aktivkohle ist zum einen auf den hohen Anteil an graphitischen Kohlenstoff, zum anderen auf den hohen elektrischen Innenwiderstand aufgrund der ausgeprägten Porenstruktur zurückzuführen. [14]

Alternativ wurden unterschiedlich gekörntes Silicium und Siliciumcarbid als Suszeptoren getestet. Die Ergebnisse zur Suszeptibilität waren nach Lühken [14] nicht ausreichend reproduzierbar.

Tastversuche

In Tastversuchen wurde die Eignung von vier verschiedenen Stoffen als mögliche Suszeptoren zur Mineralwolleverschlackung untersucht. Zur Verfügung standen die beiden Reststoffe Kronofloc und Kronocarb. Zudem wurden als Träger von Kohlenstoff handelsübliches Graphitspray und Siliciumcarbid untersucht.

- Kronofloc-Filterkuchen: Dieser hellgelbe, sandartige Filterkuchen fällt als Restprodukt in der Abwasserreinigung mit Eisen (II)-chlorid (FeCl₂) an.
- Kronocarb: Es entsteht bei der Herstellung des Weißpigmentes Titandioxid aus natürlichen Erzen. Dieses grau-schwarze, gekörnte Restprodukt ist ein stark poröser und kohlenstoffhaltiger Koks, der daneben auch Titan- und Siliciumverbindungen sowie Schwermetalle enthält.

- Siliciumcarbid: Dieser Stoff, auch als Karborund bezeichnet, ist in die Gruppe der Carbide einzuordnen und stellt die chemische Verbindung aus Silicium und Kohlenstoff SiC dar.
- Graphitspray: Die Basis des Sprays bildet Lösungsmittel und Graphit-Feststoff.

Für die Testung der oben aufgeführten Stoffe als Suszeptoren erfolgten die Untersuchungen am Probenmaterial C. Die Dämmungsrohre wurden zu Halbschalen aufgeschnitten und diese nochmals in eine untere und obere Probenhälfte zertrennt. Die Präparation der Mineralwollehalbschalen mit den ausgewählten Suszeptoren erfolgte auf der unteren Probekörperhälfte. Das Oberteil wurde in das präparierte Unterteil eingesetzt, sodass sich die zu untersuchenden Stoffe im Kern des Mineralwollestückes befanden (Bild 14).

Die gewählte Probenpräparation wurde aus Tastversuchen mit Graphitspray abgeleitet. Diese zeigten, dass die Präparation des Mineralwollestückes mit dem Suszeptor für dessen Wirkungsweise von großer Bedeutung ist. Oberflächlich aufgebracht, zeigte Graphitspray keine Wirkung. Wurde dagegen das Probestück im Inneren mit Graphitspray präpariert, trat eine Schmelzbildung auf.



Bild 14: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Kronofloc-Filterkuchen|1|, Siliciumcarbid |2|, Kronocarb |3| und Graphitspray |4|

Die Mikrowellenbehandlung erfolgte mit den herkömmlichen Geräteeinstellungen, Mikrowellenleistung 100% und Lüftereinstellung auf der Stufe 3. Die bisherige Behandlungsdauer von 2 min wurde auf 3 min erhöht.

Nach bereits einem Behandlungsdurchgang konnte eine Wirkung für die meisten der eingesetzten Stoffe beobachtet werden (Bild 15). Ausnahme bildete der Kronofloc-Filterkuchen. Dieser Stoff absorbierte keine Mikrowellen, so dass keine Energieumwandlung in Wärme stattfand und folglich keine Veränderungen hinsichtlich der Umwandlung von Mineralwollefasern zu verzeichnen war (Bild 16).

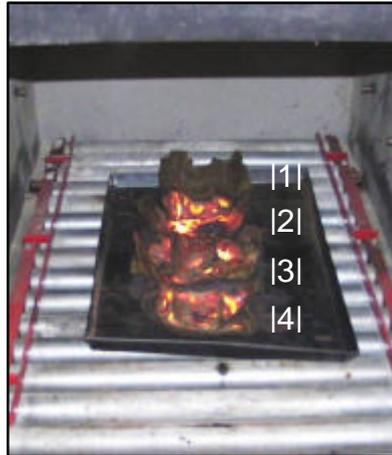


Bild 15: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Kronofloc-Filterkuchen [1], Siliciumcarbid [2], Kronocarb [3] und Graphitspray [4] direkt nach der Mikrowellenbehandlung



Bild 16: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Kronofloc-Filterkuchen vor und nach der Mikrowellenbehandlung

Das Zusammenwirken der anderen drei Stoffe mit der Mineralwolle unter Mikrowellenbestrahlung führte zu Temperaturen, die das Mineralwollematerial zum Glühen brachte. Eine Gegenüberstellung des Ausgangszustandes zum erreichten Endzustand der Mineralwolleproben nach 3-minütiger Mikrowellenbehandlung ist in den nachfolgenden Bildern dokumentiert.



Bild 17: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Siliciumcarbid vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung (rechts)



Bild 18: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Kronocarb vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung (rechts)



Bild 19: Präpariertes Mineralwollematerial C mit Graphitspray vor (links) und nach der Mikrowellenbehandlung (rechts)

Durch die Aufgabe der kohlenstoffhaltigen Suszeptoren Siliciumcarbid, Kronocarb und Graphitspray konnte für das Probenmaterial C, welches ohne Zusätze nicht auf die Mikrowellenbehandlung angesprochen hatte, nun doch eine Umwandlung der Fasern erzielt werden. Die Verschlackung der Fasern erfolgte ebenso wie beim Probenmaterial A nur im Probeninneren. Oberflächlich sind Umwandlungen der Mineralwollefasern in Schlacke nur in den Bereichen aufgetreten, in denen es zu Energieüberlagerungen gekommen ist. Das gilt vor allem für die Anwendung von Siliciumcarbid, stärker noch für die Anwendung von Graphitspray.



Bild 20: Verschlacktes Probeninneres der mit Suszeptoren präparierten Mineralwolle C nach der Mikrowellenbehandlung

Die Wirkungsintensität der Suszeptoren und folglich die gewünschte Umwandlung der Mineralwollefasern sowie die resultierende Ausbildungsform der Schlackenrückstände unterschied sich zwischen den einzelnen Suszeptoren (Bild 20). Am aussichtreichsten sind die Ergebnisse, die durch Einwirkung des Graphitsprays erreicht wurden. Die relativ geringe Menge Graphitspray gegenüber den größeren Aufgabemassen der beiden anderen Suszeptoren, bedingt durch das etwas schwierigere Handling bei der Präparation, führte dennoch zur größten umgewandelten Fasermenge. Die Ausbildung der Faserrückstände in Form von Schlacke ähnelte dem erreichten Ergebnis bei der Behandlung des Mineralwollematerials A. Die Schlackenrückstände lagen überwiegend mit kugeligem bzw. tropfenförmigem Habitus bei einer max. Korngröße von ca. 6 mm vor. Teilweise traten auch flächenförmig zusammengesetzte Schlackenstücke größerer Abmessungen auf. Bei den beiden anderen als Suszeptoren eingesetzten Stoffen lag die umgewandelte Mineralwolle mehr in Form eines feinen Pulvers mit vereinzelt auftretenden Schlackekügelchen vor (Bild 21) Inwieweit es sich hier um umgewandelte Mineralwollefasern oder noch vorhandene Rückstände des Siliciumcarbids bzw. des Kronocarbs handelte, wurde nicht näher untersucht.

Als Schlussfolgerung aus den Tastversuchen ergab sich zum einen, dass Siliciumcarbid, Kronocarb und Graphitspray geeignete Suszeptoren sind. Zum anderen konnte ein signifikanter Einfluss der Präparation festgestellt werden. Eine bessere Wirkung wurde durch homogenes Untermischen der Suszeptoren erreicht.

Anwendungsversuch

Eine Umsetzung der in den Tastversuchen gewonnenen Erkenntnisse erfolgte für die Behandlung des Mineralwollematerials B. Als Suszeptor wurde der Anfallstoff Kronocarb, aufgrund der besseren Möglichkeiten, diesen Stoff gleichmäßig in das Mineralwollematerial einzubinden, ausgewählt.

Zur Gewährleistung einer homogenen Untermischung des Suszeptors wurde zunächst eine Suspension aus 200 g Kronocarb mit 4,5 l Wasser hergestellt. In dieser wurden die Mineralwolleflocken eingeweicht bzw. manuell untergemischt. Nach einer Saugzeit von ca. 1 h erfolgte die Befüllung einer Plattenform 25 x 25 x 5 cm mit der getränkten Mineralwolle. Mittels Druckpresse wurde das feuchte, lose Material bei einer Druckkraft von ca. 17 kN zu einer Platte mit einer Stärke von 3 cm gepresst und gleichzeitig überschüssige Suspension entfernt. Nach einem Tag Lagerung bzw. Trocknung bei Raumklima erfolgte die Mikrowellenbehandlung.



Bild 21 Präparation der Mineralwolle B mit Kronocarb

Die Mikrowellenbehandlung erfolgte mit den herkömmlichen Geräteeinstellungen, Mikrowellenleistung 100% und Lüftereinstellung auf der Stufe 3. Aufgrund der noch sehr hohen Restfeuchte der präparierten Mineralwolleplatte wurde die Behandlungsdauer für den 1. Durchgang auf 4 min erhöht.

Zunächst bewirkte die Mikrowellenbehandlung nur eine Trocknung der Mineralwolle. Mit dem anschließenden 2. Durchgang von ebenfalls 4 min konnte ein Großteil der Plattenoberseite verschlackt werden. Eine nochmalige Mikrowellenbehandlung von 2 min bewirkte die nahezu komplette Umwandlung der Mineralwollestruktur auf der Oberseite der Platte (Bild 22).

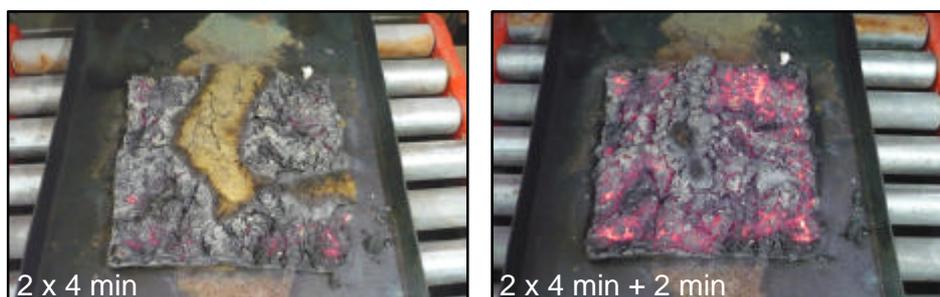


Bild 22: Plattenoberseite (Material B mit Kronocarb) nach Mikrowellenbehandlung

Um der abschirmenden Eigenschaft der verwendeten Probenunterlage entgegen zu wirken, erfolgte eine weitere Mikrowellenbehandlung an der nach oben gewendeten Plattenunterseite. Die Mikrowellenbeaufschlagung betrug ebenfalls 4 min, mit dem Ergebnis, einer fast vollständigen Umwandlung der Mineralwollefasern zu Schlacke (Bild 23). Nur vereinzelt waren visuell noch Faserstrukturen erkennbar, die auf die doch vorhandene unterschiedliche Strahlungsverteilung in der Mikrowelle zurück zu-

führen sind. Bei Erhöhung der Behandlungsdauer ist eine vollständige Umwandlung der Mineralwollefaser zu erwarten.

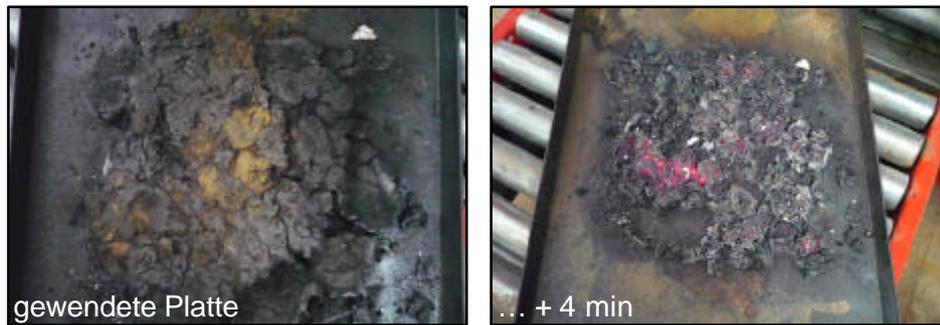


Bild 23: Plattenunterseite (Material B mit Kronocarb) nach Mikrowellenbehandlung

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Untersuchungen unterscheidet sich die Ausbildung der Schlackenrückstände. Bisher entstanden bei der Umwandlung der Mineralwollefaser vereinzelt „Schmelzperlen“ unterschiedlicher Größe und Zusammenschmelzungen dieser zu verschiedenen tropfenförmigen Agglomeraten. Die Schlackenrückstände der mit Kronocarb präparierten Mineralwolleplatte zeigten hingegen keine Ausbildung kugelförmiger Schmelzprodukte, sondern hochporöse, offenporige Formen, die einem Lava- bzw. Bimsgestein ähnelten.

2.3.2.5 Versuchsserie III

Hinsichtlich der festgestellten Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Mineralwollen A und B in Bezug auf den Eisenoxidgehalt (siehe Kap. 2.4.1) erfolgten Untersuchungen zur Verschlackung der Mineralwollen, die nicht auf die Mikrowellenstrahlung reagiert hatten, mit Eisen(III)-oxid als Suszeptor.

Die Ausgangsmaterialien B, C und D wurden zunächst in kleinere Stücke zerteilt. Damit das unterzumischende Eisen(III)-oxid gut an dem Probematerial haftet, wurden die Mineralwollestücke mit Wasser besprüht. Anschließend erfolgte unter der Druckpresse mit einer Kraft von 17 kN die Verdichtung der präparierten, losen Mineralwollestücke in einer Form mit einem Querschnitt von 10 x 10 cm, zu einem Plattenformat von 10 x 10 x 1 cm Plattenstärke (Bild 24).

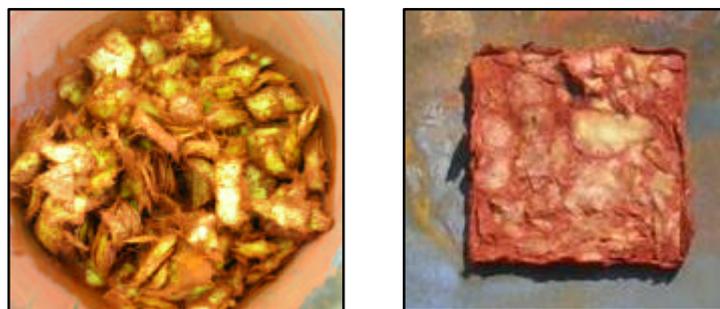


Bild 24: Präparierte Mineralwolle mit Eisen(III)-oxid

Die Mikrowellenbehandlung erfolgte mit den herkömmlichen Geräteeinstellungen, Mikrowellenleistung 100% und Lüftereinstellung auf der Stufe 3. Es wurden abermals zwei Behandlungsdurchgänge gefahren, bei einer Behandlungsdauer von jeweils 4 min.

Die präparierten Mineralwolleplatten zeigten nach der oben beschriebenen Mikrowellenbehandlung keine Verschlackungsreaktionen auf. Als mögliche Ursache wurde

eine zu geringe Plattenstärke vermutet, die einen Hitzestau in der Probe verhinderte. Deshalb wurden die drei vorhandenen Platten der Materialien B, C und D für eine erneute Mikrowellenbehandlung übereinandergelegt. Damit ergab sich eine Plattenstärke von 3 cm, die der Plattenstärke aus dem oben beschriebenen Versuch mit Kronocarb (siehe Kap. 2.3.2.4) entsprach. Die gewählte Mikrowellenbehandlung von 4 min wurde aufgrund von fremdartigen Maschinengeräuschen nach 2 min abgebrochen. Als Ergebnis dieses vorzeitig abgebrochenen Versuches konnte eine teilweise erfolgte Verschlackung des aus den drei Platten zusammengesetzten Probekörpers festgestellt werden (Bild 25).



Bild 25: Teilweise erfolgte Verschlackung

Eine Überprüfung des Einflusses der Probekörperabmessungen erfolgte durch die Herstellung einer Platte mit dem Material B und Eisen(III)-oxid in Anlehnung an die Abmessungen der hergestellten Platte mit Kronocarb (2.3.2.4). Die Präparation glich der Vorgehensweise zur Herstellung der kleinen Plattenformate 10 x 10 x 1 cm. Hierzu wurden 144 g Eisen(III)-oxid auf 640g Mineralwolle untergemischt. Die Plattenstärke betrug aber nun 4 cm.

Durch eine Mikrowellenbehandlung von 2 x 4 min von einer Seite konnte ein Großteil der Mineralwollefasern in Schlacke umgewandelt werden (Bild 26). Bei Erhöhung der Behandlungsdauer sowie durch Wenden der Platte auf die bisherige Plattenoberseite ist eine vollständige Umwandlung der Mineralwollefasern zu erwarten.



Bild 26: Mineralwolle B mit Eisen(III)-oxid vor und nach der Mikrowellenbehandlung

2.4 Untersuchungen am Ausgangsmaterial und an den verschlackten Probenrückständen

Zur Klärung des unterschiedlichen Verhaltens der Mineralwollematerialien unter Mikrowellenbeanspruchung wurden sowohl die Ausgangsmaterialien als auch die jeweils zugehörigen Schlackenrückstände hinsichtlich ihrer oxidchemischen Zusammensetzung untersucht. Zusammen mit thermoanalytischen Untersuchungen (DSC-TG) und der Infrarot-Spektroskopie (FTIR) sollten Rückschlüsse über denkbare Unterschiede im Verhalten durch Mikrowellenbeanspruchung gezogen werden. Eine weitere Charakterisierung der Schlackenrückstände erfolgte über die Ermittlung der physikalischen Kenngrößen Reindichte, ggf. Rohdichte und durch visuelle Betrachtung der Erscheinungsform.

Die Untersuchungen erfolgten für die Mineralwollematerialien A und B und die daraus gebildeten Schlacken unter Mikrowellenstrahlung. Für die Schlacke der Mineralwolle B ist bei den Analysen der zugegebene Suszeptor Kronocarb zu berücksichtigen.

2.4.1 Chemische Zusammensetzung mittels ICP-OES

Zur Ermittlung der chemischen Zusammensetzung bzw. zur quantitativen und qualitativen Bestimmung der Elemente wurde das Verfahren der optischen Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) angewendet. Die Elementanalyse erfolgte nach DIN ISO 14869 – 2: 2003-01, DIN ISO 11885 (E 22) und DIN EN 196 – 2: 2005-05 und wurde an der Material- Forschungs- und Prüfanstalt in Weimar durchgeführt. Die sich über die Molmassenverhältnisse ergebende oxidchemische Zusammensetzung der beiden Mineralwollematerialien und der zugehörigen Schlacken sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Mineralwollematerialien

Der Vergleich der beiden Mineralwollematerialien zeigte, dass die Zusammensetzung sehr stark differierte (Tabelle 10).

Am deutlichsten waren die Unterschiede in Bezug auf die Metalloxide und Alkaligehalt. Gegenüber der Mineralwolle A, die sehr hohe Anteile an Eisen- (13,98 M.-%) und Aluminiumoxid (11,88 M.-%) aufwies, konnte für die Mineralwolle B nur geringere Mengen von 0,41 M.-% bzw. 3,10 M.-% nachgewiesen werden. Andererseits war die Mineralwolle B durch einen sehr hohen Anteil an Kaliumoxid charakterisiert. Diese Unterschiede sind begründet mit der Vielfalt an mineralischen Ausgangsmaterialien wie, Kalkstein, Feldspat, Dolomit, Basalt, Diabas, Sand, Zement und Altglas als Recyclingmaterialien. [13]. Die Unterschiede in Zusammensetzung sind möglicherweise eine der Ursachen für das unterschiedliche Verhalten bei der Mikrowellenbehandlung. Ein weiterer markanter Unterschied ergab sich bei der Betrachtung des Glühverlustes. Mit 6,01 M.-% war ein geringerer Glühverlust für das Mineralwollematerial A gegenüber dem Material B von 10,66 M.-% ermittelt worden. Folglich wurde dem Material A eine geringere Menge an organischen Substanzen (Binde- und Schmelzmitteln) zugesetzt (siehe Kap. 2.4.2).

Tabelle 10: Oxidchemische Zusammensetzung von Mineralwolle u. deren Schlacken

Oxide	Probenbezeichnung			
	Mineralwolle A	Mineralwolle B	Schlacke A	Schlacke B
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
Silicium [SiO ₂]	40,25	58,44	44,14	59,56
Calcium [CaO]	11,48	8,30	13,08	9,39
Magnesium [MgO]	7,74	3,61	6,44	3,55
Eisen [Fe ₂ O ₃]	13,98	0,41	13,63	1,27
Aluminium [Al ₂ O ₃]	11,88	3,10	13,03	3,31
Mangan [MnO ₂]	0,27	0,02	0,29	0,04
Titan [TiO ₂]	2,42	0,08	2,69	4,22
Kalium [K ₂ O]	3,40	13,37	3,67	12,27
Natrium [Na ₂ O]	1,44	1,52	1,99	1,47
Schwefel [SO ₃]	0,08	0,37	0,05	0,80
Phosphor [P ₂ O ₅]	1,05	0,13	0,99	0,91
Summe	93,99	89,34	100,00	96,80
Glühverlust*	6,01	10,66	-	3,20
Summe	100,00	100,00	-	100,00

*Glühverlust bei 1000 °C durch TG bestimmt; auf 100 % normiert

Schlackerückstände

Die Zusammensetzung der Schlacke A unterscheidet sich nicht gravierend vom Ausgangsmaterial. Folglich führte die Mikrowellenbehandlung nur zu einer Umwandlung der Faserstruktur, ohne die chemischen Zusammensetzung zu beeinflussen. Die aufgetretenen Abweichungen liegen im Bereich der Messungenauigkeiten. Zudem sei hier auf die Inhomogenität des Materials hingewiesen. Für die Schlacke B zeigen die grau hinterlegten Tabellenfelder erhöhte Werte gegenüber dem Ausgangsmaterial, die auf die Zugabe des Suszeptors Kronocarb zurück zu führen sind. Die anderen Elemente entsprechen in ihrer Größenordnung dem des Ausgangsmaterials B. Der ermittelte Glühverlust von 3,20 M.-% ist im Zusammenhang mit der eingetretenen Koksverbrennung durch die Zugabe des Suszeptors zu sehen. Nähere Erläuterungen hierzu werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

2.4.2 Thermoanalytische Messungen mittel DSC-TG

Die analytische Methode zur Bestimmung der Masseveränderungen in Abhängigkeit von der Temperatur bzw. zur Ermittlung der Reaktionskinetik wurde an der Professur Bauchemie der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten durch die Anwendung der simultanen Thermoanalysenapparatur Setsys 16/18 im Temperaturbereich bis 1000 C bzw. 1350 C in Luft-Atmosphäre. Die blau dargestellten Kurven zeigen die Veränderungen der Masse und die rot dargestellten Kurven beschreiben die Energiedifferenzlinie.

Mineralwollematerialien

Bei Betrachtung der in Bild 27 dargestellten Kurven finden sich die Unterschiede der chemischen Zusammensetzung beider Mineralwollen wieder. Der tendenzielle Verlauf der Massenveränderungen resultiert zunächst bei beiden Proben aus der Austreibung des physikalisch gebundenen Oberflächenwassers sowie dem anschließenden Ausbrennen der Organik. Diese Reaktionen sind mit Masseverlusten verbunden, die sich im fallenden Kurvenverlauf widerspiegeln. Die Summe aus den Masseverlusten von 0,43 M.-% und 5,76 M.-% ergibt für das Material A einen Gesamtmasseverlust bei 540 °C von 6,19 M.-%, der mit dem im Muffelofen bestimmten Masseverlust in etwa übereinstimmt (siehe Kap. 2.2.1).

Für das Material B wurden jeweils höhere Masseverluste von 0,97 bzw. 8,18 M.-% ermittelt, die zu einem Gesamtmasseverlust von 9,15 M.-% führten. Die unterschiedlichen Größenordnungen der Verluste sind aus den verschiedenartigen Zusammensetzungen der Mineralwollen in Bezug auf das Ausgangsmaterial und der zugesetzten Menge an Binde- und Schmelzmittel herzuleiten. Für die Mineralwolle A ist zudem im weiteren Kurvenverlauf ein Masseanstieg ab ca. 540 °C zu beobachten, der auf eine mögliche Eisenoxidation zurück zu führen ist.

Im Zusammenhang mit den Veränderungen der Masse steht die Energiedifferenzlinie. Deutlich nachzuweisen ist die exotherme Reaktion durch die Verbrennung der Organik. Bei Material A tritt ein weiterer exothermer Peak bei 850 °C auf. Er kann durch Umkristallisation von Mineralwollebestandteilen [16] und der stattfindenden Eisenoxidation erklärt werden. Beide Prozesse sind reversibel.

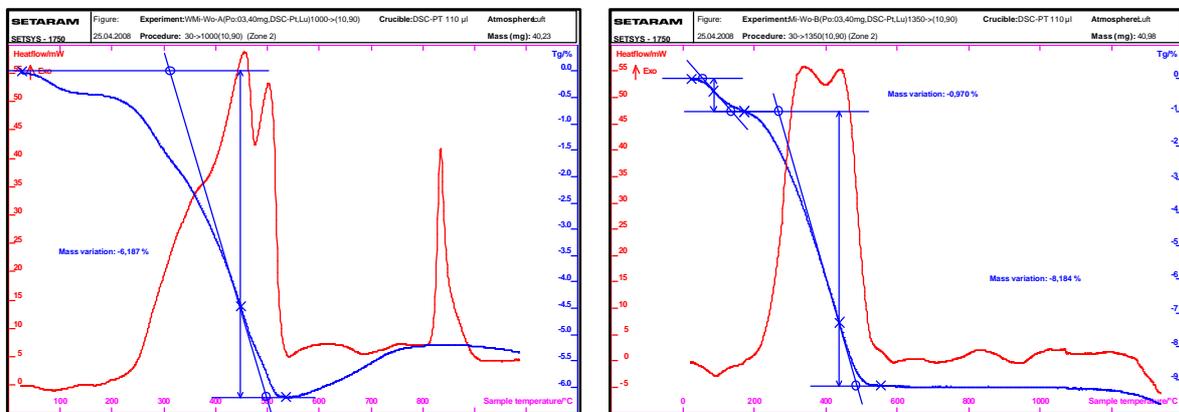


Bild 27: Thermoanalyse Mineralwolle A und B bis 1000 bzw. 1350 °C an Luft

Schlackerückstände

Entsprechend den vorangegangenen Ausführungen ergaben sich für die Thermoanalysen der Schlacken ebenso Unterschiede, die im Bild 28 dargestellt sind.

Die Entstehungstemperatur der Schlacke durch die Mikrowellenbehandlung der Mineralwolle lag bei ca. 1200 °C. Folglich ist ein Masseverlust für die untersuchten Schlacken nicht mehr zu erwarten. Für die Schlacke A trifft diese Annahme zu. Der dargestellte Peak in der Energiedifferenzlinie bei 800 bis 950 °C ist wiederum auf die Umkristallisation und die Massenzunahme der Eisenoxidation zurück zu führen. Schlacke B zeigt ein anderes Verhalten, was aus der Zugabe des Suszeptors Kronocarb resultiert. Der Masseverlust ergibt sich aus der Verbrennung des in der Schlacke noch enthaltenen Restkokes bzw. organischer Bestandteile im Temperaturbereich von 500 bis 750 °C. Der durch die Zugabe von Kronocarb eingebrachte Kohlenstoff konnte bei der Verschlackung der Mineralwolle nur teilweise verbrannt werden, da nicht genügend Sauerstoff für diesen Prozess zur Verfügung stand. Die Ursache der reduzierenden Atmosphäre (sauerstoffarm) liegt in der fehlenden Frischluftzufuhr an der Mikrowellenanlage. Die weiteren Peaks der Energiedifferenzlinie sowie der Masseverlust ab ca. 800 °C ergeben sich aus der Umwandlung der im Kronocarb enthaltenen Beimengungen.

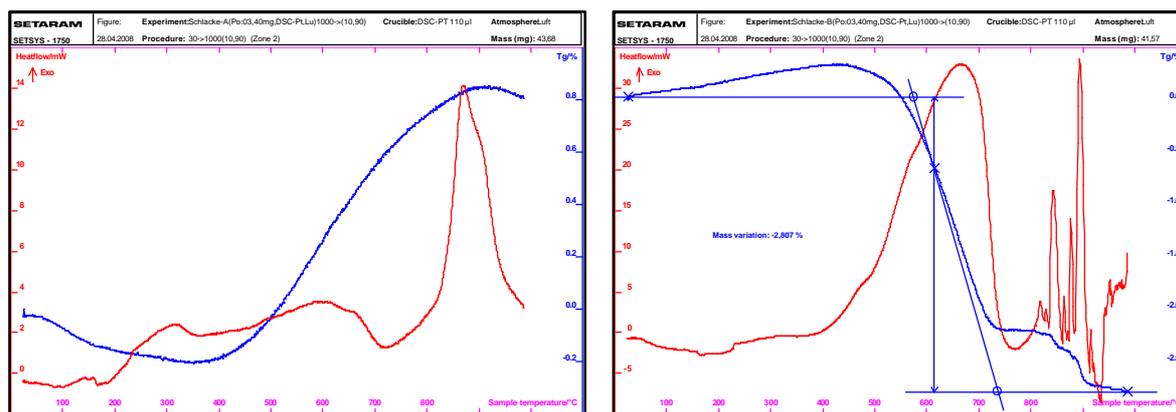


Bild 28: Thermoanalyse Schlacke A und B bis 1000 °C an Luft

2.4.3 Infrarot - Spektroskopie FTIR

Die Infrarot - Spektroskopie stellt eine weitere Möglichkeit zur Charakterisierung der Mineralwollen als Ausgangsmaterialien und der Schlacken als Endprodukte der Mikrowellenbehandlung dar. Mit Hilfe dieser Untersuchungsmethode lassen sich kristalline und amorphe anorganische Bestandteile aber auch organische Substanzen identifizieren. Die Untersuchungen erfolgten an der Professur Bauchemie der Bauhaus-Universität Weimar. Als Analysegerät kam das FTIR-Spektrometer FTS 175L zum Einsatz, bei dem ein mittlerer Messbereich von 400 – 4000 nm verwendet wurde. Der Messmodus erfolgte über eine abgeschwächte Totalreflexion mit der Dura Sampl IR-Einheit.

Mineralwollematerialien

Zunächst wurde die Untersuchung am Feststoff vorgenommen (Bild 29). Mit Hilfe eines Tetra-Chlor-Methan-Auszuges erfolgte die Betrachtung nur für die organischen Komponenten der Mineralwollematerialien A und B (Bild 30).

Für beide Mineralwollen konnten vergleichbare Spektren für den dargestellten Wellenlängenbereich gemessen werden. In Abhängigkeit von der Art der Verbindungen, d. h. der chemischen Zusammensetzung, welche sich für die untersuchten Mineralwollematerialien hauptsächlich quantitativ unterscheidet, liegen die gemessenen Peaks nicht bei denselben Bandenlagen, sondern sind etwas verschoben. Die gemessenen Schwingungen bei den Bandenlagen um 1640 cm^{-1} sind charakteristisch für Kristallwasser, die bei 1415 cm^{-1} und 1448 cm^{-1} für Karbonatverbindungen. Bei den gekennzeichneten Bandenlagen von 423 cm^{-1} bis 950 cm^{-1} handelt es sich um Silicium-Sauerstoff-Verbindungen.

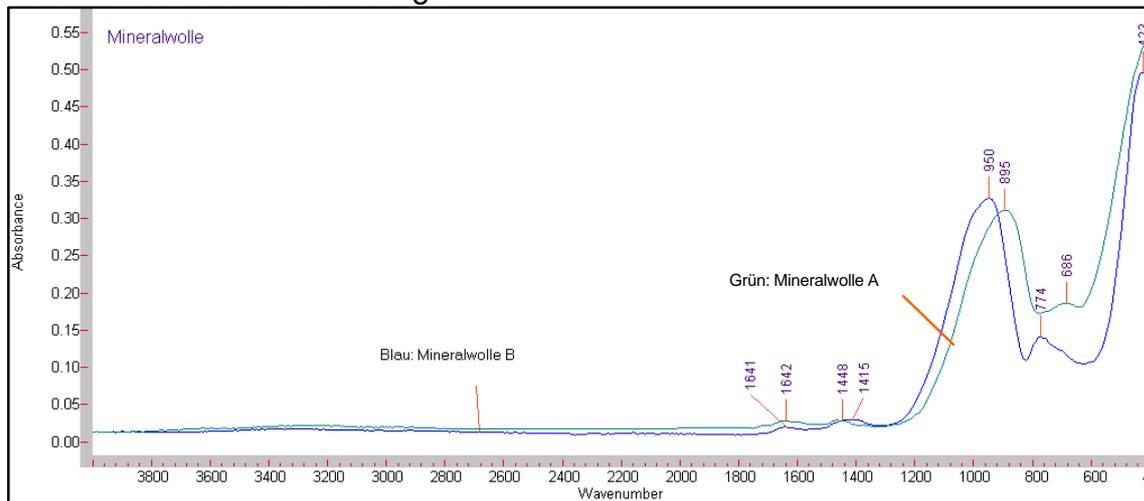


Bild 29: FTIR-Spektrum der Mineralwollen A und B

Die extrahierten organischen Verbindungen der beiden Mineralwollen zeigen annähernd gleiche Bandenlagen (Bild 30), sodass hier vom gleichen bzw. sehr ähnlichen Binde- und Schmelzmittel ausgegangen werden kann. Der sehr unbeständige Kurvenverlauf für das Material A ergibt sich durch die geringere Menge an gelösten organischen Verbindungen, die keine genauere Detektierung ermöglichte. Dieses Ergebnis geht konform zur thermogravimetrischen Analyse.

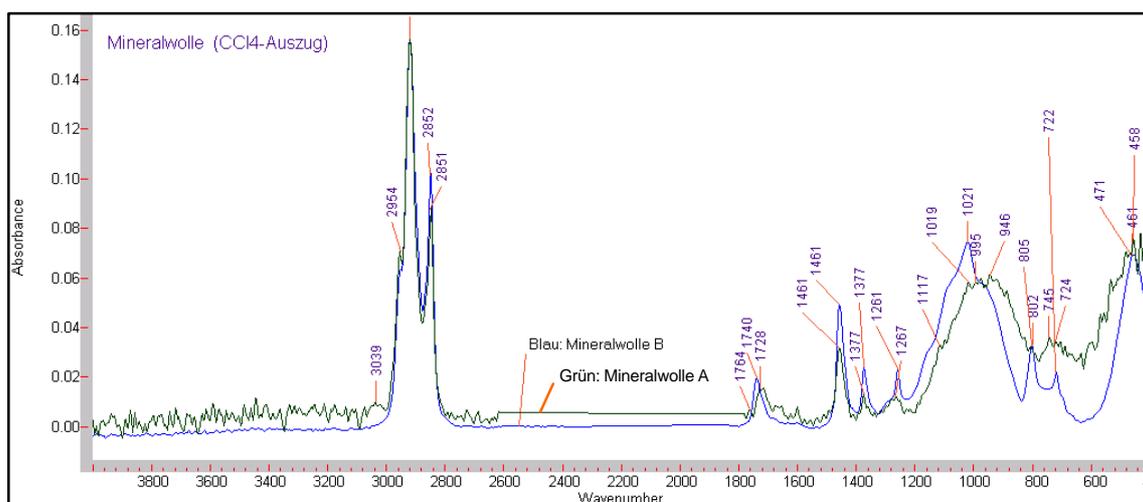


Bild 30: FTIR-Spektrumauszug der gelösten organischen Bestandteile der Mineralwollen A und B

Neben CH_2 -Verbindungen, CH-Aromaten, Karbonsäure, Siliciumverbindungen (Quarz, tonige Bestandteile) konnte durch die IR-Spektroskopie bei einer Bandenla-

ge von 1261 cm^{-1} und 1267 cm^{-1} auf Siliconharz bzw. Siliconöl, die als Schmelzmittelzusatz [12] verwendet werden, geschlussfolgert werden.

Schlackerückstände

Analog zu den IR-Spektren der Mineralwollen (Bild 29) ergaben sich die Analysedaten für die Schlacken A und B, d. h. es wurden die gleichen Bandenlagen für die Karbonat- und Silicium-Sauerstoff-Verbindungen (Bild 31) gefunden. Die für die Schlacke A bei 606 cm^{-1} und 973 cm^{-1} gekennzeichneten zusätzlichen Bandenlagen stellen ebenso Silicium-Sauerstoff-Verbindung dar. Kristallwasser ist durch die Mikrowellenbehandlung ausgetrieben worden und deshalb nicht mehr nachzuweisen.

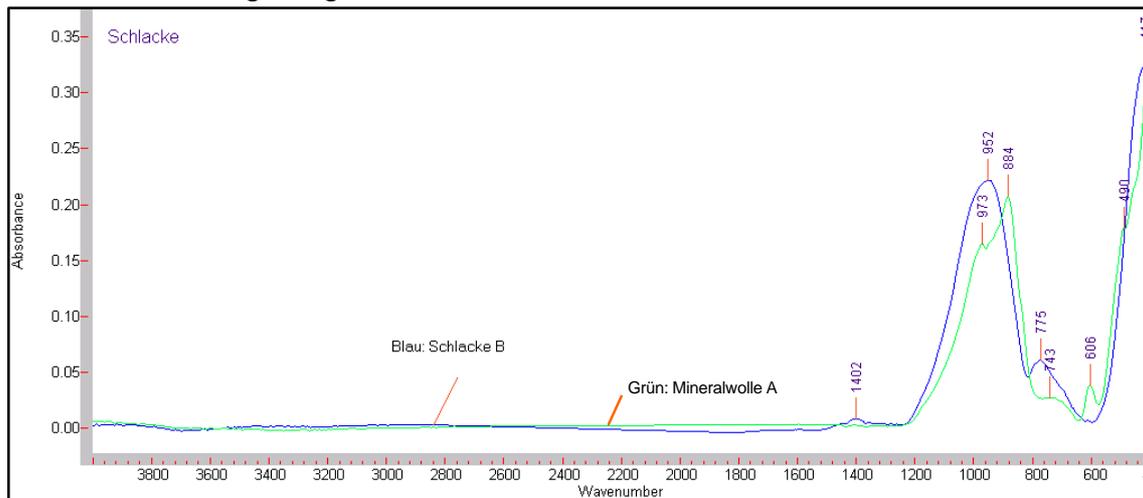


Bild 31: FTIR-Spektrum der Schlackenrückstände von Mineralwolle A und B

2.4.4 Physikalische Kenngrößen

Die Bestimmung der Dichten erfolgte an der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung der Bauhaus-Universität Weimar. Mittels Ultrapycnometer 1000 wurden die Reindichten der Mineralwollen A und B sowie der erzeugten Schlacken ermittelt. Die Rohdichtebestimmung der Mineralwollematerialien basiert auf der Bestimmung der Probenmasse und dem -volumen. Durch die Anwendung des Geo Pyc 1360 konnten für die Schlacke A Anhaltswerte für die Rohdichte gemessen werden. Eine Gegenüberstellung der ermittelten Dichten ist in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Rein- und Rohdichten von Mineralwolle und deren Schlacken

Probe	Reindichte [g/cm ³]	Rohdichte [g/cm ³]
Mineralwolle A	2,51 ± 0,006	0,15
Schlacke A	3,02 ± 0,003	1,36 ± 0,418
Mineralwolle B	2,83 ± 0,005	<< 0,15
Schlacke B mit Kronocarb	2,63 ± 0,006	-
Schlacke B mit Eisen(III)-oxid	2,85 ± 0,004	-

Entsprechend der unterschiedlichen Ausbildungsformen der entstandenen Schlackenrückstände als Schmelzkugeln oder Tropfengebilde der Mineralwolle A (Bild 32), die vorwiegend als Hohlkörper vorlagen, schwankte die Rohdichte zwischen $0,80 \text{ g/cm}^3$ und $2,05 \text{ g/cm}^3$.



Bild 32: Schlackenrückstände der Mineralwolle A

Eine Rohdichtebestimmung für die Schlackenrückstände der Mineralwolle B war aufgrund der Ausbildungsformen als hochporöse Stücke (Bild 33), die unter geringster Belastung zu Pulver zerfielen, nicht möglich.



Bild 33: Schlackenrückstände der Mineralwolle B mit Kronocarb

2.4.5 Eluatuntersuchungen

Auf die Untersuchungen zum Eluatverhalten der Schlacken wurde zugunsten der unten beschriebenen Abgasuntersuchungen verzichtet. Es kann aber eingeschätzt werden, dass bei einer vollständig verschlackten Mineralwolle alle organischen Schadstoffe ausgetrieben sind. Für die Schwermetalle als mögliche anorganische Schadstoffe ist anzunehmen, dass sie fest in die Strukturen der Schlacke eingebaut und damit nicht eluierbar sind.

2.5 Abgasuntersuchung

Bei den Untersuchungen mit der Multi-Mode-Mikrowellenanlage entstand durch das Austreiben der organischen Bestandteile ein charakteristisch riechendes Abgas. Aus gesundheitlichen und umwelttechnischen Gesichtspunkten, die bei der Errichtung und dem Betrieb einer geplanten Industrieanlage zu berücksichtigen sind, wurde deshalb eine Abgasuntersuchung vorgenommen. Die Durchführung erfolgte durch das Institut Prof. Dr. Jäger GmbH Institut für Umwelttechnik in Weimar.

Die Emissionmessung beruhte auf einer kontinuierlichen Messung der Abgasströme während der Verschlackung von 6 Proben des Mineralwollematerials A. Die Behandlungsabfolge resultierte aus den in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Untersuchungen, d. h. in zwei Behandlungsdurchgängen. Nach der ersten Mikrowellenbestrahlung wurde die Probe auf die ursprüngliche Probenoberseite gelegt und in einer kürzeren zweiten Behandlungsphase erneut mit Mikrowellen bestrahlt. Der Messzeitraum erstreckte sich über reichliche 90 Minuten. Die Durchschnittswerte der Emissionsmessungen im Abgas der Mikrowelle sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Durchschnittswerte der Abgase während der Mikrowellenbehandlung von Mineralwolle

Abgasmesswerte								
O ₂ -Konzentration	HCL-Konzentration	HF-Konzentration	Phenol-Konzentration	SO ₂ -Konzentration	Formaldehyd-Konzentration	NO _x -Konzentration	CO ₂ -Konzentration	Gesamtkohlenstoffgehalt
[Vol.-%]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]
20,7	7,9	0,4	10,1	24,6	0,13	610,7	337,5	6,0

Eine Übersicht der Messergebnisse im Vergleich zu den derzeit gültigen Grenzwerten nach TA Luft 2002 ist in Tabelle 13 aufgezeigt. Die gewählten Grenzwerte ergeben sich bei der Einordnung der Versuchsanlage in Anlehnung an die Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) für die Anlagen zur Schmelze mineralischer Stoffe einschließlich für Anlagen zur Herstellung von Mineralfasern.

Tabelle 13: Abgasmesswerte im Vergleich zu den Grenzwerten

Schadstoff	Grenzwert als Halbstundenmittelwert [mg/Nm ³]	Maximaler Messwert [mg/Nm ³]
Fluorwasserstoff	5	0,4
Chlorwasserstoff	30	7,9
Stickstoffdioxid	500	2642,7
Schwefeldioxid	600*	115,8
Gesamtkohlenstoff	50	58,3
Phenole (org. Stoff nach Klasse I)	20 als Summe Klasse I	10,1
Formaldehyd (org. Stoff nach Klasse I)		0,13
Kohlenmonoxid	-	1213,5

* Grenzwert bei Einsatz ausschließlich von Naturstein und Gemenge

Überschreitungen der Grenzwerte treten hauptsächlich beim Stickstoffdioxid und geringfügig beim Gesamtkohlenstoffgehalt auf. Der hohe Kohlenmonoxidgehalt ist aus Sicht des Arbeitsschutzes ebenfalls kritisch. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) von 35 mg/m^3 ist mit $1213,5 \text{ mg/m}^3$ weit überschritten. Bei einer Umsetzung der Ergebnisse in den technischen Maßstab sind ggf. Maßnahmen zur Entstickung und zur Nachverbrennung zu berücksichtigen.

3 Arbeitspaket 3

3.1 Logistik bei der Verwertung/Beseitigung von Mineralwolleabfällen

Der Gesetzgeber verlangt höchste Sicherheitsmaßnahmen im Umgang mit Mineralwolle der „alten“ Produktion. Diese werden in der Gefahrstoffverordnung [17] und in der Chemikalienverordnung [18] sowie der TRGS 521 „Faserstäube“ [19] formuliert. Faserfreisetzungen sind vom Zeitpunkt der Abfallaufnahme bis zur Entsorgung zu vermeiden.

Als künstliche Mineralfasern bezeichnet man Fasern, die im Gegensatz zu Asbestfasern nicht natürlich im Gestein vorkommen, sondern aus verschiedenen Ausgangsstoffen wie beispielsweise Glas, Gesteine wie Basalt oder Oxidkeramiken industriell hergestellt werden.

Mineralfasern werden als Filze, Matten, Platten oder als lose Schüttung in der Hauptsache als Dämmstoffe zur Wärme-, Kälte- und Schalldämmung im Hochbau eingesetzt. Zur Abfallvermeidung sind mineralwollehaltige Abfälle von anderen Abfällen oder verwertbaren Reststoffen (z.B. Baurestmassen) getrennt zu erfassen und zu entsorgen.

Vor Beginn der Abbruch-/Sanierungsarbeiten muss eine Überprüfung auf das Vorhandensein mineralwollehaltiger Materialien und Bauteile erfolgen, eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt und ein Arbeitsplan erstellt werden. Im Arbeitsplan wird die Reihenfolge der Arbeiten festgelegt.

Nach der Technischen Regel für Gefahrstoffe [19] heißt es im Punkt 3 (1): der Arbeitgeber hat zu ermitteln, ob Produkte hergestellt oder verwendet werden, aus denen Faserstäube mit gefährlichen Eigenschaften freigesetzt werden können. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei diesen Produkten in vielen Fällen um nicht kennzeichnungspflichtige Erzeugnisse handelt. (2) Verbleiben bei der Ermittlung Ungewissheiten über die Gefährdung, hat der Hersteller oder Einführer dem Arbeitgeber auf Verlangen die gefährlichen Inhaltsstoffe der Produkte sowie die von ihnen ausgehenden Gefahren und die zu ergreifenden Maßnahmen mitzuteilen. Bei biopersistenten Mineralwollen hat der Inverkehrbringer auf die besonderen Arbeitsschutzmaßnahmen nach Anhang V Nr. 7 Gefahrstoffverordnung hinzuweisen. Sind keine Angaben verfügbar, so ist – bezogen auf die Faserart – vom jeweils ungünstigsten Fall auszugehen. (9) Darüber hinaus ist zu prüfen, ob für den jeweiligen Anwendungsfall Arbeitsverfahren so ausgewählt werden, dass eine Freisetzung von Faserstäuben so gering wie möglich ist. (10) Geeignete Verfahren sind z. B. Nassverfahren bei Abbrucharbeiten, das Verwenden staubarm arbeitender Bearbeitungsgeräte und –verfahren.

Alle Arbeiten zur Schaffung der „Faserfreiheit“ müssen unter dem Gesichtspunkt der Abfallminimierung erfolgen, d. h. Verwendung reinigbarer und wieder verwendbarer Materialien.

Auch bei der Entsorgung von Mineralfaserabfällen ist gemäß Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) [20] prinzipiell einer Verwertung Vorrang vor der Beseitigung einzuräumen. Die Forderung nach einer wirkungsvollen Zerstörung der Fasern in Verbindung mit der Nutzung des Abfalls als Ersatz für andere Rohstoffe zeigt, dass eine tatsächliche Verwertung dieses Abfalls bislang nur untergeordnete Bedeutung besitzt.

Ausgebaute alte Mineralwolle muss als besonders überwachungsbedürftig eingestuft werden. Für die Entsorgungskonzepte werden die Mineralfaserabfälle den Abfallarten des Europäischen Abfallverzeichnisses [20] zugeordnet 17 06 03*. In jedem Bundesland gelten zusätzlich landesspezifische Regelungen. Mineralfasern sind am Entstehungsort staubdicht zu verpacken und ggf. zu befeuchten. Für den Transport sind geschlossene Behälter zu verwenden. Mineralfaserhaltige Dämmmaterialien können in speziellen Anlagen aufbereitet werden. Sollte eine Aufbereitung nicht möglich sein, werden die Materialien auf eine Sonderdeponie oder Deponien mit Sonderbereiche und entsprechender Zulassung sicher abgelagert. Es gilt die Pflicht zur Nachweisführung.

Die Beseitigung von Mineralfaserabfällen hat in Abhängigkeit der Gehalte an organischen Zusatzstoffen bzw. schädlichen Verunreinigungen zu erfolgen. Als organische Anteile kommen neben Kartonkaschierungen vor allem Bindemittel wie z.B. Phenolharze und Formaldehydharze, Schmelzmittel wie z.B. Mineralöle oder Klebstoffe in Betracht. Wenn hierzu keine Herstellerangaben vorliegen bzw. ein relevanter Anteil an organischen Stoffen nicht sicher ausgeschlossen werden kann, sind entsprechend den Zuordnungswerten zur Ablagerung gemäß TA Siedlungsabfall (Anhang B) bzw. gemäß dem Merkblatt für Bauschuttdeponien (RW 1-, RW 2-Werte) Analysen durchzuführen.

3.2 Produktionsabfälle - Logistikkonzept

Neue Glas- und Steinwolleprodukte sind recyclingfähig und können wiederverwertet werden. So können Produktionsabfälle wieder dem Produktionsprozess zugeführt oder bei der Herstellung von Ziegeln oder Fliesen als Zuschlagstoffe verwendet werden. Glas- und Steinwolle sind deponiefähig und können wie jeder andere mineralische Bauschutt entsorgt werden. [27]

Die Hersteller von Mineralfaserdämmstoffen nehmen die Bauabfälle zurück und führen sie dem Materialkreislauf wieder zu.

3.3 Bauabfälle - Logistikkonzept

Geeignete Arbeitsverfahren für den Rückbau von Mineralwolle sind in der TRGS 521 definiert. Es müssen berufsgenossenschaftliche oder behördlich anerkannte Arbeitsverfahren, Nassverfahren und das Verwenden Staub arm arbeitender Bearbeitungsgeräte und –verfahren gewählt werden.

Der Arbeitgeber hat zu ermitteln, ob Produkte hergestellt oder verwendet werden, aus denen Faserstäube mit gefährlichen Eigenschaften freigesetzt werden können. Verbleiben bei der Ermittlung Ungewissheiten über die Gefährdung, hat der Hersteller oder Produkteinführer dem Arbeitgeber auf Verlangen die gefährlichen Inhaltsstoffe der Materialien sowie die von ihnen ausgehenden Gefahren und die zu ergreifenden Maßnahmen mitzuteilen.

Soweit dies nach dem Stand der Technik möglich ist, dürfen Faserstäube nicht freigesetzt werden. Die verwendeten Verfahren, Werkzeuge und Maschinen müssen eine staubarme Bearbeitung gewährleisten.

Beim Umgang mit Produkten, die Fasern bzw. Faserstäube freisetzen können, ist die Verschmutzung der Arbeitsstätte so gering wie möglich zu halten. Dies kann durch die Anwendung staubarmer Bearbeitungsverfahren und –geräte erreicht werden.

Messer

Scheren

Handsägen

Kreis- oder Stichsäge mit Absaugung

Arbeitsstätten einschließlich der Lagerräume sind so zu errichten, dass Staubablagerungen weitgehend vermieden werden und Fußböden und ebene Flächen leicht und möglichst ohne Staubaufwirbelungen zu reinigen sind.

Mineralwolle ist so zu lagern und zu transportieren, dass das Freisetzen von Fasern so weit wie möglich verhindert wird. Mineralwolle ist in staubdichten Verpackungen zu lagern oder zu transportieren. Verpackungen dürfen beim Transport nicht beschädigt werden, so dass vom Inhalt nichts unbeabsichtigt nach außen gelangen kann. Beim Transport sind verkehrsrechtliche Vorschriften zu beachten.

Verpackungen zur Erfassung, Sammlung und Aufbewahrung von Abfällen mit gefährlichen Eigenschaften sind nach Nr. 5 der TRGS 201 [28] sowie Gefahrstoffverordnung zu kennzeichnen.

Die Kennzeichnung sollte Angaben über die Art des Abfalls und den Hinweis „Inhalt kann Krebs erzeugende Faserstäube freisetzen“ enthalten. Eine vorhandene Kennzeichnung gilt so lange weiter, so lange die Verpackung nicht gereinigt worden ist.

Das Rückbauen, einsammeln und Transportieren erfolgt grundsätzlich durch beauftragte Fachfirmen.

Abfall, Verschnitt und ausgebaute Materialien sind in Behältnissen zu sammeln, wobei die Freisetzung von Faserstäuben so gering wie möglich zu halten ist.

Für die Entsorgung und den Transport von Mineralwolle dürfen keine offenen Behälter angewendet werden.

Für einen faserfreien Transport sollten geschlossene Container, ausgekleidet mit Folien, Foliensäcken oder Big Bags verwendet werden.

Zur getrennten Abfallentsorgung wird eine gesonderte Sammlung der Mineralfaserabfallstoffe aufgestellt. Mineralwolleabfälle können sowohl in dafür bereitgestellte verschließbare Big Bags als auch Container mit Deckel gesammelt werden. Das Sammeln sollte sortenrein ohne fremde Anhaftungen von Fremdstoffen erfolgen. Dies bringt den Vorteil der kontrollierten Befüllung und damit Sortenreinheit sowie die Möglichkeiten der mengenmäßigen Abrechnung durch die Zuordnung der Abfälle entsprechend Abfallschlüssel.

Mulden von 1 bis 2 m³ Volumen sowie Big Bags können innerhalb des Bauwerks abgesetzt werden. Sie sind stets in der Nähe des Abfallaufkommens verfügbar. Ein zügiger Abtransport mit Mineralwolle gefüllter Behältnisse ist zu gewährleisten. Zur Vermeidung von Fremdnutzung und Vandalismus sind verschließbare Container zu bevorzugen.

Das Zerkleinern von Mineralfaserabfällen, das Abwerfen oder die Verwendung von Schüttrutschen ist nicht zulässig. Die Mineralwolleabfälle sind am Entstehungsort ggf. zu befeuchten und in reißfeste Kunststoffsäcke oder Big Bags zu verpacken.

Für die Sanierung von Mineralwolle werden von verschiedenen Herstellern bereits Sammel- und Transportsäcke angeboten. Diese zeichnen sich durch extreme Stabilität und hervorragendes Handling aus. [22]



Bild 34: Mineralwollensäcke der Fa. ASV Vallet e.K. [22]



Bild 35: Mineralwollensäcke [23]



Bild 36: Mineralfaserabfallsack mit Bezeichnung [24]

Big Bags können für kleinere Mengen Mineralwolle verwendet werden. Fallen größere Mengen Mineralwolleabfälle an, sollten Container mit ausgekleideten Folien und Deckeln zur Anwendung kommen.

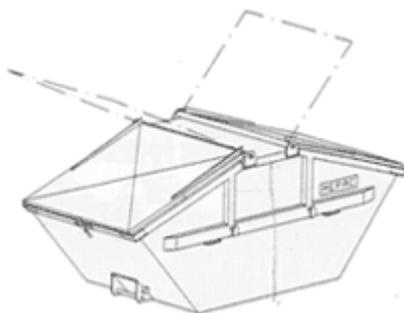


Bild 37: Deckelmulde [25]



Bild 38: Deckelnormmulde [26]



Bild 39: Transport der Big Bags mittels Kran (Foto Held, Ilmenau)



Bild 40: Transport der Big Bags mittels Karren der Fa. Berufsbekleidung Fricke [24]



Bild 41: Ausbau Mineralwolle (Foto Held, Ilmenau)

3.3.1 Sammlung der Mineralwolle auf Deponien und Recyclinghöfen

Sonderdeponien und Deponien mit Sonderbereichen für die Ablagerung von Mineralwolle können als Ausgangspunkt für die Mineralwolleverwertung durch Mikrowellenbehandlungsverfahren genutzt werden.

Die Mineralwollereststoffe werden in den Sammelbehältern gesammelt und separat auf eine Deponie für Asbestbaustoffe bzw. Deponie mit Sonderbereichen geliefert und zunächst abgelagert.

Der Anfall von Mineralwolle hängt von den jeweiligen Rückbauvorhaben und den darin enthaltenen Materialien ab.

Denkbar ist, dass das Mikrowellenbehandlungsverfahren auf reinen Asbestdeponien und Deponien mit Sonderbereichen angewandt wird, um die Transportwege zu verringern.

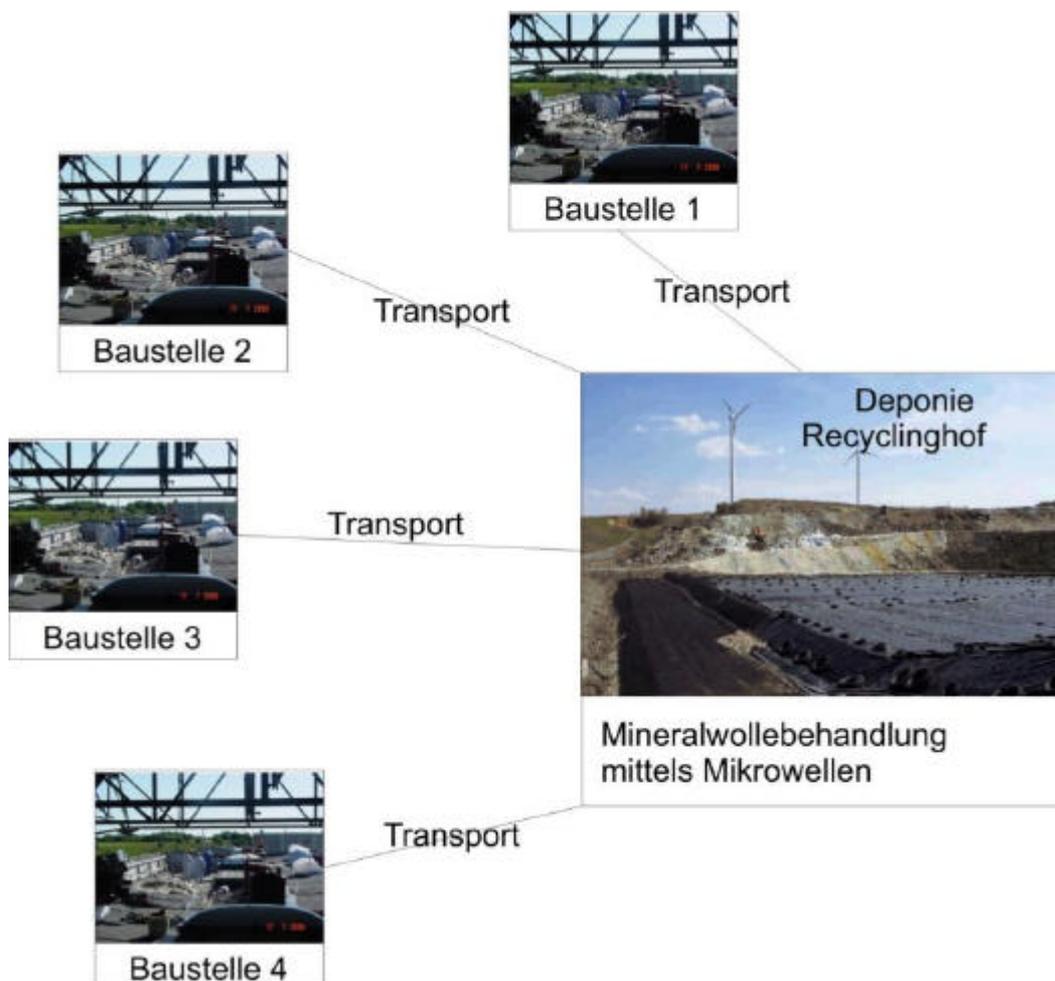


Bild 42: Sammlung kanzerogener Mineralwolle

Eine weitere Möglichkeit besteht in mobilen bzw. semimobilen Mikrowellenstandorten. Ähnlich wie bei Bauschuttzubereitungsanlagen können mobile Anlagen auf Baustellen aufgestellt werden, die ein hohes Aufkommen an Mineralwolle erwarten lassen. Entsprechend den Vorschriften des Bundes-Immissionsschutzgesetzes [30] müsste ein komplett abgeschotteter Bereich geschaffen werden, der sich nur für größere Abbruchmaßnahmen kostenseitig rentieren würde. Eine Einzelfallzulassung ist zu prüfen.

3.3.2 Baustellenabfallrücknahmesystem Fa. Rockwool

Die Fa. Rockwool bietet ein Rücknahmesystem für Steinwolle aus Flachdachsaniierungen an. Das erfolgt unabhängig vom Hersteller und Alter der Steinwolle. Voraussetzung hierfür sind die Sortenreinheit der Abfälle und eine transportfähige Verpackung, ob im Big Bag oder auf Palette. Der Entsorgungsnachweis erfolgt im Rahmen der freiwilligen Rücknahme gemäß § 25 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz durch einen Übergabebeschein. [29]

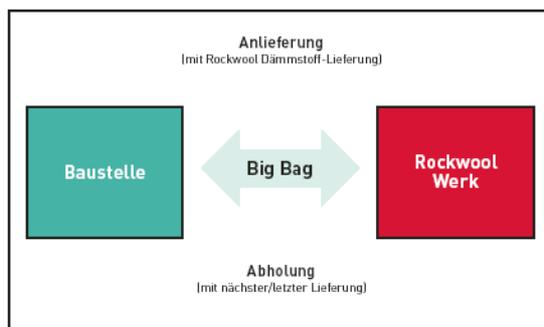


Bild 43: Logistiksystem Fa. Rockwool [29]

Das Rockwool Entsorgungs-System ist logistisch einfach und bietet viele Vorteile. Für Baustellenverschnitt, der zwangsläufig bei der Verlegung von Rockwool Dachdämmplatten anfällt, bietet Rockwool Big Bag an. Bei der Bestellung des Dämmstoffs kann der Big Bag gleich mitbestellt werden und wird dann zusammen mit der Dämmung zur Baustelle geliefert. Sobald der Big Bag mit Verschnitt gefüllt ist, wird er bei einer der nächsten Lieferungen, spätestens bei der letzten Anlieferung zurückgenommen und der Wiederverwertung zugeführt. (siehe Bild 42, Bild 43, Bild 44) Die Big Bags erfassen rund 2 m³ Materialvolumen und besitzen Außenmaße von 1,3 x 1,3 x 1,3 m. Die Big Bags sind wieder verschließbar.



Bild 44: Sammeln der Steinwolleabfälle [29]

4 Arbeitspaket 4

4.1 Verfahrensentwicklung zur Mineralwollebehandlung mit minimaler Faserfreisetzung

Für die Mineralwollebehandlung mit Mikrowellen wurde nachfolgender Verfahrensablauf konzipiert, siehe Bild 45.

Verfahrensablauf Mineralwollebehandlung

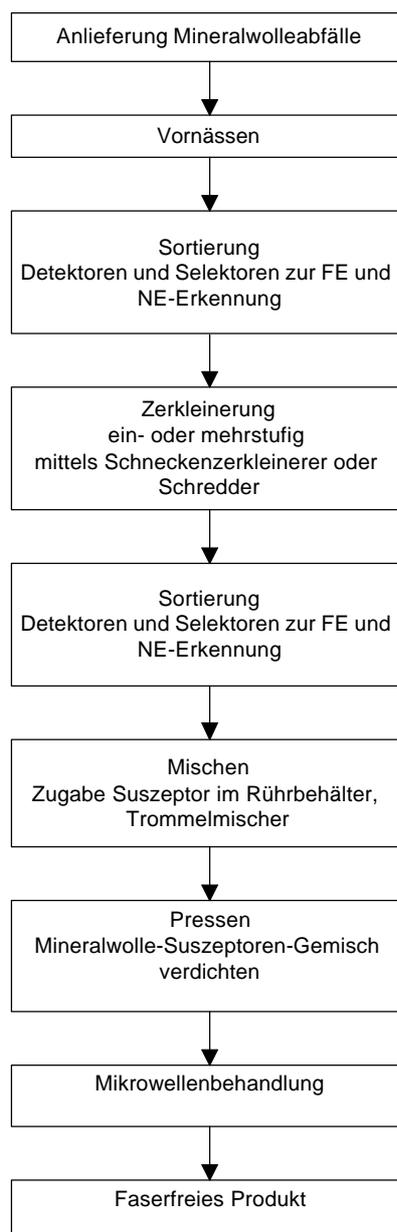


Bild 45: Verfahrensablauf

4.1.1 Beschreibung der Verfahrensschritte

Anlieferung der Mineralwolleabfälle:

Die Mineralwolleannahme erfolgt in folgenden Formen siehe Bild 46 bis Bild 49:

- Kunststoffsäcke (Baustellenabfälle)
- Mineralwollematten in BigBags
- Mineralwollerollen



Bild 46: Mineralwollematten



Bild 47: Mineralwolleabfälle auf der Baustelle



Bild 48: : Mineralwollegemisch bei der Anlieferung bei Woolrec [31]



Bild 49: Kunststoffsäcke mit Mineralwolle [33]

Vornässen:

Ein Vornässen der Mineralwolle reduziert die Faserfreisetzung während der Prozesskette.

Sortierung:

Detektierung und Aussortierung von Eisen- und Nichteisenmetallen, um eine Beschädigung nachgeschalteter Maschinen zu vermeiden und die Wertstoffrückgewinnung zu gewährleisten.

Zerkleinerung:

Durch eine Zerkleinerung wird eine Vereinheitlichung der Korngröße und Homogenisierung erreicht. Die Zerkleinerung kann ein- oder zweistufig erfolgen. Geeignete Aggregate sind der Schneckenzerkleinerer, Schredder (siehe Bild 50 bis Bild 52).



Bild 50: Schneidaggregat [32]



Bild 51: Werkzeug (Messer) [32]



Bild 52: Schredderanlage [32]

Mischen:

Durch das Einmischen von Suszeptoren wird eine homogene und Mikrowellen geeignete Suspension erzeugt. Geeignete Aggregate sind Rührbehälter oder Trommelmischer.

Pressen:

Durch den Pressvorgang wird das Mineralwolle-Suszeptoren-Gemisch verdichtet, mit dem Ziel der Erzeugung von Agglomeraten definierter Korngröße.

Mikrowellenbehandlung:

Durch die Behandlung des Mineralwolle-Suszeptoren-Gemisches mit Mikrowellen wird die Faserstruktur der Mineralwolle zerstört und das Material verschlackt. Es entsteht ein faserfreies Endprodukt für verschiedene Anwendungen (Zusatz in Baustoffen, Rückführung in den Produktionsprozess). Die Mikrowellenbehandlung sollte im Durchlaufbetrieb im „Drehrohr“ erfolgen.

Die Mikrowelle muss mit einer Nachverbrennung ausgestattet werden, um die entstehenden Gase umzuwandeln.

5 Arbeitspaket 5

5.1 Entwicklung Multi-Mode-Mikrowellentechnik

5.1.1 Kapazitätsplanung für eine Anlage zur Mineralwollebehandlung

Annahmen:

- Jahresdurchsatz von 20.000 Tonnen
- Betriebsstunden je Arbeitstag in drei Varianten
 - 8 h/Tag
 - 12 h/Tag
 - 24 h/Tag

Berechnung der Arbeitsstunden pro Jahr mit den Annahmen auf Bild 53:

Arbeitszeit pro Tag		
8 h	16 h	24 h
1428 h/Jahr	2856 h/Jahr	4284 h/Jahr

Kapazitätsplanung			
Kalendertage	365		
- Feiertage	-11		
- Samstag	- 52		
- Sonntag	- 52		
- Winterpause 2 Monate	- 40		
Arbeitstage Plan	210		
Stunden pro Arbeitstag	8	12	
Stunden pro Jahr (Annahme Auslastungsfaktor von 0,85)	1428	2142	
Produktion Soll 100.000 t/a	70 t/h	47 t/h	
Umrechnung in Volumen	47 m ³ /h	31 m ³ /h	

	Rohdichte [t/m ³]	„Transportdichte“ [t/m ³]
Beton	2,2	1,5-1,6
Stahlbeton	2,4	1,5-1,6
Ziegel-MW	1,8	1,4-1,5
Holz	0,6-0,8	0,3-0,7
Papier	0,6	0,3
Kunststoff	0,8	0,7
Eisen und Stahl	7,8	3,5-4,5
Bauschutt	1,5	1,4-1,5
Baustellenabfälle	1,3	1,0-1,1

Quelle: M. Kirschbaum, Gesteins-Perspektiven, 7/2007, S. 29-36

4

Bild 53: Kapazitätsplanung

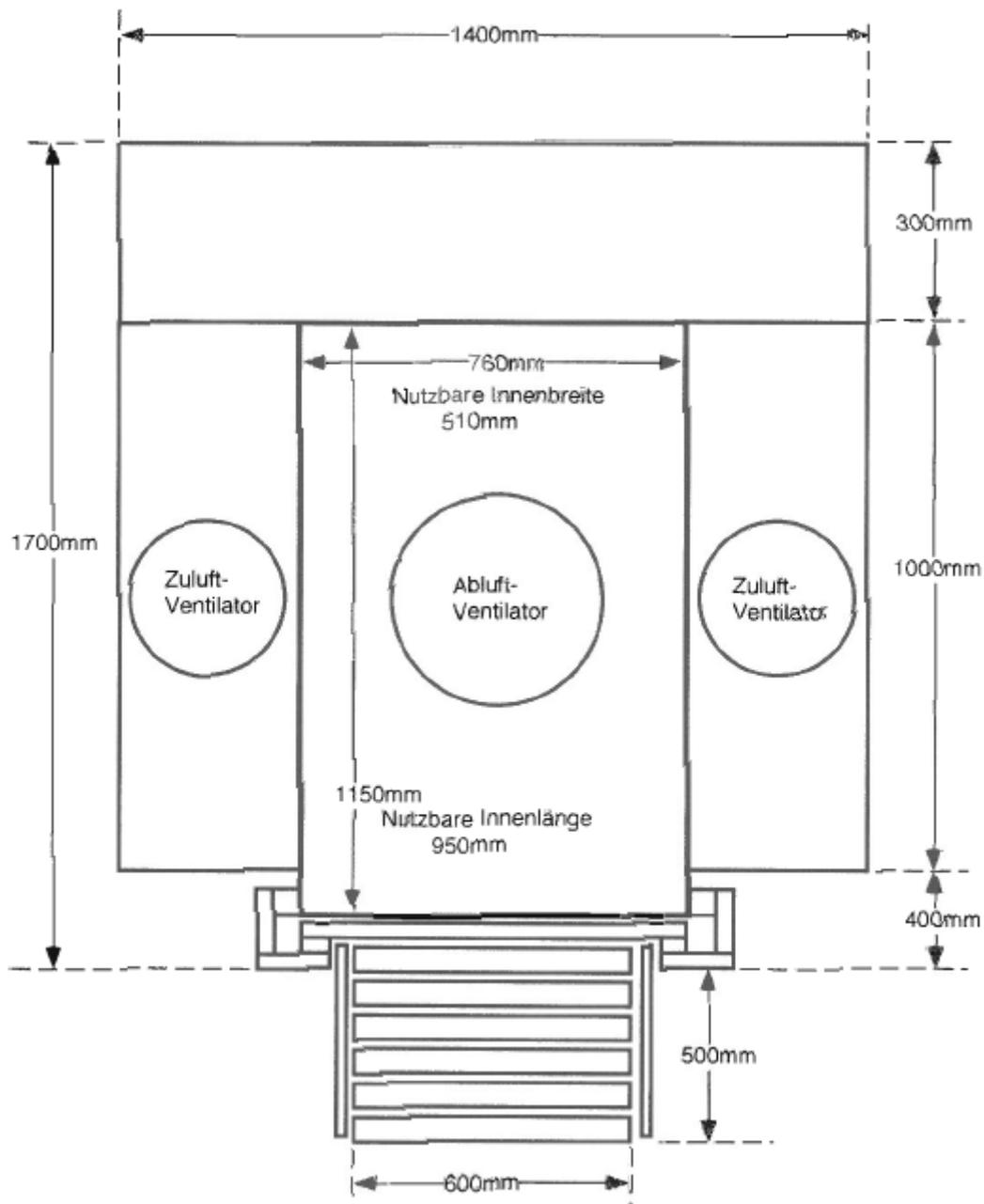
Durchsatzberechnung:

Arbeitszeit pro Tag		
8 h	16 h	24 h
14 t/h	7 t/h	4,7 t/h

Vorschlag für die Kapazität der Aggregate:

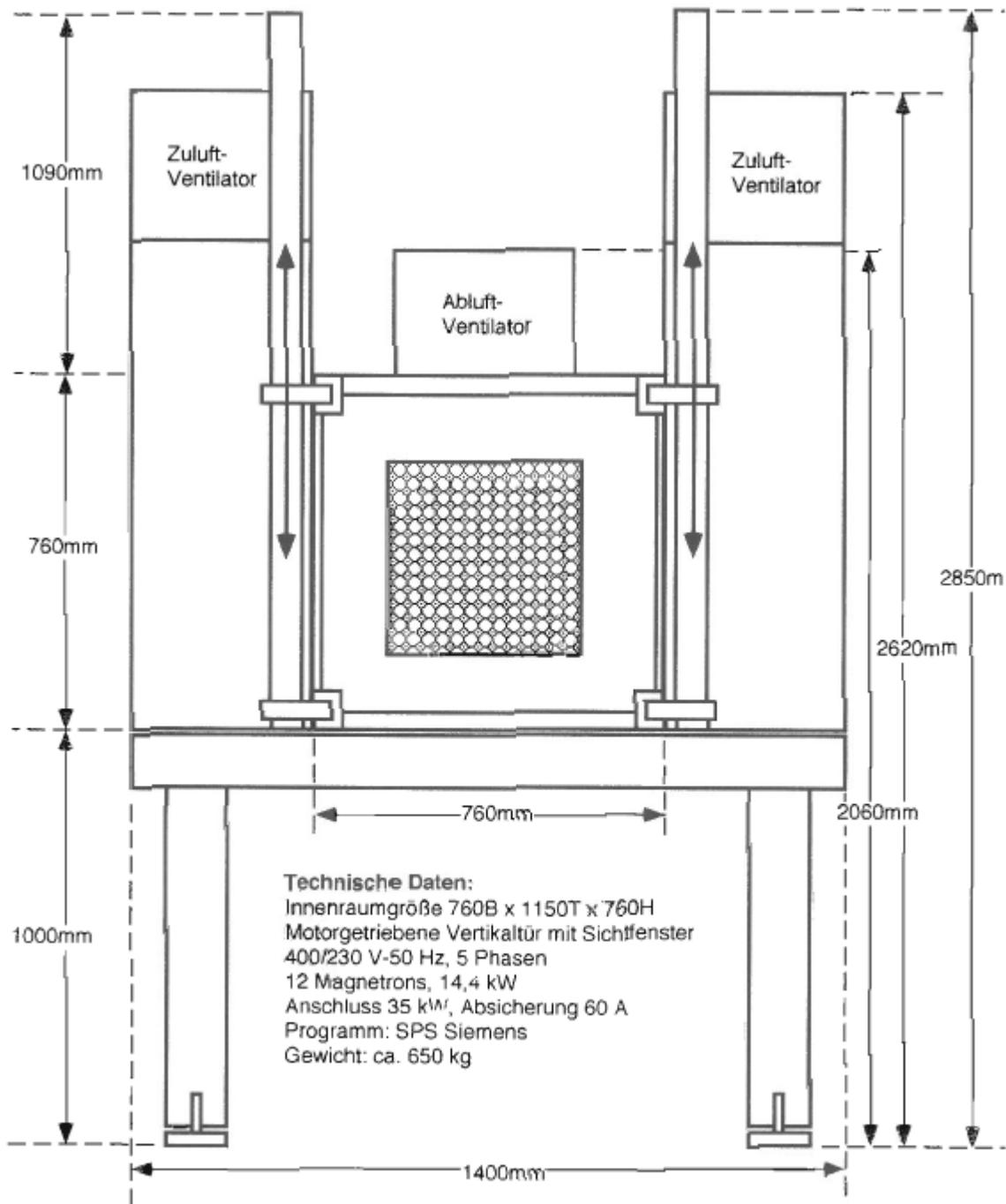
Die mechanischen Aufbereitungsschritte sollten mit einer Kapazität von ca. 15 t/h geplant werden, d.h. diese Anlagenteile werden einschichtig betrieben. Die Mikrowellenanlage sollte eine Kapazität von 5 t/h aufweisen und kontinuierlich betrieben werden. Vor der Mikrowellenanlage muss ein Materialpuffer mit einer Kapazität von ca. 120 t (24 h*5 t/h) zwischengeschaltet werden. Eine Umrechnung der Massendurchsätze in Volumendurchsätze kann mit Hilfe der experimentell abgeschätzten Rohdichten erfolgen.

5.1.2 Konstruktion Mikrowelleneinheit



Mikrowellenanlage Typ LK 14.4, Aufsicht

Bild 54: Mikrowellenanlage Aufsicht



Mikrowellenanlage Typ LK 14.4, Front

Bild 55: Mikrowellenanlage Front

Anlagenkenndaten:

- Spannung: 480/230V/50Hz
- Anschluss: 35kW
- Frequenz: 2450MHz
- Prozessraum: ca. 55x60x100 cm
- arbeitet mit jeweils 6 Magnetronen auf jeder Seite

Steuereinheit

- automatisch/manuell
- Leistung (50/75/100%)
- Zeit
- Abgasventilatoren

5.1.3 Multi-Mode-Mikrowellenverfahren

- Magnetronen geben Energie direkt in den Kammerinnenraum ab, da sie direkt durch Öffnungen in der Kammerwand abstrahlen
- Energiezufuhr kann bedarfsabhängig gesteuert werden
- Keine Energieüberlagerungen, sogenannte „Hot-Spots“,
- Materialien werden absolut gleichförmig von innen nach außen erwärmt
- Kerntemperatur wird mit einem Minimum an eingesetzter Energie erzielt

Bild 56 zeigt die Strahlungsausrichtung bei einer Mikrowelle mit Hohlleitereinspeisung, die gerichtete Strahlung führt zur Entstehung von Hot-Spots und im Gegensatz dazu die „Wilde Strahlung“ bei der Multi-Modetechnologie, die zu einer gleichmäßigen Erwärmung führt.

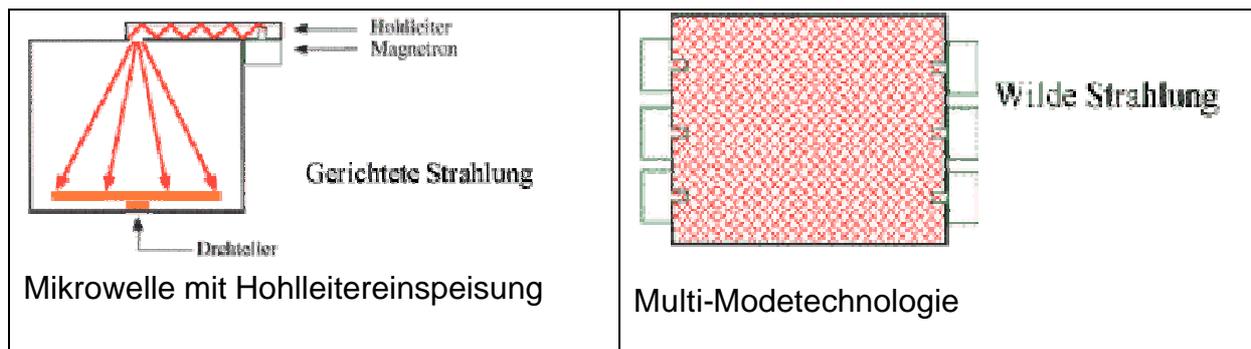


Bild 56: Strahlungsausrichtung

6 Arbeitspaket 6

6.1 Lastenheft

1. Die Verschlackung von Mineralwolle mittels Mikrowellenbehandlung ist möglich.
2. Der Einsatz von Suszeptoren ist in Abhängigkeit von der Mineralwolleart notwendig.
3. Die Mineralwolle muss vor der Mikrowellenbehandlung grob zerkleinert und sortiert sein (Metallabscheidung).
4. Das Mineralwolle-Suszeptoren-Gemisch muss verdichtet werden.
5. Die Mikrowellenanlage ist im Durchlaufverfahren zu konzipieren.
6. Das Aufgabegut ist während der Mikrowellenbehandlung ausreichend umzuwälzen, um alle Bereiche zu beanspruchen.
7. Die entstehenden Dämpfe aus den Bindemitteln sind mit geeigneten Techniken zu entfernen, d.h. die Anlage ist mit einer Nachverbrennung auszustatten

7 Ökologische, technologische, ökonomische Bewertung

Das Projekt ist ein Beitrag zum produktionsintegrierten Umweltschutz. Durch die Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zum umweltgerechten Behandeln kanzerogener Mineralwolle auf der Basis der Multi-Mode-Mikrowellentechnologie kann die Emission der gesundheitsschädlichen Mineralwollefaser durch die Verschlackung der Mineralwolle beseitigt werden. Gleichzeitig wird der Gefahrstoff in einen faserfreien Rohstoff umgewandelt.

Diese innovative Gefahrstoffbehandlung führt zur Ressourceneinsparung durch Einsatz des Materials in der Baustoffproduktion und zur Einsparung von Deponieraum. Die Reduzierung der gefährlichen Faseremissionen ist ein Beitrag zum Umwelt- und Gesundheitsschutz und war Schwerpunkt des Vorhabens. Bisher gab es kein Verfahren zur Zerstörung der Faserstruktur im Verwertungs-/Behandlungsverfahren. Bei dem derzeit angewendeten Woolrec-Verfahren werden die Mineralwolleabfälle mehrstufig sortiert und geschreddert und anschließend mit einer Suspension aus Speisegelatine, Melasse und Tonmehl gemischt. Dieses Gemisch wird agglomeriert und kann als Zusatzstoff für die Herstellung von Ziegeln eingesetzt werden. Da die anschließende Verwertung (eigentliche Umwandlung/Zerstörung der Faserstruktur) nur im Ziegelton möglich ist, muss hier eine Abnahme des eingekapselten Gefahrstoffes durch ein Ziegelwerk erfolgen.

Bei dem derzeit hergestellten Agglomerat „Woolit“ handelt es sich nur um ein Zwischenprodukt, der Gefahrstoff liegt hierbei nur „locker“ umhüllt vor und die Gefahrstoffumwandlung erfolgt erst beim Ziegelbrand durch das Aufschmelzen der Fasern.

Künstliche Mineralfasern sind seit 1980 eingestuft als „Stoffe mit begründetem Verdacht auf ein Krebs erzeugendes Potential“. Seit 1996 ist das Herstellen „alter“ kanzerogener Fasern verboten und mit Wirkung vom 1. Juni 2000 ebenso das in Verkehr bringen und verwenden. Laut Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) gelten nach gegenwärtigem Erkenntnisstand lungengängige (einatembare) künstliche Mineralfasern als frei von Krebsverdacht, wenn der Kanzerogenitätsindex KI mindestens 40 ist und die Faserhalbwertszeit max. 40 Tage beträgt. (Kanzerogenitätsindex KI nach TRGS 905: $KI = \sum Na, K, B, Ca, Mg, Ba\text{-Oxide} - 2 \times Al\text{-Oxide} [Ma.\%]$)

„Alte“ Mineralwolle (Herstellung vor 1996) erfüllt nicht die Kriterien des Anhangs IV Nr. 22 Abs. 2 der Gefahrstoffverordnung und ist damit krebserzeugend (Kategorie 2, $KI \leq 30$) oder krebserzeugend (Kategorie 3, $30 < KI < 40$). Derzeit erfolgt die Entsorgung auf Deponien, die Entsorgungskosten liegen zwischen 100-600 EUR/t. Beim Woolrec-Verfahren liegt der Annahmepreis für Mineralwolleabfälle bei 165,00 EUR/t. Wie hoch die Verfahrenskosten und der Gewinn liegen, wurde vom Betreiber nicht bekannt gegeben.

Die Multi-Mode-Mikrowellenanlage verfügt über einen Anschlusswert von 35 KW/h bei Volllauf. Aus einem durchschnittlichen Strompreis von 0,20 EUR/KWh und einer Behandlungszeit von 8 min/kg, ergeben sich Energiekosten von ca. 53 EUR/t. Hinzu kommen die Kosten für die vorgelagerte Zerkleinerung und Sortierung und den Mischprozess mit Suszeptoren (Personal, Energie, Wartung, Reparatur, Versicherung). Hierfür sind ca. 15 EUR/t zu veranschlagen.

Für die Investitionskosten (Anlagentechnik, Betriebsgeräte, Nebeneinrichtungen, Genehmigungskosten) sind ca. 10,00 EUR/t/a anzusetzen. Die Kapitalkosten (Abschreibungen, Zinsen) können mit 2,00 EUR/t geschätzt werden. Somit ergeben sich für das neue Verfahren geschätzte Gesamtkosten von 80 EUR/t.

Ausgehend vom Annahmepreis für Mineralwolleabfälle der Fa. Wool.rec. GmbH von 165,00 EUR/t, könnte durch den Betreiber ein Gewinn von 85 EUR/t erzielt werden.

8 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Projektpartner bereiten gemeinsam eine Schutzrechtsanmeldung vor. Nach der erfolgten Schutzrechtsanmeldung sind Veröffentlichungen in der Fachliteratur und Vorträge zu Fachveranstaltungen geplant.

9 Fazit

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass die Verschlackung von Mineralwolle mittels Mikrowellenbehandlung möglich ist. Aufgrund der großen Schwankungen der Zusammensetzung der Mineralwollearten ist der Einsatz von Suszeptoren notwendig. Die Mineralwollebehandlung sollte in den Verfahrensschritten Vornässen der angelieferten Mineralwolle, Sortierung mit Eisen- und Nichteisenerkennung und Abscheidung, Mehrstufige Zerkleinerung, Nachgeschaltete 2. Sortierstufe mit Eisen- und Nichteisenerkennung und Abscheidung, Mischen mit Suszeptor, Pressen des Mineralwolle-Suszeptoren-Gemisches, Mikrowellenbehandlung und abschließend die Aufbereitung der Schlacke durch Mahlen oder die Rückführung in den Produktionsprozess erfolgen. Die Mikrowellenanlage sollte im Durchlaufverfahren konzipiert werden. Das Aufgabegut ist während der Mikrowellenbehandlung ausreichend umzuwälzen, um alle Bereiche zu beanspruchen. Die entstehenden Dämpfe aus den Bindemitteln sind mit geeigneten Techniken zu entfernen, d.h. die Anlage ist mit einer Nachverbrennung auszustatten. Die gestellten Projektziele konnten durch die Projektpartner erreicht werden. Die positiven Ergebnisse des Vorprojektes konnten die technische Machbarkeit des Vorhabens „Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zum umweltgerechten Behandeln und Verwerten kanzerogener Mineralwolle auf der Basis der Multi-Mode-Mikrowellentechnologie“ bestätigen und bilden die Grundlage für die Weiterführung des Projektes. Im nächsten Schritt ist die technische Umsetzung des Mineralwolle-Behandlungsverfahrens geplant. Hierfür ist die Mitwirkung der Deutschen Dämmstoffindustrie notwendig, da die Anlagentechnik nicht durch die beteiligten Projektpartner finanziert werden kann.

Literatur/Quellenverzeichnis

- [1] TRGS 521, Technische Regel für Gefahrstoffe, Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle, Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Ausgabe Februar 2008
- [2] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) vom 23.12.2004, letzte Änderung vom 12.10.2007
- [3] TRGS 905, Technische Regel für Gefahrstoffe, Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe, Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Ausgabe Juli 2005, letzte Änderung vom Mai 2008
- [4] Verband für Abbruch und umweltgerechte Entsorgung in Mecklenburg-Vorpommern e.V.: Studie über die Entfernung und Entsorgung von Beton-Mehrschicht-Außenwandplatten mit Kamilit-Kerndämmung, Kamilit als Trittschalldämmung, Teerpappen als Sperrschichten unter Estrich beim Abbruch / der Sanierung von Plattenbauten in den neuen Bundesländern unter Berücksichtigung gefahrstoff-, abfall- und immissionsschutzrechtlicher sowie wirtschaftlicher Gesichtspunkte; 2005
- [5] <http://www.mineralwolle.de>
- [6] <http://www.waermedaemmstoffe.com>
- [7] <http://www.isover.de>
- [8] <http://www.rockwool.de>
- [9] <http://www.knaufinsulation.de>
- [10] <http://www1.heraklith.at>
- [11] Stecker, R.; knaufinsulation, E-Mail
- [12] Axmann, M., Stroh, K.: Umwelt Wissen – Künstliche Mineralfasern, Merkblatt des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, Augsburg 2008
- [13] Gütegemeinschaft Mineralwolle e.V.: “50 Antworten zur modernen Dämmung“; Broschüre der Gütegemeinschaft Mineralwolle e. V., 5. überarbeitete Auflage, Rossdorf, Mai 2006
- [14] Lühken, A.: “Ultraschall und Mikrowellenstrahlung im Chemieunterricht“; Dissertation; Frankfurt 2005
- [15] Mingos, M. P., Baghurst, D.R.: “Applications of Microwave Dielectric Heating Effects to Synthetic Problems in Chemistry“; Cem. Soc. Rev. 20 (1991)S. 1-47
- [16] Timofeeva, L. K., Shaposhnikov, A. P., Myshenkova, I. P.: “Use of rapid differential thermal analysis for controlling the properties of silicate melts“; Glass and Ceramics 29, Nr.6, (1972), S. 375-377
- [17] GefStoffV, Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen, Stand 1.1.2005
- [18] ChemG, Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen, Stand 13.12.2007
- [19] TRGS 521, Technische Regeln für Gefahrstoffe, Faserstäube, Ausgabe Mai 2002

- [20] KrW-/AbfG, Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen, Stand 19.07.2007
- [21] AVV, Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis, Stand 15.07.2006
- [22] <http://www.asvvallet.de>
- [23] <http://www.bigbagshop.de>
- [24] <http://www.berufsbekleidung-fricke.de>
- [25] <http://www.weiss-recycling.at>
- [26] <http://www.werner-weber.com>
- [27] <http://www.isover.de>
- [28] TRGS 201, Technische Regeln für Gefahrstoffe, Einstufung und Kennzeichnung von Abfällen zur Beseitigung beim Umgang, Ausgabe Juli 2002
- [29] <http://www1.rockwool.de>, Broschüre Abfallrücknahme-Service, Ausgabe 01/2007
- [30] BImSchG, Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverschmutzungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnlichen Vorgängen, Stand 23.10.2007
- [31] <http://www.woolit.de>
- [32] Firmenprospekt Holzmag AG
- [33] <http://www.berufsbekleidung-fricke.de>

