

**Bericht zum IGF-Forschungsvorhaben
AiF 18889 BG**

**Charakterisierung sortierter Ziegel-Recycling-Materialien anhand
physikalischer und chemisch-mineralogischer Eigenschaften für
die Generierung neuer Stoffströme**

von

**Dr. Anne Tretau
Dr. Barbara Leydolph**

Es handelt sich um ein Vorhaben der Forschungsvereinigung Ziegelindustrie e.V. nach Auswahl und Projektbegleitung durch die Forschungsgemeinschaft der Ziegelindustrie e.V.

Das IGF-Vorhaben 18889 BG der Forschungsvereinigung Ziegelindustrie e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18889 BG

Thema

Charakterisierung sortierter Ziegel-Recycling-Materialien anhand physikalischer und chemisch-mineralogischer Eigenschaften für die Generierung neuer Stoffströme

Berichtszeitraum

01.01.2017 bis 31.12.2018

Forschungsvereinigung

Ziegelindustrie

Forschungseinrichtung(en)

1. Institut für Ziegelforschung Essen e.V.

Am Zehnthof 197, 45307 Essen

2. IAB Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH

Über der Nonnenwiese 1, 99428 Weimar

Essen, 08.04.2019

Dr. Anne Tretau, Dr. Barbara Leydolph

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

INHALT

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Zusammenfassung..... | 8 |
| 2 | Einleitung und Zielsetzung..... | 8 |
| 3 | Wissenschaftliche Grundlagen | 11 |
| 4 | Experimentelles Vorgehen | 14 |
| 4.1 | Versuchsmatrix..... | 14 |
| 4.2 | Charakterisierung der Betriebsmassen und der RC-Ziegel..... | 14 |
| 4.2.1 | Analysen..... | 16 |
| 4.2.2 | Analyseverfahren..... | 17 |
| 5 | Auswertungen/Ergebnisse | 23 |
| 5.1 | Betriebsmassen..... | 23 |
| 5.1.1 | Bestimmung der Korngrößenverteilung..... | 23 |
| 5.1.2 | Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA..... | 24 |
| 5.1.3 | Mineralphasenbestimmung mittels XRD | 24 |
| 5.1.4 | Bestimmung des thermischen Verhaltens mittels DSC..... | 25 |
| 5.1.5 | Bestimmung der Schwefel- und Kohlenstoffgehalte | 27 |
| 5.1.6 | Bestimmung des Austreibungsverhaltens..... | 27 |
| 5.2 | RC-Material..... | 30 |
| 5.2.1 | Korngrößenverteilung..... | 32 |
| 5.2.2 | Chemische Zusammensetzung über WD RFA | 33 |
| 5.2.3 | Bestimmung Mineralphasen mittels XRD..... | 34 |
| 5.2.4 | Bestimmung des thermischen Verhaltens mittels DSC..... | 35 |
| 5.2.5 | Schwefel- und Kohlenstoffgehalte..... | 36 |
| 5.2.6 | Physikalische Messwerte | 37 |
| 5.2.7 | Bestimmung des Ziegelanteils..... | 39 |
| 6 | Zuordnung der Betriebsmassen und der RC-Ziegel:..... | 51 |
| 6.1 | Herstellung der Probekörper | 51 |
| 6.1.1 | Analysen der RC-Versätze, Scherbenanalyse nach dem Brand | 52 |
| 6.1.2 | Analyseverfahren | 52 |
| 7 | Auswertungen / Ergebnisse | 54 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 7.1 | RC-Zugabemenge 10% | 54 |
| 7.1.1 | Ton A10..... | 54 |
| 7.1.2 | Ton E10..... | 55 |
| 7.1.3 | Ton U10..... | 55 |
| 7.1.4 | Eluatanalysen..... | 58 |
| 7.2 | RC-Zugabemenge 3% bzw. 25% | 59 |
| 7.2.1 | Ton A, 3%-Zugabe RC-Material (A3)..... | 59 |
| 7.2.2 | Ton E 3% bzw. 25%-Zugabe RC-Material (E3, E25)..... | 61 |
| 7.2.3 | Ton U 25%-Zugabe RC-Material (U25)..... | 63 |
| 8 | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | 68 |
| 9 | Schlussbemerkungen | 81 |
| 9.1 | Notwendigkeit und Angemessenheit der Förderung..... | 81 |
| 9.2 | Wirtschaftlicher Nutzen..... | 81 |
| 9.3 | Plan zum Ergebnistransfer..... | 82 |
| 10 | Literatur | 84 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Gebäudebestand, Alter [19] | 9 |
| Abbildung 2: Abgang der Gebäude im Jahr 2017 nach Baujahr | 9 |
| Abbildung 3: Abgang von Gebäuden im Hochbau nach Bundesländern | 10 |
| Abbildung 4: Ziegeleien in Deutschland, Recyclinghöfe die Mauerwerksbruch verwerten | 11 |
| Abbildung 5: Darstellung der Einbindung von Magerungsmitteln in die Tonmatrix | 13 |
| Abbildung 6: Günstige Korngrößen-Zusammensetzung von Ziegeltonen, nach WINKLER [23] | 17 |
| Abbildung 7: Prinzipskizze Röhrenofen zur Bestimmung des Austreibungsverhaltens | 19 |
| Abbildung 8: Prinzipdarstellung der Magnetscheidung mit Scheidetrommel [22] | 21 |
| Abbildung 9: Prinzipdarstellung des Rückhaltescheiders [12] | 22 |
| Abbildung 10: Modifiziertes WINKLER-Dreieck zur Eignungsbewertung der Rohstoffe A, E, U | 23 |
| Abbildung 11: Simultane Thermoanalyse (STA /DSC) – Betriebsmasse A | 26 |
| Abbildung 12: Simultane Thermoanalyse (STA /DSC) – Betriebsmasse E | 26 |
| Abbildung 13: Simultane Thermoanalyse (STA /DSC) – Betriebsmasse U | 27 |
| Abbildung 14: Kohlenstoffaustreibung Probe A | 28 |
| Abbildung 15: Kohlenstoffaustreibung Probe E | 29 |
| Abbildung 16: Kohlenstoffaustreibung Probe U | 29 |
| Abbildung 17: Material B (Pflasterziegel), K (Hintermauerziegel modern), | 30 |
| Abbildung 18: Darstellung der Korngrößenverteilung der RC-Materialien im WINKLER- Dreieck | 32 |
| Abbildung 19 Dreistoffsystem $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Flussmittel FM}$ | 34 |
| Abbildung 20: Probe D1 – DSC-Kurve (Beispiel) | 36 |
| Abbildung 21: Trockene Magnetscheidung | 42 |
| Abbildung 22: Probe G – Hochlochziegel, Probe P - Hochlochziegel | 42 |
| Abbildung 23: Untersuchungsschema für trockene Magnetscheidung der Proben G und P | 43 |
| Abbildung 24: Materialaufgabe; G 0,5 – 4 mm | 44 |
| Abbildung 25: Einkornschüttung | 44 |
| Abbildung 26: Ergebnis Magnet-scheidung (trocken) | 44 |
| Abbildung 27: Materialaufgabe; G 0,1 - 0,5 mm | 44 |
| Abbildung 28: Ergebnis; Magnetische Probe | 44 |
| Abbildung 29: Ergebnis; Unmagnetische Probe | 44 |
| Abbildung 30: Probe G 0,5-4mm; vor und nach Magnetscheidung (Tabelle 27: Versuch 1) | 45 |
| Abbildung 31: Probe G 0,125-0,5mm; vor und nach Magnetscheidung (Tabelle 27: Versuch 3) | 45 |
| Abbildung 32: Untersuchungsschema für Probe P, trockene Magnetscheidung und | 48 |
| Abbildung 33: Nassmagnetscheidung; Einfüllen der trockenen Probe | 49 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 34: Nassmagnetscheidung; Herstellung einer Suspension | 49 |
| Abbildung 35: Bedienelement Nassmagnetscheidung (Rückhaltescheider)..... | 49 |
| Abbildung 36: Rückhaltescheider | 49 |
| Abbildung 37: Magnetische Restprobe Nassmagnetscheidung | 49 |
| Abbildung 38: Restmaterial nach Versuch; MP; UP; Spülwasser..... | 49 |
| Abbildung 39: Vakuum-Laborschneckenpresse im Institut für Ziegelforschung | 51 |
| Abbildung 40: Messgerät nach Pfefferkorn | 52 |
| Abbildung 41: Messgerät Biegezugfestigkeit | 53 |
| Abbildung 42: Anordnung der Probekörper während des Brandes | 54 |
| Abbildung 43: Ton A (10% Zugabe) Biegezug/Rohdichte | 56 |
| Abbildung 44: Ton E (10% Zugabe) Biegezug/Rohdichte..... | 56 |
| Abbildung 45: Ton U (10% Zugabe) Biegezug/Rohdichte..... | 56 |
| Abbildung 46: Ton A10, Schwindung Brennverlust | 57 |
| Abbildung 47: Ton E10, Schwindung Brennverlust | 57 |
| Abbildung 48: Ton U10, Schwindung Brennverlust..... | 57 |
| Abbildung 49: Vergleich WA für Ton A, E und U..... | 58 |
| Abbildung 50: Ton A3, Biegezugfestigkeit, Rohdichte | 60 |
| Abbildung 51: Foto Probekörper A3..... | 60 |
| Abbildung 52: Ton E3, E25, Biegezugfestigkeit, Rohdichte | 61 |
| Abbildung 53: Foto ER3, EC25, ED25, optische Begutachtung..... | 62 |
| Abbildung 54: Ausblühungen ED 25..... | 62 |
| Abbildung 55: Wasseraufnahme Ton E, nach Zugabe von..... | 62 |
| Abbildung 56: Ton E3, E25, Biegezug, Rohdichte | 63 |
| Abbildung 57: Wasseraufnahme Vergleich U10-U25..... | 63 |
| Abbildung 58: Foto U+25%-RC Materialien | 64 |
| Abbildung 59: optische Beurteilung der Probekörper, tabellarische Aufstellung..... | 66 |
| Abbildung 60: Kostenmodell Einsatz Ziegel-RC-Material (schematisch)..... | 68 |
| Abbildung 61: Mauerwerkbruch, Fraktion 8/16 | 70 |
| Abbildung 62: Produktpreise einer Recyclinganlage nach [11] | 76 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Abgang von Gebäuden 2017 | 10 |
| Tabelle 2: Bezeichnung der ausgewählten Betriebsmassen..... | 16 |
| Tabelle 3: Einteilung der 21 RC-Proben, Fraktionen < 4mm..... | 16 |
| Tabelle 4: Übersicht der Siebanalyse zur Ermittlung der Kornklassen der Rohstoffe A, E, und U..... | 23 |
| Tabelle 5 RFA der Betriebsmassen (Schmelztablette)..... | 24 |
| Tabelle 6: Mineralogie Tonminerale - Betriebsmassen A, E, U | 24 |
| Tabelle 7: Mineralogie Nichttonminerale - Betriebsmassen A, E, U | 25 |
| Tabelle 8: C + S – Bestimmung Betriebsmassen A, E, U | 27 |
| Tabelle 9: Austreibungsverhalten der Betriebsmassen..... | 27 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 10: Aufstellung der ausgewählten RC Materialien..... | 31 |
| Tabelle 11: Körnungsbereiche der RC-Materialien, Mittelwerte | 33 |
| Tabelle 12: RFA an Schmelztabletten der Fraktion < 4 mm; gemischte Proben (sortenreines Material sowie Material aus Mauerwerkbruch, selektivem Rückbau und RC-Sand) | 33 |
| Tabelle 13: RFA an Schmelztabletten der Fraktion < 4 mm, moderne Hochlochziegel | 34 |
| Tabelle 14: Übersicht der Mineralphasenzusammensetzung RC-„alt“ | 35 |
| Tabelle 15: Übersicht der Mineralphasenzusammensetzung RC-„neu“ | 35 |
| Tabelle 16: C+S-Analyse; RC „alt“ | 37 |
| Tabelle 17: C+S-Analyse; RC „neu“ | 37 |
| Tabelle 18: tabellarische Darstellung der Analysenergebnisse | 38 |
| Tabelle 19: Bestimmung Ziegelanteil Probe F – Siebrückstände | 39 |
| Tabelle 20: Bestimmung Ziegelanteil Proben B, C, F, R (RC-Material „alt“ – Auswahl)..... | 39 |
| Tabelle 21: Bestimmung Ziegelanteil Proben G, H, J, N, P, Q (RC-Material „neu“ – Auswahl) | 40 |
| Tabelle 22: Bestimmung Ziegelanteil "RC - alt", Fraktion 1000 - 2000 µm | 40 |
| Tabelle 23: Bestimmung Ziegelanteil "RC - neu", Fraktion 1000 - 2000 µm..... | 41 |
| Tabelle 24: Zusammensetzung der Probenmaterialien in den verschiedenen Korngrößenbereichen für die Magnetscheideversuche (trocken) bestimmt durch Siebung..... | 43 |
| Tabelle 25: Messprotokoll (Ausschnitt), Maschinendetails (mT=Millitesla, magnetische Flussdichte) | 44 |
| Tabelle 26: Ergebnisprotokoll zur trockenen Magnetscheidung (UVR-FIA)..... | 45 |
| Tabelle 27: Bestimmung Sortiergrad (Auszählung Einzelpartikel) vor und nach Magnetscheidung aus Versuch 1 | 46 |
| Tabelle 28: Chemische Analyse Probe G und Probe P; Vergleich Ausgangsprobe (\leq 4mm) mit einzelnen Siebfractionen 0,125 -0,5 mm und 0,5 – 4 mm | 47 |
| Tabelle 29: Chemische Analyse Probe G und Probe P;..... | 48 |
| Tabelle 30: Ergebnisse Nassmagnetscheidung – Protokoll UVR-FIA (Auszug) | 50 |
| Tabelle 31: Zusammenstellung der Ergebnisse Ton A / 10% RC-Material..... | 55 |
| Tabelle 32: Zusammenstellung der Ergebnisse Ton E / 10% RC-Material..... | 55 |
| Tabelle 33: Zusammenstellung der Ergebnisse Ton U / 10% RC-Material..... | 55 |
| Tabelle 34: Eluatanalysen nach Zugabe von 10% RC-Ziegel | 59 |
| Tabelle 35: Zusammenstellung der Ergebnisse Ton A / 3% RC-Material..... | 59 |
| Tabelle 36 Zusammenstellung der Ergebnisse Ton E / 3% bzw. 25% RC-Material | 61 |
| Tabelle 37: Zusammenstellung Ergebnisse U 25% RC-Ziegel..... | 63 |
| Tabelle 38: Tabellarische Darstellung des Austreibungsverhaltens der hergestellten Probekörper. | 65 |
| Tabelle 39: Auszüge aus den Preislisten für die Annahme von Bauschutt verschiedener stationärer Recyclinganlagen [6] | 69 |
| Tabelle 40: Fortsetzung - Auszüge aus den Preislisten für die Annahme von Bauschutt verschiedener stationärer Recyclinganlagen [6] | 69 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 41: Zusammenfassung - Preise Annahme Ziegelmaterial (min., max.) | 69 |
| Tabelle 42: Sortiermerkmale verschiedener Arten Abbruchmaterial nach [11]..... | 71 |
| Tabelle 43 Berechnung der Gesamtkosten einer Abbruch / Rückbaumaßnahme mit unterschiedlichen Abbruchszenarien (Grobermittlung) | 74 |
| Tabelle 44: Zusammenfassung | 74 |
| Tabelle 45: Kapazitätsplanung von Recyclinganlagen nach Bevölkerungsdichte [11]..... | 75 |
| Tabelle 46: Mögliche Einsatzmengen von RC-Material nach Produktgruppen..... | 76 |
| Tabelle 47: Verbrauch natürlicher Rohstoffe zur Herstellung keramischer Produkte [24]..... | 76 |
| Tabelle 48: Produktionskosten Dachziegel [20] | 77 |
| Tabelle 49: Chemische Reaktionen beim Brennprozess [25]..... | 79 |
| Tabelle 50: Energiebedarf der Teilprozesse nach [25]..... | 79 |

1 Zusammenfassung

Ziel dieses Forschungsvorhabens war, die hochwertige Verwertung von Mauerwerkbruch, vor allem des darin enthaltenen Ziegelanteils, nachhaltig zu sichern. Hierzu war es notwendig, Basiswissen zu erarbeiten, welche Qualitäten und Mengen an aus Mauerwerkbruch stammendem Ziegelbruch wieder in der Ziegelproduktion eingesetzt werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Reinheit kann dies nur in Abhängigkeit von der Ziegelart geschehen. Als Ergebnis der Untersuchungen konnte ein Merkblatt erstellt werden, das je nach Qualität des Mauerwerksbruchs, die jeweils maximale Zugabemenge des RC-Materials empfiehlt, gestaffelt, nach den Produktgruppen Vormauer-, Hintermauer-, oder Dachziegel.

Als limitierende Faktoren wurden optische Einflüsse des RC-Materials auf das fertige Produkt ebenso berücksichtigt, wie chemisch – physikalische Einflüsse während des Produktionsprozesses. Je nach Produktgruppe unterscheiden sich die Zugabemengen an RC-Material, die problemlos wieder in den Produktionsprozess eingebunden werden können, erheblich. Auch die Qualität des RC-Materials, das verwertet werden kann, muss sich nach dem jeweiligen Einsatz richten. Während im Bereich der Hintermauerziegel eine Zugabemenge von bis zu 25% RC-Material gut möglich ist, beschränkt sie sich für Dachziegel auf höchstens 3%. Zusätzlich stellt sich die Anforderung, dass für die Dachziegelproduktion ausschließlich sortenreines, hart gebranntes RC-Material geeignet ist.

Die Untersuchungsergebnisse werden untenstehend im Einzelnen dargestellt.

Um in der Ziegelindustrie die Akzeptanz der Hersteller zu erlangen, RC-Ziegel-Material als Magerungsmittel einzusetzen und somit die natürlichen Ressourcen zu schonen, sind auch monetäre Gesichtspunkte von entscheidender Bedeutung. In die Kostenkalkulation fließen neben den reinen Materialkosten auch die Transportkosten mit ein. Eine Wirtschaftlichkeit ist nur dann gewährleistet, wenn die räumliche Nähe von Ziegelhersteller und Recyclingunternehmen gegeben ist, wodurch geringe Transportkosten garantiert sind. In Abhängigkeit der eigenen Betriebsmasse aus Roh- und Zuschlagstoffen sowie Additiven kann dann, anhand des Merkblattes, das passende RC-Material ausgewählt werden.

Somit wird die Ziegelindustrie in die Lage versetzt bereits bei der Herstellung ihrer Produkte eine spätere Wiederverwertung im eigenen Produktionszyklus zu ermöglichen. Den Anforderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [8] wird somit Rechnung getragen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Einleitung und Zielsetzung

Der Baustoff Ziegel ist einer der ältesten überhaupt. Dennoch ist es ein erklärtes Ziel der Ziegelindustrie, durch fortwährende Forschung und Innovation, die Relevanz dieses nachhaltigen Werkstoffes innerhalb des Bausektors hervorzuheben und zu erhöhen. Daher wurden in diesem Forschungsvorhaben die Erwartungen der Bundesregierung an zeitgemäße Baustoffe aufgegriffen, die sowohl im Kreislaufwirtschaftsgesetz [8], als auch im Ressourceneffizienzprogramm [1] formuliert sind. Durch die Stärkung von Abfallvermeidung und Recycling soll ein Übergang von der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft erreicht werden. Durch den angestrebten Einsatz von RC-Ziegeln in der Ziegelherstellung wird eine hochwertige Wiederverwertung der Ziegel möglich, da der Baustoff im selben Produktzyklus verbleibt. Gleichzeitig werden Rohstoffressourcen geschont, der Gedanke des Urban Mining wird praktizierbar. Aus der folgenden Grafik, erstellt durch das Statistische Bundesamt, ist zu entnehmen, dass über 70% des Gebäudebestandes, sowohl in den alten als auch in den neuen Bundesländern, vor 1978 errichtet wurde [19].

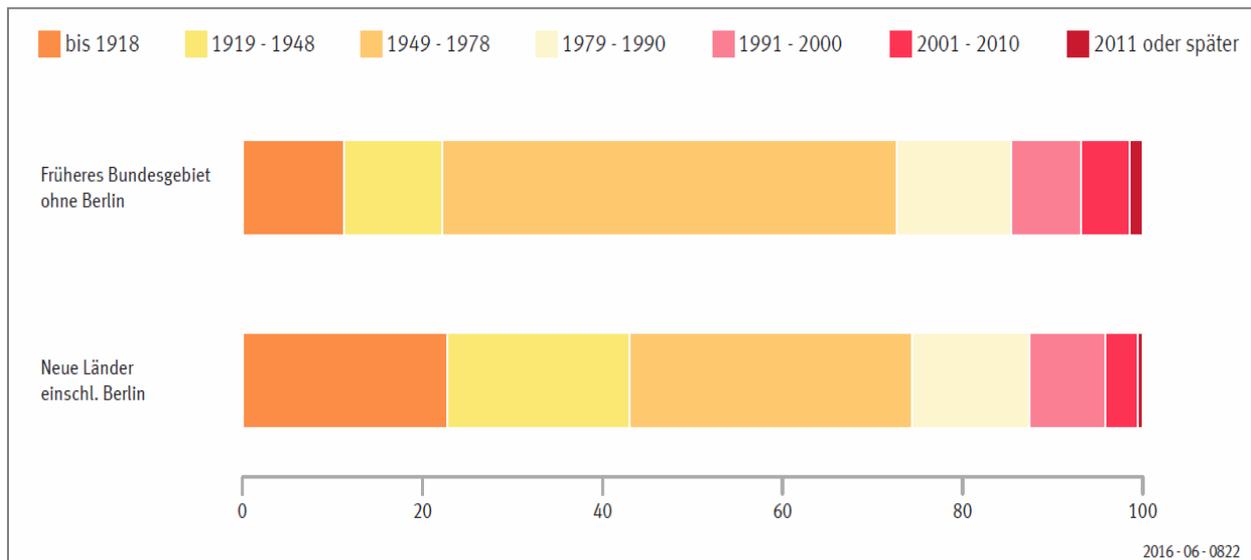


Abbildung 1: Gebäudebestand, Alter [19]

Aus energetischer Sicht stellt dieses Jahr 1978 eine Zäsur dar, da mit Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung der Endenergiebedarf für die Bereitstellung und Nutzung von Wärme deutlich gemindert werden konnte. Gleichzeitig wurde die Wohnqualität, bezüglich des Komforts der Wohnungen, erheblich gesteigert. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es daher oftmals rentabler einen Gebäudeabriss einer Sanierung vorzuziehen. Der daraus resultierende Abgang der Gebäude im Jahr 2017 ist in der folgenden Grafik dargestellt, die aus der darunter stehenden Tabelle generiert wurde.

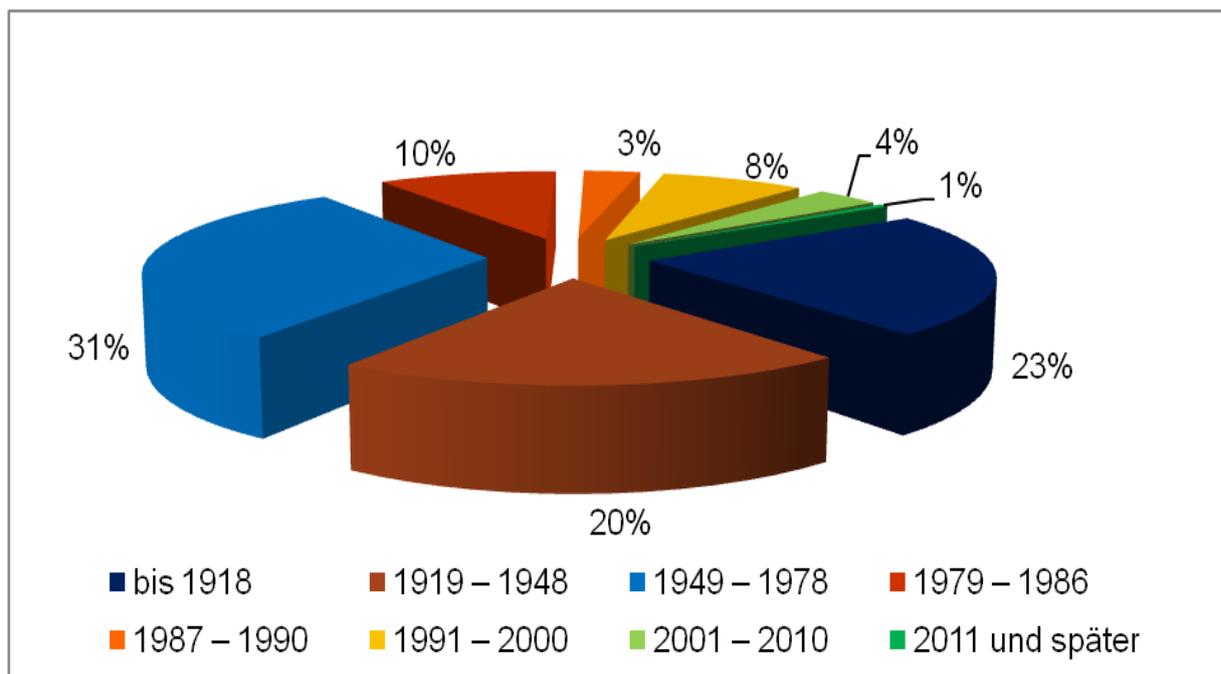


Abbildung 2: Abgang der Gebäude im Jahr 2017 nach Baujahr

| Abgang von Gebäuden/Gebäudeteilen im Hochbau: Bundesländer, 2017 | | | | |
|--|----------------------------|------------|------------|-----------|
| Statistik des Bauabgangs | | | | |
| Jahr Bundesländer | Gebäude/ Ge- bäudeteile | Nutzfläche | Wohnfläche | Wohnungen |
| | Anzahl | 1000 qm | 1000 qm | Anzahl |
| 2017 | | | | |
| Baden-Württemberg | 2820 | 1257 | 291 | 3775 |
| Bayern | 2725 | 906 | 272 | 3434 |
| Berlin | 227 | 380 | 17 | 227 |
| Brandenburg | 793 | 355 | 78 | 1367 |
| Bremen | 34 | 30 | 2 | 18 |
| Hamburg | 128 | 73 | 20 | 322 |
| Hessen | 2134 | 911 | 204 | 2346 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 200 | 98 | 49 | 1162 |
| Niedersachsen | 646 | 153 | 44 | 437 |
| Nordrhein-Westfalen | 3893 | 1780 | 513 | 5672 |
| Rheinland-Pfalz | 705 | 191 | 56 | 538 |
| Saarland | 117 | 50 | 9 | 103 |
| Sachsen | 835 | 380 | 92 | 1406 |
| Sachsen-Anhalt | 1144 | 325 | 133 | 2165 |
| Schleswig-Holstein | 362 | 134 | 31 | 402 |
| Thüringen | 780 | 211 | 95 | 1493 |

(C)opyright Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017

Tabelle 1: Abgang von Gebäuden 2017

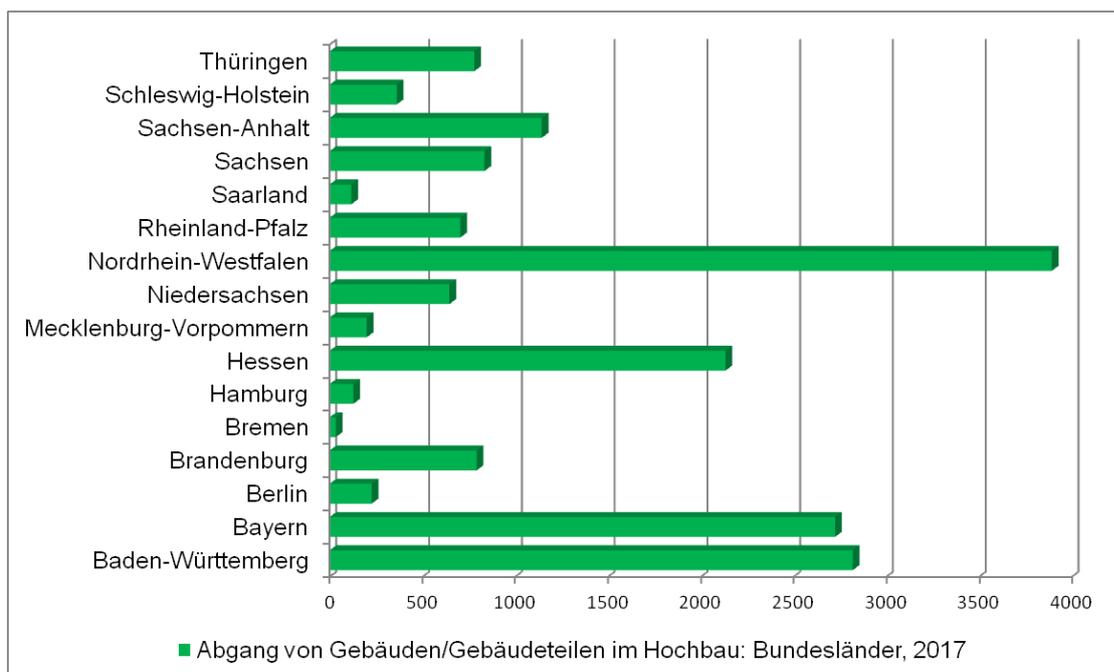


Abbildung 3: Abgang von Gebäuden im Hochbau nach Bundesländern
[eigene Darstellung auf Datengrundlage destatis 2017]

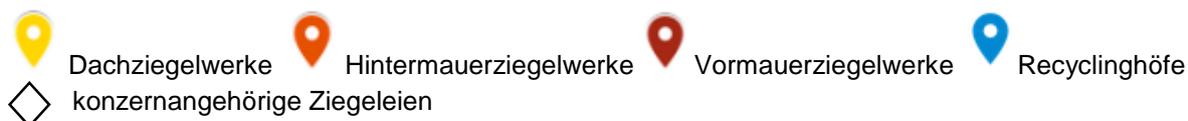
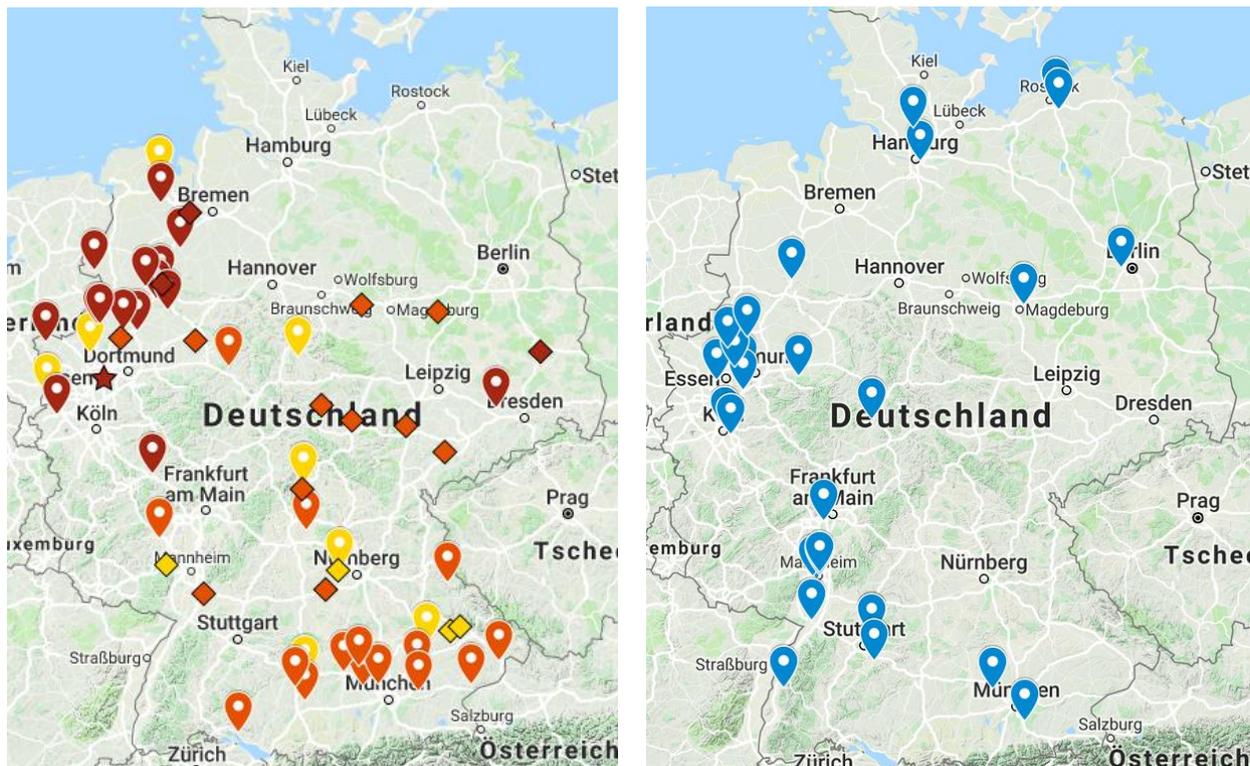


Abbildung 4: Ziegeleien in Deutschland, Recyclinghöfe die Mauerwerksbruch verwerten

Aus der in Abbildung 4 links stehenden Karte, welche die Produktionsstandorte deutscher Ziegelwerke zeigt ist zu entnehmen, dass Vormauerziegelwerke hauptsächlich im Norden und Hintermauerziegelwerke vermehrt im Süden Deutschlands angesiedelt sind. Die Anzahl der Werke ist in Bayern, Baden- Württemberg und Nordrhein-Westfalen deutlich höher als in den anderen Bundesländern. Da genau in diesen erstgenannten Bundesländern die bedeutendsten Gebäudeabgänge zu verzeichnen sind (siehe Abbildung 3) ist eine Nutzung von regional anfallendem Mauerwerksbruch vorstellbar. Die Ergebnisse dieses Vorhabens eröffnen ein neues Einsatzgebiet für den anfallenden Mauerwerksbruch. Aufgabe der RC-Industrie ist die Herstellung von Ziegelmaterial aus sortenrein erfasstem und in einer Aufbereitungsanlage behandelten Ziegelbruch aus Abfällen, der bei Bautätigkeiten wie Rückbau, Neubau, Sanierung usw. anfällt. Durch die hochwertige Wiederverwertung in der Ziegelindustrie kann Abfall reduziert werden, natürliche Ressourcen werden geschont.

3 Wissenschaftliche Grundlagen

Die Rohstoffe sowie die Betriebsmassen der drei verschiedenen Produktgruppen der Ziegelindustrie unterscheiden sich stark voneinander. Dies gilt sowohl für die chemisch-mineralogische Zusammensetzung, als auch für die physikalischen Kenngrößen. Neben Ziegeltonen und -lehm werden der Betriebsmasse diverse Zuschlags- und Hilfsstoffe zugesetzt, um die Eigenschaften des fertigen Produktes zu optimieren und eine möglichst kosten- und energieeffiziente Herstellung zu garantieren. Zur Magerung besonders fetter, feinkörniger Tone wird dem Rohstoff vor

der Verarbeitung bevorzugt Sand oder Quarzmehl zugefügt. Ziegeltonen mit zu geringer Rohdichte werden unter anderem Kalk- und Natursteinmehl beigemischt, wodurch wesentlich bessere Dämmeigenschaften erzielt werden. Die im Ziegelton natürlich enthaltenen organischen Bestandteile werden während des Brandes ausgetrieben und schaffen ebenso wie das entweichende Wasser Porenräume, wodurch die Rohdichte und die damit verbundene Kornfestigkeit erheblich vermindert werden. Um diese sich auf die Wärmedämmung von Ziegeln positiv auswirkende Eigenschaft zusätzlich zu erhöhen, werden der Ziegeltonmasse Porosierungsmittel zugefügt. Dabei werden bevorzugt nicht mehr recyclingfähige Reststoffe wie Papierfangstoffe, Sägespäne und Polystyrol aus anderen Industriezweigen verwendet. Diese Porosierungsmittel werden dem Ton vor der Homogenisierung beigemischt und verbrennen während des Brennprozesses unter Erzeugung von Porenraum.

Hauptbestandteil der in den Ziegelwerken verwendeten Betriebsmassen ist in der Regel Ton aus Lagerstätten des direkten Umfeldes der jeweiligen Ziegelei. Um eine gleichbleibend sehr gute Produktqualität zu gewährleisten, ist oftmals der Einsatz von ergänzenden Zuschlagstoffen notwendig. Diese Zuschlagstoffe wirken sich einerseits positiv auf den Produktionsprozess aus, andererseits dienen sie dazu die Ziegeleigenschaften, von der Brennfarbe über die Plastizität bis hin zur Festigkeit, in der gewünschten Weise zu beeinflussen. Für die Formgebung in der Ziegelindustrie ist die Plastizität des Rohstoffes ein entscheidender Faktor. Unter dem plastischen Verhalten der Masse versteht man die Verformbarkeit durch Versetzungsbewegungen, Korngrenzengleiten und Diffusionsvorgänge. Nach dem Überschreiten der Fließgrenze findet eine bleibende Verformung statt, ohne dass der Zusammenhalt der Teilchen verloren geht. Für die Bildsamkeit von maßgeblicher Bedeutung ist die Fließgrenze, gemessen als Kraft unter definierten geometrischen Bedingungen bei Verformungsbeginn und die maximale erreichbare Verformung bis zur Rissbildung. Den Magerungsmitteln kommt im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eine besondere Bedeutung zu, da die Hypothese ist, dass diese durch RC-Ziegel substituiert werden können. Der Nachweis, ob die vorteilhaften Einflüsse, wie z.B. Minderung der Texturanfälligkeit, der Aufheizempfindlichkeit und Steigerung der Feuerstandsfestigkeit, durch die RC-Ziegel ebenfalls erfüllt werden, war Bestandteil der Untersuchungen. Auch der Einfluss auf das Trocknungsverhalten wurde erfasst, indem Parameter wie z.B. Wasserbeladung, Schwindung, Rissempfindlichkeit und das Ausblühverhalten bestimmt wurden.

Durch die Zugabe von Magerungsmitteln, die dem Rohstoffgemenge als nichtplastische Zuschlagstoffe beigefügt werden, nimmt die Wasserbeladung ab, der kapillare Wassertransport wird verbessert. Wie in Abbildung 5 deutlich zu sehen ist, findet sich rings um die Magerungsmittel, hier Sandkörner, ein mit Wasser gefüllter Kapillarraum, der die sogenannte Randgängigkeit erhöht. Dies begünstigt den Feuchteausgleich innerhalb der Masse und vermindert so die Rissgefährdung, da die Druckspannungen im Inneren und die Zugspannungen an der Oberfläche des Rohlings verringert werden. Die Plastizität der Masse, die durch die Tonminerale bewirkt wird und entscheidenden Einfluss auf das Formgebungsverhalten hat, wird herabgesetzt. Auch die trockenbedingte Schwindung der Rohmasse wird durch die Zugabe von Magerungsmitteln gemindert. Hier sind der Tonmineralbestand und das plastische Verhalten des Ausgangstones von entscheidender Bedeutung. Neben diesen positiven Effekten kann es allerdings auch zu unerwünschten Folgen kommen. Durch die Veränderung des Trocknungs- und Brennverhaltens und die Zugabe andersfarbiger Partikel, sind Farbabweichungen des keramischen Scherbens möglich. Auch die Wanderung von löslichen Salzen kann durch die Verwendung von Magerungsmitteln

teln beeinflusst werden, was im Magerungsprozess zu Ausblühungen führen kann. Als Magerungsmittel werden üblicherweise z.B. Quarz, Feldspat, Keramikbruch oder gesondert gebrannte Rohschamotte eingesetzt.

Kaolinitplättchen
auf einem Quarz-
zirkristall

l zu Ausblühungen führen kann. Als Magerungsmittel werden üblicherweise z.B. Quarz, Feldspat, Keramikbruch oder gesondert gebrannte Rohschamotte eingesetzt.

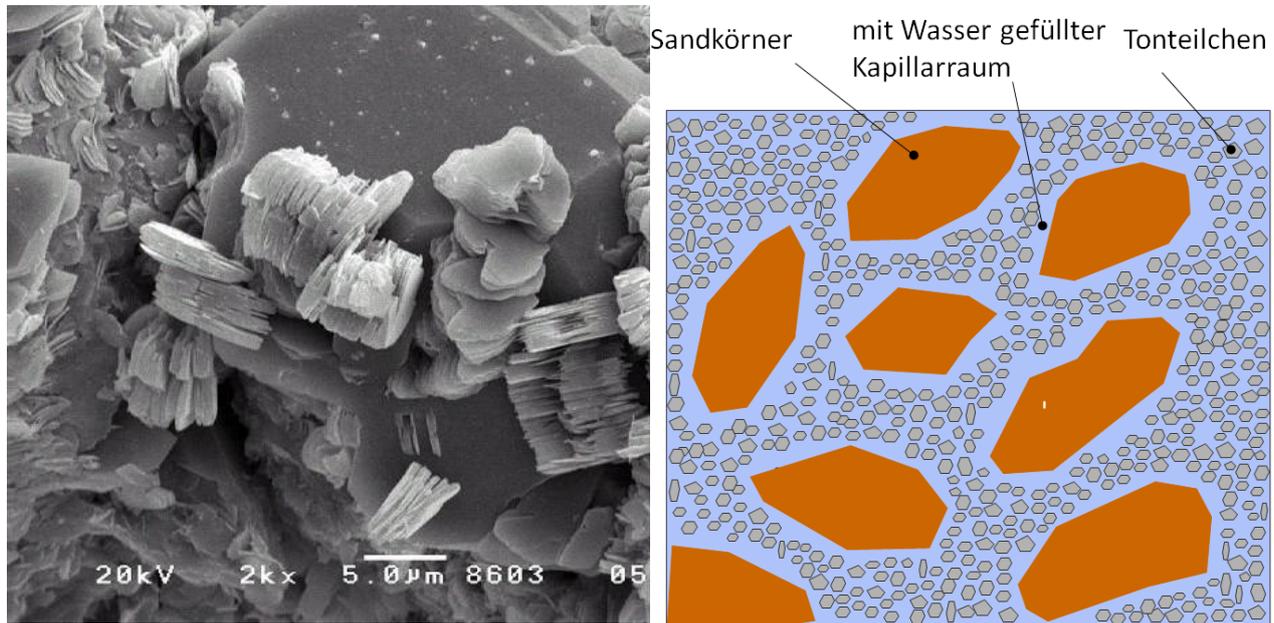


Abbildung 5: Darstellung der Einbindung von Magerungsmitteln in die Tonmatrix

Ob es durch die veränderten Trocknungsparameter oder die erneute Wärmebehandlung zu einer vermehrten Auslaugung von Schwermetallen und anderen Rohstoffbestandteilen kommt, wird anhand von Eluatanalysen ermittelt.

4 Experimentelles Vorgehen

4.1 Versuchsmatrix

Es wurden drei Betriebsmassen ausgewählt, welche die jeweilige Produktgruppe repräsentieren. Diese sind, ein:

- Karbonatreicher Hochlochziegelton (HLZ)
- Anhydrithaltiger Vormauerziegelton (VMZ)
- Kalkfreier Dachziegelton (DZ)

Nach der Auswahl von Recyclingmaterialien und deren Charakterisierung, wurden aus den 21 ursprünglich zur Verfügung stehenden RC-Proben sechs ausgewählt, die den Tonen zugeordnet wurden. Die Auswahl der RC-Ziegel geschah anhand der Analysenergebnisse, es wurden Proben ausgewählt, die möglichst repräsentativ für die jeweilige Qualität des RC-Materials waren. Zunächst wurden die Ausgangstone mit einer Zugabemenge von 10 M.-% RC-Material versetzt. Nach der Analyse der Ergebnisse ergab sich die Notwendigkeit eines differenzierten weiteren Vorgehens. Dem kalkfreien Dachziegelton wurde in der Folge maximal 5 M.-% RC-Ziegel, dem karbonatreichen Hintermauerziegelton bis zu 25 M.-% RC-Ziegel zugegeben. Dem anhydrithaltigen Vormauerziegelton wurde, je nach RC-Material, entweder 5 M.-% oder 25 M.-% zugegeben. Die zugrundeliegenden Untersuchungen werden im Folgenden erläutert.

4.2 Charakterisierung der Betriebsmassen und der RC-Ziegel

Um eine herstellerneutrale Nomenklatur zu gewährleisten, wurden die drei für das jeweilige Produkt typische Betriebsmassen mit den Vokalen (A - Dachziegelton, E - Vormauerziegelton und U - Hintermauerziegelton) und die RC-Materialien mit Konsonanten (B-Z) belegt. In der Tabelle

2 ist die Auswahl der Betriebsmassen aufgezeigt,

| Proben | P.-Nr. | Herkunft / Entnahme | Zustand | Zusammensetzung | sonstiges |
|--------|--------|--|---------------------|--|--|
| B | 4096 | Essen, Zufahrt, selektive Entnahme | alt (~ 45 Jahre) | Pflasterziegel, Organik (Moos etc.), mörtelfrei | |
| C | 4097 | Essen, selektive Entnahme | alt (~ 56 Jahre) | Dachziegel, schwarz engobiert, Organik, mörtelfrei | |
| D | 4098 | HLz, Baustellenverschnitt | neu (3 Jahre) | Unverfüllte Hochlochziegel mit Mittelbettmörtel ca. 1cm | |
| G | 4100 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung Perlit, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | Werke nicht bekannt (Proben G - Q) Ziegel unterschiedlicher Herkunft, Größe und Lochung |
| H | 4101 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| J | 4102 | Unverfüllt Hlz | neu | verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| K | 4103 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| L | 4104 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| M | 4105 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| N | 4106 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm IP 18; 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| P | 4107 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| Q | 4108 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| T | 4111 | Ziegelbruch, Gelsenrot Bottrop | neu | Bruch aus Ziegelwerken, bevorzugt Klinker (VmZ), alternativ DZ | |
| V | 4112 | Ziegelreicher Mauerwerksbruch RC Hof Remex Essen, | alt | Abbruchmaterial Wohnhaus, selektiver Rückbau | |
| W | 4113 | AWH GmbH c./o. EVH GmbH Halle über Firma Zincolit 0-4 mm | | | |
| X | 4114 | RC-Sand 0/2 gewaschen, Feess GmbH, Kirchheim/Teck | | | |
| Y | 4115 | RC-Sand 0/1, Schweizer RC-Anlage | | | |
| Z | 4116 | Backsteinsand 0/8, Schweizer RC-Anlage | | | |

Tabelle 10: Aufstellung der ausgewählten RC Materialien

zeigt die Aufstellung aller getesteten RC-Materialien:

| Probe | Bezeichnung |
|-------|--|
| Ton A | Dachziegelton DZ , Batzen der Betriebsmasse, nahezu kalkfrei |
| Ton E | Vormauerziegelton VMZ , Rohlinge |
| Ton U | Hintermauerziegelton HMZ , Rohlinge, hochporosiert, karbonatreich |

Tabelle 2: Bezeichnung der ausgewählten Betriebsmassen

In der folgenden Tabelle 3 ist eine Übersicht der untersuchten RC-Materialien aufgeführt. Eine grobe Einteilung erfolgte in sortenreines Material, Mauerwerk mit Mörtelanhaftungen und Material von Recyclinganlagen.

| <u>Sortenreines Material</u> | <u>Mauerwerk mit Mörtelanhaftungen</u> | <u>Material von Recyclinganlagen</u> |
|--|---|---|
| 1 x Pflasterziegel (ca. 45 Jahre) | 1 x Mauerziegel (ca. 70 Jahre) | 4 x Ziegelreicher Bauschutt bzw. Mauerwerkbruch |
| 1 x Dachziegel, engobiert (ca. 56 Jahre) | 2 x Unverfüllte HLz, Baustellenverschnitt | 1 x RC-Sand, gewaschen verschiedene Fraktionen |
| 1 x reiner Ziegelbruch vom Recyclinghof | 8 x Verfüllte HLz, nach Trennung und Sortierung | 1 x Backsteinsand |

Tabelle 3: Einteilung der 21 RC-Proben, Fraktionen < 4mm

Die 21 bundesweit ausgewählten RC-Materialien wurden hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Um möglichst das gesamte Produktspektrum der Ziegelindustrie zu betrachten, wurden selektiv rückgebaute Pflastersteine und Dachziegel, Vormauer- und Hintermauerziegel, sowie ziegelreicher Bauschutt in die Untersuchungen einbezogen. Die Hintermauerziegel standen mit und ohne Mörtelanhaftungen zur Verfügung.

Die Anforderungen an das Recyclingmaterial sind einerseits abhängig von der Qualität der Rohstoffe die es zu substituieren gilt und andererseits von den spezifischen Parametern des Produktes, das unter Verwendung der RC-Materialien hergestellt werden soll.

4.2.1 Analysen

Betriebsmassen:

Die von den Werken zur Verfügung gestellten Betriebsmassen wurden auf die folgenden Parameter untersucht:

Korngrößenverteilung, Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA, Mineralphasenbestimmung mittels XRD, Bestimmung des thermischen Verhaltens mittels DSC, Bestimmung der Schwefel- und Kohlenstoffgehalte, Eluatanalysen, Austreibungsverhalten mittels Austreibungskurven.

RC-Materialien:

Die RC-Materialien wurden auf die folgenden Parameter untersucht:

Korngrößenverteilung, Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA, Mineralphasenbestimmung mittels XRD, Bestimmung des thermischen Verhaltens mittels DSC, Bestimmung der Schwefel- und Kohlenstoffgehalte, Eluatanalysen, Schüttdichte, Wassergehalt, Kornfestigkeit, pH-Wert, Leitfähigkeit, Bestimmung Ziegelanteil (optisch), Magnetscheidung

4.2.2 Analyseverfahren

Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung beeinflusst entscheidend die Menge des notwendigen Anmachwassers, das Schwindungsverhalten, die Trocknungseigenschaften und das Brennverhalten einer keramischen Masse. Ein entscheidender Parameter für die Einschätzung von Ziegelrohstoffen ist die Korngrößenverteilung der drei Fraktionen 2 µm, 2-20 µm und > 20 µm. Die Einordnung in das WINKLER-Dreieck dient zur Bewertung der Eignung eines Rohstoffes für ein bestimmtes Produkt aufgrund seiner Korngrößenverteilung.

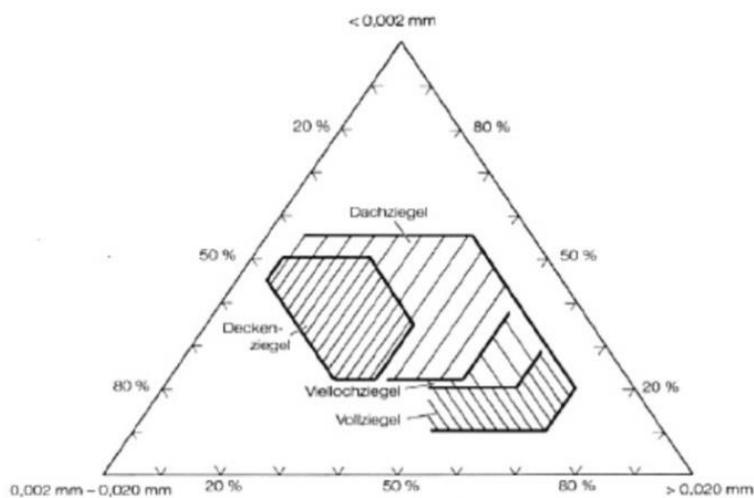


Abbildung 6: Günstige Korngrößen-Zusammensetzung von Ziegeltonen, nach WINKLER [23]

Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA

Die chemische Analyse der RC-Materialien erfolgte semiquantitativ mittels Röntgenfluoreszenzanalyse an dafür hergestellten Schmelztabletten (Gerät: ZSX Primus IV (WD-RFA)).

Mineralogische Zusammensetzung, Mineralphasenbestimmung XRD

Die mineralogische Analyse wurde anhand quantitativer Röntgenpulverdiffraktometrie an Proben, die auf eine Korngröße <math>< 63 \text{ µm}</math> aufbereitet wurden, bestimmt. Die Pulver wurden texturarm präpariert. Für die Messung in Reflexion wird das Pulverdiffraktometer STOE STADI MP mit Kupfer Cu K- α_1 -Strahlung und primärem Monochromator angewendet (2-Theta-Messbereich: 2 - 52,385).

Thermische Analyse DSC- dynamische Differenzkalorimetrie

Die thermische Analyse ermöglicht eine komplexe Bewertung und eindeutige Zuordnung von thermischen Effekten für temperaturabhängige Reaktionen und wird unterstützend zur Mineralphasenanalyse durchgeführt. Die Kombination hilft bei der zweifelsfreien quantitativen Phasenbestimmung insbesondere von Gips und Carbonaten sowie Hydroxiden.

Die folgenden vereinfacht dargestellten, charakteristischen Reaktionsbereiche finden sich unabhängig von der jeweiligen Produktgruppe:

- bis 250 °C – Freisetzung des physikalisch gebundenen Wassers
- 250 bis 450 °C – Austrieb und Aufoxidation der leicht flüchtigen organischen Verbindungen
- 450 bis 900 °C – Austrieb des chemisch gebundenen Wassers
 - Entsäuerung der Carbonate
 - Aufoxidation des festen Kohlenstoffs
- Über 900 °C – Sinterreaktionen und Mineralneubildungen

Bestimmung Schwefel und Kohlenstoff

Die Werte wurden mit Hilfe eines Schwefel-Kohlenstoff-Analysators ermittelt.

Eluatanalysen gemäß DIN 19529

Die Untersuchungen wurden entsprechend der DIN 19529 - Elution von Feststoffen -Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg – durchgeführt.

Ziel dieser Untersuchung ist es das Freisetzungsverhalten von Feststoffen zu bestimmen.

Der zu untersuchende Feststoff wird mit dem Elutionsmittel Wasser unter festgelegten Bedingungen bei einem W/F-Verhältnis von 2 l/kg für 24 h durch Schütteln eluiert. Eingesetzt werden können Feststoffe mit einer Korngröße bis 32 mm. Feststoffe mit einer Korngröße >32 mm werden zerkleinert. Das Verfahren liefert ein Eluat, das physikalisch und chemisch nach bestehenden Standardverfahren analysiert werden kann.

Austreibungsverhalten

Für die Herstellung von Ziegeln ist neben der rein keramtechnischen Betrachtung der Roh- und Hilfsstoffe auch die verfahrenstechnische Betrachtung notwendig. So kommt es während des Aufheizprozesses sowohl zu exothermen, als auch zu endothermen Reaktionen, die als rohstoffabhängiges thermisches Verhalten direkten Einfluss auf die verfahrenstechnische Steuerung des Tunnelofens haben. So nehmen Reaktionen wie z.B. die Schwelgasfreisetzung oder die Karbonatentsäuerung Einfluss auf die örtliche Brennstoffzufuhr und damit auf die Dimensionierung der Brenneranlage oder der Positionierung von Absauge- oder Einblaseeinrichtungen. Ebenso geschieht in ganz bestimmten Temperaturbereichen die Zersetzung des Pyrit- oder Sulfatschwefels sowie von Fluor. Im IZF können hierzu Untersuchungen zum Austreibungsverhalten der Materialien vorgenommen werden.

Die im Bild dargestellte Versuchsanlage besteht aus einem Röhrenofen, der Ofensteuerung, den Analysengeräten und einer Messwerterfassung. Die zu untersuchende Rohstoffprobe (Masse ca. 120 g) wird im Innenraum des Quarzglasrohres aufgeheizt.

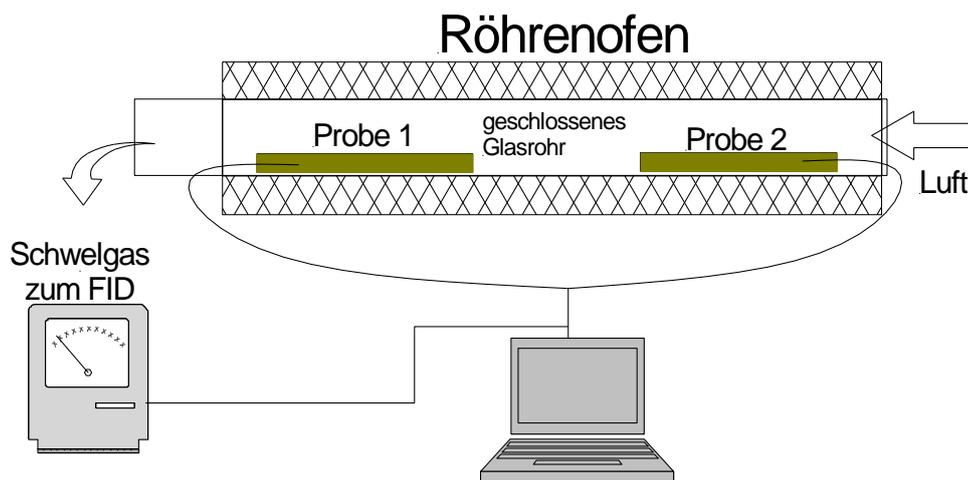


Abbildung 7: Prinzipskizze Röhrenofen zur Bestimmung des Austreibungsverhaltens

Die Aufheizung erfolgte jeweils entsprechend der Brennkurve der verwendeten Betriebsmasse.

Für die Analyse wurden die Probekörper jeweils mit einer zentralen Bohrung zur Aufnahme eines Thermoelementes versehen. Das Aufheizen des Probekörpers erfolgt in einem temperaturprogrammierbaren Quarzröhrenofen mit 60 mm lichter Weite. Das Ende des Quarzrohres wird durch Heizbänder auf eine Temperatur von 200°C gebracht, um Kondensation zu vermeiden. Die zur Austreibung über den Probekörper strömende Luftmenge betrug 1 Liter pro Stunde und Gramm Probekörpergewicht, so dass während des Versuchs ein Verhältnis von Luft zu Feststoff von 1 herrschte.

Die Austreibungsversuche werden unter Verwendung von Luft mit 21 % Sauerstoff vorgenommen.

Die Bestimmung des Gesamtkohlenwasserstoffes (Schwelgase) erfolgt kontinuierlich mit einem Flammenionisations-Detektor.

Die Bestimmung des Chlorgehaltes wird durch potentiometrischer Titration mit 0,02 n Silbernitratlösung vorgenommen.

Die Bestimmung der Gesamtschwefelgehalte wird durch Titration mit 0,01 n Bariumperchloratlösung und Thorin als Indikator vorgenommen.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen ist die verwendete Apparatur besonders für die Untersuchung des Schwelverhaltens von Rohstoffen geeignet.

Schüttdichtebestimmung gemäß DIN EN 1097-3:

Bestimmt wird der Quotient, der bei Division der Masse der unverdichteten trockenen Gesteinskörnung in einem festgelegten Messgefäß durch das Volumen dieses Messgefäßes erhalten wird. [3]

Bestimmung des Wassergehaltes DIN EN 1097-5:

Das Verfahren der Ofentrocknung liefert ein Maß für den Gesamt-Wassergehalt einer Messprobe aus einer Gesteinskörnung. Das Wasser kann dabei von der Oberfläche der Gesteinskörnung und aus wasserhaltigen Poren innerhalb der Körner stammen.

Aus der Massendifferenz zwischen der feuchten und der trockenen Messprobe wird der Wassergehalt bestimmt und als Anteil in Prozent der Trockenmasse der Messprobe angegeben. [4]

Bestimmung der Kornfestigkeit DIN EN 13055 Anhang C

Eine vorbereitete Probe der Gesteinskörnung wird in einen definierten Stahlzylinder eingefüllt und durch Rütteln verdichtet. Anschließend wird die Gesteinskörnung mit einem Druckstempel um eine vorgegebene Höhe im Zylinder zusammengedrückt, und die hierfür erforderliche Kraft gemessen und als Kornfestigkeit angegeben. [5]

pH-Wert DIN EN ISO 10523

Der pH-Wert ist der mit -1 multiplizierte dekadische Logarithmus der Aktivität der Oxoniumionen $c_{H_3O^+}$

$$pH = -\lg(c_{H_3O^+})$$

Die Aktivität ist dabei in diesem Fall über das chemische Potenzial definiert und somit dimensionslos

Bei der Angabe des pH-Wertes begnügt man sich aus Gründen der Vereinfachung mit der Näherung, dass die Oxoniumaktivität für verdünnte Lösungen gleich der Konzentration der Oxoniumionen (in mol / dm³) gesetzt wird.

$$pH = -\lg(c_{H_3O^+}) \approx -\lg\left(\frac{[H_3O^+]}{\text{mol/dm}^3}\right)$$

Die Ermittlung der pH-Werte erfolgte mit Hilfe des pH-Messgerätes Mettler Toledo für Labor und Prozessanwendungen.

Wie in dem Forschungsvorhaben IGF-Nr. 16329N – Mineralbegleitende Metalle- veranschaulicht wurde, ist der pH-Wert eine entscheidende Einflussgröße für die Mobilität, d.h. das Auslagverhalten der verschiedenen Metalle. Es konnte nachgewiesen werden, dass der pH – Wert neben den Brennbedingungen entscheidend für das Auslagverhalten von keramischen Werkstoffen ist.

Leitfähigkeit DIN EN 27888 (C8)

Die Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit (Konduktometrie) ist nach der pH-Wert-Messung die in der Betriebsmesstechnik am häufigsten eingesetzte elektrochemische Messmethode und dient einer ersten schnellen Einschätzung eines Wassers bezüglich seines Gehaltes an Ionen. Die meisten im Wasser gelösten Feststoffe sind Salze. Diese liegen dann als Elektrolyte (hydratisierte Kationen und Anionen) vor. Je niedriger der gemessene Wert, umso weniger Salze/Schmutz ist im Wasser enthalten. Im Gegensatz wird bei hoher Leitfähigkeit von einer hohen Salzkonzentration ausgegangen.

Bestimmung des Ziegelanteils

Die optische Sortierung erfolgte an einzelnen Siebrückständen, die bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung erhalten wurden. Unter dem Digitalmikroskop wurden hierzu die Partikel nach Farben sortiert ausgezählt.

Magnetscheidung

Anhand der durch die Partikelanzählung erhaltenen Werte zum vorliegenden Sortiergrad der Ziegelmaterialien sollte weiterführend untersucht werden, ob sich durch eine nachgeschaltete Magnetscheidung während des Sortierprozesses der Sortiergrad verbessern lässt.

Die Magnetscheidung ist ein Sortierverfahren zum Trennen von ferro- und paramagnetischen Partikeln aus einem dispersen Feststoffgemisch [12]. In einem inhomogenen Magnetfeld wirkt auf die Feststoffpartikel eine Kraft, die abhängig ist von der Magnetisierbarkeit (Suszeptibilität) der einzelnen Partikel und dem Produkt aus Feldstärke und Feldgradient. Man kann in einem inhomogenen Feld Partikel unterschiedlicher Suszeptibilität unterschiedlich stark aus ihrer Bewegungsbahn ablenken oder die Teilchen mit der höchsten Magnetisierbarkeit an den Bereichen höchster magnetischer Kraftwirkung zurückhalten. Für schwachmagnetische Stoffe werden hohe absolute Feldstärken und hohe Feldgradienten angestrebt. Eine häufig genutzte Bauart ist der Trommelscheider für eine **trockene Magnetscheidung**, siehe Abbildung 8.

Das Stoffgemisch wird in einen Aufgabetrichter gefüllt und mittels einer Vibrationsrinne auf ein Förderband geleitet. Dort soll das Material möglichst als Einkornschüttung zum Liegen kommen. Das Förderband bewegt sich über eine Scheidetrommel. In einem feststehenden Bereich der Trommel befinden sich Permanentmagneten. Die über das Förderband laufenden nicht magnetisierbaren Bestandteile fallen aufgrund der Schwerkraft in einen Sammelbehälter. Die magnetisierbaren Bestandteile hingegen haften im Bereich der Magneten und werden weiter auf dem Förderband mitgeführt. Nach Verlassen des Einflussbereiches der Magneten fallen diese Bestandteile ebenfalls in einen Behälter. Die Menge des zu sortierenden Stoffgemischs wird über die Schwingweite und Frequenz der Rinne sowie der Geschwindigkeit des Förderbandes eingestellt. Ein begrenzender Einflussparameter ist die Korngröße des verwendeten Stoffgemisches.

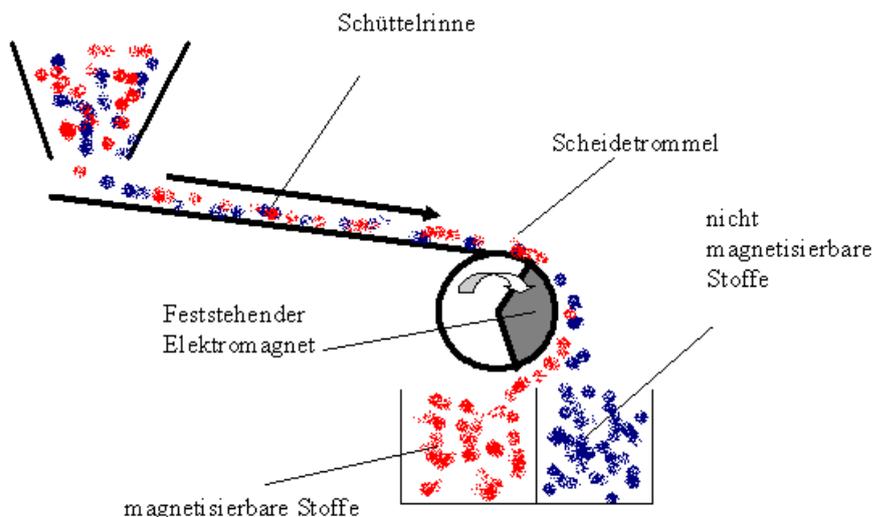


Abbildung 8: Prinzipdarstellung der Magnetscheidung mit Scheidetrommel [22]

Eine weitere Bauart von Magnetscheidern sind sogenannte Rückhaltescheider mit denen eine Starkfeld-Nass-Magnetscheidung durchgeführt werden kann. Das Arbeitsprinzip ist Abbildung 9 dargestellt. Aus dem Ausgangsmaterial wird zunächst eine Feststoffsuspension hergestellt, die über den Aufgabeschacht A eingefüllt wird. Das Material gelangt in die zwischen den Magnetpolen P angeordnete Kammer K. Durch das angelegte Starkfeld werden Partikel mit einer hohen Suszeptibilität an den Schneiden der Platten zurückgehalten. Die unmagnetischen Partikel in der Feststoffsuspension fließen durch den Austragsschacht B ab. Für die Entfernung der magnetischen Partikel aus der Kammer K erfolgt ein Spülen der Kammer nach Abschalten des Starkfeldes mit Wasser. Das austretende magnetische Material wird separat aufgefangen und muss anschließend getrocknet werden. Durch die Herstellung einer Suspension und Notwendigkeit einer

anschließenden Trocknung ist die Nass-Magnetscheidung extrem aufwendig, teuer und für die hier verfolgte Aufgabenstellung nicht geeignet.

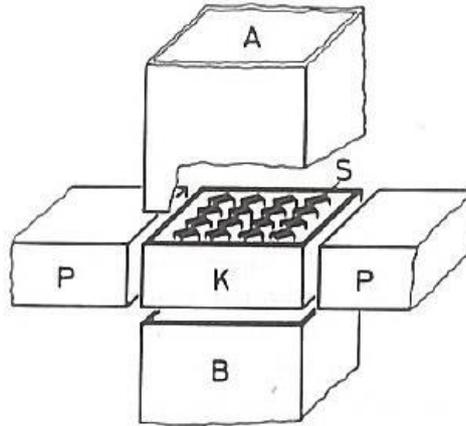


Abbildung 9: Prinzipdarstellung des Rückhaltescheiders [12]

5 Auswertungen/Ergebnisse

5.1 Betriebsmassen

5.1.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Ein entscheidender Parameter für die Einschätzung von Ziegelrohstoffen ist die Korngrößenverteilung der drei Fraktionen 2 µm, 2-20 µm und > 20 µm. Auch die groben Anteile (Karbonate, Organik usw.) werden erfasst. In der dargestellten Übersicht sind die Kornklassen und die dazugehörigen Mengenanteile der Rohstoffe angegeben. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der durch Sieb- und Sedimentations-Analyse bestimmten Kornklassenanteile und deren Einordnung in das WINKLER-Dreieck.

| A – Dachziegel (DZ) | E – Vormauerziegel (VMz) | U – Hochlochziegel (HLZ) |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | |
| > 20 µm: 30,9 M.-% | > 20 µm: 51,8 M.-% | > 20 µm: 40,3 M.-% |
| 2 – 20 µm: 26,2 M.-% | 2 – 20 µm: 17,7 M.-% | 2 – 20 µm: 33,4 M.-% |
| < 2 µm: 42,9 M.-% | < 2 µm: 30,6 M.-% | < 2 µm: 26,3 M.-% |

Tabelle 4: Übersicht der Siebanalyse zur Ermittlung der Kornklassen der Rohstoffe A, E, und U

Die Einordnung ins WINKLER-Dreieck dient zur Bewertung der Eignung eines Rohstoffes für ein bestimmtes Produkt aufgrund seiner Korngrößenverteilung, hierzu wurden alle Betriebsmassen entsprechend in Abbildung 10 eingefügt.

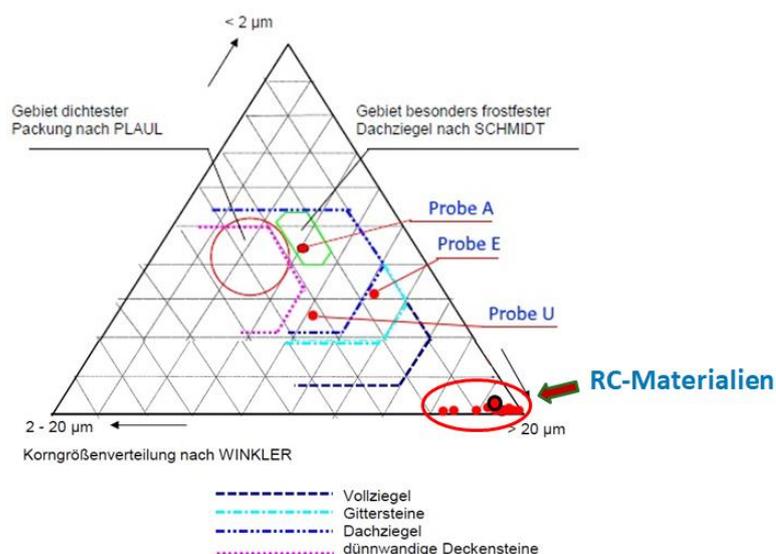


Abbildung 10: Modifiziertes WINKLER-Dreieck zur Eignungsbewertung der Rohstoffe A, E, U

5.1.2 Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA

Die Werte der Tabelle 5 zeigen die chemische Zusammensetzung der verwendeten Betriebsmassen. Die chemische Analyse der Dachziegel- und der Vormauerziegelmasse weist die erwartungsgemäßen Ähnlichkeiten auf, da die geforderten Produkteigenschaften wie Frostbeständigkeit und rote Farbgebung der ausgewählten Proben, über die entsprechende Rohstoffauswahl eingestellt werden.

Die Hochlochziegelmasse besitzt gegenüber der beiden erstgenannten einen deutlich höheren Anteil an CaO was sich auf einen hohen Anteil von Calcit und Dolomit in der Masse zurückführen lässt. Für die Herstellung von hochporosierten Ziegeln werden häufig karbonatreiche Rohstoffe mit Dolomit und Kalk verwendet, die während des Brandes viele Poren im Scherben hinterlassen (Verringerung Scherbenrohddichte = gute Wärmedämmung).

| | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | SO ₃ | MnO | P ₂ O ₅ | BaO | GV 1025°C | Summe |
|-----|---|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|------|-------------------------------|------|-----------|-------|
| | | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% |
| DZ | A | 63,4 | 15,9 | 5,92 | 0,90 | 2,33 | 4,36 | 1,74 | 0,79 | 0,05 | 0,03 | 0,13 | 0,35 | 4,00 | 100,0 |
| VMz | E | 59,9 | 16,1 | 6,68 | 3,31 | 2,41 | 3,32 | 0,84 | 1,14 | 0,11 | 0,32 | 0,20 | 0,21 | 5,30 | 100,0 |
| HLZ | U | 40,0 | 13,2 | 3,78 | 14,38 | 2,45 | 1,94 | 0,28 | 0,86 | 0,47 | 0,06 | 0,13 | n.d. | 22,2 | 99,9 |

Tabelle 5 RFA der Betriebsmassen (Schmelztablette)

5.1.3 Mineralphasenbestimmung mittels XRD

Zur Vervollständigung der Analysen wurde von allen drei Betriebsmassen eine Mineralphasenanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellt. Wie auch schon in der chemischen Analyse festgestellt, bestätigt sich der hohe Anteil an Carbonaten (Calcit 19 % und Dolomit 6,5 %) im Hochlochziegelton. Die Betriebsmassen der Dachziegel und Vormauerziegel besitzen mit ca. 60 % einen höheren Tonmineralanteil als der Hintermauerziegelton (45 %).

| Tonminerale TM | A | E | U |
|---|------------|------------|------------|
| Zweischichttonminerale (ZSTM): kaolinitische | | | |
| Fire Clay (fehlgeordneter Kaolinit) | 10 | 15 | 15 |
| Zweischichttonminerale (ZSTM): weitere | | | |
| Pyrophyllit | - | 3 | - |
| Dreischichttonminerale (DSTM): Glimmer und illitische | | | |
| Muskovit / Paragonit | 3 | 1 | 7 |
| Biotit / Phlogopit | - | ? | - |
| Illit | 15 | 20 | 3 |
| Mixed Layer (Illit/Smektit) | 21 | ? | - |
| Anteil illitischer Schichten im ML | 14 | 0 | 0 |
| Anteile smektitischer Schichten | 7 | 0 | 0 |
| Summe illitische TM (DSTM) | 39 | 21 | 10 |
| Dreischichttonminerale (DSTM): quellfähige | | | |
| Smektit (Montmorillonit) | - | 12 | 10 |
| Summe quellfähige DSTM | 0 | 12 | 10 |
| Summe illitischer Schichten | 24 | 4 | 7 |
| Summe quellfähiger Schichten in Mixed Layer u. Smektit | 14 | 12 | 10 |
| Vierschichttonminerale (VSTM) | | | |
| Chlorit | 10 | 5 | 10 |
| Summe Tonminerale | 59 | 56 | 45 |
| Summe Nichttonminerale | 41 | 44 | 55 |
| Gesamtsumme | 100 | 100 | 100 |

Tabelle 6: Mineralogie Tonminerale - Betriebsmassen A, E, U

| Nichttonminerale NTM | A | E | U |
|------------------------------------|------------|------------|------------|
| Quarz | 29,0 | 33,0 | 18,0 |
| Cristobalit / Tridymit | - | - | - |
| Mikroklin/Orthoklas (K-Feldspat) | 2,0 | 7,0 | 2,0 |
| Oligoklas (Plagioklas: Na-Ca-FS) | 7,0 | | 3,0 |
| Summe Silikate | 38 | 40 | 23 |
| Calcit | 0,2 | 1,5 | 19,0 |
| Dolomit | 0,3 | - | 6,5 |
| Summe Carbonate | 0,5 | 1,5 | 26 |
| Goethit (Limonit) | ? | 0,5 | - |
| Hämatit | 2,0 | - | - |
| Rutil / Anatas | Spuren | - | - |
| Summe Oxide/Hydroxide | 2 | 0,5 | 0 |
| Pyrit / Markasit | - | - | 0,5 |
| Gips / Anhydrit | - | 1,0 | - |
| Σ Sulfide/Sulfate/Phosphate | 0 | 1 | 1 |
| Amorphes, organisch | 0,5 | 1,0 | 6,0 |
| Summe röntgenamorphes | 0,5 | 1,0 | 6,0 |
| Summe Nichttonminerale | 41 | 44 | 55 |

Tabelle 7: Mineralogie Nichttonminerale - Betriebsmassen A, E, U

5.1.4 Bestimmung des thermischen Verhaltens mittels DSC

Anhand der thermischen Analyse lassen sich das unterschiedliche Brennverhalten sowie der unterschiedliche Masseverlust der drei Betriebsmassen klar veranschaulichen. (Siehe Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13). Das Ausbrennen der organischen Bestandteile, die der Betriebsmasse U, als Porosierungsmittel zugegeben wurden, findet im Bereich von 300°C bis 450°C statt und spiegelt sich in dem unten dargestellten Masseverlust in diesem Temperaturbereich wieder. Ähnlich verhält es sich bei der Carbonatentsäuerung, die im Bereich von 600 °C – 800 °C stattfindet. Insgesamt wurden die folgenden Masseverluste ermittelt:

- A – Dachziegel** MV: 6,7 M.-%
- E – Vormauerziegel** MV: 7,7 M.-%
- U – Hochlochziegel** MV: 23,5 M.-%

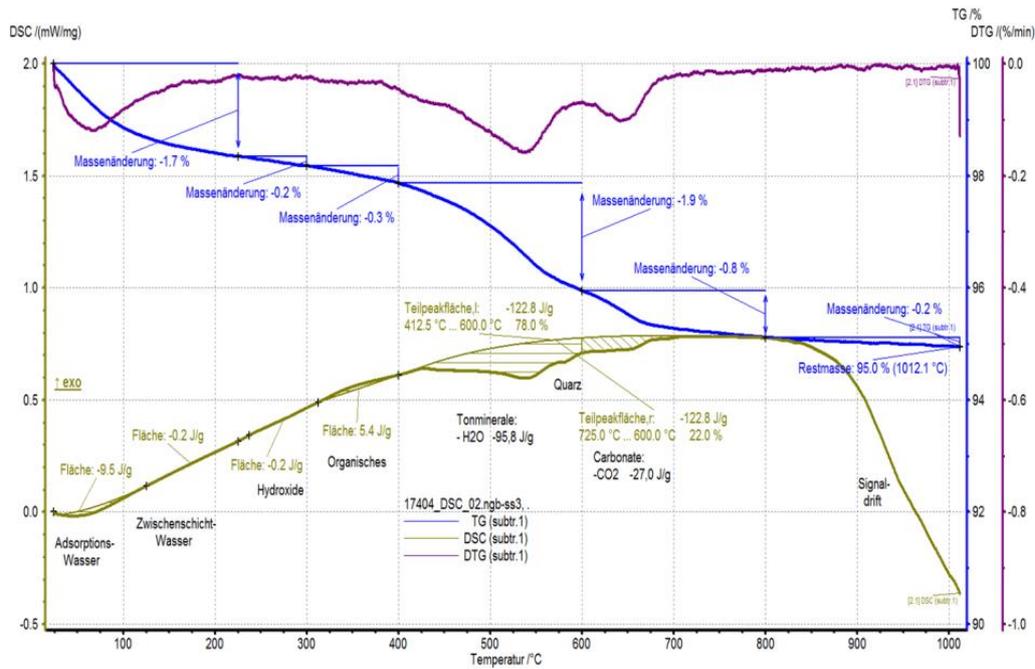


Abbildung 11: Simultane Thermoanalyse (STA /DSC) – Betriebsmasse A

A – Dachziegel MV: 6,7 M.-%

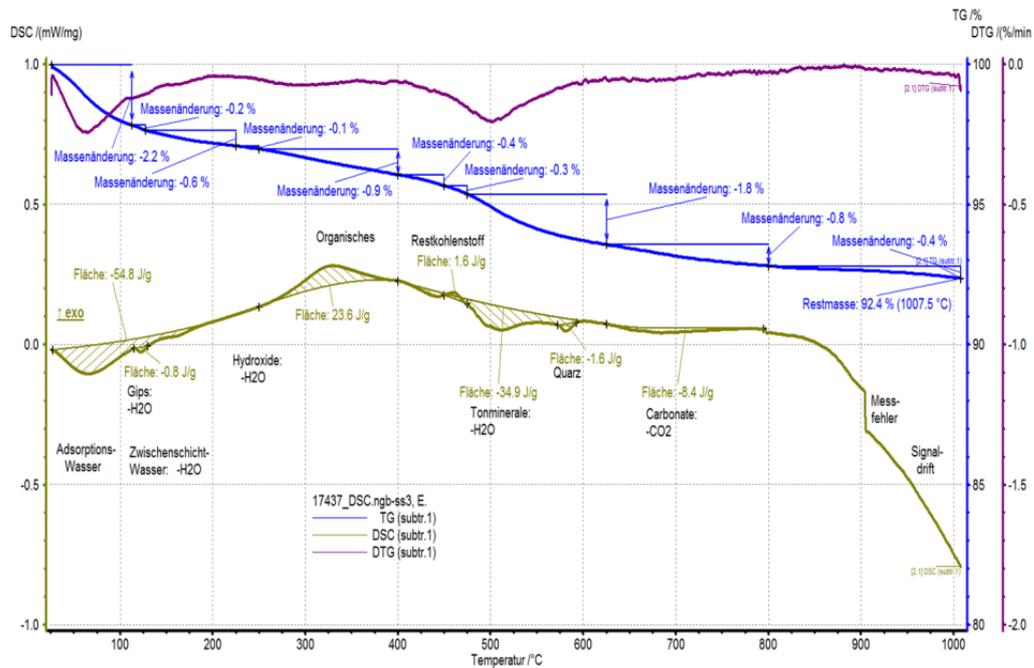


Abbildung 12: Simultane Thermoanalyse (STA /DSC) – Betriebsmasse E

E – Vormauerziegel MV: 7,7 M.-%

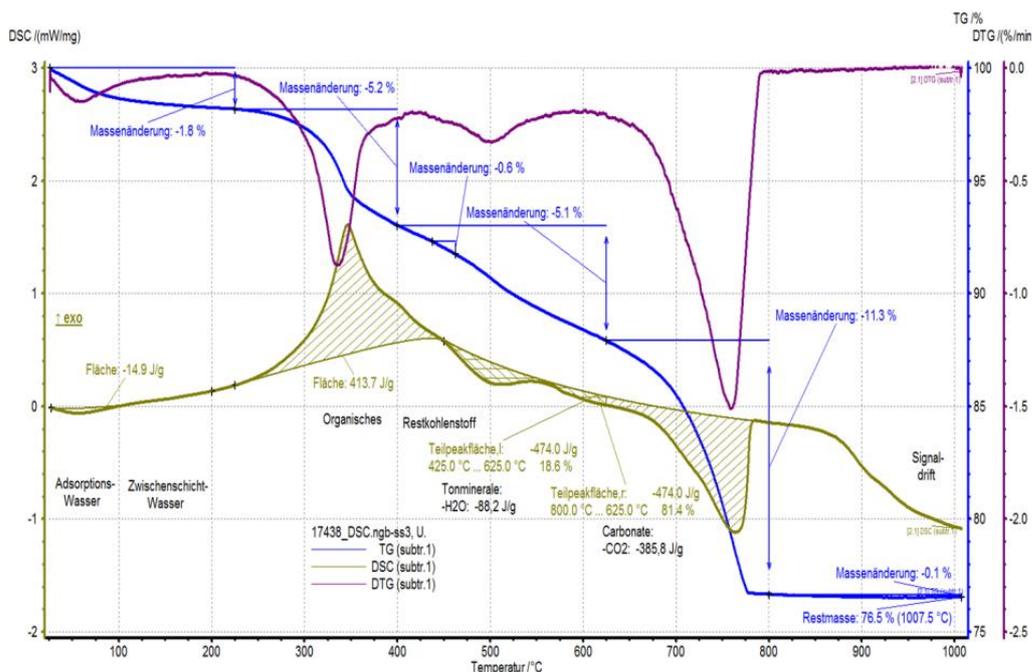


Abbildung 13: Simultane Thermoanalyse (STA /DSC) – Betriebsmasse U
U – Hochlochziegel MV: 23,5 M.-%

5.1.5 Bestimmung der Schwefel- und Kohlenstoffgehalte

In Tabelle 8 sind die analysierten Werte der Schwefel- und Kohlenstoffbestimmung für die untersuchten Betriebsmassen angegeben. Durch die in der Betriebsmasse U zugesetzten Porosierungsstoffe ergab sich ein deutlich höherer Wert für den enthaltenen Kohlenstoff im Vergleich zu den anderen Betriebsmassen.

| | Probe | C [%] | S [%] |
|------------------------------|-------|-------|-------|
| Betriebsmasse DZ | A | 0,24 | ? |
| Betriebsmasse Klinker | E | 0,54 | 0,31 |
| Betriebsmasse Hochlochziegel | U | 7,29 | 0,13 |

Tabelle 8: C + S – Bestimmung Betriebsmassen A, E, U

5.1.6 Bestimmung des Austreibungsverhaltens.

| | C | | SOx | | HF | | HCl | |
|---|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Integral | Maximalwert | Integral | Maximalwert | Integral | Maximalwert | Integral | Maximalwert |
| | mg/kg | mg/m³ | mg/kg | mg/m³ | mg/kg | mg/m³ | mg/kg | mg/m³ |
| A | 3,13 | 1,22 | 501,7 | 167,08 | 135,32 | 47,4 | 216,2 | 125,33 |
| E | 1.478,17 | 516,13 | 3.879,70 | 1.339,12 | 270,88 | 68,06 | 92,40 | 13,71 |
| U | 4.116,34 | 4.261,98 | 30,10 | 8,38 | 66,88 | 16,27 | 217,20 | 121,54 |

Tabelle 9: Austreibungsverhalten der Betriebsmassen

Die in den Betriebsmassen enthaltenen flüchtigen organischen Bestandteile werden während des Brandes „ausgetrieben“. Dieser, einer Pyrolyse ähnliche Prozess findet im Temperaturbereich zwischen 150°C und 450°C statt. Je nachdem welcher Stoff als Porosierungsmittel eingesetzt

wird, werden die Bestandteile bei unterschiedlichen Temperaturen freigesetzt. Der Restkohlenstoff verbrennt bei höheren Temperaturen. Anhand von Austreibungskurven ist eine Visualisierung dieses Vorganges temperatur- und zeitabhängig möglich. Außerdem kann eine quantitative Aussage getroffen werden. Erwartungsgemäß wird die größte Menge an kohlenstoffhaltigen Verbindungen aus der Hintermauerziegelmasse freigesetzt, der anhydrithaltige Vormauerziegelton weist die größten SO_x Emissionen auf. Dies gilt auch für den Fluorgehalt, wobei die Fluormenge von den im Rohstoff enthaltenen Mineralien abhängig ist. Um eine Überschreitung der zulässigen Emissionswerte in den entsprechenden Ziegelwerken zu gewährleisten, sind diese mit Rauchgasreinigungsanlagen ausgestattet. Dennoch ist es Ziel der Unternehmen im Allgemeinen, die Emissionswerte bereits durch die Auswahl der Rohstoffe so gering wie möglich zu halten.

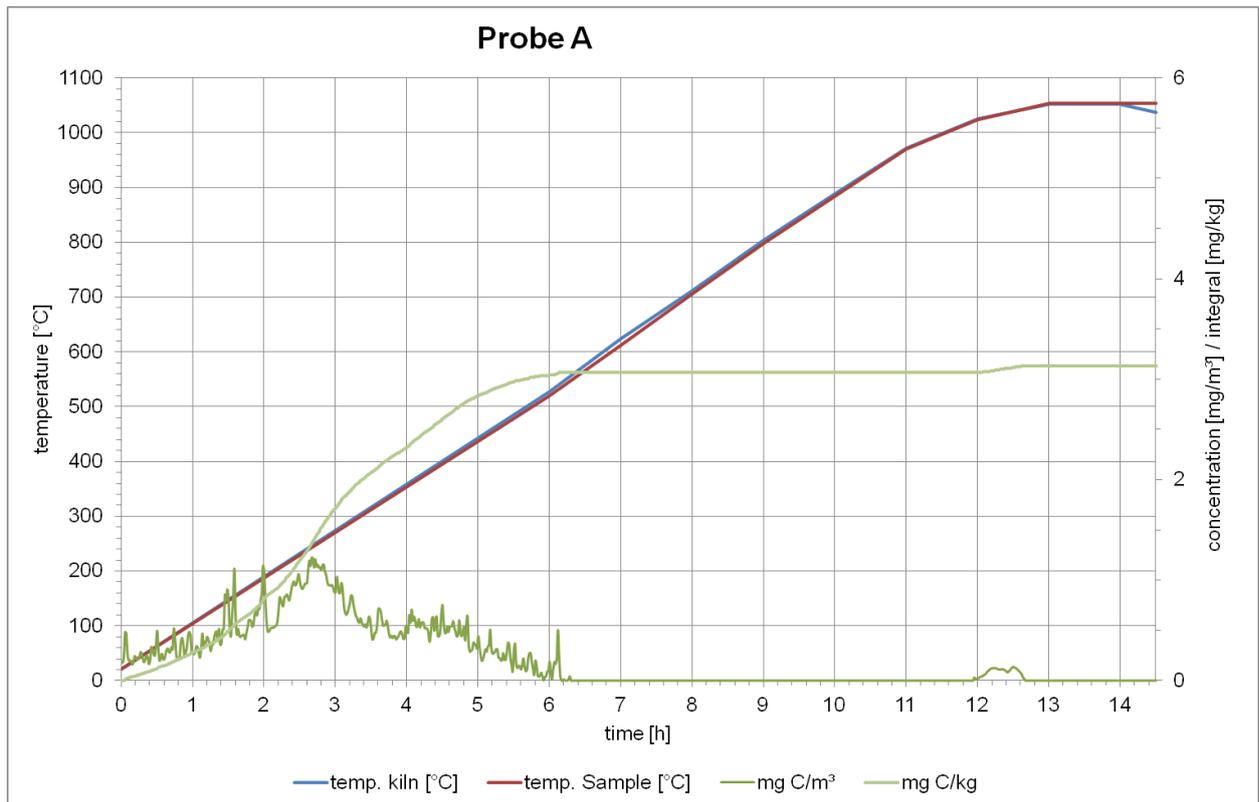


Abbildung 14: Kohlenstoffaustreibung Probe A

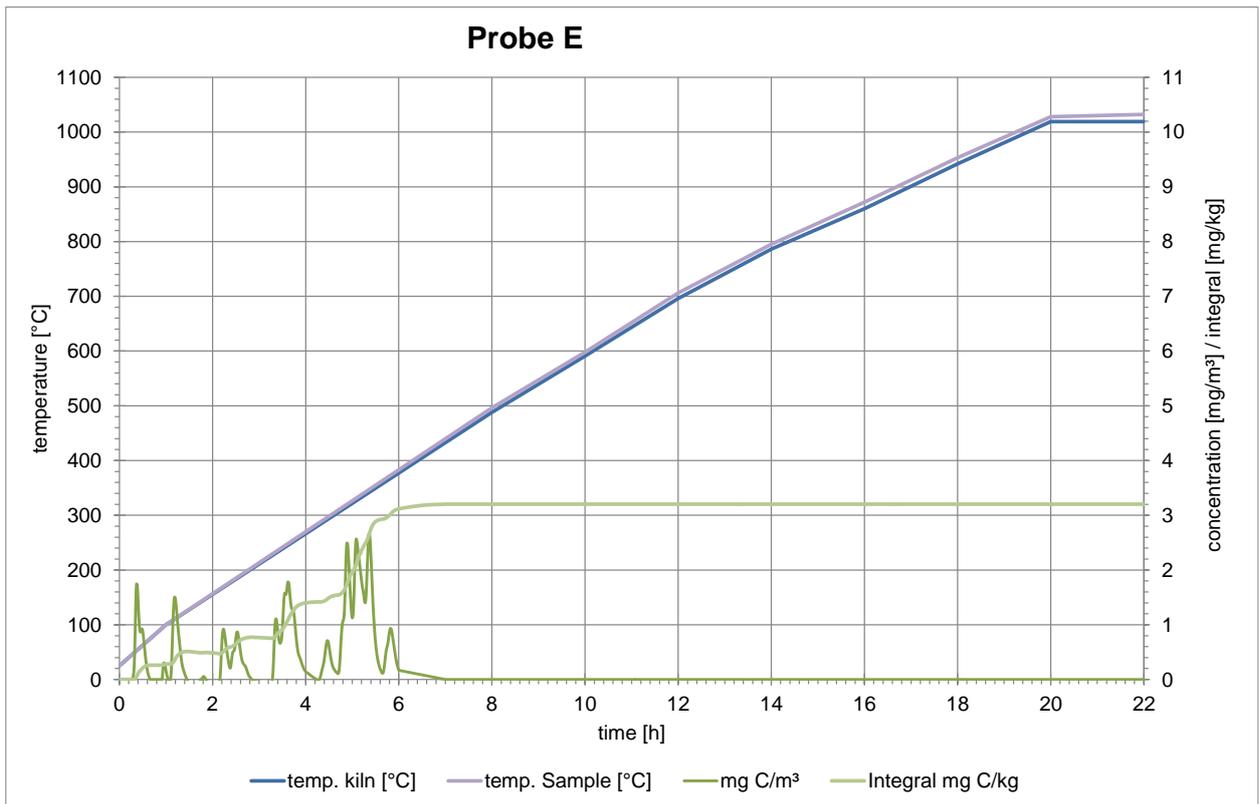


Abbildung 15: Kohlenstoffaustreibung Probe E

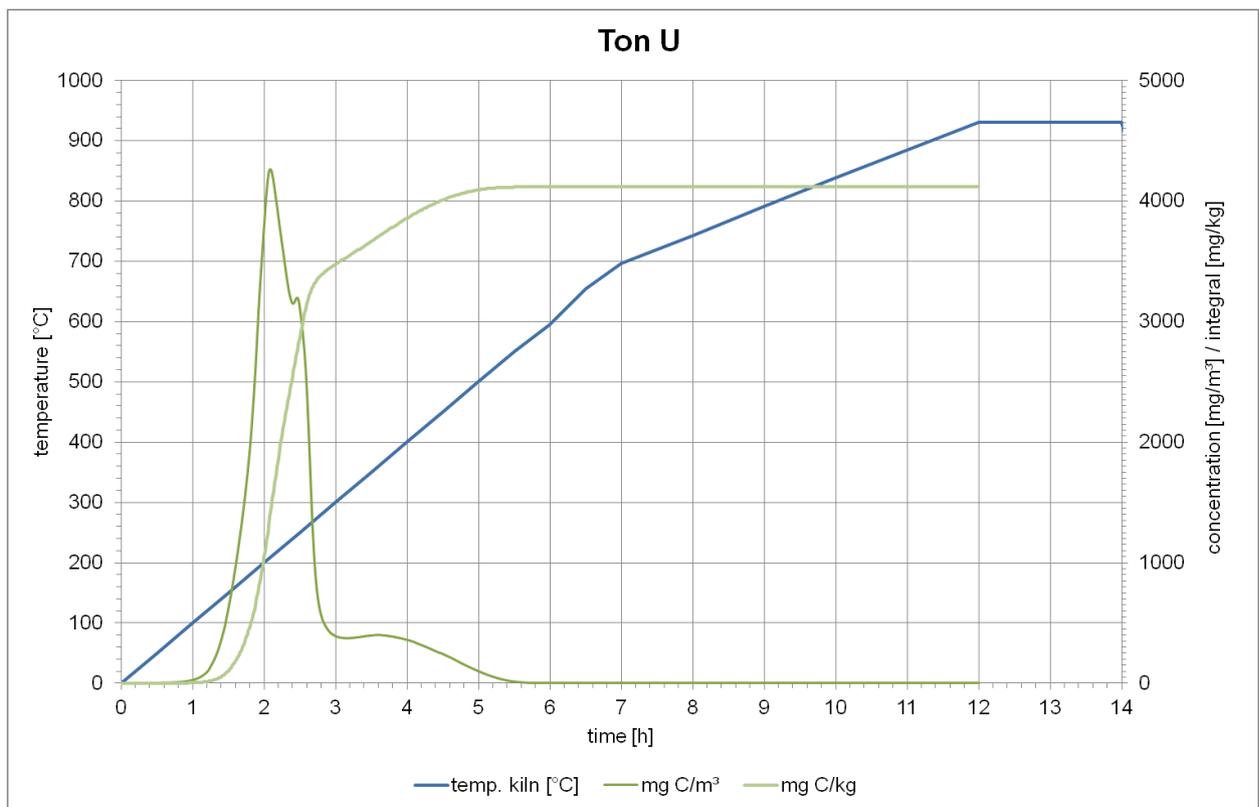


Abbildung 16: Kohlenstoffaustreibung Probe U

5.2 RC-Material

Üblicherweise besteht Mauerwerk (kleinformatig) zu ca. 75 Volumen-% aus Steinen/Ziegeln und zu 25 Volumen-% aus Mörtel. Bei Mauerwerk aus größeren Ziegelformaten, wie aktuell üblich, verschiebt sich der Mörtelanteil zu geringeren Anteilen. Wurden Planziegel verwendet, sinkt der Mörtelanteil weiter auf kleiner 1%. Häufig werden im Innenraum Gipsputze und im Außenbereich Zement- oder Kalk-Zement-Putze angebracht. Aktueller Trend ist die Anwendung von großformatigen Ziegeln, welche mit Dämmstoffen verfüllt sind. Wird reines Ziegelmauerwerk abgebrochen, ist die Zusammensetzung also weitgehend bekannt. In diesem Fall ist der durchschnittliche Ziegelanteil ca. 80 M.-%. Liegt Mauerwerkbruch vor, ist die Zusammensetzung breiter gefächert, da noch Beton und Leichtbeton, sowie Kalksandstein und Porenbeton enthalten sein können. Sortenreines Ziegelmaterial fällt vor allem bei Dachumdeckungen oder durch Vorsortierung aus ziegelreichem Mauerwerksbruch oder als Brennbruch an [11].

Zunächst wurden die beschafften RC-Ziegel in die Fraktionen kleiner und größer 4 mm klassiert. Die Bestimmung der Eigenschaften erfolgte an den Fraktionen < 4 mm



Abbildung 17: Material B (Pflasterziegel), K (Hintermauerziegel modern), R (ziegelreicher Bauschutt), V (ziegelreicher Mauerwerksbruch);

In der folgenden Tabelle 10 ist eine Übersicht aller untersuchten RC-Materialien aufgeführt. Eine grobe Einteilung erfolgte, wie bereits in Tabelle 3 dargestellt, in sortenreines Material, Mauerwerk mit Mörtelanhaftungen und Material von Recyclinganlagen.

| Proben | P.-Nr. | Herkunft / Entnahme | Zustand | Zusammensetzung | sonstiges |
|--------|--------|--|---------------------|--|--|
| B | 4096 | Essen, Zufahrt, selektive Entnahme | alt (~ 45 Jahre) | Pflasterziegel, Organik (Moos etc.), mörtelfrei | |
| C | 4097 | Essen, selektive Entnahme | alt (~ 56 Jahre) | Dachziegel, schwarz engobiert, Organik, mörtelfrei | |
| D | 4098 | HLz, Baustellenverschnitt | neu (3 Jahre) | Unverfüllte Hochlochziegel mit Mittelbettmörtel ca. 1cm | |
| G | 4100 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung Perlit, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | Werke nicht bekannt (Proben G - Q) Ziegel unterschiedlicher Herkunft, Größe und Lochung |
| H | 4101 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| J | 4102 | Unverfüllt Hlz | neu | verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| K | 4103 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| L | 4104 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| M | 4105 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| N | 4106 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm IP 18; 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| P | 4107 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| Q | 4108 | Verfüllte Hlz | neu | Füllung MiWo, verputzt 1,5cm Kalkzementputz 1cm Gips-Kalk-Maschinenputz | |
| T | 4111 | Ziegelbruch, Gelsenrot Bottrop | neu | Bruch aus Ziegelwerken, bevorzugt Klinker (VmZ), alternativ DZ | |
| V | 4112 | Ziegelreicher Mauerwerksbruch RC Hof Remex Essen, | alt | Abbruchmaterial Wohnhaus, selektiver Rückbau | |
| W | 4113 | AWH GmbH c./o. EVH GmbH Halle über Firma Zincolit 0-4 mm | | | |
| X | 4114 | RC-Sand 0/2 gewaschen, Feess GmbH, Kirchheim/Teck | | | |
| Y | 4115 | RC-Sand 0/1, Schweizer RC-Anlage | | | |
| Z | 4116 | Backsteinsand 0/8, Schweizer RC-Anlage | | | |

Tabelle 10: Aufstellung der ausgewählten RC Materialien

5.2.1 Korngrößenverteilung

Für die Nutzung von Recyclingmaterialien in der keramischen Industrie sind besonders die Korngrößenverteilungen (KGV) von entscheidender Bedeutung, da diese die Bildsamkeit, die Formgebung, die Sinterkinetik und schlussendlich die Gefügebrauchung beeinflussen.

Es erfolgte zunächst eine Ist-Stand-Analyse der vorliegenden RC-Materialien der Fraktion < 4 mm. Wie zu erwarten war, handelte es sich zumindest aus keramtechnologischer Sicht um sehr grobe Materialien mit zu hohen Anteilen in großen Korngrößen, siehe

Tabelle 11: Körnungsbereiche der RC-Materialien, Mittelwerte

. Über 90 % des Materials besaßen eine Körnung größer als 20 µm. Als Vergleich – bei einer Dachziegelmasse liegt dieser Wert bei höchstens 30 % und der weitaus größere Teil (70 %) besitzt eine Korngröße < 20 µm. In Abbildung 18 sind die Körnungsbereiche der RC-Materialien visuell dargestellt (Mittelwert der Proben). Für die Nutzung in der keramischen Industrie ist zwingend eine entsprechende Aufbereitung der RC-Materialien auf feinere Korngrößen erforderlich. Bei Korngrößen < 4 mm entstehen keine Probleme bei der Nutzung der vorhandenen Aufbereitungstechnik der Ziegelwerke.

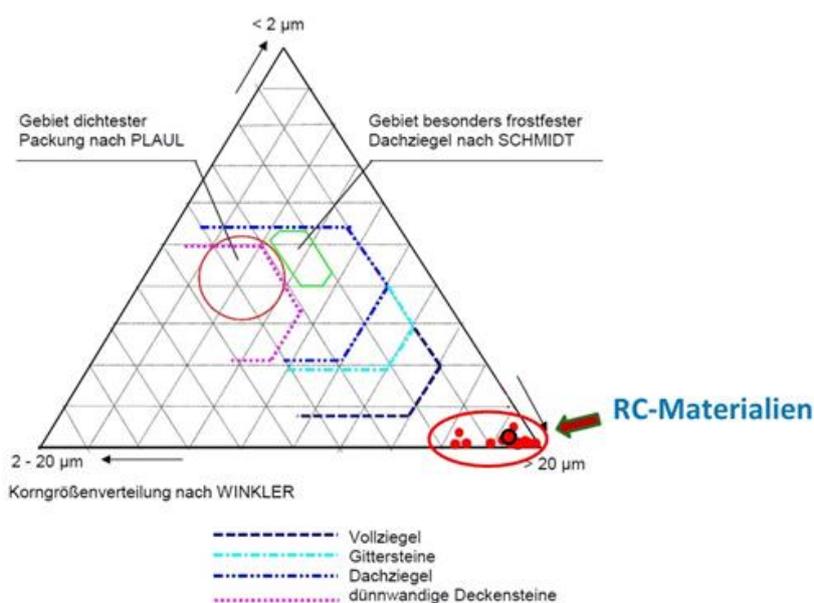


Abbildung 18: Darstellung der Korngrößenverteilung der RC-Materialien im WINKLER-Dreieck

| Körnungsbereiche | Anteil in M.-% |
|--------------------|----------------|
| > 500 µm: | 62,26 |
| > 250 µm: | 76,54 |
| > 63 µm: | 89,11 |
| > 40 µm: | 91,42 |
| < 10 µm: | 2,62 |
| > 20 µm: | 92,46 |

| | |
|------------|------|
| 2 - 20 µm: | 7,00 |
| < 2 µm | 0,54 |

Tabelle 11: Körnungsbereiche der RC-Materialien, Mittelwerte

5.2.2 Chemische Zusammensetzung über WD RFA

Bei der Auswertung wurden der Übersichtlichkeit halber die Ergebnisse getrennt dargestellt.

In Tabelle 12 finden sich die Ergebnisse „**RC- alt**“ – es handelte sich hier um sortenreines Ziegelmaterial, ziegelreichen Bauschutt, Mauerwerkbruch, Material aus dem selektiven Rückbau sowie RC-Sande. Im Gegensatz dazu finden sich in Tabelle 13 ausschließlich die Ergebnisse moderner Hochlochziegel „**RC – neu**“.

Die chemischen Hauptbestandteile aller Proben sind Siliziumdioxid und Aluminiumoxid. Der Gehalt an Fe₂O₃ war im Pflasterklinker, im Dachziegel sowie im Ziegelbruch höher, da bei diesen Produkten eine auffallend ziegelrote Farbe gewünscht ist. Erhöhte Gehalte an CaO wurden bei allen Proben „RC-neu“ und einigen Proben „RC-alt“ (F,R,S) nachgewiesen. Dies lässt einerseits auf enthaltenen Kalkputz bzw. –mörtel sowie CaO aus Gips bzw. Anhydrit schließen und ist andererseits ein Hinweis auf kalkreiche Mauerziegelmassen. Für die gleichen Proben wurde auch ein erhöhter SO₃-Gehalt ermittelt. Dieser ist auf enthaltenen Gipsputz zurückzuführen. Tabelle 13 zeigt für alle Proben einen relativ hohen Anteil an MgO, der mit dem im Ziegelrohstoff enthaltenem Dolomit zu begründen ist.

| | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | SO ₃ | MnO | P ₂ O ₅ | BaO | GV 1025°C | Summe |
|-------------------------|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|------|-------------------------------|------|-----------|-------|
| RC - "alt" | Proben | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% |
| Pflasterklinker | B | 62,5 | 19,6 | 8,06 | 1,54 | 1,81 | 3,43 | 0,68 | 0,98 | 0,06 | 0,3 | 0,19 | 0,18 | 0,72 | 100 |
| DZ, schwarz engobiert | C | 70,4 | 15,1 | 5,45 | 1,64 | 1,28 | 2,21 | 0,65 | 0,99 | 0,06 | 0,14 | 0,13 | n.d. | 1,87 | 100 |
| Mz alt, unverfüllt | F | 66,2 | 13,8 | 4,19 | 6,55 | 1,36 | 2,43 | 0,45 | 0,8 | 0,56 | 0,07 | 0,09 | n.d. | 3,42 | 100 |
| ziegelr. MWB | R | 50,5 | 8,14 | 2,8 | 17,9 | 1,58 | 2,55 | 0,6 | 0,44 | 1,97 | 0,1 | 0,13 | n.d. | 13,1 | 100 |
| ziegelr. MWB | S | 68,9 | 7,68 | 2,47 | 9,78 | 0,73 | 1,56 | 0,43 | 0,39 | 0,48 | 0,08 | 0,11 | n.d. | 7,24 | 100 |
| Ziegelbruch | T | 69,6 | 14,2 | 7,42 | 1,09 | 1,24 | 3,11 | 0,31 | 0,83 | 0,18 | 0,04 | 0,08 | n.d. | 1,86 | 100 |
| ziegelr. MWB | V | 72,1 | 6,05 | 3,74 | 9,03 | 0,89 | 1,59 | 0,4 | 0,26 | 1,43 | 0,1 | 0,09 | n.d. | 5,33 | 100 |
| RC-Material | W | 67,2 | 11,6 | 4,07 | 6,06 | 2,38 | 2,96 | 0,44 | 0,65 | 0,55 | 0,11 | 0,14 | n.d. | 3,56 | 100 |
| RC-Sand 0/2, gewaschen | X | 59,7 | 6,18 | 3,52 | 14,1 | 1,36 | 1,54 | 0,95 | 0,29 | 0,25 | 0,07 | 0,12 | n.d. | 11,9 | 100 |
| RC-Sand 0/1, (CH) | Y | 44,4 | 5,39 | 1,97 | 23,1 | 3,12 | 1,11 | 0,65 | 0,28 | 0,78 | 0,05 | 0,09 | n.d. | 19,1 | 100 |
| Backsteinsand 0/8, (CH) | Z | 51,1 | 11,7 | 4,28 | 18,1 | 3,77 | 2,2 | 0,69 | 0,58 | 0,35 | 0,1 | 0,14 | n.d. | 6,99 | 100 |

Tabelle 12: RFA an Schmelztabletten der Fraktion < 4 mm; gemischte Proben (sortenreines Material sowie Material aus Mauerwerkbruch, selektivem Rückbau und RC-Sand)

| | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | SO ₃ | MnO | P ₂ O ₅ | BaO | GV 1025°C | Summe |
|-----------------|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|------|-------------------------------|------|-----------|-------|
| RC - "neu"(HLZ) | Proben | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% | Ma-% |
| HLZ, unverfüllt | D | 48,1 | 13,9 | 4,51 | 17,50 | 3,23 | 2,10 | 0,44 | 0,79 | 0,62 | 0,07 | 0,14 | n.d. | 8,57 | 100 |
| HLZ, unverfüllt | J | 41,4 | 10,8 | 3,93 | 22,57 | 3,68 | 2,68 | 0,52 | 0,57 | 2,36 | 0,11 | 0,11 | n.d. | 11,10 | 100 |
| HLZ, verfüllt* | G | 42,0 | 12,9 | 3,22 | 20,97 | 3,21 | 2,78 | 0,58 | 0,68 | 2,64 | 0,06 | 0,11 | n.d. | 10,90 | 100 |
| HLZ verfüllt* | H | 41,0 | 10,4 | 3,78 | 22,57 | 3,68 | 2,61 | 0,52 | 0,54 | 2,47 | 0,08 | 0,11 | n.d. | 12,20 | 100 |
| HLZ verfüllt* | K | 38,2 | 13,3 | 4,69 | 23,74 | 3,44 | 2,18 | 0,40 | 0,82 | 2,42 | 0,09 | 0,15 | n.d. | 10,40 | 100 |
| HLZ verfüllt* | L | 37,1 | 12,6 | 4,42 | 25,00 | 3,16 | 1,95 | 0,45 | 0,77 | 2,20 | 0,10 | 0,15 | n.d. | 12,10 | 100 |
| HLZ verfüllt* | M | 37,5 | 12,7 | 4,46 | 24,40 | 3,31 | 2,06 | 0,45 | 0,90 | 2,23 | 0,09 | 0,16 | n.d. | 11,80 | 100 |
| HLZ verfüllt* | N | 35,6 | 11,4 | 4,30 | 26,90 | 4,08 | 2,04 | 0,50 | 0,55 | 2,72 | 0,10 | 0,14 | n.d. | 11,60 | 100 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| HLZ verfüllt* | P | 43,2 | 13,3 | 5,35 | 19,18 | 3,53 | 2,27 | 0,75 | 0,71 | 2,74 | 0,18 | 0,14 | n.d. | 8,53 | 100 |
| HLZ verfüllt* | Q | 43,5 | 13,3 | 4,99 | 19,92 | 3,38 | 2,25 | 0,75 | 0,65 | 2,38 | 0,11 | 0,17 | n.d. | 8,29 | 100 |

Tabelle 13: RFA an Schmelztabletten der Fraktion < 4 mm, moderne Hochlochziegel

In Abbildung 19 sind die Ergebnisse der chemischen Analyse in einem Dreistoffdiagramm dargestellt. Es zeigte sich, dass die im Projekt vorliegenden Proben, zusammengefasst als „Ziegelreicher Bauschutt“ (gelb), gut mit Daten der Literatur korrelieren („Mauerwerkbruch (allgemein)“). Betrachtet man die Hochlochziegelproben „Mauerwerkbruch – neue Wände“ sieht man, dass sie gegenüber dem sonstigen Mauerwerkbruch zu einem erhöhten Anteil an Flussmittel ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) hin verschoben sind. Sie besitzen deutlich höhere Anteile an CaO + MgO , aufgrund der enthaltenen Mörtel und Putze sowie der verwendeten karbonatreichen Rohstoffe. Der in diesen Rohstoffen enthaltene Dolomit und der Kalk vermindern die Scherbenroh-dichte, die mit der gewünschten Wärmeleitfähigkeit korreliert.

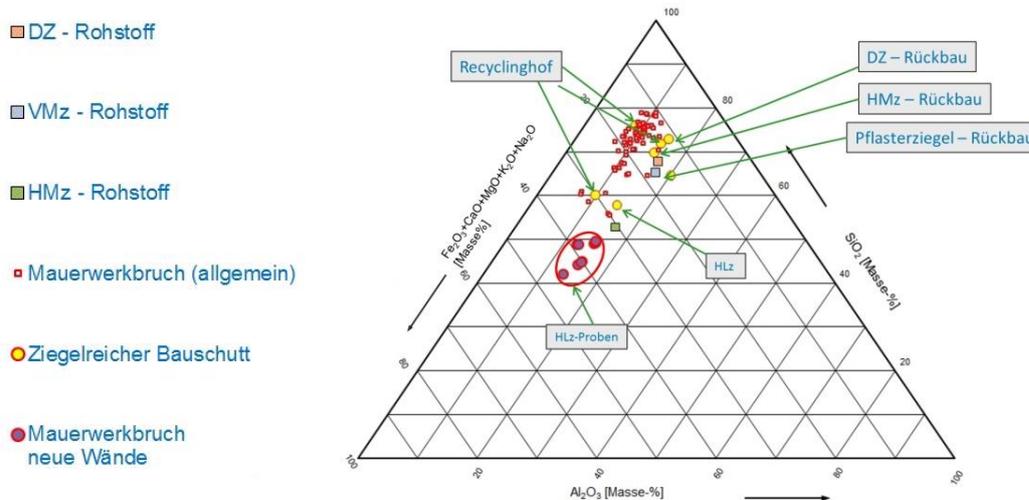


Abbildung 19 Dreistoffsystem $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Flussmittel FM}$

5.2.3 Bestimmung Mineralphasen mittels XRD

Mineralogische Zusammensetzung RC-Materialien:

Die mineralogische Analyse erfolgte mittels quantitativer Röntgenpulverdiffraktometrie. Die Ergebnisse der Mineralphasenbestimmung für RC-„alt“ und RC-„neu“ sind in und Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 14: Übersicht der Mineralphasenzusammensetzung RC-„alt“

und Tabelle 15 zusammengefasst.

| Nichttonminerale NTM | B | C | F | R | S | T | V | W | X | Y | Z |
|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| ∑ Silikate | 26 | 40 | 47 | 37 | 41 | 26 | 42 | 36 | 46 | 34 | 25 |
| ∑ CA-, CS-, CSH-Phasen | - | 3 | 7 | - | - | - | 0 | 0 | 2 | 2 | 12 |
| ∑ Carbonate | - | - | 1,5 | 21,5 | 10 | 1 | 6 | 4 | 31 | 40 | 11 |
| ∑ Oxide/Hydroxide | 7 | 5 | 4,5 | 2 | - | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| ∑ Sulfide/Sulfate/Phosphate | - | 1,5 | 2 | 3,5 | - | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ röntgenamorphes | 67 | 50,5 | 38 | 31 | 49 | 69 | 50 | 52 | 18 | 23 | 50 |
| Summe Nichttonminerale | 100 | 100 | 100 | 95 | 100 | 100 | 100 | 95 | 97 | 99 | 100 |

| Tonminerale TM | B | C | F | R | S | T | V | W | X | Y | Z |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ∑ kaolinitische TM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ weitere ZSTM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ illitische TM (DSTM) | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| ∑ quellfähige DSTM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ quellfähiger Schichten, ML, S | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ andere TM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ DS-VS ML | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ VSTM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe Tonminerale | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 3 | 1 | 0 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Gesamtsumme | 100 |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|

Tabelle 14: Übersicht der Mineralphasenzusammensetzung RC-„alt“

| | Unverfüllt | | Verfüllt | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--|
| | D | J | G [#] | H [°] | K [°] | L [°] | M [°] | N [°] | P [°] | Q [°] | |
| Nichttonminerale NTM | | | | | | | | | | | |
| ∑ Silikate | 38 | 30 | 21 | 21 | 23,5 | 24,5 | 22 | 25 | 32 | 30 | |
| ∑ CA-, CS-, CSH-Phasen | 20 | 8 | - | 20 | 12 | 12 | 13 | 14,5 | 10 | 7 | |
| ∑ Carbonate | 4 | 20 | 18 | 20,5 | 21 | 22 | 22 | 24 | 13,5 | 15 | |
| ∑ Oxide/Hydroxide | 3,5 | 3,5 | 4 | 2 | 4 | 5 | 3 | 3,5 | 5,5 | 3 | |
| ∑ Sulfide/Sulfate/Phosphate | - | 4 | 4,5 | 6 | 3 | 3 | 2,5 | 4,5 | 5,5 | 3 | |
| ∑ röntgenamorphes | 31,5 | 23,5 | 51,5 | 20,5 | 31,5 | 28,5 | 32,5 | 28,5 | 31,5 | 40,5 | |
| Summe Nichttonminerale | 97 | 89 | 99 | 90 | 95 | 95 | 95 | 100 | 98 | 98 | |

| Tonminerale TM | D | J | G [#] | H [°] | K [°] | L [°] | M [°] | N [°] | P [°] | Q [°] |
|---------------------------------------|----------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| ∑ kaolinitische TM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ weitere ZSTM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ illitische TM (DSTM) | 3 | 11 | 1 | 10 | 5 | 5 | 5 | 0 | 2 | 2 |
| ∑ quellfähige DSTM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ quellfähiger Schichten, ML, Smektit | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ andere TM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ DS-VS ML | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ∑ VSTM | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Summe Tonminerale | 3 | 11 | 1 | 10 | 5 | 5 | 5 | 0 | 2 | 2 |

| | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Gesamtsumme | 100 |
| # Perlite, ° Miwo | | | | | | | | | | |

Tabelle 15: Übersicht der Mineralphasenzusammensetzung RC-„neu“

Fasst man die Ergebnisse zusammen, lässt sich festhalten, dass in den sortenreinen RC-Proben neben nicht umgesetztem Quarz und Feldspat vor allem amorphe Silikate (silikatische Netzwerke; bei hochgebrannten Produkten Glasphase) sowie in geringem Anteil je nach Ausgangsrohstoff Mineralneubildungen (Anorthit, Gehlenit, Diopsid usw.) festgestellt wurden. Bei den Proben mit Mörtelanhaftungen (Mauerwerkbruch, ziegelreicher Bauschutt usw.) ließen sich neben den zuvor genannten Phasen noch Anteile an Carbonaten, Calciumsilikaten, CSH-Phasen, Gips / Anhydrit, Calcit und Portlandit nachweisen.

5.2.4 Bestimmung des thermischen Verhaltens mittels DSC

Auch wenn es sich bei den RC-Proben um bereits gebranntes Material handelt, sind die Reaktionen in den entsprechenden Temperaturbereichen deutlich erkennbar. In Abbildung 20 ist die

Probe D1 dargestellt – Hochlochziegel mit Mittelbettmörtel, Baustellenverschnitt. Wie der Kurvenverlauf zeigt, erfolgten bei Temperaturen bis 200 °C zunächst die Austreibung des Adsorptionswassers und die Gipsentwässerung. Bis zu einer Temperatur von ca. 400 °C schloss sich die Zersetzung der Hydroxide an, die vom Austrieb leicht flüchtiger organischer Bestandteile gefolgt wurde. Zwischen 400 und 500 °C fand die Portlandzersetzung statt, bei der Calciumoxid und Wasser entstehen. Der Quarzsprung erfolgte bei 573 °C und die Entsäuerung der Carbonate zwischen 625 und 850 °C. Die Carbonate stammen hauptsächlich aus dem in der Probe enthaltenen Mörtelbestandteilen.

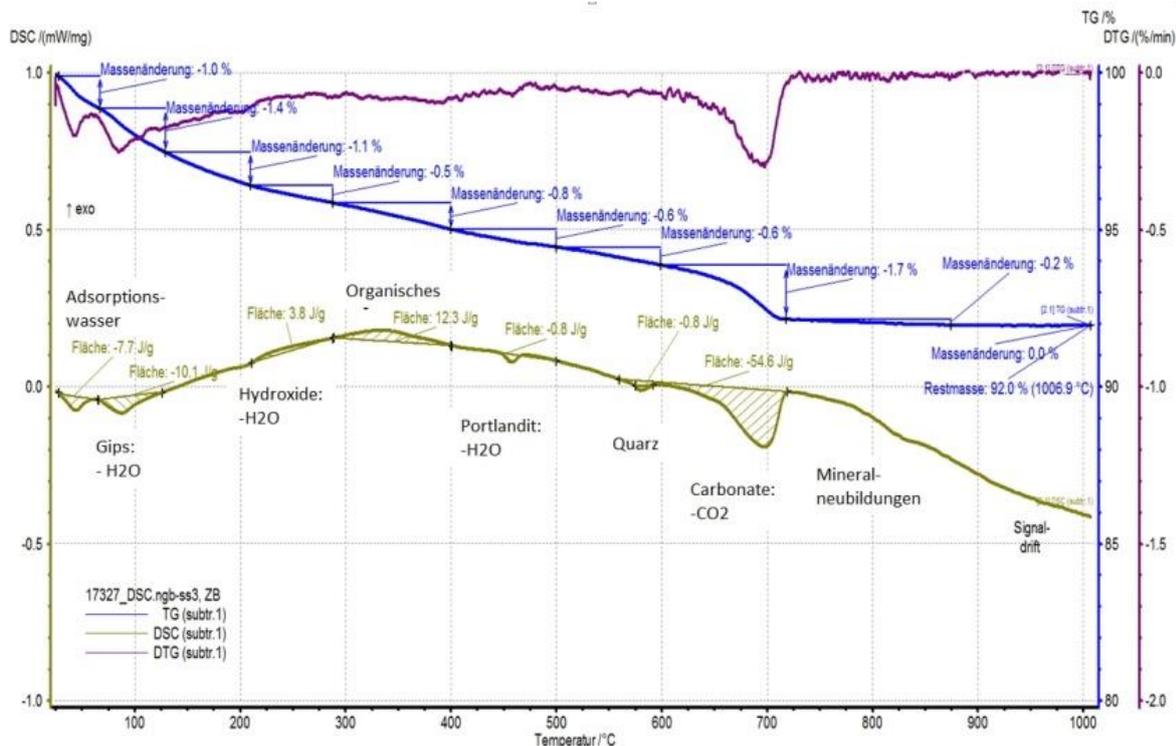


Abbildung 20: Probe D1 – DSC-Kurve (Beispiel)

5.2.5 Schwefel- und Kohlenstoffgehalte

Mit einem Schwefel-Kohlenstoff-Analysator wurden die in Tabelle 16: C+S-Analyse; RC „alt“

Tabelle 16 und Tabelle 17 dargestellten Werte analysiert. Für die Gruppe der modernen Hochlochziegel wurden generell höhere Gehalte an Gesamtschwefel und Gesamtkohlenstoff festgestellt. Der Kohlenstoff stammt aus Carbonaten, dem Hydrophobierungsmittel der vormals enthaltenen Wärmedämmstoffe und aus Zusätzen von Mörteln und Putzen.

Der Schwefelgehalt ist bei den sortenreinen Produkten auf Pyrit sowie Gips in den Ziegelrohstoffen zurückzuführen. Die dem gegenüber höheren Sulfatgehalte im Mauerwerkbruch stammen von Gipsputzen sowie Sulfaten, die im Zementanteil der Mauermörtel als Abbinderegler fungieren. Die angegebenen Werte korrelieren nachvollziehbar mit den Sulfat-Werten aus der chemischen Analyse.

| "RC - alt" | Probe | C [%] | S [%] |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| Pflasterklinker | B | 0,13 | 0,04 |
| DZ, engobiert | C | 0,39 | 0,29 |
| Mz alt, unverfüllt | F | 0,32 | 0,32 |
| ziegelr. Bauschutt | R | 3,36 | 0,79 |
| ziegelr. Bauschutt | S | 1,76 | 0,20 |
| Ziegelbruch | T | 0,55 | 0,12 |
| ziegelr. MWB | V | 1,25 | 0,21 |
| RC-Material | W | 0,63 | 0,33 |
| RC-Sand 0/2, gewaschen | X | 4,06 | 0,08 |
| RC-Sand 0/1, (CH) | Z | 5,30 | 0,27 |
| Backsteinsand 0/8, (CH) | Z | 1,40 | 0,13 |

Tabelle 16: C+S-Analyse; RC „alt“

| "RC - neu" (HLZ) | Probe | C [%] | S [%] |
|------------------|-------------------|-------|-------|
| HLz, unverfüllt | D ₂₀₁₈ | 2,01 | 0,16 |
| HLz, unverfüllt | J | 2,82 | 0,92 |
| HLz, verfüllt # | G | 2,56 | 1,14 |
| HLz, verfüllt ° | H | 2,82 | 1,10 |
| HLz, verfüllt ° | K | 2,76 | 0,93 |
| HLz, verfüllt ° | L | 2,95 | 0,88 |
| HLz, verfüllt ° | M | 2,89 | 0,88 |
| HLz, verfüllt ° | N | 2,98 | 1,06 |
| HLz, verfüllt ° | P | 2,16 | 1,25 |
| HLz, verfüllt ° | Q | 2,06 | 1,05 |

° Miwo, # Perlite

Tabelle 17: C+S-Analyse; RC „neu“

5.2.6 Physikalische Messwerte

In der Tabelle 18 sind die physikalischen Messwerte der 21 RC-Ziegel angegeben. Diese sind die Schüttdichten, Gleichgewichtsfeuchten, Reindichten, pH-Werte und Leitfähigkeiten.

| Probe | Schüttdichte [kg/dm ³] | Feuchte [%] | Reindichte e [g/cm ³] | pH-Wert | Leitfähigkeit [mS/cm] |
|-------|---------------------------------------|----------------|--------------------------------------|---------|--------------------------|
| B | 1,276 | 1,82 | 2,555 | 9,26 | 0,03 |
| C | 1,092 | 1,12 | 2,605 | 6,5 | 3,42 |
| D | 0,902 | 0,53 | 2,45 | 11,74 | 3,22 |
| F | 1,089 | 3,83 | 2,575 | 10,71 | 0,68 |
| G | 0,787 | 2,68 | 2,365 | 10,95 | 4,05 |
| H | 1,007 | 1,49 | 2,85 | 11,03 | 4,31 |
| J | 1,035 | 1,93 | 2,565 | 11 | 4,15 |
| K | 0,883 | 1,19 | 2,59 | 11,63 | 4,4 |
| L | 0,927 | 1,14 | 2,58 | 11,99 | 7,35 |
| M | 0,910 | 0,84 | 2,66 | 11,88 | 6,45 |
| N | 0,862 | 1,13 | 2,63 | 11,34 | 4,22 |
| P | 1,071 | 1,26 | 2,595 | 11,2 | 5,34 |
| Q | 0,961 | 0,96 | 2,645 | 11,2 | 3,94 |
| R | 1,037 | 3,46 | 2,675 | 9,5 | 4,92 |
| S | 1,279 | 7,15 | 2,61 | 10,8 | 1,79 |
| T | 1,321 | 2,82 | 2,765 | 8,72 | 1,81 |
| V | 0,883 | 9,37 | 2,52 | 10,92 | 1,52 |
| W | 1,213 | 14,17 | 2,67 | 8,99 | 2,5 |

Tabelle 18: tabellarische Darstellung der Analyseergebnisse

Erwartungsgemäß weisen die RC-Hintermauerziegel die geringsten Schüttdichten, die höchsten pH-Werte sowie eine höhere Leitfähigkeit auf als die dicht gebrannten Vormauer- und Dachziegel.

5.2.7 Bestimmung des Ziegelanteils

Zunächst wurde eine repräsentative Probe ausgewählt, um daran erste Versuche zur optischen Sortierung durchzuführen. Ausgewählt wurde Probe F.

Die aus der Bestimmung der Korngrößenverteilung vorliegenden Siebrückstände wurden genutzt, um den Anteil an Ziegeln und weiteren Bestandteilen auszuzählen. Wie in Tabelle 19 dargestellt, ließen sich die Bestandteile der Proben zwischen dem Größtkorn von 4 mm bis zu 250 µm relativ gut optisch sortieren. Der Ziegelanteil lag zwischen 57,1 % (2-4 mm) und 49,7 % (500 – 250 µm). Es zeigte sich, dass der Ziegelanteil bei kleineren Korngrößen abnahm, sich also mit geringer werdender Korngröße Störstoffe anreicherten. Es zeigte sich weiterhin, dass die optische Sortierung nach Farben unterhalb von 250 µm selbst unter dem Mikroskop kaum noch sicht- bzw. auszählbar war.

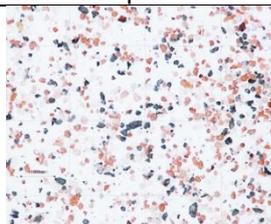
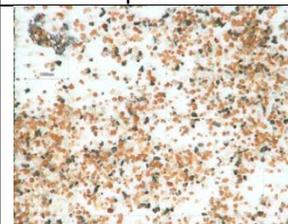
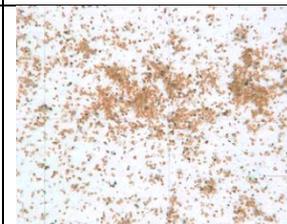
| 4000 – 2000 µm | 2000 – 1000 µm | 1000 – 500 µm | 500 - 250 µm |
|---|---|--|--|
|  57,1 % Ziegel |  53,3 % Ziegel |  50,7 % Ziegel |  49,7 % Ziegel |
| 250 - 125 µm | 125 – 63 µm | 63 – 40 µm |  kaum noch sicht- bzw. zählbare Unterschiede |
|  |  |  | |

Tabelle 19: Bestimmung Ziegelanteil Probe F – Siebrückstände

(Prozentangabe = Mittelwert der Auszählung von 4 bis 6 Bildern - Mineralwolle nicht erfasst).

Für die weitere Auszählung des Ziegelanteils wurden von allen Proben der Siebrückstand 2000 – 1000 µm ausgewählt. In Tabelle 20 sind die optischen Ergebnisse einiger „alten“ RC-Materialien dargestellt und in Tabelle 21 einige „neu“ RC-Materialien.

(Bei Proben unklarer Herkunft und unbekannter Herkunft, wurden Partikel, die nicht zur Ziegelfraktion zählten, als „Rest“ bezeichnet.)

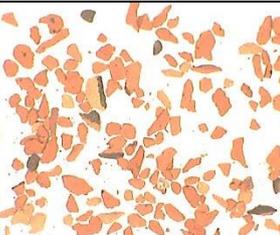
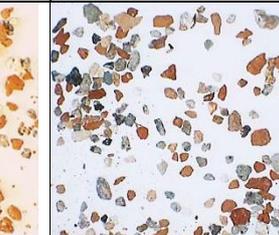
| B – Pflasterziegel | C – Dachziegel, schwarz engobiert, | F – unverfüllte Mz, Zement + Mörtel | R – ziegelreicher Bau-schutt |
|---|---|--|---|
| 100 % Pflasterziegel | 100 % Dachziegel | Ziegel 52,5 % Zement + Mörtel 47,5 % | Ziegel 41,2 % Rest 58,8 % |
|  |  |  |  |

Tabelle 20: Bestimmung Ziegelanteil Proben B, C, F, R (RC-Material „alt“ – Auswahl)

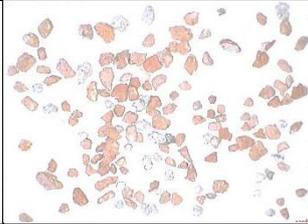
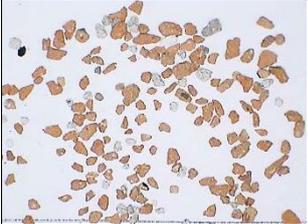
| | | |
|---|---|---|
| G – HLz mit Perlit, Außen- + Innenputz, Dünnbettmörtel | H – HLz mit Miwo Außen- + Innenputz, Dünnbettmörtel | J – HLz unverfüllt Außen- + Innenputz, Dünnbettmörtel |
| Ziegel 59,7 % Mörtel 40,3 % | Ziegel 78,9 % Mörtel 21,1 % | Ziegel 80,2 % Mörtel 19,8 % |
|  |  |  |
| N – HLz mit Miwo Außen- + Innenputz, Dünnbettmörtel | P – HLz mit Miwo Außen- + Innenputz, Dünnbettmörtel | Q - HLz mit Miwo Außen- + Innenputz, Dünnbettmörtel |
| Ziegel 79,6 % Mörtel 20,4 % + Miwo! | Ziegel 80,8 % Mörtel 19,2 % + Miwo! | Ziegel 86,5 % Mörtel 13,5 % + Miwo! |
|  |  |  |

Tabelle 21: Bestimmung Ziegelanteil Proben G, H, J, N, P, Q (RC-Material „neu“ – Auswahl)

Die ausführlichen Ergebnisse der Auszählung der Fraktion 1000-2000 µm sind in Tabelle 22 und Tabelle 23 zusammengefasst. Die RC-Materialien „RC-alt“ zeigten eine starke Schwankungsbreite (Tabelle 22). Der Ziegelanteil variierte von 100%, was dem sortenreinen Ziegelmaterial entsprach, bis hin zu einem Ziegelanteil von ca. 20 % für Mauerwerkbruch. Im Schnitt ergaben sich Ziegelanteile von ca. 50 bis 70 %. Es zeigte sich, dass bei den modernen Hochlochziegeln (Tabelle 23) ein guter Sortiergrad vorlag. Der durchschnittliche Ziegelanteil betrug hier ca. 80% (Ausnahme Probe G).

| "RC - alt" | Probe | Anteil Ziegel [%] | Rest- partikel [%] |
|------------------------------------|-------|-------------------------|--------------------------|
| Fraktion 1000 - 2000 µm | | | |
| Pflasterklinker | B | 100 | - |
| DZ, engobiert | C | 100 | - |
| Mz alt, unverfüllt | F | 52,5 | 47,5 |
| ziegelr. Bauschutt | R | 41,2 | 58,8 |
| MWB | S | 25,2 | 74,8 |
| Ziegelbruch | T | 93,3 | 6,7 |
| MWB | V | 20,3 | 79,7 |
| ziegelr. Bauschutt | W | 73,3 | 26,7 |

Tabelle 22: Bestimmung Ziegelanteil "RC - alt", Fraktion 1000 - 2000 µm

| "RC - neu" (HLZ) Fraktion 1000 - 2000 µm | Probe | Anteil Ziegel [%] | Rest- partikel [%] |
|--|-------|-------------------------|--------------------------|
| HLZ, unverfüllt | D | 86,7 | 13,3 |
| HLZ, unverfüllt | J | 80,2 | 19,8 |
| HLZ, verfüllt | G | 59,7 | 40,3 |
| HLZ, verfüllt | H | 78,9 | 21,1 |
| HLZ, verfüllt | K | 85,4 | 14,6 |
| HLZ, verfüllt | L | 80,6 | 19,4 |
| HLZ, verfüllt | M | 84,3 | 15,7 |
| HLZ, verfüllt | N | 79,6 | 20,4 |
| HLZ, verfüllt | P | 80,8 | 19,2 |
| HLZ, verfüllt | Q | 86,5 | 13,5 |

Tabelle 23: Bestimmung Ziegelanteil "RC - neu", Fraktion 1000 - 2000 µm

Anhand dieser Werte soll weiterführend untersucht werden, ob sich durch eine nachgeschaltete Magnetscheidung während des Sortierprozesses der Sortiergrad maßgeblich verbessern lässt.

Trockene Magnetscheidung

Ausgangsmaterial: ca. 60% Ziegelanteil + 40% Putz, Mörtel und Perlit aus der Füllung

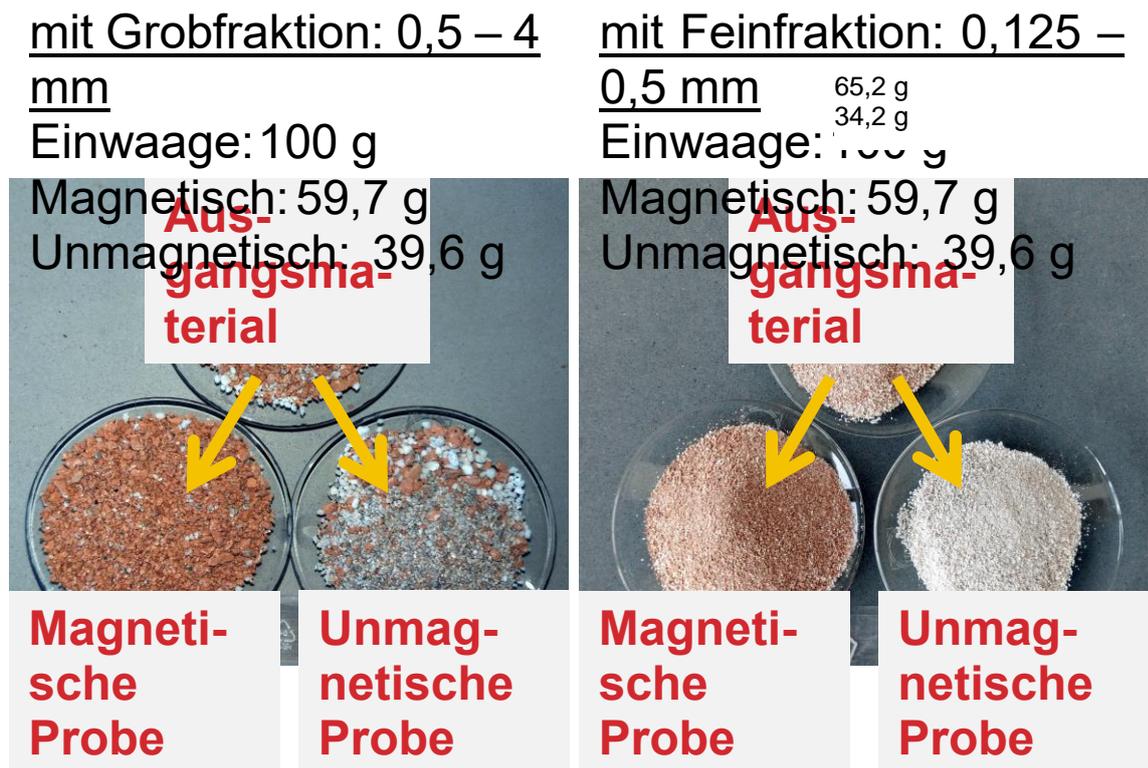


Abbildung 21: Trockene Magnetscheidung

Im Rahmen der durchgeführten Versuche erfolgte die Magnetscheidung mit beiden genannten Verfahren (nass und trocken), um die Trenngüte beider Verfahren beurteilen zu können.

Die praktischen Versuche zur Magnetscheidung wurden beim UVR-FIA in Freiberg durchgeführt. Ausgewählt wurden 2 verschiedene Materialien - die Proben G und P (Abbildung 22). Diese Proben repräsentieren gut das Ziegelmaterial, welches aktuell produziert wird und zukünftig zu recyceln ist. Probe G besaß laut Tabelle 23 den niedrigsten (59,7 %) und Probe P den höchsten Ziegelanteil (80,8 %) in der Fraktion von 1000 – 2000 µm.



Abbildung 22: Probe G – Hochlochziegel, Probe P - Hochlochziegel

Für die ausgewählten Proben wurden 2 unterschiedliche Verfahrensabläufe ausgewählt, welche im Folgenden ausführlich erläutert werden.

Die trockene Magnetscheidung wurde an beiden Probenmaterialien (G, P) durchgeführt, siehe Abbildung 23. Es erfolgte zunächst eine Siebung in verschiedene Fraktionen. Das Material < 0,1

mm wurde abgetrennt. Es eignete sich durch eine hohe Staubentwicklung nicht für die trockene Magnetscheidung. Auch Material >4 mm wurde abgesiebt und nicht in die Untersuchungen einbezogen, wobei nahezu kein Material >4 mm vorhanden war. Eine weitere Korngrößentrennung erfolgte in die Fraktionen 0,1 - 0,5 mm und 0,5 – 4,0 mm. Für die Siebung des Mauerwerkbruchs in die verschiedenen Fraktionen wurden jeweils 2 kg Material genutzt. Tabelle 24 zeigt die Zusammensetzung des Materials nach Gewicht sowie prozentualer Verteilung der abgesiebten Mengen. Der Großteil (56,4 % bzw. 58 %) des Probenmaterials G und P bestand aus Material Korngrößen zwischen 0,5 – 4 mm.

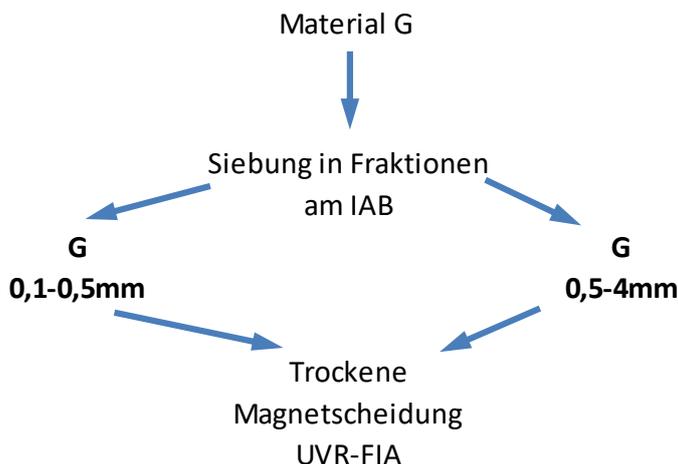


Abbildung 23: Untersuchungsschema für trockene Magnetscheidung der Proben G und P

| | Probe G | | Probe P | |
|------------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | Masse [g] | Masse [%] | Masse [g] | Masse [%] |
| Einwaage | 2000 | 100 | 2000 | 100 |
| < 0,1 mm | 330,6 | 16,5 | 286,5 | 14,3 |
| 0,1 mm - 0,5mm | 535,8 | 26,8 | 550,8 | 27,5 |
| 0,5 mm - 4,0 mm | 1127,2 | 56,4 | 1159,5 | 58,0 |
| > 4,0 mm | 0,7 | 0,0 | 2,4 | 0,1 |
| Summe | 1994,3 | 99,7 | 1999,2 | 100,0 |

Tabelle 24: Zusammensetzung der Probenmaterialien in den verschiedenen Korngrößenbereichen für die Magnetscheiderversuche (trocken) bestimmt durch Siebung

Laborversuche – Trockene Magnetscheidung am UVR FIA

Die technischen Rahmenbedingungen des Versuches zur trockenen Magnetscheidung am UVR-FIA sind in Tabelle 25 aufgeführt. Die ersten Versuche fanden mit dem Probenmaterial G (0,5 – 4 mm) statt (Abbildung 24-25) Die Einwaage für alle Versuche zur trockenen Magnetscheidung betrug jeweils 100 g Material. Es gab mehrere Durchläufe mit Variation der Bandgeschwindigkeiten.

| | | | | |
|---------------------|-------|---------|-----------------------|-----------------|
| max. Induktion | mT | 700 | | |
| Polabstand | mm | | | |
| Arbeitsbreite | mm | 200 | nutzbare Bandbreite | ca. 150 mm |
| 2. typ. Dimension | mm | 75 | Rollen-Durchmesser | |
| 3. typ. Dimension | mm | - | | |
| Drehzahl | 1/min | 0 - 280 | stufenlos einstellbar | |
| Bandgeschwindigkeit | m/s | 0 - 1,5 | stufenlos einstellbar | |
| max. Korngröße | mm | 10 | min. Korngröße | ca. 0,05-0,1 mm |
| max. Durchsatz | kg/h | - | je nach Korngröße | |

Tabelle 25: Messprotokoll (Ausschnitt), Maschinendetails (mT=Millitesla, magnetische Flussdichte)

Probe G – 0,5 -4 mm



Abbildung 24: Materialaufgabe;
G 0,5 – 4 mm



Abbildung 25: Einkornschüttung



Abbildung 26: Ergebnis Magnet-scheidung (trocken)

Probe G – 0,1 -0,5 mm



Abbildung 27: Materialaufgabe;
G 0,1 - 0,5 mm

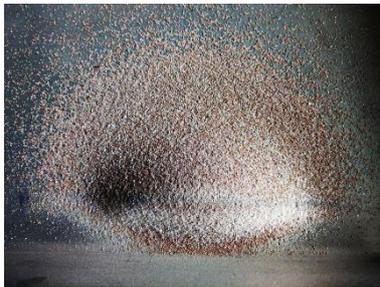


Abbildung 28: Ergebnis;
Magnetische Probe



Abbildung 29: Ergebnis;
Unmagnetische Probe

Die Ergebnisse der kleintechnischen Versuche am UVR-FIA sind in (Tabelle 26) aufgeführt. Inhalt sind die Versuchsnummer, die Bezeichnung des aufgegebenen Materials, die Bandgeschwindigkeit (v_{Band}), die Masse des aufgegebenen Materials und die nach der Trennung erhaltene Menge an magnetischen (MP) und unmagnetischen Partikeln (UP).

| Vers. Nr. | Aufgabe | V_{Band} [ms^{-1}] | Masse [g] | | |
|-----------|----------------|--|-----------|-------|-------|
| | | | Aufgabe | MP | UP |
| 1 | G 0,5 - 4 mm | 0,09 | 100 | 59,65 | 39,55 |
| 2.1 | G 0,5 - 4 mm | 0,09 | 100 | 61,8 | 37,9 |
| 2.2 | MP2.1 | 0,09 | 61,8 | 52,45 | 9,2 |
| 3 | G 0,125-0,5 mm | 0,09 | 100 | 65,55 | 34,2 |
| 4 | G 0,125-0,5 mm | 0,23 | 100 | 61,9 | 37,85 |
| 5 | G 0,125-0,5 mm | 0,31 | 100 | 59,6 | 40,05 |
| 6 | G 0,125-0,5 mm | 0,46 | 100 | 56,3 | 43,45 |
| 7 | P 0,125-0,5 mm | 0,46 | 100 | 68,2 | 31,65 |
| 8 | P 0,5 - 4 mm | 0,09 | 100 | 89,6 | 9,8 |

Tabelle 26: Ergebnisprotokoll zur trockenen Magnetscheidung (UVR-FIA)

Um die in Tabelle 26 erhaltenen Werte für die magnetischen und unmagnetischen Partikel besser darstellen zu können und den Trennerfolg optisch darstellbar zu machen, sind im Folgenden einige Bilder aufgeführt. Oben in der Mitte dargestellt befindet sich die Ausgangsprobe, unten links die als magnetisch aussortierten Partikel und rechts unten die unmagnetische Probe. Die Bilder entsprechen den Versuchen 1 und 3 aus dem oben genannten Protokoll. Wie man erkennen kann, sind weiterhin fehlsortierte Partikel in den magnetischen bzw. unmagnetischen Fraktionen enthalten (Abbildung 30, Abbildung 31), allerdings in geringeren Anteilen.



Abbildung 30: Probe G 0,5-4mm; vor und nach Magnetscheidung (Tabelle 26: Versuch 1)



Abbildung 31: Probe G 0,125-0,5mm; vor und nach Magnetscheidung (Tabelle 26: Versuch 3)

Analyse der Proben nach Magnetscheidung

a. Auszählung

Neben einer rein optischen Beurteilung des Sortiererfolges (Abbildung 30; Abbildung 31) wurden stichprobenhaft Proben der Korngröße 0,5 – 4 mm ausgezählt. Die Ergebnisse einer Auszählung sind in Tabelle 27 aufgeführt. Eine Auszählung der Proben mit einer Korngröße von 0,125 – 0,5 mm waren aufgrund der geringen Teilchengröße nicht zielführend.

| Probe | Ziegelanteil [%] | Anteil andere Partikel [%] |
|--|---------------------|----------------------------------|
| Gesamtprobe G 0,5 - 4 mm (vor Magnetscheidung) | 56,1 | 43,9 |
| G -MP - magnetische Partikel | 85,6 | 14,4 |
| G -UP - unmagnetische Partikel | 13,7 | 86,3 |

Tabelle 27: Bestimmung Sortiergrad (Auszählung Einzelpartikel) vor und nach Magnetscheidung aus Versuch 1

Die Ergebnisse der Partikelanzählung zeigen eine deutliche Anreicherung von Ziegelpartikeln in der magnetischen Probe durch eine Magnetscheidung. Von einem Ziegelanteil von 56,1 % vor der Magnetscheidung erhöhte sich der Wert auf 85,6 %. Die Größenordnung der falsch sortierten unmagnetischen Partikel in dieser Probe lag bei 14,4%. Eine ähnliche Verteilung zeigte sich bei der Zusammensetzung der unmagnetischen Teilprobe, welche zu 86,3 % aus Mörtel und weiteren Partikeln Bestand und nur zu 13,7 % aus falsch sortiertem Ziegelmaterial.

b. Chemie

Für eine genauere Beurteilung der durch die Magnetscheidung trocken sortierten Probenmaterialien wurden chemische Analysen (Röntgenfluoreszenzanalysen) durchgeführt. Zunächst erfolgte ein Vergleich der Ausgangsproben, also der ursprünglichen Gesamtprouben G und P, die bis zu einer maximalen Korngröße von 4 mm vorlagen mit den Proben, die für die Magnetscheidung in verschiedene Fraktionen getrennt wurden (0,125 – 0,5 mm, 0,5 – 4 mm). Wie Tabelle 28 zeigt, ergaben sich bei der chemischen Analyse durch die Auftrennung in Fraktionen Verschiebungen in den erhaltenen Ergebnissen. Als charakteristische Werte wurden hierbei der Glühverlust bei 1025 °C sowie die Gehalte an Fe₂O₃, CaO und SO₃ ausgewählt.

| Bezeichnung | Glühverlust 1025 °C [M.-%] | Fe ₂ O ₃ [M.-%] | CaO [M.-%] | SO ₃ [M.-%] |
|----------------------|----------------------------------|--|---------------|---------------------------|
| G Gesamtprobe | 10,9 | 3,22 | 20,97 | 2,64 |
| G 0,5 - 4 mm | 8,44 | 3,64 | 18,1 | 1,08 |
| G 0,125 - 0,5 mm | 12,0 | 3,05 | 21,5 | 2,56 |
| P Gesamtprobe | 8,53 | 5,35 | 19,18 | 2,74 |

| | | | | |
|-----------------------|-------------|------|------|------|
| P 0,5 - 4 mm | 4,8 | 5,86 | 13,7 | 0,49 |
| P 0,125 - 0,5 mm | 13,6 | 4,47 | 23,5 | 1,82 |
| P < 0,5 Gesamtprobe | 7,97 | 5,4 | 17,3 | 1,23 |
| P < 0,125 Gesamtprobe | 7,55 | 5,62 | 16,3 | 0,84 |

Tabelle 28: Chemische Analyse Probe G und Probe P; Vergleich Ausgangsprobe (≤ 4 mm) mit einzelnen Siebfractionen 0,125 -0,5 mm und 0,5 – 4 mm

Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass es im kleineren Partikelgrößenbereich im Vergleich zur Ausgangsprobe zur Anreicherung von Gips- und Mörtelbestandteilen kam, weshalb auch durch die Zersetzung dieser Stoffe der Glühverlust anstieg. Aufgrund des geringeren Zerkleinerungswiderstands von Putzen und Mörteln, die am Ziegelmaterial anhaften sammeln sich diese Fraktionen vor allem im Feingut (siehe Tabelle 28). Der Glühverlust erhöhte sich bei Probe G von 10,9 % bei der Ausgangsprobe auf 12,0 % für die abgetrennte Fraktion von 0,125 – 0,5 mm. Bei Probe P stieg der Wert von 8,53 % Glühverlust auf 13,6 %.

Durch die Trennung des Materials während der Magnetscheidung in magnetische und unmagnetische Bestandteile kam es zu einer weiteren Verschiebung der Analysenergebnisse und Anreicherung von Mörtel, Kalk- und Gipsputz vor allem in der unmagnetischen Fraktion (Tabelle 29). Der Glühverlust der unmagnetischen Teilprobe von G 0,5 – 4 mm erhöhte sich auf 20,1 %. Noch höher lag der Glühverlust mit 25,8 % bei der unmagnetischen Probe von G 0,125 - 0,5 mm. Auch hier reicherte sich das weichere Mörtel-/Putz-Material im Feingut an. Der Glühverlust lag bei den magnetischen Teilproben (ca. 3 bis maximal 6 %) deutlich geringer. Aufgrund von fehlsortiertem Material war die Ziegelfraktion nicht frei von Störstoffen wie SO_3 . Wenn man von den SO_3 -Werten ausgeht als Sortierkriterium, dann kann man aufgrund der erhaltenen Ergebnisse schlussfolgern, dass die grobe Fraktion besser geeignet ist, da die SO_3 -Werte deutlich geringer sind als in der feinen Fraktion (0,125 - 0,5 mm). Prinzipiell zeigen die Ergebnisse, dass eine Magnetscheidung technisch möglich ist, was auch die Fe_2O_3 -Werte in Tabelle 29 im Vergleich zu den korrespondierenden unmagnetischen Proben belegen.

| Bezeichnung | Glühverlust 1025 °C | Fe_2O_3 | CaO | SO_3 |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|------|---------------|
| G 0,5-4 mm | 8,44 | 3,64 | 18,1 | 1,08 |
| G1-MP-V1 | 2,99 | 4,72 | 11,5 | 0,19 |
| G1-UP-V1 | 20,1 | 1,7 | 30,2 | 2,52 |
| G 0,125-0,5 mm | 12,0 | 3,05 | 21,5 | 2,56 |
| G2-MP-V3 | 6,4 | 4,36 | 15,3 | 0,92 |
| G2-UP-V3 | 25,8 | 0,60 | 36,8 | 6,27 |
| P 0,5-4 mm | 4,8 | 5,86 | 13,7 | 0,49 |
| P1-MP-V8 | 2,36 | 6,42 | 10,7 | 0,2 |
| P1-UP-V8 | 33,1 | 0,67 | 43,4 | 2,85 |
| P 0,125-0,5 mm | 13,6 | 4,47 | 23,5 | 1,82 |
| P2-MP-V7 | 5,47 | 6,35 | 14,9 | 0,79 |
| P2-UP-V7 | 32,2 | 0,44 | 42,7 | 3,54 |

**Tabelle 29: Chemische Analyse Probe G und Probe P;
Vergleich Siebfractionen 0,125 -0,5 mm und 0,5 – 4 mm vor und nach Magnetscheidung**

Laborversuche – Nassmagnetscheidung am UVR FIA

Neben der trockenen Magnetscheidung wurde der Verfahrensablauf für Probe P um Versuche zur Nassmagnetscheidung erweitert Abbildung 32. Für diese Nassmagnetscheidung musste die Gesamtprobe feiner aufgemahlen werden, um daraus eine Feststoffsuspension herstellen zu können. Auch hier wurden wieder zwei verschiedene Ansätze verfolgt und das Material unterschiedlich aufbereitet, um eventuelle Unterschiede bei der Trenngüte beobachten zu können. Eine Probe wurde < 500 µm aufbereitet und eine Probe auf < 100 µm.

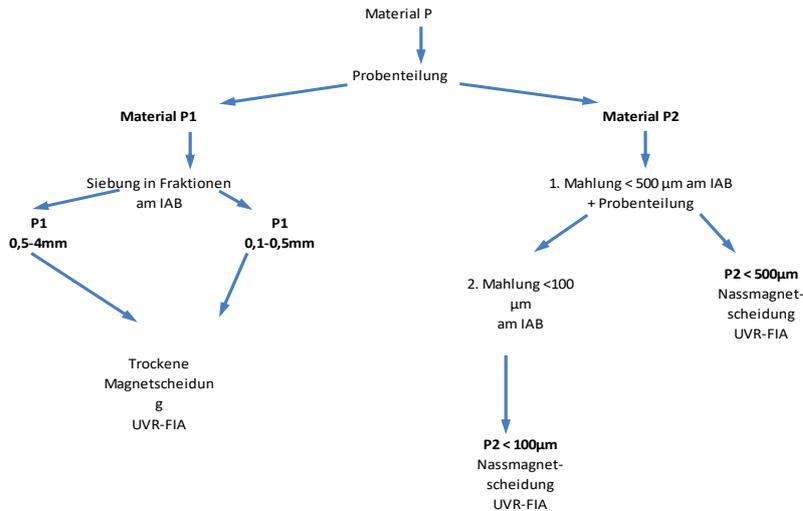


Abbildung 32: Untersuchungsschema für Probe P, trockene Magnetscheidung und Nassmagnetscheidung

Bei den technischen Versuchen wurden an einigen Proben zu Testzwecken Nassmagnetscheiderversuche durchgeführt. Der Verfahrensablauf ist in Abbildung 33 bis Abbildung 38 dargestellt.



Abbildung 33: Nassmagnetscheidung; Einfüllen der trockenen Probe



Abbildung 34: Nassmagnetscheidung; Herstellung einer Suspension



Abbildung 35: Bedienelement Nassmagnetscheidung (Rückhaltescheider)

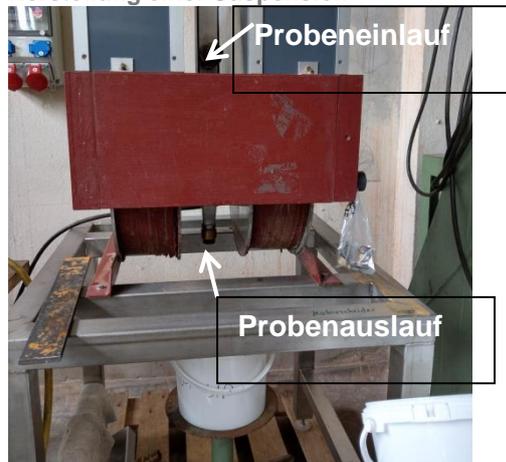


Abbildung 36: Rückhaltescheider



Abbildung 37: Magnetische Restprobe Nassmagnetscheidung



Abbildung 38: Restmaterial nach Versuch; MP; UP; Spülwasser

Zunächst wurde aus einer fein aufbereiteten Probe eine Suspension hergestellt (Abbildung 34) und diese mit einem Trichter von oben in den Rückhaltescheider eingefüllt. Da eine hohe Spannung angelegt war, blieb das magnetische Material im Rückhaltescheider zurück, während das unmagnetische Material unten aus dem Rückhaltescheider austrat und aufgefangen wurde. Um das gesamte Material zu entfernen, wurde mit 2 Litern Wasser nachgespült. Anschließend wurde der anliegende Strom ausgeschaltet und das magnetische Material konnte mit Hilfe eines Wasserschlauches ausgespült werden und wurde ebenfalls aufgefangen. Es blieben am Ende der

Magnetscheidung mehrere Behälter übrig, in denen sich das jeweils abgetrennte Material absetzte und später zurückgetrocknet werden konnte. Tabelle 30 zeigt einen Auszug aus dem Messprotokoll vom UVR-FIA.

Vergleicht man die erhaltenen Werte der mehrfach untersuchten Probe P < 0,5 mm sieht man, dass die Menge an magnetischem bzw. unmagnetischem Material je nach verwendeter Matrix (FEX, MEX, CEX) deutlich schwankten.

| Lfd. Nr. | Probe | Matrix | Masse [g] | Menge Susp. [l] | Stromstärke [A] | UP Spülwasser-menge [l] | MP Spülwasser-menge [l] | Magnetprodukt MP | | Unmagnetisches Produkt UP | | Summe MP + UP [g] | Verlust [%] | Bemerkungen |
|----------|--------------|--------|-----------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------|---------------------------|------|-------------------|-------------|--|
| | | | | | | | | [g] | [%] | [g] | [%] | | | |
| 1 | P < 0,5 | FEX | 50 | 1 | 3 | 2 x 1l | Schlauch | 27,8 | 65,1 | 14,9 | 34,9 | 42,7 | 14,6 | an der Matrix haftendes Material verworfen |
| 2 | P < 0,125 mm | FEX | 50 | 1 | 3 | 2 x 1l | Schlauch | 23,4 | 48,9 | 24,5 | 51,1 | 47,9 | 4,2 | an der Matrix haftendes Material verworfen |
| 3 | P < 0,5 | MEX | 50 | 1 | 3 | 2 x 1l | Schlauch | 15,5 | 31,9 | 33,1 | 68,1 | 48,6 | 2,8 | Matrixrest 0,8 g (ferromagnetisch) |
| 4 | P < 0,5 | CEX | 50 | 1 | 3 | 2 x 1l | Schlauch | 7,7 | 15,8 | 40,9 | 84,2 | 48,6 | 2,8 | Matrixrest 1,0 g (ferromagnetisch) |

Tabelle 30: Ergebnisse Nassmagnetscheidung – Protokoll UVR-FIA (Auszug)

Aus dem Vergleich der beiden magnetischen Abscheideverfahren lässt sich folgendes Fazit ziehen: Die Nassmagnetscheidung ist ein sehr aufwändiges Trennverfahren. Da zunächst das Probenmaterial fein aufbereitet werden muss und im Anschluss eine Trocknung der unterschiedlichen abgetrennten Materialien nötig ist, erweist sich dieses Verfahren als zu aufwändig. Die Trennung von Mauerwerkbruch in seine einzelnen Bestandteile sollte möglichst kostengünstig sein und dies ist mit der Nassmagnetscheidung nicht möglich, da mehrere energie- und kostenintensive Zwischenschritte notwendig sind. Dies ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll.

Aufgrund der großen Schwankungsbreite der Ergebnisse und des hohen Aufwandes, welchen dieses Sortierverfahren mit sich bringt, wird der industrielle Einsatz ausgeschlossen. Daher wurde auf die weitere kostenintensive chemische Analyse der Teilkomponenten (MP, UP) verzichtet.

6 Zuordnung der Betriebsmassen und der RC-Ziegel:

Anhand der erzielten Ergebnisse konnte eine Gruppierung der 21 RC-Materialien vorgenommen werden. Es fanden sich Materialien mit nahezu identischen Eigenschaften, insbesondere im Bereich der Hintermauerziegel. Somit konnten insgesamt 6 charakteristische RC-Rohstoffe ausgewählt werden, anhand derer die gesamte Palette der ursprünglichen Ausgangsstoffe repräsentiert werden. Als Austauschmaterial wurden folgende RC-Materialien ausgewählt:

- C – Dachziegel
- D – Hochlochziegel, Baustellenverschnitt (nur Ziegel)
- D1 – Hochlochziegel, Baustellenverschnitt (Variante mit Mittelbettmörtel)
- D2 – Hochlochziegel, Baustellenverschnitt (Variante mit Dünnbettmörtel)
- H – Hochlochziegel, verfüllt mit Mineralwolle
- R – Ziegelreicher Bauschutt
- T – Ziegelbruch (sortenrein)
- V – Ziegelreicher Mauerwerksbruch, Abbruchmaterial

Die Betriebsmassen wurden wie beschrieben, ebenfalls charakterisiert. Nach Auswertung der Ergebnisse konnten den drei Betriebsmassen jeweils 4 Rohstoffe für die Herstellung von Probekörpern zugeordnet werden.

- Ton A: RC-Material C, D (D1, D2), R, T
- Ton E: RC-Material C, D (D1, D2), R, V
- Ton U: RC-Material C, D (D1, D2), H, R

Dabei wurden drei Varianten des Materials D berücksichtigt, mit Dünnbettmörtel, mit Mittelbettmörtel und ohne Mörtelanhaftungen.

6.1 Herstellung der Probekörper

Die Herstellung von Probekörpern wurde im IZF mit Hilfe einer Laborschneckenpresse vorgenommen. Der Probendurchmesser betrug 33 mm.



Abbildung 39: Vakuum-Laborschneckenpresse im Institut für Ziegelforschung

6.1.1 Analysen der RC-Versätze, Scherbenanalyse nach dem Brand

Die drei ausgewählten Betriebsmassen, die den unterschiedlichen Produktgruppen zuzuordnen sind wurden mit zunächst 10 M.-% des jeweils zugeordneten RC- Materials aufbereitet, gemischt und mit Wasser versetzt. Der Pfefferkornwert, der die Plastizität widerspiegelt, wurde für sämtliche Proben mit 26 eingestellt, um eine Vergleichbarkeit der Untersuchungen zu gewährleisten. Die Verarbeitungseigenschaften wurden, ebenso wie der Vakuum- und Presskopfdruck dokumentiert. Alle Probekörper wurden mit Schwindmarken versehen. Während der Probenherstellung wurden Eigenschaften wie lineare Trockenschwindungen und der jeweilige Anmachwasserbedarf ermittelt. Letzterer nimmt Einfluss auf den Trocknungsenergiebedarf der neu zu entwickelnden RC-Versätze. Die Biegezugfestigkeiten der Probekörper wurden sowohl im getrockneten, als auch im gebrannten Zustand gemessen, um eine Einschätzung der Festigkeitsentwicklung vornehmen zu können. Ebenso wurden die Brenn- und die Gesamtschwindung, die Wasseraufnahme, die Rohdichte, der Brennverlust und das Austreibungsverhalten bestimmt. Bei der optischen Beurteilung der Proben wurde die Brennfarbe mit der Nullprobe verglichen und Ausblühungen bei bestimmten Versatzvarianten festgehalten.

6.1.2 Analyseverfahren

Messung der Plastizität nach Pfefferkorn

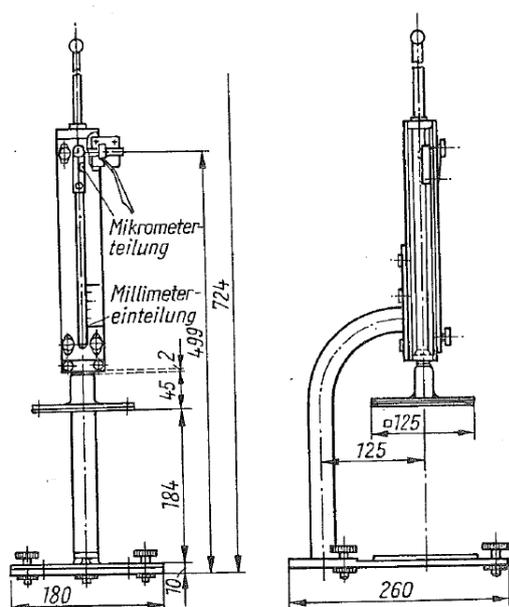


Abbildung 40: Messgerät nach Pfefferkorn

Nach Haase [9] wird im Pfefferkornversuch die kinetische Energie der fallenden Scheibe gleich der geleisteten Verformungsarbeit gesetzt und die Fließgrenze T_f aus den Pfefferkorn-Werten berechnet zu

$$T_f = \frac{m H}{2 V \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)}$$

m = Masse der Pfefferkornscheibe
 H = Fallhöhe der Scheibe
 V = Volumen des Massezylinders
 h_0, h_1 = Höhe des Massezylinders vor und nach dem Stauchversuch

Das nach Pfefferkorn benannte Stauchverfahren dient der Prüfung des Viskositätsverhaltens einer keramischen Masse. Der Vorgang beruht auf der Stauchung von Masse- oder Tonzylindern mittels eines fallenden Gewichtes bei konstanter Fallhöhe. Das Verhältnis der Höhe des Körpers nach der Deformation h_1 zur ursprünglichen Höhe h_0 wird als Funktion des Wassergehaltes der Masse (bezogen auf die Trockensubstanz) grafisch aufgetragen. Der sich ergebende Wassergehalt für das Deformationsverhältnis $h_0:h_1$ wird als Bildsamskeitszahl nach Pfefferkorn bezeichnet [16].

Bestimmung des Anmachwassergehaltes

Der Wassergehalt gibt die Menge an Wasser in der Masse der feuchten Probe an. Zur Trocknung wurden die Probekörper bei 105°C über einen Zeitraum von 24 Stunden getrocknet. Der Wassergehalt berechnet sich nach folgender Formel und wird in Masseprozent angegeben. [16]

$$W = \frac{mf - mtr}{mf} \quad \text{bzw.} \quad Watro = \frac{mf - mtr}{mtr}$$

Dabei gilt: **W** = Wassergehalt bezogen auf feuchtes Material [%]

Watro = Wassergehalt bezogen auf

mf = Masse der feuchten Probe

mtr = Masse der trockenen Probe [g]

Schwindungsverhalten

Unter Schwinden versteht man das Zusammenziehen eines ansonsten formbeständigen Körpers. Das Volumen des Körpers setzt sich aus dem Teilvolumen der Trockensubstanz, demjenigen des Wassers und demjenigen der im Körper eingeschlossenen Luft zusammen. Dieser Prozess ist in der Fertigung von Ziegeln von entscheidender Bedeutung, da während des ersten schwindungsbehafteten Trocknungsabschnittes die Gefahr der Rissbildung besteht. Die Oberfläche des Rohlings ist bestrebt, sich zusammenzuziehen, wird aber vom Inneren daran behindert. So entstehen außen Zugspannungen und innen Druckspannungen. Wenn die Spannungen nicht mehr durch elastische Verformungen aufzufangen sind, kommt es zu plastischen Veränderungen der Rohlingsgeometrie, die sich beispielsweise als Verkrümmungen von Dachziegelrohlingen auswirken. Werden die Kräfte so groß, dass sie auch nicht mehr durch plastische Verformungen kompensierbar sind, entstehen Trockenrisse. Zur Messung des Schwindungsgradienten wird der gepresste Rohling in mit Schwindmarken versehen. Anhand der Längenänderung kann dann die Schwindung nach dem Trocknungsprozess sowie nach dem Brand bestimmt werden. Es wurden je 10 Probekörper mit je 3 Schwindmarken in Längsrichtung versehen. Die Ergebnisse ergeben sich aus dem Mittelwert von 10 Proben.

Biegezugfestigkeiten

Die Bestimmung der Biegezugfestigkeiten wurde sowohl an den getrockneten Rohlingen, als auch an den gebrannten Probekörpern vorgenommen. Auch hier wurden die Mittelwerte aus jeweils 10 Proben gebildet. Dies ermöglicht eine Aussage über den Einfluss der unterschiedlichen RC-Ziegel auf die Festigkeit des gebrannten Scherbens.

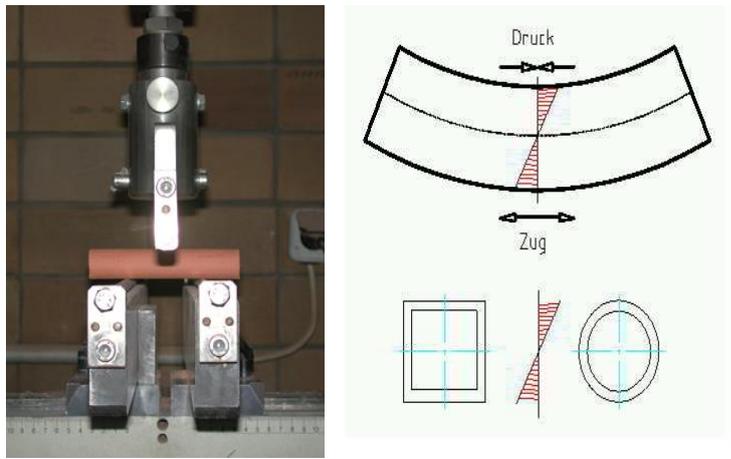


Abbildung 41: Messgerät Biegezugfestigkeit

7 Auswertungen / Ergebnisse

Die Ergebnisse werden im Folgenden zunächst für die Zugabemenge von 10% RC-Material dargestellt. Die Probekörper wurden in einem Gasofen entsprechend der jeweiligen Betriebsbrennkurven der Werke gebrannt, welche die Betriebsmassen zur Verfügung gestellt hatten. Abbildung 42 zeigt exemplarisch die Anordnung der Probekörper im Ofenraum.



Abbildung 42: Anordnung der Probekörper während des Brandes

7.1 RC-Zugabemenge 10%

Für alle drei Betriebsmassen wurde zunächst eine Menge von 10% RC-Ziegel zugegeben, wobei in der Auswahl der Zuschlagstoffe zum Teil unterschiedliche Materialien berücksichtigt wurden. Hierbei wurde unter anderem die räumliche Nähe von RC-Betrieben zu den entsprechenden Ziegelwerken berücksichtigt.

In den folgenden Auswertungen wurde die Nomenklatur so gewählt, dass in der Probekörperbezeichnung bereits ersichtlich ist, wie hoch die prozentuale Zugabemenge des jeweiligen RC-Materials ist. Beispielfhaft bedeutet AD10 es handelt sich um die Betriebsmasse A, (Dachziegelmasse) mit einer RC-Zugabe von 10%D (unvermörtelter Hintermauerziegel)

7.1.1 Ton A10

Ton A: RC-Material C, D (D1, D2), R, T

Da es sich bei dem Ton A um eine Dachziegelmasse handelt, ist der Einfluss der Zuschlagstoffe auf das optische Erscheinungsbild der entstehenden Probekörperoberfläche von entscheidender Bedeutung. Ausblühungen sind ebenso inakzeptabel wie Störungen der Oberflächenstruktur oder Farbveränderungen gegenüber der Nullmasse. Für Dachziegeltone ist eine hohe Trockenbiegezugfestigkeit sehr prozessrelevant, da sich die Rohlinge während der Fertigung weder verbiegen noch verziehen dürfen. Schwindungsbedingte Verformungen müssen vermieden werden. Auch der gebrannte Scherben muss eine hohe Festigkeit aufweisen, um den Anforderungen auf dem Dach gerecht zu werden. Dies betrifft sowohl die Durchtrittssicherheit, als auch die Widerstandsfähigkeit gegenüber angreifenden Windsoglasten. Die Frostsicherheit muss gewährleistet sein. Entscheidender Parameter ist hier die Wasseraufnahme des gebrannten Scherbens.

Zunächst wurde der Nullmasse 10 % Recyclingmaterial zugegeben. Die Ergebnisse werden im Folgenden für die unterschiedlichen RC-Materialien vergleichend gegenübergestellt.

| Material | Wasser- aufnahme [M.-%] | Rohdichte [kg/dm ³] | Trocken- schwindung [%] | Gesamt- schwindung [%] | Brenn- schwindung [%] | Brenn- verlust [M.-%] | BZ trocken [N/mm ²] | BZ gebrannt [N/mm ²] | |
|----------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|-------|
| A10 | A | 4,80 | 2,19 | 7,43 | 11,86 | 4,78 | 5,14 | 3,70 | 23,13 |
| | AC | 6,83 | 2,11 | 6,68 | 10,59 | 4,19 | 4,63 | 3,26 | 19,02 |
| | AD | 11,88 | 1,92 | 6,68 | 9,80 | 2,76 | 4,59 | 3,29 | 15,56 |
| | AD1 | 11,23 | 1,95 | 6,23 | 9,21 | 3,18 | 5,17 | 3,25 | 16,23 |
| | AD2 | 11,43 | 1,94 | 6,50 | 9,76 | 3,49 | 5,09 | 3,32 | 16,10 |
| | AR | 9,78 | 1,97 | 6,59 | 9,69 | 3,32 | 5,58 | 3,42 | 15,87 |
| | AT | 7,56 | 2,08 | 6,59 | 10,39 | 4,04 | 5,17 | 3,48 | 18,57 |

Tabelle 31: Zusammenstellung der Ergebnisse Ton A / 10% RC-Material

Die in Tabelle 31 zusammengefassten Ergebnisse korrelieren miteinander. So weisen die Probekörper, die unter Zugabe von Hintermauerziegelmaterial hergestellt wurden einerseits die geringste Rohdichte, andererseits die höchste Wasseraufnahme auf. Diese ist mit >11 M.-% zu hoch um eine Frostsicherheit zu garantieren. Die erzielten Festigkeiten sind ausreichend für Dachziegel. Die optische Begutachtung ist hier das limitierende Element, die einen Einsatz von 10 M.-% Hintermauermaterial ausschließt.

7.1.2 Ton E10

Ebenso wie für die Dachziegel gilt auch für die Vormauerziegel, dass die optische Qualität des Produktes von entscheidender Bedeutung ist. Farbabweichungen gegenüber der aktuellen Produktpalette sind vom Hersteller unerwünscht und werden vom Kunden nicht akzeptiert. Daher wurde auch in diesem Fall bei der Auswertung der Ergebnisse großer Wert auf Parameter wie das Ausblühverhalten gelegt. Auch in diesem Fall ist die optische Bewertung das limitierende Element.

| Material | Wasser- aufnahme [M.-%] | Rohdichte [kg/dm ³] | Trocken- schwindung [%] | Gesamt- schwindung [%] | Brenn- schwindung [%] | Brenn- verlust [M.-%] | BZ trocken [N/mm ²] | BZ gebrannt [N/mm ²] | |
|----------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|-------|
| E10 | E | 9,25 | 2,11 | 6,17 | 8,92 | 2,93 | 5,14 | 7,55 | 13,73 |
| | EC | 9,42 | 2,13 | 5,71 | 8,51 | 2,97 | 4,63 | 6,40 | 13,70 |
| | ED | 11,60 | 2,03 | 5,45 | 7,88 | 2,57 | 4,59 | 6,94 | 10,44 |
| | ED1 | 12,67 | 1,99 | 5,05 | 7,29 | 2,36 | 5,17 | 4,77 | 9,17 |
| | ED2 | 13,06 | 1,97 | 5,14 | 7,40 | 2,38 | 5,09 | 4,97 | 8,52 |
| | ER | 11,13 | 2,04 | 5,02 | 7,28 | 2,38 | 5,58 | 6,12 | 9,52 |
| | EV | 10,61 | 2,07 | 4,93 | 7,41 | 2,61 | 5,17 | 5,78 | 9,48 |

Tabelle 32: Zusammenstellung der Ergebnisse Ton E / 10% RC-Material

7.1.3 Ton U10

Für die Verwendung von RC-Ziegel im Bereich der Hintermauerziegel wurden andere Bewertungskriterien zugrunde gelegt. Hier sind Auswirkungen auf die optischen Eigenschaften weniger entscheidend, da es sich nicht um Sichtmauerwerk handelt. Eine Minderung der Festigkeitswerte kann jedoch durchaus ein Ausschlusskriterium darstellen.

| Material | Wasser- aufnahme [M.-%] | Rohdichte [kg/dm ³] | Trocken- schwindung [%] | Gesamt- schwindung [%] | Brenn- schwindung [%] | Brenn- verlust [M.-%] | BZ trocken [N/mm ²] | BZ gebrannt [N/mm ²] | |
|----------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------|
| U10 | U | 37,82 | 1,38 | 5,61 | 6,31 | 0,75 | 23,16 | 5,83 | 8,08 |
| | UC | 35,23 | 1,43 | 5,58 | 6,10 | 0,55 | 21,29 | 5,63 | 7,99 |
| | UD | 38,69 | 1,36 | 4,58 | 5,94 | 1,42 | 18,70 | 4,36 | 5,92 |
| | UD1 | 38,98 | 1,36 | 4,94 | 6,08 | 1,19 | 22,08 | 4,66 | 5,65 |
| | UD2 | 38,69 | 1,37 | 4,96 | 5,78 | 0,86 | 22,23 | 4,86 | 5,72 |
| | UH | 36,69 | 1,41 | 4,58 | 5,52 | 0,99 | 22,39 | 4,95 | 6,26 |
| | UR | 35,95 | 1,42 | 4,72 | 5,37 | 0,68 | 22,48 | 5,80 | 7,25 |

Tabelle 33: Zusammenstellung der Ergebnisse Ton U / 10% RC-Material

Die grafische Darstellung anhand der folgenden Diagramme veranschaulicht, wie sich die Zugabe von 10% der RC-Materialien auf die drei Produktklassen auswirkt.

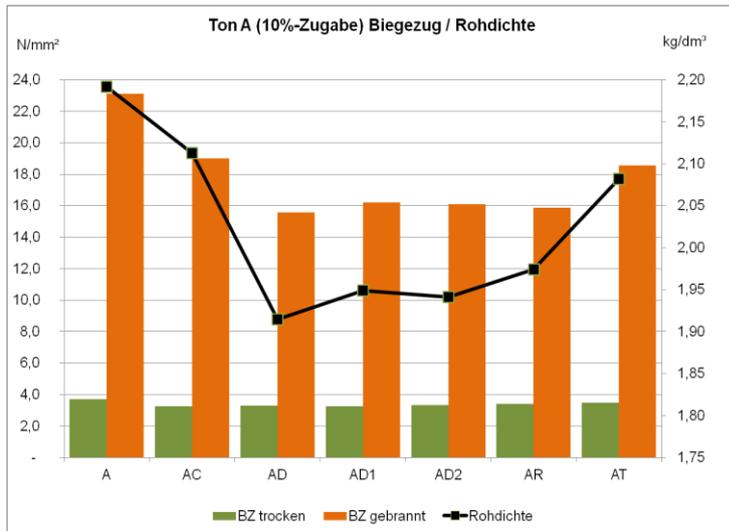


Abbildung 43: Ton A (10% Zugabe) Biegezug/Rohdichte

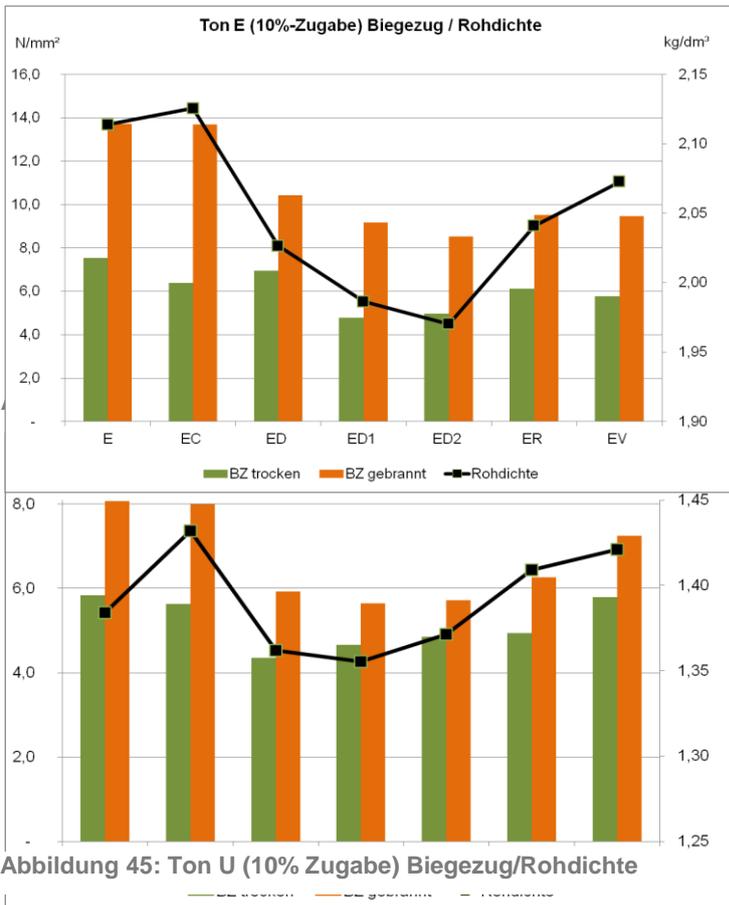


Abbildung 45: Ton U (10% Zugabe) Biegezug/Rohdichte

Ton A:

Erwartungsgemäß sinkt die Festigkeit umso stärker, je geringer die Rohdichte des eingesetzten RC-Materials ist, siehe Abbildung 43. Aber auch durch die Zugabe von 10% reinem RC-Dachziegelmaterial (C) kommt es zu einer deutlichen Minderung der Biegezugfestigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bindigkeit der plastischen Dachziegelmasse durch die Zugabe des als Magerungsmittel wirkenden RC-Ziegels, herabgesetzt wird.

Wie ebenfalls in Abbildung 43 ersicht-

lich, hat eine Zugabemenge von 10% RC-Material nur einen relativ geringen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit der getrockneten Rohlinge. Verfahrenstechnische Auswirkungen durch die Zugabe von RC-Material sind in Bezug auf die Festigkeit während der Trocknung nicht zu erwarten.

Ton E:

Durch die Zugabe von Dachziegelmaterial steigt die Rohdichte geringfügig an und die Festigkeit bleibt annähernd gleich. Alle weiteren Materialien haben auf den Ton E einen ähnlichen Effekt wie bei Ton A bereits dargestellt.

Ton U:

Durch die Zugabe von hartgebranntem RC-Material kann die Rohdichte des Hintermauerscherbens erhöht werden. Für Dachziegelmaterial als RC-Ziegel bei gleichbleibender Festigkeit. Dies kann für die Entwicklung von Schallschutzziegeln von Relevanz sein, da sich eine höhere Dichte positiv auf die Schallschutzeigenschaften auswirkt.

Das Schwindungsverhalten sowie der Brennverlust werden in den folgenden Grafiken (Abbildung 46 - Abbildung 48) dargestellt.

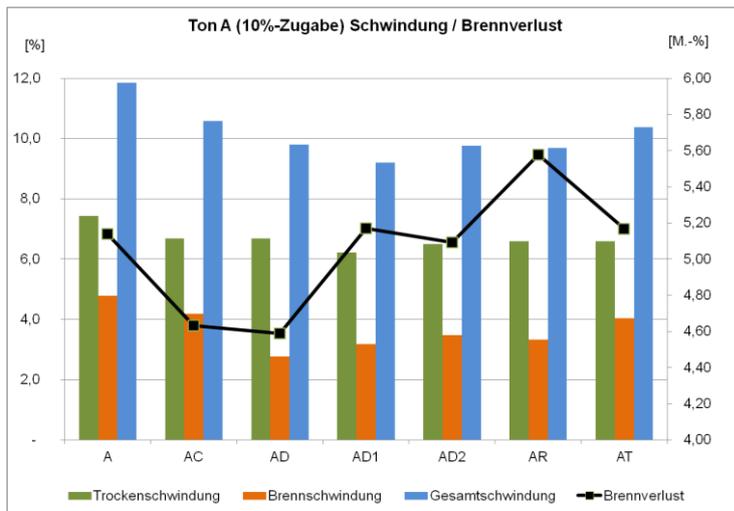


Abbildung 46: Ton A10, Schwindung Brennverlust

Der bekannte Effekt, dass die Schwindung durch die Zugabe von Magerungsmitteln vermindert wird, ist auch für die ermittelten Ergebnisse nachvollziehbar.

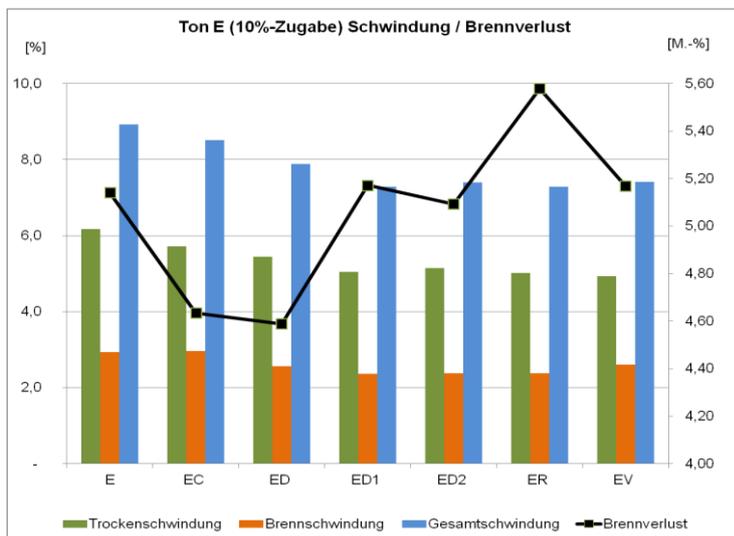


Abbildung 47: Ton E10, Schwindung Brennverlust

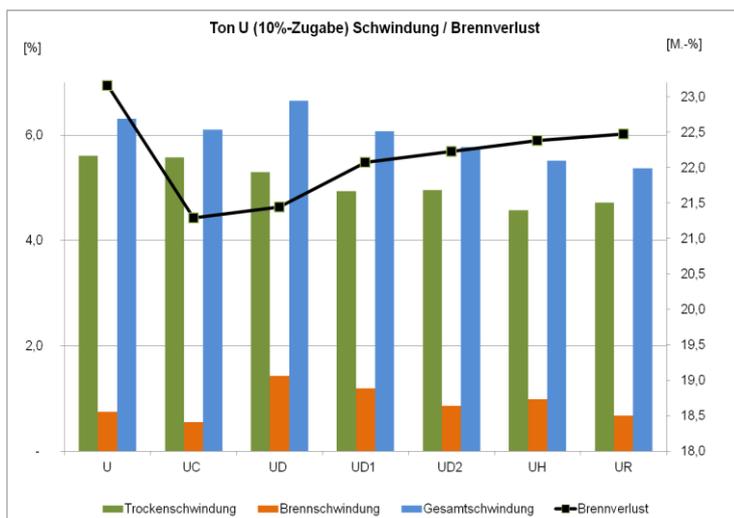


Abbildung 48: Ton U10, Schwindung Brennverlust

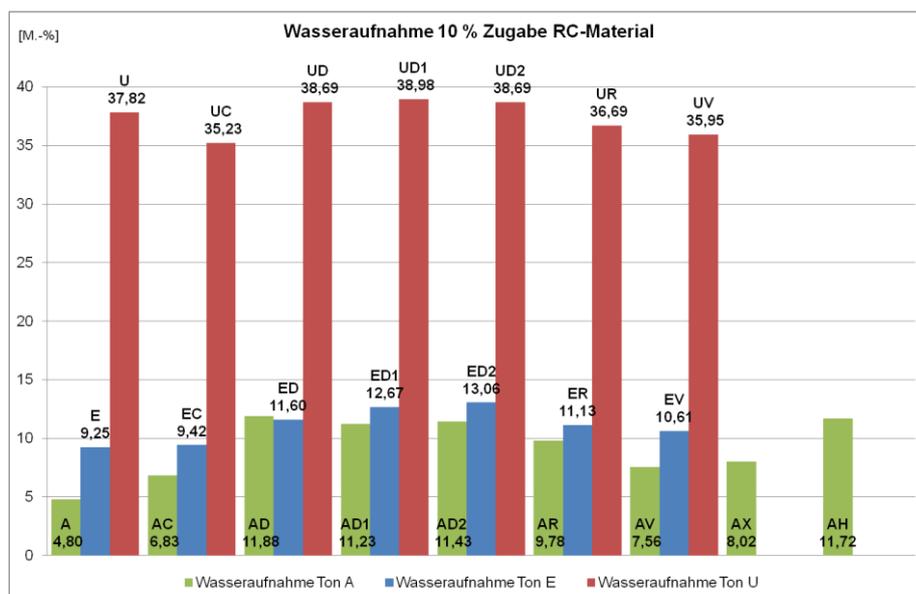


Abbildung 49: Vergleich WA für Ton A, E und U

Nach der Auswertung der Ergebnisse aus dieser Versuchsreihe wurde für alle drei Betriebsmassen die Festlegung getroffen in wie weit die Zugabemenge für die folgenden Verpressungen gesteigert werden kann, oder gesenkt werden muss. Entscheidend ist unter Umständen, neben den Auswirkungen auf das finale Produkt, bereits in diesem Prozessschritt der Einfluss auf die Plastizität und damit die Verpressbarkeit der Mischungen.

Für die Dachziegelmasse A wurde entschieden, dass aufgrund der optischen Beeinträchtigung die Zugabemenge von RC-Ziegelmaterial auf 3% hart gebranntes Material limitiert wird.

Für die Vormauerziegelmasse E wurde differenziert entschieden, da die Beeinträchtigung von der Sortenreinheit des RC Materials abhängig war.

Für die Hintermauerziegelmasse wurde entschieden, dass für alle RC-Materialien die Zugabemenge auf 25%-RC-Ziegel erhöht werden sollte.

7.1.4 Eluatanalysen

Im Rahmen der Eluatanalysen wurde das Auslaugverhalten der Proben bei einer Zugabe von 10% RC-Materialien untersucht. Sowohl die Werte bezüglich der Schwermetalle als auch der von löslichen Salzen, können als unbedenklich eingestuft werden. Dies ist der Fall, obwohl die Wahl der Korngröße in der Probenvorbereitung deutlich feiner gewählt wurde, als in den einschlägigen Prüfvorschriften gefordert. Hierdurch ist die der Elution zur Verfügung stehende Oberfläche erheblich größer als es bei der in den einschlägigen Normen geforderten Korngröße der Fall wäre.

| Probe | Nitrat | Chlorid | Sulfat | Arsen | Blei | Cadmium | Kupfer | Nickel | Quecksilber | Zink |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Eluat mg/L |
| A | < 0,3 | 0,6 | 17 | 0,024 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,007 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0490 |
| AC | < 0,3 | 0,6 | 17 | 0,042 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | < 0,0050 |
| AD | < 0,3 | 0,6 | 21 | 0,051 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0440 |
| AD1 | < 0,3 | 0,6 | 10 | 0,009 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0180 |
| AD2 | < 0,3 | 0,6 | 24 | 0,056 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0068 |
| AH | < 0,3 | 0,6 | 21 | 0,00098 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0180 |
| AR | < 0,3 | 0,6 | 15 | < 0,0005 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0059 |
| AT | < 0,3 | 0,6 | 21 | 0,034 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0050 |
| AX | < 0,3 | 0,6 | 0,5 | < 0,0005 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0130 |
| E | < 0,3 | 0,6 | 56 | 0,047 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0080 |
| EC | < 0,3 | 0,6 | 51 | 0,051 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0060 |
| ED | < 0,3 | 0,6 | 110 | 0,087 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0310 |
| ED1 | < 0,3 | 0,6 | 110 | 0,051 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | 0,1100 |
| ED2 | < 0,3 | 0,6 | 130 | 0,100 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0560 |
| ER | < 0,3 | 0,6 | 110 | 0,0041 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0140 |
| EV | < 0,3 | 0,6 | 110 | 0,080 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | < 0,0050 |
| U | < 0,3 | 1,2 | 1,5 | 0,0012 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0230 |
| UC | < 0,3 | 1,1 | 12 | 0,0011 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0160 |
| UD | < 0,3 | 1,4 | 20 | 0,00079 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,003 | 0,001 | < 0,0002 | 0,1000 |
| UD1 | < 0,3 | 1,4 | 15 | < 0,0005 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,002 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0160 |
| UD2 | < 0,3 | 1,1 | 42 | 0,00054 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0094 |
| UH | < 0,3 | 1,8 | 36 | < 0,0005 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,0160 |
| UR | < 0,3 | 1,8 | 21 | < 0,0005 | < 0,001 | < 0,0003 | 0,001 | 0,001 | < 0,0002 | 0,1200 |

Tabelle 34: Eluatanalysen nach Zugabe von 10% RC-Ziegel

7.2 RC-Zugabemenge 3% bzw. 25%

7.2.1 Ton A, 3%-Zugabe RC-Material (A3)

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse, insbesondere aufgrund der optischen Beurteilung des gebrannten Scherbens, wurde festgelegt, dass der Dachziegelmasse während des weiteren Vorgehens eine maximale Zugabemenge von 3% RC-Ziegelmaterial beigemischt wird, unabhängig davon um welches RC-Material es sich dabei handelt. Die Ergebnisse werden wiederum tabellarisch dargestellt.

| Material | Wasser- aufnahme [M.-%] | Rohdichte [kg/dm ³] | Trocken- schwindung [%] | Gesamt- schwindung [%] | Brenn- schwindung [%] | Brenn- verlust [M.-%] | BZ trocken [N/mm ²] | BZ gebrannt [N/mm ²] |
|----------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|
| A 3 | A | 4,89 | 2,14 | 8,79 | 13,39 | 4,88 | 4,80 | 24,63 |
| | AC | 5,95 | 2,09 | 8,53 | 12,52 | 4,25 | 4,40 | 20,96 |
| | AD | 6,52 | 2,06 | 8,16 | 11,90 | 3,99 | 4,89 | 21,36 |
| | AD1 | 6,72 | 2,06 | 7,95 | 11,79 | 4,19 | 4,69 | 20,02 |
| | AD2 | 7,02 | 2,03 | 8,13 | 12,52 | 4,44 | 4,92 | 18,86 |
| | AR | 6,10 | 2,08 | 8,01 | 11,74 | 4,08 | 5,01 | 18,63 |
| | AT | 5,44 | 2,11 | 8,30 | 12,50 | 4,46 | 4,74 | 21,30 |

Tabelle 35: Zusammenstellung der Ergebnisse Ton A / 3% RC-Material

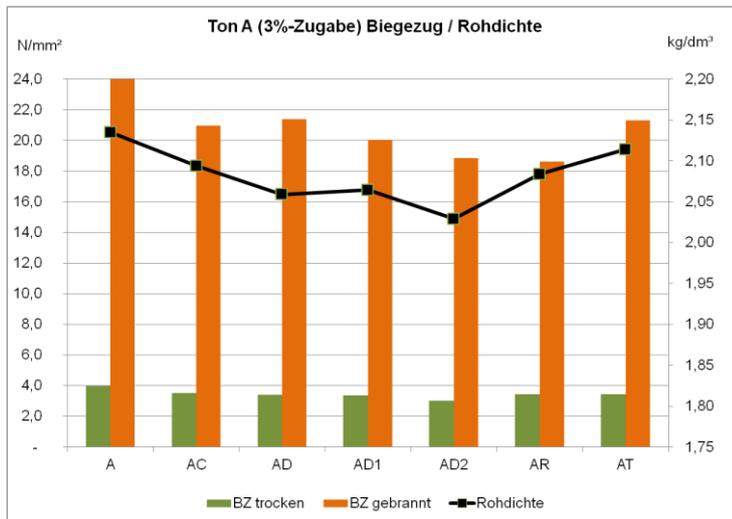


Abbildung 50: Ton A3, Biegezugfestigkeit, Rohdichte

Auch im Fall der reduzierten Zugabemenge von 3% RC-Material kann ein Einfluss auf die Biegezugfestigkeiten und die Rohdichte beobachtet werden, jedoch fällt dieser wie erwartet geringer aus. Aus dieser Sicht besteht kein Hinderungsgrund für die Verwendung von 3% RC-Ziegelmaterial, unabhängig von dessen Beschaffenheit. Jedoch kommt hier der optische Einfluss zum Tragen, siehe Abbildung 51 Die optische Begutachtung zeigt, dass der Einsatz von Hintermauerziegelmaterial aufgrund des enthaltenen Kalkanteiles problematisch ist. Es kommt zu sogenannten „Kalkspatzen“ auch bei dem Material, das keine Putz- oder Mörtelanhaftungen aufweist (AD3%). Daher ist eine Limitierung der Zugabe von RC- Ziegelmaterial für Dachziegelmassen ratsam. Diese sollte zum einen berücksichtigen, dass nur sortenreines hochgebranntes Material Verwendung finden sollte, zum anderen ist eine maximale Zugabemenge von 3% zu empfehlen.

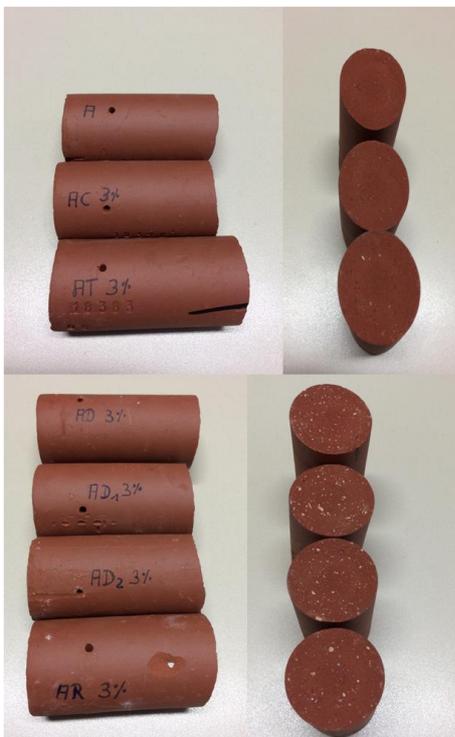


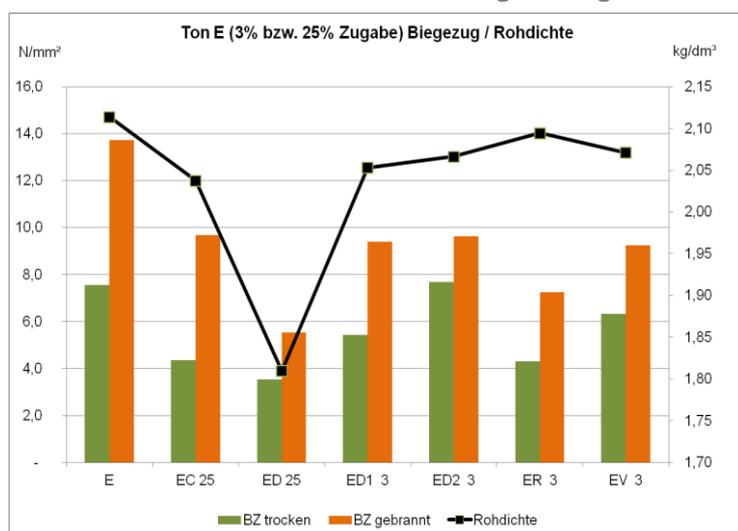
Abbildung 51: Foto Probekörper A3

7.2.2 Ton E 3% bzw. 25%-Zugabe RC-Material (E3, E25)

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse, insbesondere aufgrund der optischen Beurteilung des gebrannten Scherbens, wurde festgelegt, dass der Vormauerziegelmasse während des weiteren Vorgehens unterschiedliche Mengen RC-Ziegel zugegeben werden sollten, je nach Herkunft und Qualität. Die Ergebnisse werden wiederum tabellarisch dargestellt.

| Material | Wasser- aufnahme [M.-%] | Rohdichte [kg/dm ³] | Trocken- schwundung [%] | Gesamt- schwundung [%] | Brenn- schwundung [%] | Brenn- verlust [M.-%] | BZ trocken [N/mm ²] | BZ gebrannt [N/mm ²] |
|----------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|
| E | E | 9,25 | 2,11 | 6,17 | 8,92 | 2,93 | 5,14 | 13,73 |
| | EC 25 | 9,66 | 2,04 | 4,50 | 6,68 | 2,28 | 5,13 | 9,69 |
| | ED 25 | 16,38 | 1,81 | 4,27 | 5,49 | 1,28 | 6,14 | 5,55 |
| | ED1 3 | 8,54 | 2,05 | 5,03 | 6,96 | 2,03 | 6,29 | 9,40 |
| | ED2 3 | 8,47 | 2,07 | 4,44 | 6,12 | 1,76 | 4,78 | 9,62 |
| | ER 3 | 7,97 | 2,09 | 4,14 | 6,12 | 2,06 | 4,90 | 7,26 |
| | EV 3 | 8,18 | 2,07 | 4,88 | 6,73 | 1,95 | 4,74 | 9,26 |

Tabelle 36 Zusammenstellung der Ergebnisse Ton E / 3% bzw. 25% RC-Material

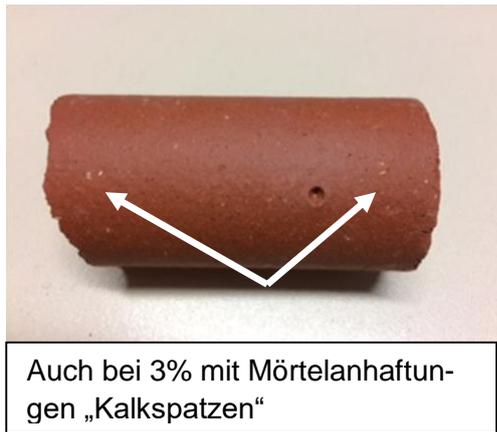


Durch die Zugabe von RC-Ziegel sinken in allen Fällen die Biegezugfestigkeiten im Vergleich zur Ausgangsmasse. Dies gilt sowohl für die getrockneten, als auch für die gebrannten Probekörper und zwar auch nach der Verringerung der Zugabemenge auf 3%. Während die Zugabe von 25% RC-Material C bezogen auf die Rohdichte und die Festigkeitswerte noch vertretbar ist, kann die Zugabemenge von 25% RC-Material D ausgeschlossen werden.

Abbildung 52: Ton E3, E25, Biegezugfestigkeit, Rohdichte

Die optische Begutachtung kommt zu einem, gleichlautenden Ergebnis.





E+25% C

E+25% D

E+ 3% R

Abbildung 53: Foto ER3, EC25, ED25, optische Begutachtung



Nach der Prüfung der Wasseraufnahme kam es im Fall der Zugabe von 25% RC-Material D zu erheblichen Ausblühungen, wie sie in der nebenstehenden Abbildung 54 zu sehen sind. Diese stellen definitiv ein Ausschlusskriterium für die Zugabe von 25% RC- D zur Herstellung von Vormauerziegeln dar.

Abbildung 54: Ausblühungen ED 25

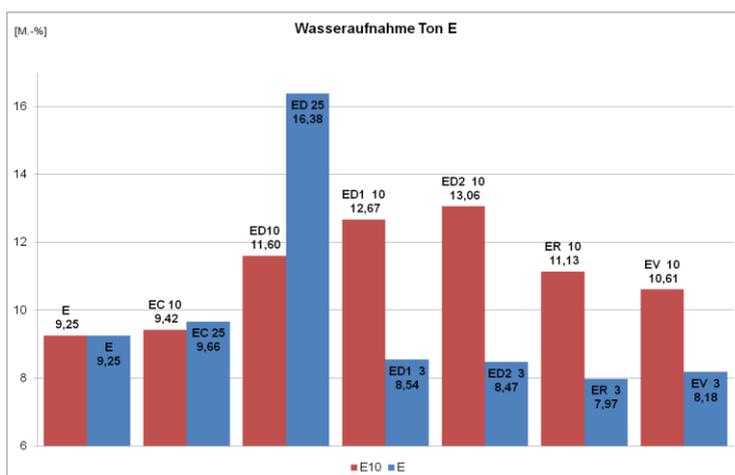


Abbildung 55: Wasseraufnahme Ton E, nach Zugabe von 3%, 10% und 25% verschiedener RC-Massen

Die Wasseraufnahme des gebrannten Scherbens stellt im Bereich der Vormauerziegel ein entscheidendes Qualitätskriterium dar, da sie Einfluss auf die Frostbeständigkeit hat. Vergleicht man die Werte für die Zugabe von Dachziegelmaterial C miteinander, so ist festzustellen, dass kaum ein Einfluss zu beobachten ist. Auch die 25%ige Zugabe ist im Hinblick auf die Frostbeständigkeit als unkritisch zu bewerten.

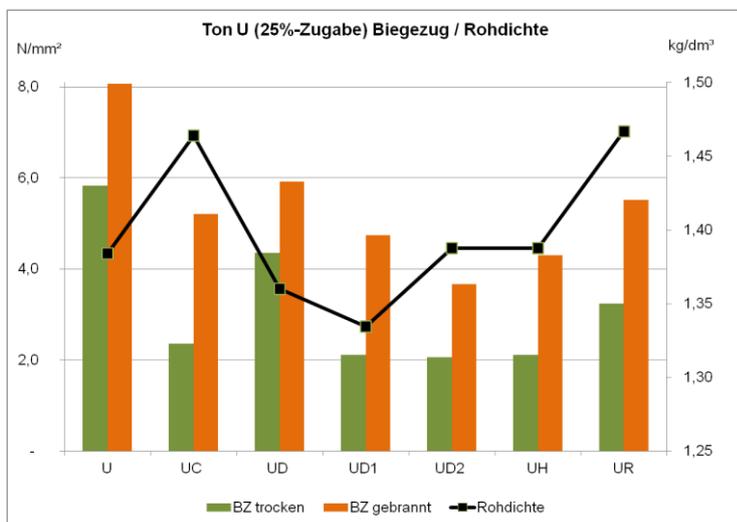
7.2.3 Ton U 25%-Zugabe RC-Material (U25)

Anhand der Untersuchungsergebnisse die für die Zugabemenge von 10% RC-Ziegel zur Betriebsmasse U (Hintermauerziegel) vorlagen, wurde für den weiteren Verlauf eine Zugabemenge von 25% aller ausgewählten RC-Ziegel-Qualitäten festgelegt.

Die Ergebnisse werden in Tabelle 37 dargestellt.

| Material | Wasser- aufnahme [M.-%] | Rohdichte [kg/dm ³] | Trocken- schwindung [%] | Gesamt- schwindung [%] | Brenn- schwindung [%] | Brenn- verlust [M.-%] | BZ trocken [N/mm ²] | BZ gebrannt [N/mm ²] |
|----------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|
| U25 | U | 37,82 | 1,38 | 5,61 | 6,31 | 0,75 | 23,16 | 5,83 |
| | UC | 32,19 | 1,46 | 4,25 | 5,73 | 1,55 | 17,53 | 2,35 |
| | UD | 41,46 | 1,36 | 4,58 | 5,94 | 1,42 | 18,70 | 4,36 |
| | UD1 | 39,54 | 1,33 | 3,96 | 5,71 | 1,82 | 20,30 | 2,11 |
| | UD2 | 39,80 | 1,39 | 4,02 | 5,76 | 1,81 | 20,63 | 2,06 |
| | UH | 36,49 | 1,39 | 4,09 | 5,72 | 1,71 | 18,88 | 2,11 |
| | UR | 32,49 | 1,47 | 4,41 | 5,02 | 0,64 | 20,45 | 3,24 |

Tabelle 37: Zusammenstellung Ergebnisse U 25% RC-Ziegel



Durch die Zugabe von 25 % RC-Ziegel sinken in allen Fällen die Biegezugfestigkeiten erwartungsgemäß noch weiter, im Vergleich zur Zugabe von 10%. Dies gilt sowohl für die getrockneten, als auch für die gebrannten Probekörper. Der negative Einfluss von Mörtel und Putzanhaftungen auf die Festigkeiten ist klar erkennbar. Daher kann klar die Empfehlung ausgesprochen werden, möglichst sortenreines RC-Material anzustreben.

Abbildung 56: Ton E3, E25, Biegezug, Rohdichte

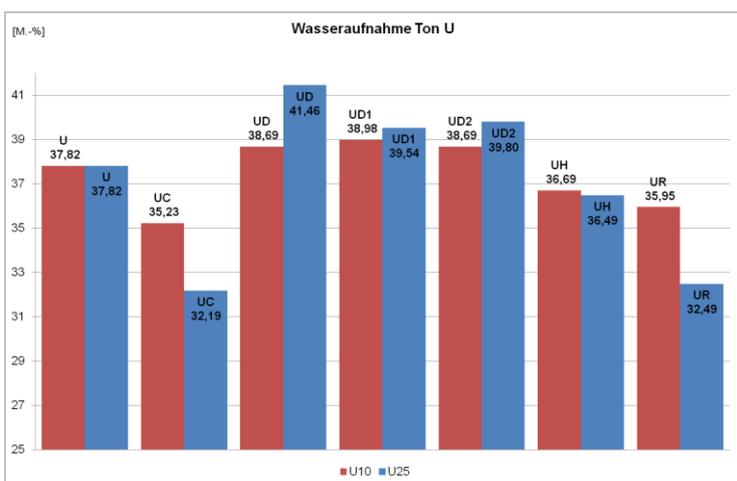


Abbildung 57: Wasseraufnahme Vergleich U10-U25



Abbildung 58: Foto U+25%-RC Materialien

Austreibungen

In

Tabelle 38 ist das Austreibungsverhalten der hergestellten Versätze dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass die Erstellung der Austreibungskurven sehr zeitintensiv ist, wurden nur diejenigen Proben untersucht, deren optisches Erscheinungsbild nicht sofort ein Ausschlusskriterium dargestellt hat. Verglichen mit der TA-Luft liegen die ermittelten Werte zum Teil oberhalb der Grenzwerte, es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Ziegelwerke über die erforderlichen Schüttschichtfilter und Rauchgasnachverbrennungsanlagen verfügen, um eine Grenzwertüberschreitung sicher zu vermeiden.

| | C | | SOx | | HF | | HCI | |
|-------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| | Integral mg/kg | Maximalwert mg/m³ | Integral mg/kg | Maximalwert mg/m³ | Integral mg/kg | Maximalwert mg/m³ | Integral mg/kg | Maximalwert mg/m³ |
| A | 3,1 | 1,2 | 501,7 | 167,1 | 135,3 | 47,4 | 216,2 | 125,3 |
| AT-3 | 11,1 | 3,3 | 584,4 | 210,2 | 112,8 | 41,5 | 90,5 | 28,5 |
| AC-3 | 7,4 | 5,9 | 534,3 | 200,2 | 128,6 | 46,5 | 83,5 | 19,9 |
| AR-3 | 90,8 | 16,4 | 239,0 | 98,0 | 229,5 | 72,7 | 88,7 | 19,3 |
| AT-10 | 74,0 | 28,2 | 541,0 | 215,4 | 256,9 | 82,5 | 86,7 | 16,9 |
| AC-10 | 131,3 | 51,1 | 908,3 | 389,8 | 260,3 | 75,5 | 81,4 | 17,0 |
| AR 10 | 8,2 | 35,7 | 262,9 | 94,8 | 151,4 | 42,0 | 88,4 | 20,3 |
| E | 1.478,2 | 516,1 | 3.879,7 | 1.339,1 | 270,9 | 68,1 | 92,4 | 13,7 |
| EC 10 | 531,2 | 193,1 | 3.821,0 | 916,6 | 185,2 | 37,3 | 34,6 | 11,6 |
| ED 10 | 564,1 | 169,6 | 3.280,3 | 939,4 | 227,7 | 51,8 | 172,9 | 26,5 |
| ED1-10 | 1.834,9 | 470,3 | 1.696,9 | 462,9 | 124,4 | 27,3 | 31,2 | 3,3 |
| ED2-10 | 1.469,4 | 358,7 | 2.668,1 | 927,4 | 230,3 | 41,4 | 48,3 | 6,5 |
| EV-10 | 220,6 | 48,4 | 2.639,2 | 690,7 | 185,5 | 41,8 | 45,0 | 9,7 |
| EC 25 | 51,5 | 8,6 | 3.914,7 | 900,9 | 164,9 | 27,8 | 48,4 | 8,8 |
| ER 25 | 47,4 | 7,5 | 3.173,5 | 744,2 | 189,5 | 35,8 | 48,0 | 4,6 |
| U | 4.116,3 | 4.262,0 | 30,1 | 8,4 | 66,9 | 16,3 | 217,2 | 121,5 |
| UC10 | 4.319,7 | 5.911,1 | 64,7 | 12,8 | 77,7 | 19,8 | 70,8 | 20,5 |
| UD 10 | 5.126,1 | 7.287,5 | 32,4 | 6,4 | 88,4 | 20,5 | 120,3 | 25,3 |
| UD1-10 | 5.363,5 | 9.360,6 | 75,5 | 18,5 | 71,1 | 23,4 | 53,7 | 20,4 |
| UD2-10 | 3.682,5 | 7.013,1 | 71,4 | 19,3 | 77,8 | 26,8 | 39,9 | 8,4 |
| UH 10 | 5.405,6 | 6.501,7 | 45,0 | 30,1 | 93,2 | 30,1 | 44,9 | 8,1 |
| UR 10 | 3.883,5 | 5.050,2 | 32,5 | 6,2 | 84,2 | 27,6 | 34,1 | 6,8 |
| UC 25 | 1.942,1 | 3.041,6 | 136,9 | 28,3 | 56,0 | 16,1 | 35,9 | 7,8 |
| UD25 | 3.484,9 | 2.805,6 | 113,2 | 38,6 | 97,5 | 29,0 | 81,8 | 30,4 |
| UD1-25 | 1.916,3 | 3.191,4 | 93,9 | 17,2 | 100,8 | 29,3 | 54,0 | 9,4 |
| UD2-25 | 1.705,0 | 2.176,9 | 104,2 | 15,7 | 101,9 | 29,8 | 74,4 | 13,8 |
| Grenzwerte laut TA-Luft | | 20,00 | 500,00 | | 5,00 | | 30,00 | |

Tabelle 38: Tabellarische Darstellung des Austreibungsverhaltens der hergestellten Probekörper.

Optische Beurteilung der Probekörper

| | Beurteilung der Proben anhand von sichtbaren Ausblühungen | | | | | | |
|----|---|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| | A | | E | | | U | |
| | 3 % Zugabe | 10 % Zugabe | 3 % Zugabe | 10% Zugabe | 25 % Zugabe | 10 % Zugabe | 25 % Zugabe |
| C | keine | geringe | keine | geringe | keine | keine | keine |
| D | keine | geringe | keine | geringe | keine | keine | keine |
| D1 | keine | geringe | keine | geringe | keine | keine | keine |
| D2 | keine | geringe | keine | geringe | keine | keine | keine |
| R | keine | geringe | keine | geringe | keine | keine | keine |
| T | keine | geringe | keine | geringe | keine | keine | keine |
| H | keine | geringe | keine | geringe | keine | keine | keine |
| V | keine | geringe | keine | geringe | keine | keine | keine |
| X | keine | geringe | keine | geringe | keine | keine | keine |

| |
|---------------------------------------|
| keine optische Beeinträchtigung |
| geringe optische Beeinträchtigung |
| stärkere optische Beeinträchtigung |
| Starke optische Beeinträchtigung |
| sehr starke optische Beeinträchtigung |

Abbildung 59: optische Beurteilung der Probekörper, tabellarische Aufstellung

Zusammenfassung:

Die Untersuchungen haben ergeben, dass der Einsatz von RC-Ziegelmaterial aus Mauerwerksbruch als Zuschlagstoff für die Ziegelproduktion grundsätzlich möglich ist. Als limitierender Faktor für die Zugabemenge hat sich die Auswirkung auf das optische Erscheinungsbild des gebrannten Scherbens herausgestellt. Es kam zum Teil zu erheblichen Beeinträchtigungen aufgrund von Ausblühungen, während die weiteren untersuchten Parameter, wie z.B. die Biegezugfestigkeiten, sich noch in akzeptabler Größenordnung befanden. Je nach Produktgruppe unterscheiden sich die Zugabemengen an RC-Material, die problemlos wieder in den Produktionsprozess eingebunden werden können, erheblich. Auch die Qualität des RC-Materials, das verwertet werden kann, muss sich nach dem jeweiligen Einsatz richten. Während im Bereich der Hintermauerziegel eine Zugabemenge von bis zu 25% RC-Material gut möglich ist, beschränkt sie sich für Dachziegel auf höchstens 3%. Zusätzlich stellt sich die Anforderung, dass für die Dachziegelproduktion ausschließlich sortenreines, hart gebranntes RC-Material geeignet ist. Die Anforderungen sind dem Technischen Merkblatt Ziegelrecycling zu entnehmen. Das Technische Merkblatt ist diesem Schlussbericht angefügt.

8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit ist entscheidend für die endgültige Umsetzung in der Ziegelindustrie. Die im Rahmen dieses Vorhabens ermittelten Ergebnisse lassen sich auf die Ziegelindustrie übertragen. Dennoch wird es je nach Standort der Werke immer wieder notwendig sein, die individuellen, lokalen Gegebenheiten zu berücksichtigen. Das Merkblatt liefert hier in jedem Fall Anhaltspunkte, ob die Analyse der standortbedingten Parameter überhaupt zielführend ist.

Einsparpotentiale durch den Einsatz von RC-Material

Bei der Errichtung, Instandhaltung oder dem Rückbau von Gebäuden kommt es zur Entstehung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle, welche aufgrund der hohen Anfallmengen ein immenses Rohstofflager darstellen. Da ein Großteil dieser Materialien als verwertbar gilt, besteht ein hohes Potenzial zur Gewinnung sekundärer Rohstoffe aus diesen Materialien. Diese können entweder direkt wiederverwertet oder als Rohstoff genutzt werden. Sehr heterogenes Material muss durch geeignete Aufbereitungs- und Trennverfahren für eine Wiederverwertung bzw. weitere Recyclingprozesse vorkonfektioniert werden. Ziel ist die Senkung des Bedarfs an Primärrohstoffen und die langfristige Umwandlung der Abfallwirtschaft in eine Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft. Für die Gewinnung der Primärrohstoffe werden die natürlichen Ressourcen ausgebeutet. Durch die Nutzung von Recycling –Baustoffen in einem zweiten Lebenszyklus können primäre Ressourcen nachhaltig geschont werden.

Ebenfalls wird Deponieraum immer knapper, weshalb das Recycling von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen zur Reduzierung nötiger Deponiekapazitäten weiter forciert werden muss. Grundsätzlich gilt: Nach der Vermeidung hat die Verwertung von Abfall gesetzlichen Vorrang vor der Entsorgung und ist pflichtgemäß zu erfüllen soweit sie technisch machbar und wirtschaftlich zumutbar ist.

Im Rahmen dieses Projektes sollte anhand von Mauerwerksbruch die technische Machbarkeit zur Wiederverwendung von recyceltem Ziegelmaterial in der Ziegelindustrie aufgezeigt werden.

Eine wirtschaftliche Betrachtung soll den Einsatz von recyceltem Ziegelmaterial in der Ziegelindustrie beurteilen. In Abbildung 60 sind die entsprechenden zu betrachtenden Rahmenbedingungen schematisch aufgeführt, die in ein Kostenmodell Eingang finden müssen.

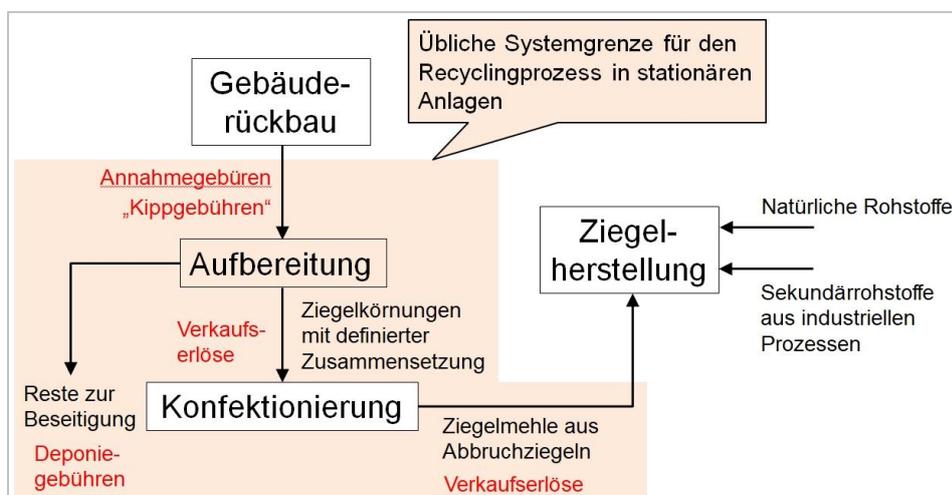


Abbildung 60: Kostenmodell Einsatz Ziegel-RC-Material (schematisch)

In Tabelle 39 und Tabelle 40: Fortsetzung - Auszüge aus den Preislisten für die Annahme von Bauschutt verschiedener stationärer Recyclinganlagen sind Preislisten „Annahme von Bauschutt verschiedener stationärer Recyclinganlagen“ sowie die entsprechenden Abfallschlüsselnummern aufgeführt [10] wie sie nach einem Gebäuderückbau anfallen (Kippgebühren). Die Zahlen stammen aus dem Jahr 2016 und somit ist davon auszugehen, dass die Preise bis heute eine weitere Steigerung erfahren haben dürften. Wie man erkennen kann, bestehen zwischen den einzelnen Bundesländern deutliche preisliche Unterschiede.

| Bundesland | Jahr | Beton kleinformatig | Beton Übergröße | Dachziegel, Ziegel ohne Mörtel | Bauschutt, Ziegel, Klinker etc. - ohne Sortierreste | Bauschutt, Ziegel, Klinker etc. mit geringen Sortierresten | Gemischte Bau- und Abbruchabfälle (mineralische Anteile mind. 90%) | Gasbeton, Porenbeton, Leichtbeton | Gasbeton, Porenbeton, Leichtbeton mit geringen Sortierresten | Baustoffe auf Gipsbasis |
|------------|------|---------------------|-----------------|--------------------------------|---|--|--|-----------------------------------|--|-------------------------|
| | | AVV: 170101 | 170101 | 170102 | 170101, 170102 oder 170107 | | | 170101,170107,170802 | 170802 | |
| NRW 1 | 2012 | 3,70 | 21,00 | - | 6,50 | 12,00 | 107,50 | 25,00 | 40,00 | - |
| | 2014 | 6,00 | 28,50 | - | 12,50 | 22,50 | 107,50 | 35,00 | 50,00 | - |
| NRW 2 | 2007 | 5,40 | auf Anfrage | - | 5,40 | 8,50 | - | - | - | - |
| | 2012 | 5,40 | auf Anfrage | - | 5,40 | 8,50 | 35,00 | - | - | 60,00 |
| NRW 3 | 2012 | 6,00 | auf Anfrage | 9,50 | 14,90 | 16,90 | - | 12,50 | 14,50 | 72,50 |
| | 2014 | 7,00 | auf Anfrage | 10,75 | 16,00 | 18,40 | - | 15,00 | 16,50 | 72,50 |
| ST | 2012 | 4,00 | 20,00 | 9,00 | 10,00 | 25,00 | - | 10,00 | - | - |
| | 2015 | 4,00 | 20,00 | 14,20 | 25,00 | 25,00 | - | 14,00 | - | - |
| BY 1 | 2012 | 6,80 | 24,00 | 8,20 | 9,50 | 18,50 | 42,00 | 59,00 | - | 78,00 |
| | 2015 | 7,50 | 28,00 | 9,50 | 12,50 | 24,90 | 58,00 | 80,00 | - | 120,00 |
| BY 2 | 2012 | 5,90 | 8,90 | 4,90 | 8,90 | 14,00 | 23,00 | - | - | 73,00 |
| | 2014 | - | - | 4,90 | 8,90 | - | - | - | - | - |
| TH | 2012 | 4,80 | 24,50 | - | 12,50 | 25,00 | 42,00 | - | - | - |
| | 2014 | 6,72 | 29,41 | - | 21,01 | - | - | - | - | - |

Tabelle 39: Auszüge aus den Preislisten für die Annahme von Bauschutt verschiedener stationärer Recyclinganlagen [6]

| Bundesland | Jahr | Beton kleinformatig | Beton Übergröße | Dachziegel, Ziegel ohne Mörtel | Bauschutt, Ziegel, Klinker etc. - ohne Sortierreste | Bauschutt, Ziegel, Klinker etc. mit geringen Sortierresten | Gemischte Bau- und Abbruchabfälle (mineralische Anteile mind. 90%) | Gasbeton, Porenbeton, Leichtbeton | Gasbeton, Porenbeton, Leichtbeton mit geringen Sortierresten | Baustoffe auf Gipsbasis |
|------------|------|---------------------|-----------------|--------------------------------|---|--|--|-----------------------------------|--|-------------------------|
| | | AVV: 170101 | 170101 | 170102 | 170101, 170102 oder 170107 | | | 170101,170107,170802 | 170802 | |
| BW 1 | 2011 | 5,90 | 32,00 | 6,00 | 18,00 | 30,00 | mittlerer Anteil nicht verwertbarer Bauschutt | 40,00 | 80,00 | 80,00 |
| | 2014 | 6,50 | 35,00 | 6,00 | 25,00 | 35,00 | Bauschutt | 45,00 | 80,00 | 80,00 |
| BW 2 | 2012 | 5,60 | 25,00 | 5,00 | 6,70 | - | - | 45,00 | - | 55,00 |
| | 2015 | 6,30 | 28,00 | 6,00 | 9,50 | - | - | 60,00 | - | 60,00 |
| BW 3 | 2013 | 3,00 | 20,00 | 5,80 | 7,50 | 15,00 | - | - | - | - |
| | 2015 | 3,00 | 20,00 | 5,80 | 10,00 | 18,00 | - | - | - | - |

Tabelle 40: Fortsetzung - Auszüge aus den Preislisten für die Annahme von Bauschutt verschiedener stationärer Recyclinganlagen [6]

In Tabelle 41 sind die minimalen und maximalen Annahmegebühren für Ziegelmaterialien zusammengefasst. Am günstigsten sind die Annahmegebühren für das Material, welches sich mit relativ geringem Aufwand in verkaufsfähige Produkte weiterverarbeiten lässt. Bei den Ziegelprodukten sind dies vor allem Dachziegel und Ziegel ohne Mörtelanhaftungen.

| | Min [€/t] | Max [€/t] |
|---|-----------|-----------|
| Dachziegel, Ziegel ohne Mörtel | 4,90 | 14,20 |
| Bauschutt, Ziegel, Klinker ohne Sortierreste | 5,40 | 25,00 |
| Bauschutt, Ziegel, Klinker mit geringen Sortierresten | 8,50 | 35,00 |

Tabelle 41: Zusammenfassung - Preise Annahme Ziegelmaterial (min., max.)

Weitere Kosten fallen durch die Aufbereitung und die Konfektionierung von Bauschutt bzw. Mauerwerkbruch an. Durch die Aufbereitung kommt es zur Aufwertung des Bauschutts und es werden Recycling-Baustoffe mit definierten Eigenschaften erzeugt. Die Haupteigenschaft ist hierbei meist eine zu erreichende Korngröße bzw. Korngrößenverteilung, die dem geplanten Einsatzzweck entsprechen muss. Weitere Aspekte sind die Materialzusammensetzung und physikalische Eigenschaften. Wichtig ist, dass keine Störstoffe enthalten sind, die den Einsatz des RC-Materials einschränken, hierzu gehören beispielsweise mörtel- und gipshaltige Baustoffe, die zu Verunreinigungen des Ausgangsmaterials führen können. Im Endprodukt würde sich dies in unerwünschten Ausblühungen äußern.

Die Qualität der erzeugten RC-Materialien ist abhängig vom Zustand des vorhandenen Bauschuttmaterials und der vorhandenen Aufbereitungstechnologie. Die Aufbereitungstechnologie wird auch davon abhängig gemacht, welche Güte das zu erzeugende RC-Material besitzen soll, prinzipiell sind die Grundoperationen Zerkleinern, Klassieren und Sortieren, teilweise Entstaubung und Entwässerung sowie Lagerung und Förderung.

Je homogener das Material vor der Aufbereitung ist, umso geringer ist der technische Aufwand für die Herstellung eines qualitätsgerechten RC-Materials. Je inhomogener das Material ist, umso größer ist der technologische Aufwand für eine optimale Trennung aller Komponenten und umso kostenintensiver wird das Endprodukt. Werden spezielle Gemische aus Baustoffen hergestellt, müssen weiterhin entsprechende Anlagen für die Dosierung und das Mischen vorhanden sein.

Vorteilhaft für eine erfolgreiche Sortierung ist ein möglichst hoher Aufschlussgrad des Materials, das heißt der zu erzielende Wertstoff – in diesem Fall das Ziegelmaterial - liegt frei von Anhaftungen eines anderen Materiales vor und kann damit besser sortiert werden (

Abbildung 61: Mauerwerkbruch, Fraktion 8/16

). Der Aufschluss wird durch die Zerkleinerung des Mauerwerkbruchs bzw. Bauschutts erreicht und ist abhängig von der Rohdichte des Materials. Erfahrungen zeigen, dass leichteres Material stärker zerkleinert wird, als schwereres Material. Somit kommt es im Endergebnis zu einer Verschiebung der Korngrößenverteilung zu feineren Bereichen, wenn die Rohdichte des Aufgabematerials geringer ist. Steigt also der Anteil an Ziegelmaterial im Aufgabegut an, wird sich der Anteil an Material < 4 mm erhöhen, da der Zerkleinerungswiderstand von Ziegelmaterial geringer ist als der von Beton. Putze und Mörtel werden am stärksten zerkleinert und sammeln sich ebenfalls im Feingut. In dieser Fraktion kommt es häufig zur Anreicherung von Gips und kalkhaltigem Material und der prozentuale Anteil an für die Ziegelindustrie unerwünschten Störstoffen erhöht sich. Vorteilhafterweise kann dieses Material durch eine einfache Siebung abgetrennt werden.



Abbildung 61: Mauerwerkbruch, Fraktion 8/16

Nach dem Aufschluss erfolgt in Sortieraggregaten eine Zerteilung des Schüttgutstromes zur Separierung der Partikel und anschließend die Trennung der Materialien aufgrund stoffspezifischer Sortiermerkmale wie Rohdichte, Kornform, Korngröße, Farbe, Magnetismus, elektrische Leitfähigkeit usw., wobei die Rohdichte das wichtigste Sortiermaterial ist (Dämmstoffe ca. 30 kg/dm³; natürliche Gesteine bis 3000 kg/dm³; beides im trockenen Zustand). Häufig besitzen die zu sortierenden Stoffe mehrere für eine Sortierung geeignete Merkmale, dann richtet sich die Auswahl des Sortierverfahrens nach dem gewünschten Endprodukt. Wenn Dichte und Kornform für eine Sortierung als Qualitätsmerkmal nicht in Frage kommen, weil sich die Materialien zu ähnlich sind, bleibt als Lösung beispielsweise die Farbsortierung. Eine Übersicht verschiedener Sortiermerkmale findet sich in

Tabelle 42 nach [11].

| | Partikelrohddichte OD [kg/m ³] | Kornform | Farbe |
|---|---|-----------------------------------|----------------|
| Natürliche Gesteinskörnung | > 2500 | kubisch | variabel |
| Beton | 2100–2500 | kubisch | grau |
| Asphalt | 2500 | kubisch | schwarz |
| Klinker, nicht porosierte Ziegel, porosierte Ziegel | 1500–2400 | variabel: von kubisch bis plattig | rot, orange |
| Kalksandstein | 1600–2400 | kubisch | weiss bis grau |
| Porenbeton | 500–900 | kubisch | weiss bis grau |
| Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton | 600–1900 | kubisch | grau |
| Mörtel, Putz | < 1500–2000 | k.A. | variabel |
| Bims | 500–2050 | | |
| Mineralische Dämmstoffe | < 150 | plattig, faserig | variabel |
| Extrudiertes Polystyrol | 30 | plattig | weiss, grau |
| Glas | ≥ 2500 | plattig | transparent |
| Gipsbaustoffe | 600–2000 | kubisch | weiß bis grau |
| Kunststoffe | 900–1400 | plattig, splittig, flächig | variabel |
| Holz | 400–600 | | grau bis braun |
| Pflanzenreste | k.A. | k.A. | variabel |
| Papier/Pappe | 500–1200 | flächig | |
| Boden/Abschlämmbares | 2500 | k.A. | variabel |

Tabelle 42: Sortiermerkmale verschiedener Arten Abbruchmaterial nach [11]

Der kleinteiligen Sortierung der aufgeschlossenen Stoffströme geht als erste Sortierstufe die gewählte Art des Rückbaus eines Gebäudes voraus. Durch einen selektiven Rückbau können die verschiedenen Materialien bereits während des Abbruchs separiert werden. Durch einen teilselektiven oder selektiven Rückbau erhöhen sich zwar die Kosten des Abbruchs, aber die Entsorgungskosten sinken, was am Ende die Gesamtkosten der Rückbaumaßnahme verringern kann.

Für die Berechnung verschiedener Abbruch- bzw. Rückbauszenarien wurde ein Tool genutzt, welches im Rahmen des Förderschwerpunktes REFINA des BMBF im Zusammenwirken mit dem BMVBS und dem BMU entstand. REFINA = Forschung für die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement [13]. Das Tool 090810 [14] eignet sich für die Kostenermittlung für Rückbau- und Abbrucharbeiten und kann sowohl für eine Grob- als

auch umfassende Detailermittlung genutzt werden. Für eine Veranschaulichung wurde eine Grobermittlung für die Abbruchkosten eines fiktiven Gebäudes in verschiedenen Szenarien durchgeführt und vorgeschlagene Abbruch und Entsorgungskosten aus der vorhandenen Datenbank genutzt. Im Rahmen einer Detailermittlung könnten alle Kosten/Preise und Gebäudedetails exakt eingegeben werden. Im dargestellten Beispiel wurde als Gebäude ein Massivbau ab 1949 gewählt. Die Abmessungen der Gebäudehülle und des Daches wurden eingegeben und verschiedene Abbruchszenarien berechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Berechnung aufgeführt.

Berechnung der Gesamtkosten einer Abbruch- / Rückbaumaßnahme mit unterschiedlichen Abbruchszenarien (Grobermittlung)

Schritt 1: Auswahl Gebäudeklasse

Massivbau ab 1949, größeres Gebäude

Schritt 2: Ermittlung des Gebäudevolumens

Gebäudeabmessungen:

| | Länge [m] | Breite [m] | Höhe [m] |
|----------------------|-----------|------------|----------|
| Keller: | 0 m | 0 m | 0 m |
| Geschosse ohne Dach: | 50 m | 20 m | 20 m |

Dach: geneigtes Dach

Dachabmessungen:

| Länge [m] | Breite [m] | Höhe [m] |
|-----------|------------|----------|
| 50 m | 20 m | 3 m |

Schritt 3: Ermittlung der Abbruchkosten

| | Eingabe in €/m ³ |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Abbruchkosten entkerntes Gebäude | 3,0 €/m ³ |
| Kosten für die Entkernung | 3,1 €/m ³ |
| Sonstige Kosten | 0 €/t |

Schritt 4: Ermittlung der Entsorgungskosten

| | €/Tonne |
|---------------------------------|------------|
| Entsorgung Beton | 8,0 €/t |
| Entsorgung Ziegel | 8,0 €/t |
| Entsorgung sonst. min. Material | 13,0 €/t |
| Entsorgung Holz | 50,0 €/t |
| Entsorgung Metalle | -120,0 €/t |
| Entsorgung Restabfall | 250,0 €/t |
| Entsorgung Sonstiges | 0,0 €/t |

Schritt 5: Berechnung der Ergebnisse

Gebäudevolumen:

| | | |
|-----------------|----------------------|----------------------|
| Keller | 0,0 m ³ | |
| Geschossbereich | 20000 m ³ | Gesamtvolumen |
| Dach | 1500 m ³ | 21500 m ³ |

Materialzusammensetzung:

| | | |
|--------------------------|----------|--------------------|
| Beton | 3296,7 t | |
| Ziegel/ min. Materialien | 4442,7 t | |
| Holz | 49,5 t | |
| Metalle | 101,1 t | |
| Restabfall | 66,7 t | Gesamtmasse |
| Sonstiges | 15,1 t | 7971,6 t |

Szenario 1: Konventioneller Abbruch**Abbruchkosten:**

| | | |
|---------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Abbruchkosten Rohbau | 64842 € | |
| Kosten für die Entkernung | keine Entkernung € | Gesamtkosten Abbruch |
| Sonstige Kosten | 0 € | 64842 € |

Entsorgungskosten:

| | | |
|---------------------------------|----------|--------------------------------|
| Entsorgung Beton | 10549 € | |
| Entsorgung Ziegel | 14216 € | |
| Entsorgung sonst. min. Material | 50306 € | |
| Entsorgung Holz | 1236 € | |
| Entsorgung Metalle | -9701 € | |
| Entsorgung Restabfall | 221380 € | Gesamtkosten Entsorgung |
| Entsorgung Sonstiges | 0 € | 287987 € |

Gesamtkosten der Abbruch/Rückbaumaßnahme: 352829 €

Szenario 2: Teilselktiver Abbruch**Abbruchkosten:**

| | | |
|---------------------------|---------|-----------------------------|
| Abbruchkosten Rohbau | 64842 € | |
| Kosten für die Entkernung | 65957 € | Gesamtkosten Abbruch |
| Sonstige Kosten | 0 € | 130799 € |

Entsorgungskosten:

| | | |
|---------------------------------|----------|--------------------------------|
| Entsorgung Beton | 19780 € | |
| Entsorgung Ziegel | 26656 € | |
| Entsorgung sonst. min. Material | 21128 € | |
| Entsorgung Holz | 2225 € | |
| Entsorgung Metalle | -10913 € | |
| Entsorgung Restabfall | 97819 € | Gesamtkosten Entsorgung |
| Entsorgung Sonstiges | 0 € | 156695 € |

Gesamtkosten der Abbruch/Rückbaumaßnahme: 287494 €

Szenario 3: Selektiver Abbruch

Abbruchkosten:

| | | |
|---------------------------|---------|-----------------------------|
| Abbruchkosten Rohbau | 64842 € | |
| Kosten für die Entkernung | 98935 € | Gesamtkosten Abbruch |
| Sonstige Kosten | 0 € | 163777 € |

Entsorgungskosten:

| | | |
|---------------------------------|----------|--------------------------------|
| Entsorgung Beton | 23736 € | |
| Entsorgung Ziegel | 31987 € | |
| Entsorgung sonst. min. Material | 10061 € | |
| Entsorgung Holz | 2473 € | |
| Entsorgung Metalle | -12126 € | |
| Entsorgung Restabfall | 16663 € | Gesamtkosten Entsorgung |
| Entsorgung Sonstiges | 0 € | 72794 € |

Gesamtkosten der Abbruch/Rückbaumaßnahme: 236571 €

Tabelle 43 Berechnung der Gesamtkosten einer Abbruch / Rückbaumaßnahme mit unterschiedlichen Abbruchszenarien (Grobermittlung)

Die in der Berechnung ermittelten Ergebnisse sind in **Tabelle 43** zusammengefasst dargestellt. Mit steigendem Aufwand beim Abbruch durch einen teilselektiven oder selektiven Rückbau steigen zwar die Abbruchkosten deutlich an, aber die Entsorgungskosten gehen deutlich zurück, wodurch auch die Gesamtkosten sinken. Vom wirtschaftlichen Standpunkt lohnt sich also eine frühzeitige Separierung der unterschiedlichen Materialströme schon während der Abbruchphase.

| | Szenario 1 Konventioneller Abbruch | Szenario 2 Teilselektiver Abbruch | Szenario 3 Selektiver Abbruch |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Gesamtkosten Abbruch | 64.842 € | 130.799 € | 163.777 € |
| Gesamtkosten Entsorgung | 287.987 € | 156.695 € | 72.794 € |
| Gesamtkosten Abbruch / Rückbaumaßnahme | 352.829 € | 287.494 € | 236.571 € |

Tabelle 44: Zusammenfassung

Transportentfernung

Die Möglichkeit qualitätsgerechte RC-Materialien herzustellen, besteht vor allem in stationären Anlagen, deren Betrieb allerdings recht kostenintensiv ist. Diesen Kosten steht derzeit noch kein Markt für hochwertig recycelte RC-Materialien gegenüber. Dies betrifft vor allem Recycling-Baustoffe die überwiegend aus Klinker, Ziegeln und Steinzeug, Kalksandstein, Mörtel, gipshaltigem Material bestehen. Diese Materialien werden derzeit mangels Verwertungsoptionen unaufbereitet oder als Reststoffe aus der Aufbereitung in der Verfüllung abgelagert oder auf Deponien entsorgt. Dadurch wird ein Großteil des in Bauschutt bzw. Mauerwerkbruch vorhandenen Nutzungspotenzials verschwendet. Lediglich der werksinterne Brennbruch und sortenreiner Ziegelbruch aus der Produktion findet in der Ziegelindustrie als Magerungsmittel Anwendung. Weiterhin wird reines Ziegelmaterial für Tennenflächen oder vegetationstechnischen Anwendungen genutzt. Allerdings werden in den genannten Bereichen nur geringe Mengen umgesetzt. Auch wird der Mehraufwand

für hergestellte bautechnische Qualitäten noch nicht über entsprechende Verkaufserlöse gedeckt.

Stationäre Anlagen sind dort wirtschaftlich sinnvoll, wo wirtschaftliche Transportwege nicht überschritten werden und ausreichende Bauschuttmengen verfügbar sind, d.h. es ist ein ausreichend großes Einzugsgebiet und eine möglichst gute Verkehrsanbindung notwendig. Bezieht man die anfallenden Bauschuttmengen auf den Maßstab der deutschen Bundesländer zeigt sich, dass in ländlichen Gebieten das Einzugsgebiet zur Erzielung einer ausreichenden Menge Bauschutt und auch die Transportentfernungen größer sind, als in Gebieten mit einer hohen Bevölkerungsdichte. Als Beispiel dient die im Folgenden dargestellte Tabelle 45. Es zeigt sich deutlich der Unterschied der maximalen Transportentfernungen für städtische und ländliche Gebiete. So liegen die Transportentfernungen bei Regionen mit geringer Bevölkerungsdichte bei 41 km. Als wirtschaftlich gelten Entfernungen bis zu 25 km [11].

| | | | |
|------------------------------|----------------------|---------|------|
| Bevölkerungsdichte | [E/km ²] | 500 | 50 |
| Flächenbezogenes Aufkommen | [t/km ²] | 450 | 45 |
| Geplante Anlagenkapazität | [t/a] | 150.000 | |
| Einzugsgebiet | [km ²] | 333 | 3333 |
| Maximale Transportentfernung | [km] | 13 | 41 |

Tabelle 45: Kapazitätsplanung von Recyclinganlagen nach Bevölkerungsdichte [11]

Eine wirtschaftliche Einschätzung der Transportentfernungen für die Zulieferung von Recycling-Material muss im Bedarfsfall für jedes einzelne Ziegelwerk durchgeführt werden, im Abgleich mit den vorhandenen Recyclinganlagen und dem im jeweiligen Werk verwendeten Rohstoffen und dem Endprodukt.

Produktpreise Bauschutt – Vergleich der Preise von Primärrohstoffen (Abbau) und Sekundärrohstoffen

Die Herstellung von RC-Baustoffen mit einer hohen Güte beginnt bereits mit der Eingangsprüfung des angelieferten Bauschutts. Dabei müssen die Herkunft des Materials, die Materialart, der Grad der Verunreinigungen durch Störstoffe, die Stückgröße und die Liefermenge erfasst werden. Ungeeignetes Material muss abgewiesen werden. Je nach Zusammensetzung des Materials errechnet sich aus den erfassten Daten die Annahmegebühr (Tabelle 39 bis Tabelle 41). Günstig ist es, bereits vor dem Abriss genaue Kenntnis über die Art des Gebäudes zu haben und danach den Abbruch bzw. Rückbau zu planen. In dem zuvor dargestellten Beispiel ergaben sich deutliche Unterschiede für die Abbruch- und Entsorgungskosten bzw. die Kosten für eine Aufbereitung bis hin zum Produkt. Wie bereits erwähnt, besitzen Baustoffe, die sich mit einem geringen Aufwand in verkaufsfähige Materialien umwandeln lassen geringe Annahmegebühren. Je höher der Aufwand für Zerkleinerungsstufen oder das Entfernen von Störstoffen wird, umso höher wird der Annahmepreis und der Verkauf wird schwieriger. Die Produkte, die in einer Recyclinganlage hergestellt werden sind direkt gekoppelt an das Inputmaterial. Die größte Produktgruppe sind RC-Materialien aus Beton, Mauerwerk und sortenreine Ziegelrezyklate.

Die erzielbaren Produktpreise richten sich nach dem Herstellungsaufwand und den Verkaufschancen. Wie in Abbildung 62 dargestellt, wird der geringste Preis für Material aus der Vorabsiebung festgelegt, da der Absatz wichtiger ist, als der Verkaufspreis. Weiterhin sieht man, dass der Produktpreis für reine Ziegel-Körnungen und Ziegelsand mit 10 €/t sehr hoch ist.

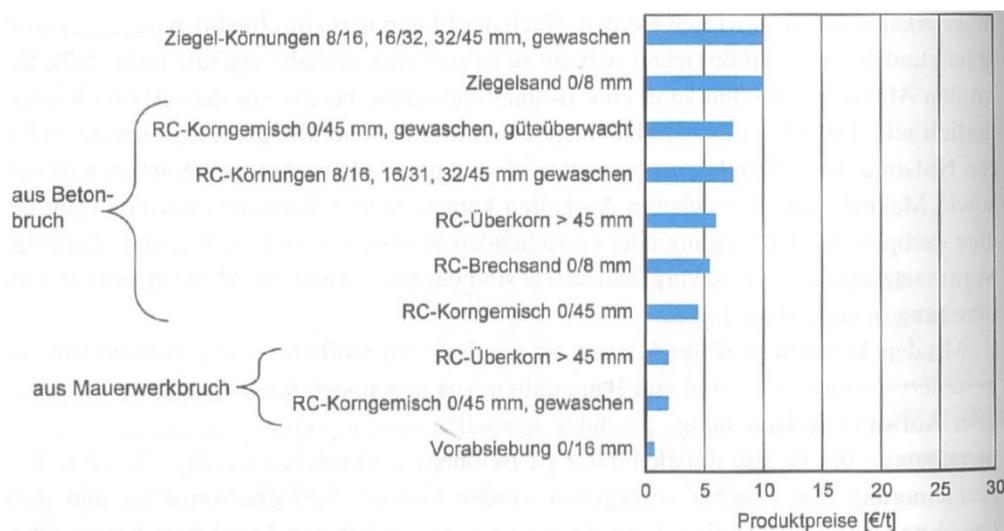


Abbildung 62: Produktpreise einer Recyclinganlage nach [11]

Bezieht man in diese Kostenübersicht die Überlegung ein, dass das Ziegel-RC-Material für eine Anwendung in der Ziegelindustrie noch feiner aufgemahlen werden muss, erhöht sich der Aufbereitungsaufwand weiter und die Kosten für Ziegelsand steigen möglicherweise weiter an. Es ist aber auch denkbar, dass ein höherer Absatz der RC-Materialien die Preisentwicklung positiv beeinflusst.

Üblicherweise liegen die Preise für Eigenton in der Ziegelproduktion bei 2 – 3 €/ t (inkl. Abbau). Fremdtone, die deutlich positive Eigenschaften auf das Endprodukt haben, werden, wenn nötig zugekauft. Hier liegen die Preise bei bis 8 – 40 €/t. Für einen handelsüblichen Hintermauerziegel kommen solche teuren Zusatztone allerdings nicht zum Einsatz.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Merkblatt entworfen und nach Produktgruppen werden Empfehlungen zur Art und Menge des Einsatzes von RC-Ziegel-Material gegeben (Tabelle 46, Auszug zu Einsatzmengen). Die detaillierten Beschränkungen zur chemischen Zusammensetzung des RC-Materials, der Korngröße finden sich im vollständigen Merkblatt.

| Erzeugnis | Mögliche Einsatzmenge | Art des RC-Materials |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Dachziegel | < 3 M.-% | Sortenreines Ziegelmaterial |
| Vormauerziegel und Klinker | < 25 M.-% | Sortenreines Ziegelmaterial |
| Hintermauerziegel | < 25 M.-% | Mauerwerkbruch |

Tabelle 46: Mögliche Einsatzmengen von RC-Material nach Produktgruppen

Laut dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung stellt sich der Verbrauch von natürlichen Rohstoffen zur Herstellung von keramischen Produkten wie in Tabelle 47 aufgeführt dar [9].

| Erzeugnis | Rohstoffverbrauch | |
|----------------------------|--------------------|-----------------------------|
| | je Tonne Erzeugnis | je m ³ Erzeugnis |
| Dachziegel | 1,23 t | 4,02 t (je 1000 Stück) |
| Vormauerziegel und Klinker | 1,12 t | 1,56 t |
| Hintermauerziegel | 1,16 t | 1,11 t |

Tabelle 47: Verbrauch natürlicher Rohstoffe zur Herstellung keramischer Produkte [24]

Anhand von Tabelle 48 sind die durchschnittlichen jährlichen Produktionskosten anhand von Dachziegelwerken aufgeführt [20]

| Jahresdurchschnitt Produktionskosten * | |
|--|-------------|
| Personal (Stundenlohn) | 55 – 65 €/t |
| Ton und Barium | 20 – 25 €/t |
| Additive, Hilfsstoffe, Farben | 20 – 26 €/t |
| Energie Gas | 25 – 30 €/t |
| Energie Strom | 15 – 20 €/t |
| Gips / Verpackung | 5 – 10 €/t |
| Reparatur | 20 – 25 €/t |

inclusive Stillstandszeiten

Tabelle 48: Produktionskosten Dachziegel [20]

Für eine grobe Einschätzung des Einsparpotenzials wurde ein Berechnungsbeispiel für die Dachziegelindustrie durchgeführt. Laut Merkblatt dürfen hier maximal 3 % (Tabelle 46) des Rohstoffes durch ein sortenreines RC-Material ausgetauscht werden. Die Berechnung erfolgte für die angenommene Jahresproduktion von ca. 20 Millionen Dachziegeln.

Laut Tabelle 47 werden für die Herstellung von 1000 Ziegeln 4,02 t Rohstoff verbraucht, was 80.400 t für die Jahresproduktion entspricht. Bei den in Tabelle 48 dargestellten Rohstoffpreisen von maximal 25 €/t ergibt sich für die Jahresproduktion eine Summe von 2.010.000 € für Rohstoffe. Bei der Annahme, dass ein extra für diesen Einsatzzweck hergestellter RC-Ziegelreststoff 10 €/t kosten würde (Abbildung 62) ergibt sich ein Einsparpotential von 35.880 €. Bei dieser Berechnung handelt es sich um eine überschlägliche Schätzung, da sich der tatsächliche Rohstoffverbrauch nach den hergestellten Produkten richtet. Im konkreten Fall muss diese Berechnung angepasst werden.

Ein großes Problem ist, dass abseits vom eigentlichen Recyclinggedanken der Einsatz des RC-Materials im Ziegel für das eigentliche Produkt keinen großen Mehrwert bringt, da die Eigenschaften allenfalls gleichbleiben, sich aber nicht deutlich verbessern. Dennoch würde der Einsatz dieser Materialien einen hohen Imagegewinn für die Ziegelindustrie bedeuten.

Nicht betrachtet wird bei diesem Ansatz, der im Werk anfallende Brennbruch, welcher ebenfalls wieder mit in die Produktion fließt und keine zusätzlichen Kosten verursacht. Die Anwendung von internen Produktionsrückständen ist in der Ziegelindustrie unproblematisch möglich. Glüh-, Glatt- und Ofenausbruch, genau wie anfallender Trockenbruch können über eine Grob- und Feinzerkleinerung wieder zurück in die Masseaufbereitung integriert werden.

Die Menge an anfallendem Brennbruch beläuft sich laut [15] in der gesamten Ziegelindustrie auf bis zu 220.000 t/a, wobei der Wert für die Dachziegelindustrie mit 1 – 3 % relativ gering ist. Im Hintermauerziegelbereich beträgt der Brennbruch ca. 15 – 15 %. Ungefähr 30 % dieser 220.000 t/a werden in den ursprünglichen Produkten als Magerungsmittel eingesetzt. Hat man von Haus aus einen eher mageren Rohstoff kann man den Brennbruch nur bedingt wiedereinsetzen. Dann fließt sortenreines Material auch häufig in Tennenflächen, Grubenverfüllungen und Wegbefestigungen.

Einsparungen bei der Trocknung

Ein wesentlicher Anteil der verbrauchten Energie (teilweise bis zu 75%) fließt bei der Ziegelherstellung in die Trocknung. Die benötigte Trocknungsenergie wird direkt beeinflusst durch den Feuchtegehalt der Ziegelrohlinge. Durch den Einsatz der RC-Materialien kann die zugesetzte Feuchte schon während der Aufbereitung und Formgebung reduziert werden und muss nicht vor dem Brand wieder herausgetrocknet werden. Dies hat einen wirtschaftlich positiven Effekt auf die Ziegelherstellung, da hier der Energieverbrauchsschwerpunkt der Ziegelindustrie liegt. Wie die Laborversuche zeigten, nahm durch den Einsatz der RC-Materialien der Anmachwassergehalt bei der Herstellung um bis zu 2,5 M.-% ab. Anhand des folgenden Beispiels erfolgt eine Grobeinschätzung des Einsparpotenziales bei der Trocknung bei einem Einsatz von 10 M.-% RC-Material.

- Trocknungsenergiebedarf 3500 kJ/kg H₂O
- Anmachwassergehalt ≈ 0,25 kg/kg Ton
- Ersatz durch 10% RC-Material (2,5% Einsparung H₂O)
- $(2,5\% \cdot 3500 \text{ kJ/kg}) / 100\% = 87,5 \text{ kJ}$ Einsparung bezogen auf das Ausgangsmaterial
- Annahme Gaspreis: 2 ct
- Einsparung: 1,75 € pro kg Rohling

Die Feuchte des Tones spielt eine wichtige Rolle und kann bei großen Schwankungen sogar zu Produktionsausfällen führen. Zu feuchter Ton sorgt beispielsweise in der Dachziegelproduktion dafür, dass die Abmessungen der Ziegel abweichen und die Formlinge sich nicht gut aus der Gipsform lösen. Ist der Ton hingegen zu trocken, kommt es eher zur Erhöhung der Trockenbruchquote und zum schnelleren Verschleiß der Gipsformen [2].

Laut der Ergebnisse der Masseversätze zeigte sich, dass durch den Zusatz der RC-Materialien die Trockenbruchanfälligkeit abnahm. Dieser positive Effekt kann zur Verminderung der Ausschussquote beitragen, was ebenfalls positive monetäre Effekte mit sich bringt.

Die durch den RC-Zusatz trockenere Pressmasse sowie die dadurch zugesetzten Hartstoffe können auch negative Effekte während der Produktion bewirken, wie z.B.:

- Steifere Masse = höherer Pressdruck = mehr Energie nötig
- Erhöhter Verschleiß durch Hartstoffe an Walzwerk, Presse usw.

Einsparungen beim Brand

Während des Brandes treten exotherme und endotherme Umwandlungsreaktionen auf, die Einfluss auf den Bedarf an zugeführter Brennenergie haben. Es gibt einerseits negative Rohstoffenthalpien, die auf den im Ton enthaltenen fossilen Kohlenstoff zurückzuführen sind, andererseits überwiegen endotherme Umwandlungsreaktionen, d.h. es wird Brennstoff benötigt damit die Umwandlungsreaktionen stattfinden können. Dies betrifft die Austreibung des gebundenen Wassers aus den Tonmineralen sowie die endotherme Carbonatentsäuerung [17]. Nach Literaturwerten beträgt der Wert zur Austreibung des gebundenen Wassers 1600 kcal/kg H₂O (6699 kJ/kg H₂O). Dieser Wärmebetrag schließt die mit der Wasserabspaltung verbundenen Umwandlungsreaktionen der Tonminerale mit ein.

Aufgeschlüsselt nach Tonmineralgruppen [15] ergeben sich diese Werte.

Kaolinitgruppe: 1570 kcal/kg H₂O = 6573 kJ/kg H₂O

Illitgruppe: 2270 kcal/kg H₂O = 9504 kJ/kg H₂O

Montmorine: 1670 kcal/kg H₂O = 6992 kJ/kg H₂O

Auch das SO₃ und elementarer Kohlenstoff tragen zu den Stoffumwandlungsenergien bei.

Tabelle 49 zeigt die während des keramischen Brandes ablaufenden Prozesse.

| Temperatur | Beschreibung der chemischen Reaktion |
|-------------|--|
| 150 - 450°C | Bei diesen Temperaturen entweichen die Schwelgase aus der Organik, welche im Ton allein oder im zugefügten Porosierungsmittel vorhanden sind |
| 400°C | Pyritersetzung (FeS ₂ => S + Fe ₂ O ₃) |
| 600 - 800°C | Der restliche Kohlenstoff wird oxidiert |
| ab 700°C | Entweicht das Fluor aus dem Rohstoff Entweicht das chemisch gebundene Wasser |
| Ab 800°C | Sulfatersetzung (sofern im Rohstoff vorhanden) sowie Entsäuerung und Abspaltung des CO ₂ aus dem Kalk (CaCO ₃) |

Tabelle 49: Chemische Reaktionen beim Brennprozess [25]

Verwendet man bereits gebrannte Materialien in der Rohstoffmischung ergibt sich der Vorteil, dass für einen Teil der Rohstoffmischung keine weitere Energie zur Stoffumwandlung während des Brennprozesses verbraucht wird, da das Material bereits thermisch behandelt wurde. Auch an dieser Stelle könnte theoretisch Energie eingespart werden, wenn sortenreine Materialien verwendet werden, denn durch einen zusätzlichen Carbonateintrag würde wieder Energie zusätzlich verbraucht werden.

Weitere in der Literatur angegebenen Werte für den Energiebedarf beim Brennen stellen sich wie folgt dar (Tabelle 50). Nach [25] wird betont, dass der korrekte Energiebedarf nur angegeben werden kann, wenn eine Analyse des Rohmaterials vorliegt, um einen optimalen Brennprozess führen zu können.

| Teilprozess | Energiebedarf |
|---|--|
| Gefügeumwandlung | 80 – 130 kJ/kg |
| Ausfahrverluste | 130 kJ/kg |
| Rauchgasverluste | 330 – 420 kJ/kg |
| Transmissionsverluste Aussenwand | 130 kJ/kg |
| In Kühlluft abgeführte Restwärme des gebrannten Backstein | 630 – 840 kJ/kg |
| Kalkumwandlung | 15 kJ/kg und Massenprozent bezogen auf den getrockneten Rohling |
| Energiefreisetzung durch Kohlenstoff | - 335 kJ/kg und Massenprozent bezogen auf den getrockneten Rohling |

Tabelle 50: Energiebedarf der Teilprozesse nach [25]

Strafzahlungen [6], [7], [18], [21]

Die Verbesserung der Ressourceneffektivität setzt sich nicht im Selbstlauf durch. Wichtige Punkte, um in Bezug auf die Verwertung von Bauabfällen Fortschritte zu erreichen, sind im der Zusammenstellung „Schonung natürlicher Ressourcen durch Materialkreisläufe in der Bauwirtschaft“ des Expertengremiums des Umweltbundesamtes zusammengefasst. Vorgeschlagen wird:

- „In Studien soll zeitnah ermittelt werden, welche Förder- und/oder Sanktionsmaßnahmen (Abgaben, Steuern, Quoten, finanzielle Förderung) wirksam wären, um das ressourcenschonende Bauen in den Markt einzuführen und zu fördern. Ähnlich wie beim energieeffizienten Bauen soll für das ressourcenschonende Bauen ein wirksamer verordnungstechnischer und förderpolitischer Rahmen geschaffen werden.
- Die Forschung zur Material- und Verfahrensentwicklung für das Baustoffrecycling, die im Vergleich zur etablierten Primärbaustoffforschung noch am Anfang steht, muss verstärkt gefördert werden. Dabei müssen die Stoffströme, die gegenwärtig auf sehr niedrigem technischem Niveau verwertet werden, im Mittelpunkt stehen. Die Förderung sollte sich in Zukunft neben der Forschung zu Betonzyklen auch auf alle anderen Baumaterialien und Bauteile bzw. -systeme erstrecken.
- Die Anlagen für die Aufbereitung von Bauabfällen in Deutschland sind heute zu einem großen Teil auf dem technischen Stand der 1980er und 90er Jahre. Die Stagnation bei der Einführung neuer Verfahren in die Recyclingpraxis muss durch die Förderung von Investitionen in innovative Technologien überwunden werden.“

Die Einführung von Strafzahlungen wird kontrovers diskutiert. So hat sich der Deutsche Naturschutzring unter anderem mit dem Thema Ressourcensteuern in Deutschland auseinandergesetzt. Dabei wird auch die Einführung einer Primärbaustoffsteuer angesprochen. Dem steht die Meinung des Bundesverbandes Mineralische Rohstoffe gegenüber, dass der Verbrauch von primären Baustoffen dadurch kaum verringert werden kann, weil schon heute ein großer Teil der Bau- und Abbruchabfälle verwertet wird.

In Europa wird in Großbritannien, in Schweden und in Dänemark eine Steuer auf natürliche Gesteinskörnungen erhoben. Diese bewegt sich zwischen 1 US\$ und 3 US\$. Ein eindeutiger Nachweis der Lenkungswirkung dieser Steuer hinsichtlich des Verbrauchs an natürlichen Ressourcen ist bisher nicht erbracht worden. Die Besteuerung bezieht sich auf Gesteinskörnungen bzw. lediglich auf Kiese (Schweden). Andere Steine-Erden-Rohstoffe wie Tone für die Herstellung von Ziegeln sind davon nicht betroffen.

Zusammenfassung

Die Frage der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von RC-Ziegel-Material beruht neben rechtlichen Rahmenbedingungen natürlich hauptsächlich auf monetären Gesichtspunkten. Für eine genaue Kostenschätzung ist es daher nötig, dass neben einer generellen Akzeptanz der Hersteller zum Einsatz von RC-Ziegel-Material auch die nötigen handwerklichen Mittel zur Verfügung gestellt werden müssen, um eine vollständige Kostenschätzung zu ermöglichen. Es muss bekannt sein welche Eigentone genutzt werden und welche Fremdtone und weitere Additive zugekauft werden und für welchen Preis. Dann kann für den Einzelfall das laut Merkblatt zum hergestellten Produkt passende RC-Material ausgewählt werden und nach Recyclinganlagen gesucht werden, die in einer wirtschaftlich vertretbaren Transportentfernung liegen.

Bei Einsatzmengen von 3 % im Dachziegelbereich halten sich die tatsächlichen erreichbaren finanziellen Effekte in Grenzen. Einsatzmengen von bis zu 25 % RC-Material im Vormauerziegel und Hintermauerziegel könnten deutlichere Effekte und Einsparungen z.B. bei der Trocknung erzielen, allerdings nur, wenn durch eine deutliche Steigerung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen auch deren Preise sinken. Wichtig wäre es, auch auf politischer Ebene Anreize zu Effizienzsteigerungen und konsequenter Kreislaufführung durch Nutzung von RC-Ziegelmaterial zu schaffen, möglicherweise durch eine Ressourcensteuer, in deren Folge der Einsatz von Primärrohstoffen sinken würde.

Recyclingbaustoffe müssen gegenüber aus Primärrohstoffen hergestellten Baustoffen eine höhere Akzeptanz erzielen, um sich am Markt durchzusetzen. Der generelle Trend steigender Rohstoffpreise wirkt sich dabei positiv auf die Konkurrenzfähigkeit von Recyclingbaustoffen aus.

Mittelfristig muss die Baustoffindustrie Produkte entwickeln, die nicht nur alle Anforderungen ihrer primären Anwendung erfüllen, sondern auch nach der ersten Nutzungsphase entweder als Rohstoffersatz oder möglichst hochwertig als Recyclingprodukt in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können [15]

Derzeit besteht von Seiten der Hersteller eine zu geringe Akzeptanz gegenüber der Nutzung von RC-Material, auch da der Kosten-Nutzen-Aufwand noch in keinem Verhältnis steht. Zumal es in den Ziegelwerken geübte Praxis ist, eigenen Brennbruch aufzubereiten und erneut bei der Herstellung der Ziegel einzusetzen. In einigen Werken ist es aufgrund des genutzten Rohstoffes schlicht nicht möglich weitere magernde Komponenten in Form von RC-Material einzusetzen. Es wäre dann die Umstellung der Betriebsmasse auf fettere Tone nötig. Für andere Werke bieten RC-Ziegel-Materialien allerdings gute Perspektiven, z.B. wird derzeit bei sehr fetten Tonrohstoffen Sand als Magerungsmittel zugekauft. Hier wäre ein guter Ansatzpunkt für die Anwendung von RC-Material bei gleichzeitigem Imagegewinn.

9 Schlussbemerkungen

9.1 Notwendigkeit und Angemessenheit der Förderung

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Zur Erreichung des Forschungszieles wurden die Arbeiten an diesem Projekt dem Lösungsweg des Antrages folgend durchgeführt. Die Pauschale für „Sonstige Ausgaben“ wurde den tatsächlichen Ausgaben für das Projekt entsprechend in Anspruch genommen. Die Leistungen Dritter wurden anteilig im Berichtszeitraum erbracht.

Personaleinsatzzeiten des wissenschaftlichen Personals HPA A.1 über die gesamte Projektlaufzeit:

Institut für Ziegelforschung Essen: 14,05 MM

IAB Weimar: 11,17 MM

Leistungen Dritter

- Eluat- und Feststoffanalytik, Gesellschaft für Bioanalytik GmbH
- Bestimmung der Biegezugfestigkeit, QSM-Essen
- Versuche zur Magnetscheidung, UVR-FIA-GmbH

9.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Alle Ziegelhersteller sind von den Ressourceneffizienzprogrammen betroffen. Mit dem vorliegenden Schlussbericht und dem enthaltenen Merkblatt kann mit der industriellen Umsetzung begonnen werden. Eine Besonderheit dieses Projekts besteht darin, dass die Einführung der im Projekt erarbeiteten Maßnahmen und Erkenntnisse durch Vorhandensein der notwendigen Aggregate ohne Investitionen möglich ist. Somit ist die schnelle Umsetzung der Projektergebnisse möglich. Jedoch ist der Einsatz von RC-Materialien aktuell nicht wirtschaftlich.

Positiver Nebeneffekt des Forschungsvorhabens ist die Senkung des spezifischen Energiebedarfs und der Rauchgasemissionen.

Da Ziegler überwiegend den kleinen und mittleren Unternehmen zuzurechnen sind, sind diese im Allgemeinen nicht allein dazu in der Lage, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchzuführen. Ihnen kommt nahezu der alleinige Nutzen dieses Forschungsprojektes zu. Das vorgestellte Projekt betrifft alle Produktarten der Ziegelindustrie. Mehr als 150 kmU-Betriebe werden daher gleichermaßen entweder direkt oder auf dem Umweg über die in der Ziegelbranche tätigen Anlagenbauer von den Ergebnissen dieses Projektes profitieren.

Aufgrund der Tatsache, dass die Forderung an moderne Baustoffe gerichtet wird, dem Kreislaufwirtschaftsgesetz Rechnung zu tragen, wird es in Zukunft relevant sein, die Wiederverwertbarkeit von Baustoffen bereits vor ihrem Einsatz nachweisen zu können. Daher ist es zielführend durch die Bereitstellung des entwickelten technischen Merkblattes, sowohl den Recyclingfirmen, als auch der Ziegelindustrie Kriterien an die Hand zu geben, welche die Möglichkeit des Einsatzes von RC-Ziegel realisierbar machen. Für die Ziegelindustrie ist dies gleich in zweifacher Hinsicht von Bedeutung. Zum einen können wertvolle natürliche Ressourcen geschont werden, da die Substituierung durch RC-Material möglich ist, was auch aus wirtschaftlicher Sicht positiv zu bewerten ist. Zum anderen ist sichergestellt, dass das Baumaterial Ziegel als recyclingfähiger Baustoff eingestuft werden kann und somit die Anforderungen an die derzeitige und zukünftige Gesetzgebung erfüllt werden.

9.3 Plan zum Ergebnistransfer

Durchgeführte Transfermaßnahmen

| Maßnahme | Ziel | Ort/Rahmen | Datum/Zeitraum |
|--|--|---|------------------------------------|
| - Vorstellung erster Ergebnisse und Diskussion weiterer Arbeiten - Präsentation der Ergebnisse und Diskussion | Fortlaufende Diskussion im PA | Berlin / PA-Ausschusssitzung Berlin / PA-Ausschusssitzung | 8. Nov. 2017 14. Nov. 2018 |
| - Vorstellung erster Ergebnisse - Präsentation der Ergebnisse und Diskussion | Weiterbildung von Mitarbeitern aus der Ziegelindustrie, insbesondere KMU's | Osnabrück / Sitzung Vormauerziegel und Klinker-Ausschuss Würzburg / Sitzung Dachziegelausschuss | Oktober 2018 September 2018 |
| Präsentation der Ergebnisse | Weiterbildung von Mitarbeitern der Ziegelindustrie | Vortrag IAB Baustoffforum, Weimar | 1. März 2018 |

Geplante Transfermaßnahmen

| Maßnahme | Ziel | Ort/Rahmen | Datum/Zeitraum |
|---------------------------------|--|--|----------------|
| Präsentation der Ergebnisse und | Weiterbildung von Mitarbeitern aus der Ziegelindustrie, insbesondere KMU's | Vortrag im Rahmen der Seminare des Institut für Ziegelforschung Essen e.V. mit den Ergebnissen des Projektes | 19. Sept. 2019 |

| | | | |
|------------------------------------|--|--|---|
| Ergebnistransfer in die Wirtschaft | Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse durch die Forschungsgemeinschaft Ziegelindustrie | Internetseiten des Instituts für Ziegelforschung Essen e.V. und des IAB Weimar Veröffentlichung in der Fachliteratur „ZI-International“ und "Recycling magazin" | Juli 2019 1/2020 (Artikel für Zi in Bearbeitung) 6/2020 |
| Präsentation der Ergebnisse und | Weiterbildung von Mitarbeitern aus der Ziegelindustrie, insbesondere KMU's | Vortrag im Rahmen des Würzburger Ziegellehrganges mit den Ergebnissen des Projektes | 04.12.2019 (Vortrag akzeptiert) |

1 Literatur

1. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, www.bmub.bund.de Deutsches Ressourceneffizienz-programm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen
2. Company News (2009, 2009) ACO Feuchtemesssensoren - die Innovation bei Wienerberger, Deest/Niederlande. Ziegelindustrie International
3. DIN EN 1097-3 - Bestimmung der Schüttdichte (DIN EN 1097-3 - Bestimmung der Schüttdichte). Zugegriffen: 04. März 2019
4. DIN EN 1097-5 Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung (DIN EN 1097-5). Zugegriffen: 04. März 2019
5. DIN EN 13055 Leichte Gesteinskörnungen, Anhang C Kornfestigkeit (DIN EN 13055). Zugegriffen: 04. März 2019
6. e.V. BMR PRESSEBOX: Primärbaustoffsteuer: Keine Lenkungswirkung, denn auch Sekundärbaustoffe brauchen eine Rohstoffquelle. [Online] [Zitat vom: 28. 02 2019.]
7. Eun Young L Steckbrief Ressourcensteuern
8. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) Ausfertigungsdatum: 24.02.2012
9. Haase T Der Pfefferkorn-Apparat als absolutes Meßgerät. Ber. DKG 43 (1966), S. 593-594
10. Müller A Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau
11. Müller AD-I Baustoffrecycling: Entstehung - Aufbereitung - Verwertung
12. Osteroth D (1979) Chemisches-Technisches Lexikon. Springer Verlag,, Berlin, Heidelberg, New York
13. REFINA Startseite. Forschung für die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement.). [Online] 30. 03 2012. [Zitat vom: 13. 02 2018.
14. REFINA > Produkte> EDV-Werkzeuge zum Gebäuderückbau Hochschule Biberach 2009, 06. 11 2009. [Zitat vom: 13. 02 2019.]
15. Rosen D Ziegelabbruch - Möglichkeiten und Grenzen einer stofflichen Verwertung. Rosen, Dieter. Recycling von Ziegelabbruch+. [Hrsg.] EU-Recycling + Umwelttechnik. EU-Recycling + Umwelttechnik. 09 2017, S. 17. Zusammenfassung des Vortrags "Ziegelabbruch - Möglichkeiten und Grenzen einer stofflichen Verwertung" von Dieter Rosen, bvse.Mineraliktag 2017
16. Salmang Scholze (2006) Keramik
17. Schwarz-Tatarin Dissertation A.Schwarz-Tatarin.doc
18. Söderholm P Taxin virgin natural Resources: Lessons from Aggregates Taxation in Europe
19. Statistisches Bundesamt Mikrozensus-Zusatzerhebung 2014 - Bestand und Struktur der Wohneinheiten; Wohnsituation der Haushalte - Fachserie 5 Heft 1 - 2014
20. Tretau A Charakterisierung sortierter Ziegel-RC-Materialien. Vortrag zum projektbegleitenden Ausschuss 14.11.2018; AiF 18889 BG. Berlin : s.n., 2018.
21. Umweltbundesamt, Asam, C., et al Schonung natürlicher Ressourcen durch Materialkreisläufe in der -Bauwirtschaft
22. Wikipedia Magnettrommelscheider PNG
23. Winkler H Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Produkte. Deutsche Keramische Gesellschaft, 1954. S. 337-343, Bericht, Bonn

24. Wirtschaftsforschung Dlf Wirtschaftliche Struktur der niedersächsischen Ziegelindustrie:
Gutachten im Auftrag des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung. Berlin :
s.n., 1998, S. 31
25. Wurche JP, Gubler ZFA Steigerung der Energieeffizienz in der Backsteinproduktion