



Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde

Masterarbeit



Prüfung der Eignung von
Gießpfannenschlacken für den Einsatz als
Substitut für Hüttensand in Zementen

Milutin Bjelic, BSc

Mai 2022



EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 22.05.2022

Unterschrift Verfasser/in
Milutin Bjelic

Danksagung

Ich möchte mich bei meiner Betreuerin, Dipl. Ing. Dr. mont. Irmtraud Marschall für ihre Unterstützung und Leitung bei der Anfertigung dieser Arbeit bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich auch beim Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde, der mir die notwendigen Gerätschaften und Materialien zur Verfügung gestellt hat, herzlich bedanken. Mein Dank gilt auch dem Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung, die mich bei Teilen dieser Arbeit ebenfalls mit der notwendigen Ausrüstung unterstützt haben.

Ein besonderes Dankeschön möchte ich an meine Familie und meine Freunde richten, die mir stets zur Seite standen. Ohne deren Unterstützung wäre die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Prüfung von Gießpfannenschlacken aus der Herstellung unterschiedlicher Stahlprodukte auf ihre Eignung als Zusatzstoff in Betonprodukten hinsichtlich Festigkeits- und Raumbeständigkeitsverhalten. Als Referenz zur Beurteilung der Eignung wurden Werte aus EN 197-1 und ÖNORM B 3309-1 herangezogen. Des Weiteren wurde Hüttensand in gleicher Weise aufbereitet und als Referenz neben den aus der Norm geforderten Werten verwendet.

Zur Charakterisierung der Proben wurden chemische Analysen und eine Phasenanalyse mittels Röntgendiffraktometrie (RDA) durchgeführt. Der Anteil an wasserlöslichem Chrom [VI] der Schlacken wurde mittels Eluatanalyse bestimmt. Weiters wurden die Stoffdichten mittels Heliumpyknometer ermittelt.

Die Schlackenproben wurden außerdem auf ihr Zerkleinerungsverhalten hin untersucht. Hierfür wurden die Gießpfannenschlacken mit einem Laborbrecher gebrochen, die Pfannenschlacken und Hüttensand in einer Stabmühle gemahlen und anschließend in einer Kugelmühle auf die gewünschten Mahlfineinheiten zerkleinert. Bei diesen Zerkleinerungsschritten wurde beim Brecher und bei der Kugelmühle der Energieeintrag gemessen, bei der Stabmühle aus bekanntem Verfahren errechnet. Bei der Zerkleinerung in der Kugelmühle wurde neben dem Energieeintrag auch die Größe der massespezifischen Oberfläche mit der Oberflächenmessung nach Blaine in unterschiedlichen Schritten gemessen. Neben der Zerkleinerung wurde vor den jeweiligen Zerkleinerungsschritten auch eine Magnetscheidung mit einem Analysemagneten durchgeführt, um den Anteil an vorliegendem Stahl zu bestimmen.

Für weitere Untersuchungen wurden Teilproben der Schlacken mit einer Mahlfineinheit von 2000, 4000 und 6000 Blaine hergestellt. Die Schlacken wurden in den Gehalten 12,5%, 25% und bei einer Pfannenschlacke mit 50% einem Einheitszement zugesetzt, um Normmörtelprismen für die Festigkeitsprüfung herzustellen. Diese wurden auf die Anfangsfestigkeit nach 7 Tagen und Normfestigkeit nach 28 Tagen hin geprüft. Begleitend dazu wurde eine Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls durch Messung der Schalllaufzeit durchgeführt. Die zeitliche Entwicklung der Parameter wurden für den Vergleich der Verhaltensweisen der Schlacken verwendet.

Für die Prüfung der Raumbeständigkeit gemäß Autoklavprüfung nach ÖNORM B 3309-1 wurden ebenfalls Normmörtelprismen hergestellt, welchen 25% Schlacke für alle Mahlfineinheiten zugesetzt wurde. Anschließend wurde die Prüfung für alle Schlacken der Mahlfineinheit 4000 und 6000 Blaine mit 50% zugesetzter Schlacke durchgeführt.

Die Untersuchungen ergaben, dass eine Aufbereitung von Pfannenschlacken zu einem Zuschlagstoff in Kombination mit einem Zement der Festigkeitsklasse 42,5 zu Bindemitteln führt, welche aufgrund ihrer entwickelten Festigkeiten auch in hohen zugesetzten Schlackegehalten Werte innerhalb der Festigkeitsklasse 32,5 aufweisen. Im Vergleich zu Hochofenschlacke wurden nach 7 Tagen Festigkeiten gemessen, welche ähnlich oder um etwa 6% niedriger waren. Nach 28 Tagen wurden Festigkeiten gemessen, welche bei höchster Schlackenzugabe um bis zu 17% niedriger waren. Das Raumbeständigkeitsverhalten konnte in vergleichender Weise zu Hochofenschlacke beurteilt werden und zeigte bei 50% Schlackegehalt um bis zu 33% größere Längenänderung als Hochofenschlacke, jedoch innerhalb des Grenzwertes für eine positive Beurteilung.

Abstract

Goal of this thesis is to evaluate the suitability of ladle furnace slags originating from the production of various steel products as additive in concrete products regarding their strength and soundness behaviour. As reference for this determination values from the standards EN 197-1 and ÖNORM B 3309-1 were used. Granulated blast furnace slag was furthermore beneficiated in the same manner and used as reference alongside the required values from the standards.

To characterize the samples chemical analyses were conducted and a phase analysis using X-ray diffractometry (XRD). Further an eluate analysis was conducted to determine the amount of water-soluble Chromium [VI] of the slags. The material densities were determined using a helium pycnometer.

The slag samples were moreover examined regarding their comminution behaviour. For this evaluation the ladle furnace slags were crushed using a laboratory jaw crusher, the ladle furnace slags and the granulated blast furnace slag were ground in a rod mill and afterwards milled in a ball mill to the desired fineness. During crushing and milling in the ball mill the energy input was measured, for the rod mill it was calculated using a known procedure. While comminuting in the ball mill apart from the energy input also the quantity of the mass specific surface was measured in differing steps using the measurement method after Blaine. Apart from the comminution a magnetic separation was carried out with a bar magnet before the following comminution step to determine the portion of present steel.

For subsequent investigations different portions of the slags were milled to a fineness of 2000, 4000 and 6000 Blaine. The slags were added in the contents of 12,5%, 25% and for one ladle furnace slag of 50% to so called Einheitszement, to produce mortar prisms for strength testing. These were tested for the initial strength after 7 days and for the standard strength after 28 days. Accompanying these tests was the determination of the young's modulus through measurements of sound propagation time. The developments of these parameters over time were used to compare the behaviours of the slags.

For testing of soundness according to autoclave testing after ÖNORM B 3309-1 also mortar prisms were produced, to which 25% slag was added for all finenesses. Afterwards the testing was carried out for all slags for the finenesses of 4000 and 6000 Blaine with 50% added slag.

The tests showed that a beneficiation of ladle furnace slags to an additive and in combination with a cement of the strength class 42,5 yields binders which show strengths in the range of the strength class 32,5 even for high amounts of added slag. Compared to blast furnace slag the strengths measured after 7 days were similar or around 6% lower. After 28 days strengths were measured, which were up to 17% lower for the highest added slag content. The soundness behaviour was compared to the behaviour of granulated blast furnace slag and showed an up to 33% greater change in length compared to blast furnace slag for 50% added slag content, but within the limit for a positive evaluation

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 PROBLEMSTELLUNG	4
2 STAND DES WISSENS	5
2.1 Allgemeines zu Gießpfannenschlacken	5
2.2 Bisherige Verwendung von Schlacken aus dem Eisen- und Stahlwerk	6
2.3 Verwertung von Pfannenschlacken in Bindemitteln.	8
3 DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN	12
3.1 Probencharakterisierung	12
3.2 Aufbereitung	13
3.2.1 Zerkleinerung mit Brecher	14
3.2.2 Zerkleinerung mit Stabmühle	14
3.2.3 Zerkleinerung mit Kugelmühle	15
3.2.4 Magnetscheidung zwischen den Schritten	17
3.3 Festigkeit, E-Modul, Ausbreitmaß und Raumbeständigkeit	17
3.3.1 Herstellung der Probenkörper	18
3.3.2 Prüfung der Festigkeiten und mechanischer Parameter.....	20
3.3.3 Raumbeständigkeitsprüfung	21
4 ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNGEN.....	23
4.1 Probencharakterisierung	23
4.1.1 Chemische Analyse	23
4.1.2 Eluatanalyse	23
4.1.3 Mineralogische Analyse	24
4.1.4 Dichte	30
4.2 Aufbereitung	31
4.2.1 Zerkleinerung mit Brecher	31
4.2.2 Zerkleinerung mit Stabmühle	31
4.2.3 Zerkleinerung mit Kugelmühle	32
4.2.4 Mahlfineinheit Zement	36
4.2.5 Magnetscheidung zwischen den Schritten	37
4.3 Probenherstellung, Festigkeiten und Raumbeständigkeit	40
4.3.1 Ausbreitmaße der hergestellten Proben.....	40
4.3.2 Anfangsfestigkeit, Biegezugfestigkeit und E-Modul nach 7 Tagen	42
4.3.3 Normfestigkeit, Biegezugfestigkeit und E-Modul nach nach 28 Tagen	44
4.3.4 Zeitliche Entwicklung der Abmaße und Raumbeständigkeitsprüfung	46
5 INTERPRETATION DER ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	49

5.1.1	Probencharakterisierung	49
5.1.2	Aufbereitung und Mahlbarkeit	50
5.1.3	Ausbreitmaß	52
5.1.4	Zeitliche Entwicklung der Festigkeiten	53
5.1.5	Zeitliche Entwicklung des E-Modul	56
5.1.6	Raumbeständigkeit	58
6	RESÜMEE	60
7	LITERATUR.....	62
8	VERZEICHNISSE	64
	ANHANG.....	I

Abkürzungsverzeichnis

U	Umdrehung
k	Als Präfix für 1000
STABW	Standardabweichung
GG	Grobgut
FG	Feingut
UL	Umlaufende Last
EE	Energieeintrag
W/Z-Wert	Wasser/Zement-Wert
AHWZ	aufbereiteter, hydraulisch wirksamer Zusatzstoff für die Betonherstellung
RDA	Röntgendiffraktometrie

1 Problemstellung

Pfannenschlacken fallen bei der Produktion von Stahl an und werden derzeit Großteiles deponiert. In dieser Arbeit soll die Eignung der Pfannenschlacke als Substitut für Hochofenschlacken in Zementen untersucht werden um eine mögliche Verwertung als Bindemittel zu prüfen.

Dazu sollten Schlacken von silziumberuhigten Stählen sowie Hüttensand als Referenz chemisch und mineralogisch charakterisiert werden. Weiters soll der Einfluss der Mahlfeinheit als sogenannte mechanische Aktivierung und des zugesetzten Schlackegehalts auf die Festigkeiten und das Raumbeständigkeitsverhalten untersucht werden.

Hierfür sollte die stückige Pfannenschlacke, bzw. der körnige Hüttensand auf die Mahlfeinheiten 2000, 4000 und 6000 Blaine aufbereitet werden und die 7 und 28 Tage Festigkeit von Mörtelprismen in Abhängigkeit der Mahlfeinheit und Zugabemenge von Schlacke im Vergleich zu einer reinen Zementprobe ermittelt werden. Die Raumbeständigkeit sollte mittels Autoklaven erhoben werden.

2 Stand des Wissens

2.1 Allgemeines zu Gießpfannenschlacken

Schlacken sind Beiprodukte, welche in pyrometallurgischen Prozessen gebildet werden und während der Verarbeitung von Metallschmelzen anfallen [1]. Sie dienen während den Prozessen unterschiedlichen Zwecken wie der Bindung von Verunreinigungen in der Metallschmelze, als Schutz der darunterliegenden Schmelze gegen Oxidation oder auch als Isolationsschicht um den Wärmeverlust zu minimieren [2]. Schlacken der Eisen- und Stahlindustrie bestehen vorwiegend aus nichtmetallischen Oxidverbindungen, welche bei hohen Temperaturen als Schmelzen vorliegen und aufgrund des Dichteunterschiedes auf der darunterliegenden Metallschmelze schwimmen [3].

Die Schlacken der Eisen- und Stahlindustrie lassen sich in unterschiedliche Gruppen in Abhängigkeit des Prozessschrittes klassifiziert und sind beispielsweise in der Norm DIN 4301 identifiziert [4]. Diese werden in Hochofenschlacken als Eisenhüttenschlacke aus der Herstellung von Roheisen und die Stahlwerksschlacken eingeteilt. Die Stahlwerksschlacken umfassen unter anderem die LD-Schlacke oder Konverterschlacke aus der Erzeugung von Rohstahl aus dem vorangehenden Roheisen, Elektroofenschlacke aus der Verarbeitung von Stahlschrotten im Elektrolichtbogenofen und sekundärmetallurgische Schlacken aus Prozessen zur Nachbehandlung des Rohstahls. Diese genannten Schlacken unterscheiden sich in ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung, Kristallinität, Basizität und in möglichen Anwendungsgebieten. Für alle gilt, dass sie äußerlich natürlichen Gesteinen vulkanischen Ursprungs ähnlich sind.

Eine der möglichen Nachbehandlungen für Rohstahl in sekundärmetallurgischen Prozessen ist der sogenannte Gießpfannenprozess. Der Prozess hat die abschließende Entschwefelung des Stahls, die Reduktion der gelösten Gase Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff, die Entfernung etwaiger Verunreinigungen aus der Stahlschmelze und bei gewissen Stahlsorten die abschließende Entkohlung zum Ziel [5]. Zur Erfüllung der genannten Zwecke werden in diesem Prozess unterschiedliche Zusatzstoffe eingesetzt. Eine Unterteilung kann hier in sogenannte aluminiumberuhigte Stahlprodukte und siliziumberuhigte Stahlprodukte getroffen werden. In aluminiumberuhigten Stählen wird die Reduktion des Sauerstoffanteils mit zugesetztem Aluminium erreicht, welches Verbindungen mit dem in der Stahlschmelze gelösten Sauerstoff eingeht während bei siliziumberuhigten Stählen diese Reduktion des Sauerstoffanteils mit Ferrosilizium oder Silicomangan herbeigeführt wird [6].

Die in diesem Prozess anfallenden Schlacken weisen durch die diskontinuierliche Prozessführung und durch die Notwendigkeit der Erfüllung der Qualitätsanforderungen des Stahlproduktes eine deutlich größere Variabilität bei der chemischen Zusammensetzung im Vergleich zur Hochofenschlacke auf, welche aus einem kontinuierlichen Prozess stammt [5]. Dadurch ist ihre Beschreibung mit einfachen Kennwerten wie dem Gehalt an CaO, MgO und SiO₂ aus in der chemischen Zusammensetzung oder dem Verhältnis aus CaO+MgO/SiO₂, wie es zur Beschreibung von Hochofenschlacken laut EN 197-1 anwendbar ist nicht repräsentativ möglich [7]. Mineralogisch sind Gießpfannenschlacken ebenfalls komplexer zu beschreiben als Hochofenschlacken, da aufgrund der funktionellen Anforderungen und der diskontinuierlichen Arbeitsweise eine größere Bandbreite an möglichen vorhandenen Phasen vorherrscht [8,9].

Laut Literatur sind im Vergleich zur Hochofenschlacke die Gießpfannenschlacken in der Regel reicher an Calcia und ärmer an Silica und daher basischer, mit einem anderen CaO/SiO₂-Verhältnis als Hochofenschlacke, wobei dies wiederum abhängig von der zugrundegelegten Funktion der Schlacke ist [10,3]. Dadurch besteht auch die Tendenz zu einer höheren

Kristallinität verglichen zu Hochofenschlacke, bei welcher durch Granulierung in Wasser ein Produkt erzeugt werden kann, welches vollständig glasig vorliegt [3].

2.2 Bisherige Verwendung von Schlacken aus dem Eisen- und Stahlwerk

Schlacken fallen in den eingangs erwähnten Prozessen in Millionen Tonnen Maßstab als Nebenprodukt an und machen in etwa 15 bis 20% der Gesamtproduktionsmenge an Stahl aus [11]. Im Sinne der nachhaltigen Nutzung von Ressourcen besteht daher die Motivation diese anfallenden Tonnagen einer Nutzung zuzuführen. Hierfür sind unterschiedliche Anwendungsbeispiele und Fälle im Forschungsmaßstab bekannt, die sich die Eigenschaften der jeweiligen Schlacken zu Nutze machen. Jedoch zeigen unterschiedliche Schlacken auch unterschiedliche Charakteristika und haben somit eigene Problemstellungen, welche vor einer Nutzung zu bewältigen sind.

Eine wichtige Zieleigenschaft ist die hydraulische Aktivität von Schlacken, daher die Erstarrung und Erhärtung unter Wasseraufnahme. Granulierte Hochofenschlacke, sogenannter Hüttensand, zeigt eine latent hydraulische Aktivität. Daher ist der Einsatz von Hüttensand die vermutlich bekannteste Nutzung von Schlacken in der Zementindustrie. Hüttensand wird in unterschiedlichen Verarbeitungsschritten eingesetzt und kann laut EN 197-1 in den Produkten CEM II Portlandkompositzemente und in CEM III Hochofenzement als Zumahlstoff eingesetzt werden [7]. Aufgrund der latent hydraulischen Eigenschaften der Schlacke kann der Anteil an Schlacke in Zementen bis zu 95% betragen. Eine andere, ähnliche Möglichkeit, welche die gleiche Eigenschaft ausnutzt, stellt die separate Aufbereitung des Hüttensandes zu einem sogenannten aufbereiteten, hydraulisch wirksamen Zusatzstoff (AHWZ) gemäß ÖNORM B 3309 dar [12]. Im Gegensatz zum Zumahlstoff, der von der Zementindustrie zu einem Portlandkompositzement oder Hochofenzement verarbeitet wird, wird der AHWZ einem Bindemittelprodukt nachträglich zugeführt.

Außerdem hilft der Einsatz von geeigneten Schlacken wie Hüttensand oder auch Gießpfannenschlacken als Zumahlstoff dabei die Emissionen an CO₂ bei der Zementherstellung zu reduzieren, da beim Zementklinkerbrand CO₂ aus den karbonatischen Rohstoffen freigesetzt wird, während dies bei Schlacken nicht der Fall ist und sie somit ein geeignetes Substitut darstellen [13]. Beachtung findet auch der Einsatz von Stahlwerksschlacken als Klinker, welcher wiederum dazu beitragen kann, die Emissionen zu reduzieren, da beim Klinkerbrand kein CO₂ freigesetzt wird [14,15].

Aufgrund der großen anfallenden Mengen und Ähnlichkeiten zu natürlichen Gesteinen finden geeignete Schlacken wie Stahlwerksschlacken als Füllmaterial im Straßenbau oder als Zuschlagstoff in Betonen Anwendung. Hier werden die hohen Festigkeiten, Langlebigkeit und geeignete chemische Zusammensetzung der Schlacken ausgenutzt [16]. Etwaige negative Effekte wie ein Expandieren der Schlacken können in diesen Anwendungen durch geschickte Kombination mit anderen ausgleichenden Stoffen minimiert werden.

Weitere häufige Verwendungsmöglichkeiten von Schlacken können dem Bundesabfallwirtschaftsplan entnommen werden. Schlacken der Eisen- und Stahlindustrie sind im Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 Teil 2 als Abfälle der grünen Liste B1210 und B1200 (granuliert) genannt [17]. Als mögliche Anwendungen werden beispielsweise der Einsatz von Schlacken zur Herstellung von Phosphatdüngern wie historisch bei sogenannten Schlacken aus dem Thomas-Verfahren, Einsatz als Sandstrahlmittel, Hüttensandmehl für Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel oder die stoffliche Verwertung zur Rückgewinnung von Wertstoffen (Metallen) genannt.

Die naheliegendste Nutzungsmöglichkeit stellt das werkinterne Recycling von Schlacken dar, welches laut Modellberechnungen nach dem Prinzip des slagless steelmaking für alle Schlacken im Eisen- und Stahlbereich möglich zu sein scheint. Hierbei ist einerseits die interne Wertstoffrückgewinnung aus den Schlacken ein Ziel. Andererseits können auf diese Weise auch Rohstoffe zur Bildung von Schlacken eingespart werden bzw. die anfallenden Schlackenvolumina minimiert werden [1]. Das Potential zum internen Recycling von Schlacken ist sogar über Grenzen der Stahlsorten hinweg möglich, wie bei der Nutzung von Gießpfannenschlacken aus aluminiumberuhigten Stahlprodukten zur Erzeugung von siliziumberuhigten Produkten zur Einsparung der eingesetzten Menge an Kalk gezeigt wurde [6].

Als weitere Verwendungsmöglichkeit sind Eisen- und Stahlwerkschlacken momentan Interesse aktueller Forschung im Versuchsmaßstab bezüglich deren Verwendungsmöglichkeiten in Bioleachingprozessen, da Schlacken aus dem Elektrolichtbogenofen sehr gute Eignung zeigen und beispielsweise auch Pfannenschlacken ein geeignetes Verhalten für eine Verwendung in diesen Prozessen aufweisen, wodurch Kosten für die Verwendung von der üblichen Kalkmilch zur Einstellung des pH-Wertes in diesen Prozessen reduziert werden kann während zeitgleich auch die Menge an deponierten Schlacken minimiert wird. [18].

Ein weiteres Beispiel für eine Anwendung im Versuchsmaßstab ist die Nutzung von Schlacken aus dem Eisen und Stahlwerk als Adsorptionsmittel für Schwermetalle zur Remediation von acid mine drainage in ehemaligen Bergbauen, wo sich zeigte, dass Schlacken aus dem Eisenwerk geeigneter für diesen Prozess sind als jene aus dem Stahlwerk, wobei auf den genauen Herkunftsprozess der jeweiligen Schlacke nicht eingegangen wurde [19].

Ebenfalls interessant ist der mögliche Einsatz von calcia- und silicareichen Schlacken in Prozessen zur Rückgewinnung von seltenen Erd-Oxiden aus recycelten Akkus, wobei die Schlacken auch hier als Adsorptionsmittel eingesetzt werden [20].

Bei vielen Pfannenschlacken ist jedoch aktuell keine Verwendung erlaubt oder möglich, wodurch bei einigen Schlacken der größte Anteil deponiert werden muss. In der europäischen Union wird geschätzt, dass etwa 4 Millionen Tonnen an Gießpfannenschlacke im Jahr 2013 produziert wurden [21]. Davon wurden aufgrund von zu hoher Belastung durch Chrom und aufgrund fehlender Raumbeständigkeit 80% deponiert [21].

2.3 Verwertung von Pfannenschlacken in Bindemitteln.

Gießpfannenschlacken zeigen in vielen Fällen ebenso wie Hochofenschlacke eine hydraulische Aktivität [5]. Daher wird an Einsatzmöglichkeiten im Bauwesen und in der Zementindustrie intensiv geforscht, da ein solcher Einsatz von industriellen Beiprodukten einerseits dem Erhalt von primären Rohstoffquellen dient und andererseits durch deren Nutzung der hohe Kohlendioxidaustoß und Energiebedarf beim Klinkerbrand reduziert werden kann [15]. Weiters kann durch den Einsatz von Gießpfannenschlacken in solchen Anwendungsfällen dazu beitragen werden die anfallenden Schlacken nicht deponieren zu müssen.

Für den Einsatz von Schlacken in Bindemitteln sind in der Literatur einige Anforderungen zu finden, welche lauten [22]:

- Schlacke muss granuliert oder pelletiert sein und muss einen Anteil an Glasphase im Bereich über 85 bis 95% aufweisen
- Die Schlacke muss eine strukturelle Unordnung aufweisen, um einen möglichst geringen Polymerisationsgrad in der Glasphase zu haben, um die hydraulische Aktivität zu erhöhen
- Die Schlacke muss basisch sein, daher ein $\text{CaO} + \text{MgO}/\text{SiO}_2$ Verhältnis größer 1 aufweisen
- Die spezifische Oberfläche sollte im Bereich von 4000 bis 6000 cm^2/g sein, da die spezifische Oberfläche eine wichtige Rolle beim Abbinden spielt.

Gießpfannenschlacken können diese Anforderungen nicht immer erfüllen. Daher wird über mechanische, chemische oder thermische Aktivierung versucht, die notwendige Reaktivität der Schlacke für einen Einsatz in Bindemitteln zu bewerkstelligen [14].

Mechanische Aktivierung ist eine Form der Aktivierung von Gießpfannenschlacken, welche bereits bei anderen Beiprodukten, die Einsatz gemeinsam mit Bindemitteln finden erfolgreich erprobt und eingesetzt wird. Durch die Aktivierung ist es möglich die Reaktivität der Schlacken durch Erhöhung der spezifischen Oberfläche und Einbringen von einem größeren Maß an struktureller Unordnung so weit zu erhöhen, dass sie in einen metastabilen Zustand überführt werden können und als hydraulisch aktiv gelten [23]. Im Labormaßstab findet diese Aktivierung mit unterschiedlichen Arten von Mühlen statt, welche durch Energieeintrag mit Mahlkörpern die spezifische Oberfläche durch Zerkleinerung erhöhen. Diese Art der Aktivierung findet auch bei Flugasche und Hochofenschlacke Anwendung, um diese für einen Einsatz in Bindemitteln reaktiver zu machen [24].

Chemische Aktivierung zur Erhöhung der Reaktivität von Pfannenschlacken besteht im Wesentlichen aus der Zugabe von Alkalien um den pH-Wert zu beeinflussen, bei dem die Hydratisierungsreaktion des Bindemittels stattfindet [24]. Dadurch kann das Aufbrechen der Si – O und Ca – O Bindungen der vorhandenen Phasen zu unterschiedlichen Hydratationsprodukten erleichtert werden. Diese Art der Aktivierung birgt jedoch den Nachteil, dass es keine allgemein gültige Regel für den Einsatz von Alkalien in Abhängigkeit von der vorliegenden der Phasenzusammensetzung gibt und daher vor jedem Einsatz einer bestimmten Schlacke zuerst die bestgeeignete Alkaliengabe als Aktivator eruiert werden muss [24].

Thermische Aktivierung von Schlacken wird über unterschiedliche Möglichkeiten der Abkühlung und Erstarrung der Schlacken erreicht. Eine möglichst rasche Abkühlung, um einen möglichst großen Anteil an Glasphase in der erstarrten Schlacke zu erreichen gilt als Möglichkeit die Reaktivität einer Schlacke zu erhöhen, da die freiwerdende Aktivierungsenergie bei einer rasch erstarrten Schlacke höher ist als jene einer kristallinen erstarrten Schlacke.

Weiters werden als große Problemstellungen das langsam eintretende Expansionsverhalten von frei vorliegendem MgO und CaO identifiziert [5]. Die beiden Phasen werden zugesetzt um die Lebensdauer der Zustellung der Gießpfannen zu erhöhen, da durch deren Einsatz die Schlacke mit CaO und MgO gesättigt wird und somit die Löslichkeit der eingesetzten Feuerfestprodukte minimiert wird [6]. Diese Problematik kann durch eine rasche Erstarrung der Schlacke reduziert werden, die Glasigkeit somit erhöht und MgO in der Glasphase statt als kristalline Phase gebunden werden. [16]. Ein Vorliegen von bis zu 5,0% MgO in einem Zement gilt laut EN 197-1 als unproblematisch und ist als erster Richtwert dienlich [25]. Laut Literatur korreliert das Expansionsverhalten einer Pfannenschlacke nicht direkt mit den Gehalten an freiem CaO und freiem MgO aufgrund der Komplexität der Zusammensetzung von Schlacken und muss gegebenenfalls im Einzelfall eruiert werden [26].

Eine weitere relevante Problemstellung, welche alle Schlacken aus dem Stahlwerk betrifft, ist die Löslichkeit von Schwermetallen, bei Gießpfannenschlacken im Speziellen Chrom. Wasserlösliche Schwermetalle gelten als Umweltgefahren, weshalb dieses Verhalten als zusätzliche Anforderung vor dem Einsatz in Bindemitteln zu untersuchen ist. Bei vorliegendem Chrom in der Schlacke kann selbst bei rascher Abkühlung und Bindung von Chrom in der Glasphase eine Auslaugung durch Wasserkontakt nicht verhindert werden [16]. Versuche zeigen trotz der genannten Problemstellungen eine potentielle Eignung von Gießpfannenschlacken in Kombination mit Bindemitteln in Kompositprodukten, selbst unter widrigsten Umweltbedingungen [21]. Neben Chrom identifiziert der Bundesabfallwirtschaftsplan auch Metalle wie Vanadium oder Blei als mögliche Gefahrenquellen. Diesen anderen Elementen wird in der Literatur im Vergleich zu Chrom weniger Aufmerksamkeit geschenkt.

Im Zuge von Untersuchungen der hydraulischen Aktivität in Bezug auf die in Pfannenschlacken vorhandenen Phasen wurden unterschiedliche Verhaltensweisen der einzelnen häufig auftretenden Phasen festgestellt. Häufig auftretende Phasen sind abhängig von der Funktion der Schlacke im Gießpfannenprozess, von der Art der Abkühlung und von den weiteren Verwendungsmöglichkeiten für die Schlacke. Als Hauptkomponenten werden Silikatphasen, Oxidphasen und Aluminatphasen identifiziert. Beispiele für auftretende Silikatphasen sind C_3S und Polymorphe von C_2S . Beispiele für auftretende Oxide sind neben CaO und MgO in freier Form auch eine CaO-FeO-MnO-MgO Mischphase [3]. Beispiele für auftretende Aluminatphasen sind Mayenit ($C_{12}A_7$) und Tricalciumaluminat (C_3A) [27]. Neben diesen Phasen werden auch häufig Åkermanit (C_2MS_2), Merwinit (C_3MS_2), Anorthit (CAS_2), Gehlenit (C_2AS), Melilith, Brownmillerit (C_4AF) und noch weitere Phasen in kleinerem Ausmaß als Phasenbestandteile identifiziert. Einige dieser genannten Phasen kommen auch in Zementen vor und sind als hydraulisch aktiv bekannt.

Als erste Phasen, welche reagieren gelten die Calciumaluminat, welche auch für die Frühfestigkeit verantwortlich gemacht werden. Tricalciumaluminat, Mayenit und Brownmillerit reagieren in einer ersten Welle zuerst und setzen Energie durch die Reaktion frei [9]. Anschließend daran reagieren andere Phasen wie Merwinit, Åkermanit, Dicalciumsilikat, Freikalk und frei vorliegender Periklas. Als erst später reagierende Phasen gelten Freikalk und Periklas, welche für ein langsam eintretendes Expansionsverhalten verantwortlich gemacht werden [5]. Dass eine Ableitung der hydraulischen Aktivität aufgrund der Phasenzusammensetzung nicht einwandfrei möglich ist, zeigt sich anhand der Phase Åkermanit, welche in einigen Publikationen als hydraulisch aktiv, in anderen wiederum als nicht hydraulisch aktiv identifiziert wird [8].

Eine der genannten Phasen gilt als Ursache für die als charakteristische Erscheinungsform von Pfannenschlacken als zerfallende, und schwer logistisch handhabbare Masse. Diese Phasen sind die Polymorphe von C_2S , welches infolge der Abkühlung der Gießpfannenschlacken an den dafür vorgesehenen Schlackeplätzen eine Umwandlung von monokliner β - C_2S Phase zur orthorhombischen γ - C_2S Phase in einem Temperaturbereich von

400°C bis 500°C vollzieht [28]. Aus dieser Umwandlung folgt eine Volumenexpansion infolge der Abkühlung von etwa 12%, welche zu hohen thermischen Spannungen in der Schlacke führt [28]. Dadurch neigen Pfannenschlacken bei der Lagerung zu einem Zerfall in kleinere Körner zum Abbau der thermischen Spannungen und zeigen ein Erscheinungsbild wie in Abbildung 1 ersichtlich.



Abbildung 1: Erscheinungsbild von Pfannenschlacken nach Abkühlung (aus [28])

Aufgrund der bereits erwähnten Eigenschaften wurde Pfannenschlacke als potentieller Rohstoff für die Zementproduktion im Labormaßstab in Erwägung gezogen. Hierbei wurde die Pfannenschlacke in ein Rohmehl eingebracht, aus dem Zemente hergestellt wurden. Durch Anpassung des Kalkstandards, des Tonerdemoduls und des Silikatmoduls konnte ein Zement mit hohem Gehalt an Alit hergestellt werden welcher chemisch und mineralogisch keine negativen Einflüsse durch die Verwendung von Pfannenschlacke als Teil der Ausgangsstoffe aufwies. Durch Einbringen von bis zu 39,2% Schlacke in das Rohmehl konnten die mechanischen Eigenschaften wie Druckfestigkeit und Raumbeständigkeit sogar positiv beeinflusst werden. Eine Auffälligkeit dieser Untersuchungen war eine festgestellte längere Zeitdauer bis zum Erstarrungsbeginn der Proben mit Pfannenschlacken verglichen zu Proben ohne zugesetzter Schlacke. Dies wird dem enthaltenen Periklas zugeschrieben, welcher im Vergleich zu anderen möglichen Phasen träger reagiert. Allgemein konnte die Eignung von chemisch und mineralogisch geeigneten Pfannenschlacken als Rohstoff für die Herstellung von Portlandzementen nachgewiesen werden [15].

Im Versuchsmaßstab wurden Pfannenschlacken in unterschiedlichen Varianten zu Mörteln verarbeitet. Einerseits wurden Versuche durchgeführt, um den Sand in Mörteln durch Pfannenschlacke zu ersetzen, andererseits wurden Pfannenschlacken in Mischungen mit Zement zu Kompositbindemitteln verarbeitet. Diese Mörtel zeigten bessere Fließfähigkeit und dadurch bessere Verarbeitbarkeit, wodurch sich in gewissen Anwendungen für Mörtel im Bauwesen Möglichkeiten für den Einsatz eröffnen. Durch diese Versuche konnte die Zugabe von Zusätzen zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit zur Gänze vermieden werden. Die entwickelten mechanischen Kennwerte zeigten ein latent hydraulisches Verhalten von Pfannenschlacken, wodurch die Substitution von Pfannenschlacken als Ersatz für Zement zu keinen gravierenden Festigkeitseinbußen führte [29].

In anderen Versuchen wurden mineralogisch geeignete Pfannenschlacken nach Magnetscheidung, Mahlung und Siebung auf ihre Eignung als Mörtel in Kombination mit Portlandzement und Sand mit Mörteln aus Portlandzement, hydraulischem oder hydrierten Kalk und Sand verglichen. Hier zeigte sich, dass die Zusammensetzung des Kompositbindemittels mit zugesetzter Pfannenschlacke vergleichbar ist in der chemischen Zusammensetzung mit dem Kompositbindemittel mit zugesetztem hydraulischem Kalk. Diese beiden Produkte zeigten auch ähnliche hydraulische Indizes. Weiters zeigte die Schlacke kein

nennenswertes Expansionsverhalten. Im Vergleich zeigte das Produkt mit der verwendeten Pfannenschlacke einen höheren Wassergehalt und eine höhere Schütt- und Stoffdichte. Bezüglich der Eignung zeigte das Produkt mit der Pfannenschlacke ein zufriedenstellendes Verhalten bei nahezu allen Vorgaben mit teils besseren mechanischen Eigenschaften als die etablierten Mörtelarten, jedoch nicht bei der Abbindezeit. Diese Eigenschaft kann möglicherweise vorteilhaft sein in Anwendungen, bei denen eine möglichst lange Verarbeitungszeit von Interesse ist [26].

3 Durchführung der Untersuchungen

3.1 Probencharakterisierung

Als Ausgangsproben für die Untersuchungen wurden Proben von Gießpfannenschlacken, welche aus der Herstellung von unterschiedlichen siliziumberuhigten Produkten stammen herangezogen. Diese wurden während des Prozesses abgeschöpft und auf eine Stahlplatte gegossen, wo sie frei erstarrten. Insgesamt 13 Proben von drei Produkten genommen, wobei sechs Proben zum Produkt Gießpfannenschlacke 1, drei Proben zum Produkt Gießpfannenschlacke 2 und vier Proben zum Produkt Gießpfannenschlacke 3 gehören. Für die weitere Aufbereitung wurden die Proben innerhalb derselben Produkte vereinigt und weiterführend als S1 für Gießpfannenschlacke 1, S2 für Gießpfannenschlacke 2 und S3 für Gießpfannenschlacke 3 bezeichnet. Sämtliche Proben der Gießpfannenschlacken waren in der Korngrößenverteilung breit gestreut von teils handgroßen Stücken bis hin zu sehr feinen Splittern. Optisch war S3 am dunkelsten mit teilweise schwarz glänzenden Stücken. S2 zeigte ausgeprägte Grün- und Brauntöne. S1 war farblich und im Erscheinungsbild S3 ähnlich, jedoch weniger ausgeprägt dunkel.

Neben den Gießpfannenschlacken wurde als Referenzprobe granuliert Hochofenschlacke, sogenannter Hüttensand, untersucht. Diese Schlacke wurde im Wasserbad granuliert und wird weiterführend als Probe HO bezeichnet. Diese Probe war optisch im Vergleich zu den Pfannenschlacken gleichförmiger in der Korngrößenverteilung und farblich nahezu einheitlich hellbraun. Da die hier angelieferte Probenmenge größer war als bei den Pfannenschlacken, wurde die Probe geteilt. In Tabelle 1 sind die Bezeichnungen und die zugehörigen Massen, welche weiter aufbereitet wurden, angegeben. Die angegebene Masse wurde für HO nach der Trocknung im Trockenschrank bei 105°C bis Massekonstanz gewogen, da die Probe im Anlieferungszustand merklich feucht war.

Tabelle 1: Ausgangsproben mit zugehöriger Ausgangsmasse

Probe	Produkt	Masse [g]
HO	Hüttensand	6348,35
S1	Gießpfannenschlacke 1	7608,78
S2	Gießpfannenschlacke 2	3507,66
S3	Gießpfannenschlacke 3	3700,52

Für die Festigkeitsuntersuchungen wurde neben den Schlacken sogenannter Einheitszement der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie verwendet. Dieser ist als CEM I 42,5 ausgewiesen. Weiters ist im zugehörigen Sicherheitsdatenblatt und auch als Produkthinweis erwähnt, dass ein Chromatreduzierer zugesetzt ist, der den Gehalt an wasserlöslichem Chrom (VI) auf weniger als 0,0002% reduziert. Optisch handelt es sich um ein graues, sehr feines Pulver.

Die genannten Proben wurden durch das Labor der Firma *voestalpine Stahl Donawitz GmbH* chemisch analysiert. Zur Analyse wurden Proben aus unterschiedlichen Zerkleinerungsschritten untersucht, um zu überprüfen, ob zwischen den einzelnen Proben ein signifikanter Unterschied infolge der Zerkleinerung feststellbar ist.

Für die erwähnten Proben wurde auch eine Analyse des Eluationsverhaltens durch das Labor der Firma *voestalpine Stahl Donawitz GmbH* durchgeführt. Aufgrund von Mangel an Probe konnte die Analyse für die Probe S3 nicht durchgeführt werden.

Die mineralogische Zusammensetzung wurde mittels Röntgendiffraktometrie charakterisiert. Hierfür wurde das Pulverdiffraktometer Modellnummer D8 der Firma *Bruker* mit Lynx eye

Detektor und einer Cu-Anode verwendet. Die Schrittweite betrug $0,01^\circ$ und die Messzeit pro Schritt 1 sec. Die Auswertung wurde mit der Software Eva der Firma *Bruker* und der Datenbank ICDD PDF4+ und die quantitative Analyse mit dem Programm Topas der Firma *Bruker* durchgeführt.

Untersucht wurden die in Tabelle 2 angeführten Proben CEM I, HO, S1, S2 und S3 jeweils nach der Zerkleinerung in der Stabmühle. Zur Durchführung mussten die Proben mit einer Scheibenschwingmühle analysefein gemahlen werden.

Die oben genannten qualitativen Informationen wurden mittels Rietveldanalyse quantitativ abgeschätzt. Diese lieferte eine Phasenzusammensetzung für die genannten Proben, welche in Tabelle 10 ersichtlich ist.

Die Stoffdichten der untersuchten Proben wurde mit einem Heliumpyknometer *AccuPyc 1340* der Firma *MICROMERITICS* bestimmt. Hierfür wurde eine 10 cm^3 Messzelle verwendet und der vorgegebene Ablauf zur Kalibration befolgt. Das Gerät bestimmt pro Versuch und eingewogener Masse jeweils drei Volumina und gibt diese als Mittelwert aus. Für jede untersuchte Probe wurde der Versuch drei Mal durchgeführt und aus den genannten Mittelwerten ebenfalls ein arithmetischer Mittelwert bestimmt. Anschließend wurde die Stoffdichte jeder Probe als Quotient der eingewogenen Masse und dem Mittelwert der bestimmten Volumina errechnet. Die Dichten sind an den Schlackeproben nach der Zerkleinerung in der Stabmühle, daher an Körnern $<1 \text{ mm}$ bestimmt worden. Lediglich beim CEM I wurde die Stoffdichte am bereits fertigen Produkt bestimmt.

3.2 Aufbereitung

Die Schlacken S1, S2, S3 wurden zuerst mit einem Backenbrecher unter Messung der Energieaufnahme zerkleinert. Im Anschluss darauf wurde eine Magnetscheidung mit einem Analyse magneten durchgeführt, um magnetisierbare metallische Einschlüsse abzutrennen, da diese Körner in der anschließend folgenden Zerkleinerung nicht brechen, sondern sich duktil verformen.

Darauf folgte die Zyklenmahlung in der Stabmühle. Hier wurde im diskontinuierlichen Mahlvorgang das Feingut $<1 \text{ mm}$ abgeseibt, während das Grobgut als umlaufende Last wiederaufgegeben wurde. Für die Zerkleinerung in der Stabmühle wurde der Energieeintrag über die Mühlenformel nach Steiner errechnet. Als Abschluss der Zyklenmahlung wurden schwer zerkleinerbare Körner mit einem Handmörser zerkleinert. Nach diesem Zerkleinerungsschritt folgte erneut eine Magnetscheidung mit dem Analyse magneten.

Die Proben $<1 \text{ mm}$ wurden dann in der Kugelmühle unter Messung der Energieaufnahme auf die vorgegebenen Mahlfeinheiten hin chargenweise zerkleinert. Zuerst wurde hierfür mit einer ersten Probe auf eine Mahlfeinheit von 6000 Blaine zerkleinert. Anhand der Umdrehungszahl, welche zum Erreichen dieser Mahlfeinheit erforderlich war, wurden die Umdrehungszahlen für die chargenweise Zerkleinerung über das Verhältnis der Schüttdichten und Füllungsgrad errechnet. Diese wurden dann gegebenenfalls anhand der tatsächlichen Zerkleinerung angepasst, bis eine ausreichende Mahlfeinheit für die Homogenisierung festgestellt werden konnte. Bei Erreichen der jeweiligen Mahlfeinheit wurden die Chargen mit einem Sieb homogenisiert, wobei zeitgleich etwaige Verunreinigungen wie Pinselhaare entfernt wurden. Daraus wurde die jeweilige Teilprobe der geforderten Mahlfeinheit abgetrennt, erneut auf die spezifische Oberfläche nach Blaine hin untersucht und für die Folgeversuche abgepackt. Die übrige Probe wurde weiter auf die nächste Mahlfeinheit aufgemahlen. Dieser Schritt wurde wiederholt, bis die Zielmahlfeinheit von 6000 Blaine erreicht wurde. Diese Teilprobe wurde dann mit der ersten Probe, welche als Richtwert herangezogen wurde vereinigt und ebenfalls abgepackt.

Auch in diesem Zerkleinerungsschritt wurde eine Magnetscheidung mit dem Analysemagneten durchgeführt, jedoch nicht mehr zu den anderen ausgebrachten Magnetprodukten hinzugefügt, da einerseits sehr wenig Masse ausgebracht wurde und diese andererseits nicht vom Abrieb der Mahlkörper unterscheidbar war.

Die Probe der Hochofenschlacke durchlief denselben Prozess wie die Proben der Gießpfannenschlacken, jedoch ohne den Zerkleinerungsvorgang mit dem Laborbrecher, da der Hüttensand bereits ausreichend fein genug war, um in der Stabmühle zerkleinert zu werden.

3.2.1 Zerkleinerung mit Brecher

Im ersten Zerkleinerungsschritt wurden die Proben der Gießpfannenschlacken mit dem Laborbrecher *BB200* der Firma *RETSCH* zerkleinert. Hierbei wurde die Energieaufnahme des Brechers während der Zerkleinerung gemessen. Da die Leistungsaufnahme in diesem Schritt die jeweilige Momentanleistung für jede Sekunde des Zerkleinerungsvorganges aufnimmt, wurde für die als stabile Bereiche identifizierten Leistungswerte ein arithmetischer Durchschnitt errechnet. Als Nettoleistung wird jene Leistung angegeben, bei der nach Abzug der Leerlaufleistung davon auszugehen ist, dass diese auf das Gut übertragen wird. Die Multiplikation mit der Verweilzeit liefert hier den Energieeintrag für den jeweiligen Vorgang. Bezieht man diesen Energieeintrag auf die Aufgabemasse erhält man den spezifischen Energieeintrag für diesen Zerkleinerungsschritt. Bei S1 wurden die Maulweiten 10, 8 und 5 mm, bei S2 wurden 10 und 5 und bei S3 10, 5 und 2,5 mm eingestellt. Bei S3 zeigte sich, dass die Maulweite bei 2,5 mm zu eng war, da sich bei diesem Vorgang die Brecherbacken geringfügig aus der optimalen Position verschoben haben.

3.2.2 Zerkleinerung mit Stabmühle

Nach der Zerkleinerung mit dem Brecher, einer Magnetscheidung mit dem Analysemagneten, auf welche in 3.2.4 eingegangen wird und einer Siebung mit 1 mm Maschenweite wurden die Proben der Gießpfannenschlacken, welche >1 mm waren in der Stabmühle zerkleinert. Dieser Zerkleinerungsvorgang wurde auch für die Hochofenschlacke durchgeführt. Die Menge an Probe, welche nach dem Brechen bereits <1 mm war wurde abgetrennt, da sie bereits fein genug für die Mahlung in der Kugelmühle war und nicht in der Stabmühle gemahlen werden musste.

Bei der verwendeten Stabmühle *R0.B0.* der Firma *ALPINE Augsburg* handelt es sich um ein diskontinuierliches Zerkleinerungsaggregat, in dem die sogenannte Zyklenschlagmahlung erfolgt. Für den Zerkleinerungsvorgang werden Stäbe als Mahlkörper verwendet, welche mit der Aufgabe in den Topf gegeben werden. Der Vorgang wurde als Trockenmahlung durchgeführt. Zur Berechnung der Topfdrehzahl wurde die kritische Drehzahl angesetzt. Diese folgt aus der Geometrie der Mühle und ist jene Drehzahl des Topfes, bei dem die Zentrifugalkraft und Gewichtskraft eines Kornes gleich sind und es somit in der Mühle an der Wand verweilt. Diese errechnet sich über die Formel [30]

$$n_{crit} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{d_i}} \quad (1)$$

wobei n_{crit} die kritische Drehzahl in 1/s, g die Erdbeschleunigung in m/s^2 und d_i der Innendurchmesser der Mühle in m ist und in diesem Fall 0,153 m beträgt. Aus dieser Formel ergibt sich für die kritische Drehzahl der Wert 1,80 1/s.

Für die eingestellte Topfdrehzahl wird 0,7 mal die kritische Drehzahl angesetzt, da es sich dabei um einen gängigen Faktor handelt, bei dem eine Kaskadenwirkung innerhalb der Mühle gegeben ist [30]. Daraus ergibt sich für n der Wert 1,26 1/s. Mit dieser Drehzahl wurden sämtliche Zerkleinerungsschritte in der Stabmühle durchgeführt.

Ein Ziel bei dieser Art der Zerkleinerung ist es, einen stabilen Bereich von etwa 100% umlaufender Last über einige Mahlzyklen zu erreichen, da dies erfahrungsgemäß den niedrigsten Energieeintrag erfordert. Diese umlaufende Last ist der Quotient aus Grobgut geteilt durch Feingut, welches nach jedem Vorgang durch Siebung mit einer Maschenweite von 1 mm und Wägung der Teilmassen ermittelt wurde.

Die Aufgabemasse ist eine Folge des Volumens zwischen den Mahlkörpern in der Mühle. Diese wurde für diese Zerkleinerungsvorgänge jedoch nicht errechnet, sondern bei der Aufgabemasse von etwa 500 g fixiert.

Die Energieeinträge während der Mahlzyklen errechnen sich über die Mühlenformel nach Steiner. Diese lautet [31]

$$\Delta e = c_p \cdot g \cdot M_K \cdot d_i \cdot \frac{U}{M_F} \quad (2)$$

Wobei Δe die spezifische Nettozerkleinerungsenergie in J/kg, c_p der Leistungsfaktor nach Steiner ist, welcher mit 1,2 angenommen wurde, M_K die Masse der Mahlkörper in kg ist, d_i der Mühleninnendurchmesser in m, U die Anzahl der Umdrehungen und M_F die Feingutmasse in kg ist.

Zu Ende der Mahlvorgänge konnten die letzten Körner nicht vollständig mit der Stabmühle auf <1 mm aufgemahlen werden. Diese wurden als schwer zerkleinerbare Körner mit dem Handmörser zerkleinert. Diese Massen wurden bei den jeweiligen Energieeinträgen nicht berücksichtigt.

3.2.3 Zerkleinerung mit Kugelmühle

Im Anschluss an die Zerkleinerung der Schlacken >1 mm in der Stabmühle und nach einer erneuten Magnetscheidung, auf welche in 3.2.4 eingegangen wird, wurden die Proben vereinigt und im Rahmen einer Dissertation selbst gebauten Mühlenversuchsstand *WIECHERT* des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredelung chargenweise zerkleinert. Bei diesem Aggregat handelt es sich um eine Kugelmühle im Labormaßstab, welche die eingebrachte Zerkleinerungsenergie über den Aufbau mitaufzeichnet. Dadurch wird es möglich ein Maß für die Mahlbarkeit festzulegen, wobei das Ergebnis die spezifische Zerkleinerungsenergie als Quotient der Gesamtenergie und der Aufgabemasse ist.

Für die Zerkleinerung wurden Stahlkugeln als Mahlkörper verwendet. Da anfallender Abrieb oder Ausbrüche aus diesen nicht in einfacher Weise von etwaigen in den Schlacken vorhandenen Stahlkörnern unterscheidbar waren und die Mengen sehr gering waren, wurden die nach dieser Zerkleinerung abgeschiedenen magnetischen Körner nicht im gesamten Magnetprodukt berücksichtigt.

Die optimale Aufgabe für die chargenweise Zerkleinerung wurde mit dem vorgegebenen Volumen zwischen den Mahlkörpern von 473 cm³ und der jeweiligen Schüttdichte, welche für alle Proben mit einem Standzylinder in je 3 Wägungen ermittelt wurde, errechnet. Mit den angesetzten Schüttdichten und dem genannten Volumen zwischen den Mahlkörpern lässt sich die optimale Aufgabemasse errechnen. Da die gesamte Aufgabemasse einer jeweiligen

Schlacke diese optimale Aufgabemasse überstieg, war eine chargenweise Mahlung notwendig.

Zur Bestimmung der während der Zerkleinerung eingebrachten Energie war vor der Mahlung jeder Schlacke eine Leerlaufmessung notwendig, um nach Abzug der Leerlaufleistung von jeder Bruttoleistung die Nettoleistung des jeweiligen Mahlvorgangs zu erhalten. Diese Leerlaufmessung wurde nach jeder Zwischenreinigung der Kugelmühle bzw. vor der ersten Mahlung einer jeden Schlacke durchgeführt. Zwischenreinigungen der Kugelmühle zwischen den Mahlfleinheiten wurden vermieden, um die Mengen an Probenverlusten zu minimieren. Daher weichen die Aufgaben von den ausgewogenen Massen nach der Mahlung im Bereich von bis zu einigen zehn Gramm ab.

Um einen Eindruck für das jeweilige Zerkleinerungsverhalten zu bekommen und um einen Anhaltspunkt für die Abschätzung der notwendigen Umdrehungszahl zu erhalten, wurde für alle Schlacken mit einer ersten Probe auf eine Mahlfleinheit von 6000 Blaine zerkleinert. Diese Mahlfleinheit wurde in mehreren Schritten hergestellt, wobei bei jedem Zwischenschritt die spezifische Oberfläche nach dem Verfahren der Oberflächenmessung nach Blaine festgestellt wurde. Da bei diesem Arbeitsschritt das Aufgabegut dasselbe blieb und somit nur in den Zwischenschritten für die Oberflächenmessung entnommen und wieder aufgegeben wurde, wurde die jeweils erste Probe in der Kugelmühle für einen Vergleich der Mahlbarkeit herangezogen. Die eingebrachten Energieeinträge wurden auf die initiale Aufgabemasse bezogen, wobei es durch die Entnahmen zwischen den Mahlvorgängen und durch die Anhaftungen im Mühltopf und an den Mahlkörpern zu beträchtlichen Verlusten bei diesen Proben kam.

Die Messungen der massespezifischen Oberfläche wurden am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung mit einem Blaine-Gerät der Firma *Tonindustrie KG* des Typs 7201/374/68 mit der Messzelle 374 anhand von jeweils drei Proben durchgeführt. Hierfür wurde bei jeder festzustellenden Mahlfleinheit eine Menge, welche fortlaufend als Einwaage in den Tabellen mit Informationen zu den Mahlfleinheit angegeben ist, zwischen den zugehörigen Filterpapieren verdichtet. Die Verdichtung wurde durch dreimaliges Klopfen auf einer Gummiunterlage erreicht, bis der aufliegende Stempel zur Verdichtung abgeschlossen hat. Die ordnungsgemäße Verdichtung wurde mit einem Messschieber nachkontrolliert, indem auf eine für diese Messzelle vorgegebene Länge hin gemessen wurde. Sofern die Verdichtung nicht ordnungsgemäß durchgeführt werden konnte, wurde die jeweilige Messung verworfen und die Einwaage angepasst. Anschließend wurde die Probe in die Messvorrichtung eingebracht und die jeweilige Falldauer des Messflüssigkeitsspiegels zwischen den vorgegebenen Messmarken mit einer Stoppuhr bestimmt. Diese Falldauer und die zugehörige Temperatur wurden je drei Mal pro Probe aufgezeichnet. Über die Berechnungsmethode für diese Messzelle wurde die volumenspezifische Oberfläche und in einem weiteren Rechenschritt unter Berücksichtigung der Einwaage die massespezifische Oberfläche in cm^2/g oder Blaine ermittelt.

Die chargenweise Zerkleinerung wurde im Anschluss an die Zerkleinerung der jeweils ersten Probe durchgeführt. Als Anhaltspunkt zur Errechnung der für die jeweilige Mahlfleinheit erforderlichen Umdrehungen dienten die erfassten Daten aus der ersten Proben. Für die jeweils letzte Charge der einzelnen Mahlfleinheiten konnte nicht die optimale Aufgabe wie oben errechnet erreicht werden. Daher wurde hier das Verhältnis der noch vorhandenen Probe zur optimalen Probe als Rechenfaktor angesetzt.

Neben den messbaren Parametern sei hier noch zu erwähnen, dass sich durch die Mahlung die Körner elektrostatisch aufgeladen haben. Dies war deutlich erkennbar durch das Haftverhalten während dem Entleeren und dem neu Aufgeben. Diese äußerte sich subjektiv unterschiedlich stark und war bei der Schlacke HO am wenigsten ausgeprägt. Bei dieser Schlacke hafteten auch am wenigsten Körner im Behälter und an den Mahlkörpern.

3.2.4 Magnetscheidung zwischen den Schritten

Wie bereits erwähnt wurde nach der Zerkleinerung mit dem Laborbrecher und nach der Mahlung in der Stabmühle eine händische Magnetscheidung mit einem Stabmagneten durchgeführt. Dieser Stabmagnet wird mit einer magnetischen Flussdichte von 0,6 T angegeben. Die Magnetscheidung nach dem Brechen wurde so durchgeführt, dass eine Monokornschicht ausgestreut wurde, so dass keine Körner übereinanderliegen. Danach wurde der Stabmagnet in etwa 2 cm Höhe über die Körner geführt. Die am Magnet haftenden Körner wurde ohne weitere Behandlung als Magnetprodukt abgetrennt. Dies wurde für die Proben S1, S2 und S3 durchgeführt.

Die Magnetscheidung nach der Zerkleinerung in der Stabmühle wurde ähnlich wie nach dem Brecher durchgeführt, allerdings lagen Körner übereinander, da sie für eine Ausbreitung zu einer Monokornschicht wie in der vorangehenden Abscheidung zu klein waren. Diese Abscheidung wurde für die Proben S1, S2, S3 und HO durchgeführt, jedoch war das Ausbringen bei der Probe HO sehr gering, so dass die Werte hier nicht berücksichtigt wurden.

3.3 Festigkeit, E-Modul, Ausbreitmaß und Raumbeständigkeit

Aus den zuvor zerkleinerten Schlacken wurden unterschiedliche Mischungen zur Beurteilung des mechanischen Verhaltens und der Raumbeständigkeit hergestellt. Hierfür wurden Prüfkörper aus Mörtel zur Prüfung der Anfangsfestigkeit nach 7 Tagen und der Normfestigkeit nach 28 Tagen gemäß EN 196-1 hergestellt. Sämtliche Prüfkörper wurden mit einem fixierten w/z-Wert von 0,5 und einem Sand zu Bindemittelverhältnis von 3:1 hergestellt. Als Sand wurde CEN-Normsand der Firma *NORMENSAND GmbH* verwendet.

Für alle Mischungen wurde dabei das Ausbreitmaß zur Beurteilung der Konsistenz festgestellt, bevor die Mörtelprismen geformt wurden. Hierfür wurde nach jedem Anmischen des Mörtels ein Teil der Mischung auf einem Ausbreittisch in eine konische Blechform gefüllt. Anschließend wurde die Form entfernt und der frei stehende angemachte Mörtel 15 mal in einer Minute um 1 cm angehoben und fallen gelassen. Der Mörtel breitet sich im Zuge dieser Untersuchung je nach Fließvermögen aus. Die ausgebreitete Form wurde mittels Messschieber an zwei zueinander normal stehenden Stellen gemessen und das Ausbreitmaß aus dem Mittelwert dieser Messungen bestimmt.

Im Anschluss an die Formgebung wurden die Mörtelprismen in einem Feuchtluftraum mit einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 65 und 75% bis zur Entformung nach 24 h gelagert. Hierbei wurde von der Norm abgewichen, da keine höhere relative Luftfeuchtigkeit erreicht werden konnte. Nach dem Ausformen wurden die Prismen vermessen und bis zur jeweiligen Festigkeitsprüfung in einem Wasserbad gelagert.

Vor der Prüfung der Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeiten wurde mittels neben einer erneuten Vermessung der Prismen eine Schalllaufzeitmessung durchgeführt. Auf die Abmessungen vor Prüfung und aus der errechneten Dichte wurde der dynamische E-Modul errechnet. Aufgrund der durchgeführten Schalllaufzeitmessung konnte der Ablauf wie in EN 196-1 vorgegeben nicht zur Gänze eingehalten werden, da die Zeit zwischen Entnahme aus dem Wasserbad und dem Zeitpunkt der Prüfung länger als laut Norm vorgegeben war. Hier wurde stattdessen die Vorgabe befolgt, die Prismen bis zur Prüfung mit feuchtem Tuch zu bedecken.

Für die Raumbeständigkeitsprüfung wurde ÖNORM B 3309-1 Anhang D als Bezugsablauf verwendet [12]. Es wurde festgestellt, dass die referenzierte Norm ASTM 151 C im Original von dem Ablauf in ÖNORM B 3309-1 abweicht [12,32]. Auf diese Abweichungen wird zum entsprechenden Punkt eingegangen.

3.3.1 Herstellung der Probenkörper

Insgesamt wurden für die Prüfung der Festigkeiten nach 7 Tagen 31 Mischungen hergestellt. Davon ist eine die Referenzprobe ohne zugesetzter Schlacke, neun Mischungen mit S1 als zugesetzter Schlacke in den Mahlfineinheiten 2000, 4000 und 6000 Blaine und den Gehalten 12,5%, 25% und 50% Schlacke, sechs Mischungen mit S2 als zugesetzter Schlacke in den Mahlfineinheiten 2000, 4000 und 6000 Blaine und den Gehalten 12,5% und 25%, sechs Serien mit S3 als zugesetzter Schlacke in den gleichen Mahlfineinheiten und Gehalten wie S2 und wiederum neun Serien mit HO in den gleichen Mahlfineinheiten und Gehalten wie S1.

Die hergestellten Prüfkörper folgen der Nomenklatur Schlacke – Mahlfineinheit – Schlackegehalt – Prüfwert. Dies bedeutet, dass beispielsweise die Prüfkörper mit Aufschrift S1-2k-12,5-7 die Schlacke S1 in einer Mahlfineinheit von 2000 Blaine und einem Schlackegehalt von 12,5% enthalten und für die Festigkeitsprüfung nach 7 Tagen vorgesehen sind. Jene Prüfprismen, welche nach 28 Tagen geprüft werden, enthalten in der Aufschrift die Endung -28 und jene, welche für die Raumbeständigkeitsprüfung vorgesehen sind die Endung -R.

Zur Untersuchung der Raumbeständigkeit wurden mit allen Schlacken und Mahlfineinheiten Normmörtelprismen mit einem Schlackegehalt von 25% hergestellt. Da für die Raumbeständigkeitsprüfung angelehnt an ÖNORM B 3309-1 nur Zumahlstoffe mit einer Mindestfeinheit von $>3750 \text{ cm}^2/\text{g}$ in Frage kommen, wurde die Prüfung mit je 50% Schlacke mit den Mahlfineinheiten 4000 Blaine und 6000 Blaine durchgeführt [12]. Einschließlich der Referenzprobe ohne Schlacken Zugabe ergeben sich somit 21 hergestellte Proben.

Sämtliche genannten Proben wurden gemäß den Vorgaben aus EN 196-1 hergestellt, daher wurden in jeder Mörtelmischung $450 \pm 2 \text{ g}$ Bindemittel bestehend aus Einheitszement und Schlacke, $1350 \pm 5 \text{ g}$ Sand und $225 \pm 1 \text{ g}$ Wasser angemischt. Die Dosierung der einzelnen Komponenten erfolgte auf derselben Waage und wurde gemäß dem Ablauf zum Mischen des Mörtels laut EN 196-1 zusammengeführt [33]. Zum Mischen wurden die jeweilige Menge an Bindemittel und Wasser in den Trog des Mixers gegeben. Nach dieser Zusammenführung wurde der Mischvorgang bei vorgegebener niedriger Geschwindigkeit begonnen. Der Zeitpunkt, bei dem dieser Mischvorgang begonnen wurde stellt die Nullzeit als Bezugspunkt für die weiterführenden Vorgänge und Versuche dar. Nach 30 Sekunden des Mischens bei niedriger Geschwindigkeit wurde der Sand über die nächsten 30 Sekunden gleichmäßig hinzugegeben. Danach wurde der Mischer für 30 Sekunden auf höhere Geschwindigkeit gestellt. Anschließend wurde der Mischer für 90 Sekunden angehalten, wobei während der ersten 15 Sekunden nach Anhalten der an der Trogwand haftende Mörtel mit einem Kunststoffschaber in die Trogmitte gegeben wurde. Abschließend wurde der Mörtel für 60 Sekunden bei höherer Mischgeschwindigkeit gemischt. Die gesamte Mischdauer betrug daher 4 Minuten.

Im Anschluss an das Mischen des Mörtels wurde das Ausbreitmaß auf dem Glastisch vor der Formgebung festgestellt. Der angemischte Mörtel wurde in eine konische Blechform in zwei Lagen eingefüllt und mit je 10 leichten Stößen mit dem dafür vorgesehenen Stopfen innerhalb der Form verteilt. Nach Einbringen der zweiten Lage wurde der überschüssige Mörtel abgezogen und die Form entfernt. Der nun frei stehende Mörtelkonus wurde 15 mal in einer Minute mit gleichbleibender Frequenz um 1 cm angehoben und fallen gelassen. Durch die Bewegung und den eingebrachten Stoß breitete sich der Mörtel je nach Fließvermögen aus. Nach der Durchführung wurde mit einem Messschieber an der breitesten Stelle angesetzt und die Breite abgelesen. Der zweite Wert wurde jeweils von der auf den Maximalwert normal stehenden Breite gemessen. Die Längen wurden als Mittelwert zum Ausbreitmaß zusammengefasst. Nach der Feststellung des Ausbreitmaßes wurde der Mörtel auf dem Glastisch wieder in den Trog gegeben. Die Mörtelmischungen zeigten ein gewisses Maß an Bluten im Zuge des Versuchs, welches sich unterschiedlich zwischen den einzelnen Schlacken zeigte. Subjektiv zeigten hohe Schlackegehalte und niedrigere Mahlfineinheiten im

Vergleich zum Referenzzement ein stärkeres Maß an Bluten. Diese Beobachtung wurde jedoch nicht weiter im Detail verfolgt oder quantifiziert.

Der Mörtel wurde für die Formgebung in leicht mit Schalöl benetzte Formen eingebracht, welche je drei Prismen mit den Maßen 40x40x160 mm ergeben. Hierfür wurde die jeweilige Form in einen Schockstisch mit dem dafür vorgesehenen Aufsatzkasten eingespannt. Der Mörtel wurde in zwei Lagen eingebracht. Zwischen den Lagen wurde der Schockstisch eingeschaltet, um für 15 Sekunden die eingebrachten Luftbläschen auszutreiben und den Mörtel zu verdichten. Nach Verdichtung der zweiten Lage wurde die Form aus der Einspannung entnommen, der Aufsatzkasten entfernt und der überstehende Mörtel mit einem Abstreichlineal mit sägender Bewegung abgestrichen. Die geformten Prismen wurden mit einem undurchlässigen Kunststoff oder einer Glasplatte abgedeckt und in den Konditionierschrank für die Lagerung bis zum Entformen gegeben. Der abgestrichene und überschüssige Mörtel wurde verworfen.

Alle genannten Prüfprismen wurden nach der beschriebenen Formgebung in einem Feuchtluftraum mit einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 65 und 75% bis zur Entformung nach 20 bis 24 h gelagert. EN 196-1 sieht eine relative Luftfeuchtigkeit von mindestens 90% vor, welche jedoch konsistent nicht erreicht werden konnte [33]. Hier wurde daher von der Norm abgewichen.

Im Anschluss an die Lagerung im Feuchtluftraum wurden die Formen entnommen. Diese wurden auseinandergelagert, um die Prüfprismen freizulegen. Die Prismen wurden mit einem Messschieber einzeln vermessen, wobei für die Höhe und Breite jedes Prismas je drei Messungen durchgeführt wurden. Für die Länge wurden je zwei Messwerte genommen. Anschließend wurden die Prismen gewogen, beschriftet und in dafür vorgesehenen Trögen unter Wasser gelagert. Bei der Lagerung wurden die Prismen nach der verwendeten Schlacke aufgeteilt in eigenen Trögen bis zur jeweiligen Festigkeitsprüfung gelagert. Die Prüfprismen für die Feststellung der Raumbeständigkeit wurden vor der Prüfung nicht unter Wasser gelagert.

3.3.2 Prüfung der Festigkeiten und mechanischer Parameter

Die Prüfung der Anfangsfestigkeiten nach 7 Tagen und der Normfestigkeit nach 28 Tagen wurden laut EN 196-1 durchgeführt [33]. Zusätzlich zur Beurteilung der Biegezugfestigkeiten und der Druckfestigkeiten wurde eine zerstörungsfreie Schalllaufzeitmessung durchgeführt, um daraus den dynamischen E-Modul zu errechnen. Vom genannten Ablauf laut EN 196-1, wurde zwischen Entnahme aus dem Wasserbad bis zum Beginn der Festigkeitsprüfungen die vorgegebene maximale Zeit von 15 min aufgrund der Schalllaufzeitmessung für alle Proben überschritten [33]. Zwischen den Messungen der Schalllaufzeit wurden die Prüfkörper wie in der Norm angegeben mit feuchtem Tuch bedeckt.

Der dynamische E-Modul wurde über die Formel [34]

$$E = c^2 \cdot \rho \quad (3)$$

ermittelt, wobei E für den dynamischen E-Modul in GPa steht, c für die Schallgeschwindigkeit, welche sich aus der Geometrie der Prüfprismen und den gemessenen Schalllaufzeiten ergibt und ρ für die Dichte der Prüfprismen in g/cm^3 steht. Hierfür wurde die Schalllaufzeit für jedes Prisma an drei Stellen in Richtung Höhe und Breite des Prismas und an zwei Stellen in Längsrichtung gemessen. Diese Zeiten wurden entsprechend der jeweiligen geometrischen Abmessung, welche vor der Festigkeitsprüfung zu ermitteln sind als Schalllaufzeit berechnet und mit der errechneten Dichte aus dem Quotienten der Masse dividiert durch das Volumen aus der Geometrie, multipliziert. Der so festgestellte E-Modul wurde als arithmetisches Mittel aus den jeweiligen Prismen und als arithmetisches Mittel aus den Prismen der Serie als Wert angegeben. Der E-Modul wird demnach für jeden Prüfkörper als isostatisch angenommen.

Voranehend an die Prüfung der Druckfestigkeit wurde für jede Serie die Biegezugfestigkeit bestimmt. Hierfür wurden die drei Prismen jeder Serie nacheinander in eine 3-Punkt-Biegezugprüfmaschine der Firma *Tonindustrie KG* des Typs 2705/321/67 für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit wie in EN 196-1 vorgesehen eingespannt [33]. Dabei wurde jedes Prisma so positioniert, dass die Belastungsrolle in der Mitte des Prüfprismas anliegt und somit die Tragrollen aufgrund der Symmetrie die gleiche Entfernung zwischen Tragrolle und Außenfläche des Prismas aufweisen. Das Prisma wurde so orientiert, dass die Fläche, welche in Kontakt mit der Belastungsrolle steht, auch jene Fläche ist, welche bei der Formgebung mit dem Abziehlineal abgezogen wurde. Diese Fläche wurde auch für das Anbringen der Beschriftung verwendet. Die Prismen, welche bereits geprüft wurden oder noch zu prüfen sind und nicht in der Prüfmaschine eingespannt waren wurden währenddessen mit feuchtem Tuch bedeckt. Die jeweilige Biegezugfestigkeit konnte an der Prüfvorrichtung direkt in der Einheit MPa abgelesen werden und musste nicht wie in EN 196-1 angegeben errechnet werden [33].

Nach Durchführung der Biegezugprüfung für jede Serie wurden die sechs Prismenhälften jeder Serie nacheinander in einen Einsatz für die Druckfestigkeitsprüfung eingebracht, wobei die beschriftete Fläche nach außen orientiert wurde und der Druckstempel und die untere Druckplatte somit die beiden Flächen belastet, welche bei der Formgebung und dem Aushärten in Kontakt mit einer glatten Oberfläche waren. Die obere Druckplatte der Universalprüfmaschine der Firma *Tonindustrie KG* des Typs 2560/136 ist weiters mit einer Kugelkalotte ausgestattet, um eine möglichst geradlinige Kräfteinleitung in den Prüfkörper zu bewerkstelligen. Beim Prüfvorgang wurde die Last mit $2400 \pm 200 \text{ N/s}$ erhöht, bis es zum Bruchvorgang kam, welcher sich als plötzlicher Abfall der maximal aufgebracht Kraft äußerte. Die Druckfestigkeit jeder Hälfte wurde wie in EN 196-1 und am Einsatz für die Druckfestigkeitsprüfung als maximal aufgebrachte Kraft geteilt durch 1600 errechnet und in MPa angegeben [33].

3.3.3 Raumbeständigkeitsprüfung

Zur Prüfung der Raumbeständigkeit wurde für alle Schlackeproben und Mahlfeinheiten einschließlich einer Referenzprobe ohne Schlackenzugabe die Prüfung gemäß ÖNORM B3309-1 bzw. gemäß ASTM C151 durchgeführt [12,32]. Von dem in ÖNORM B3309-1 – Anhang D angeführten Verfahren für die Durchführung der Autoklavprüfung zum Nachweis der Raumbeständigkeit wurde in einigen Aspekten abgewichen, welche einerseits aufgrund von Unterschieden zwischen der ÖNORM und dem referenzierten ASTM Standard notwendig waren und andererseits aufgrund von fehlenden Formen zur Herstellung der vorgesehenen Prüfkörper herrührten [12].

Für diese Versuche wurden als Prüfkörper wie in 3.3.1 erläutert Mörtelprismen mit den Abmessungen 40x40x160 mm hergestellt statt der vorgesehenen. Prüfkörper mit den Abmessungen 25x25x285 mm mit einer sogenannten Messlänge von 250 mm.

Zur Feststellung der geometrischen Parameter wurde ein Messschieber verwendet. Hier ist in der ÖNORM der Messschieber als Instrument explizit erwähnt und die Längenmessung mit dem sogenannten length comparator aus dem ASTM Standard referenziert [12,32].

Nach Ausformen der hergestellten Mörtelprismen wurden die Abmessungen mit je fünf Messungen in Richtung Breite und Höhe und sechs Messungen für die Länge durchgeführt. Aus diesen Einzelwerten wurden arithmetische Mittelwerte gebildet und als Anfangsgeometrie vor der Autoklavprüfung verwendet.

Anschließend wurden die Prismen jeder Rezeptur im vorgesehenen Probenkäfig platziert. Dieser musste aufgrund der unterschiedlichen Geometrien angepasst werden. Statt einem Aufstellen von zwei Körpern in diesem Probenkäfig wurden drei Prüfkörper auf eingebrachte Lochbleche gelegt, so dass ein Kontakt zwischen dem im Autoklav entstehenden Wasserdampf und dem Prüfkörper allseitig möglich ist.

Nach Einbringen der Prüfkörper im Probenkäfig, Einfüllen des optimalen Wasserstandes für die Prüfung und Schließen des Autoklavs wurde die Prüfung für jede Probenserie begonnen.

Der Ablauf lautet wie folgt:

- Beginn des Aufheizvorgangs bei ausreichendem Wasserspiegel und mit offenem Sicherheitsventil (ca. 25 min)
- Schließen des Sicherheitsventils bei beginnendem Dampfaustritt
- Aufheizen, bis ein Druck von 20 bar innerhalb von maximal 90 min erreicht wird. (ca. 75 min)
- Halten des Drucks von 20 bar für eine festgelegte Dauer von 180 min
- Abkühlen des Autoklavs für 90 min, in denen der Druck unter 5 bar fallen soll
- Ablassen von etwaigem Restdruck durch langsames Öffnen des Sicherheitsventils
- Entnahme der Prüfkörper
- Abkühlen der entnommenen Prüfkörper in 50°C heißem Wasserbad, welches binnen 60 min auf 20°C durch mehrmalige Zugabe von kaltem Wasser abgekühlt werden soll

Nach Durchführung dieses Ablaufs wurde eine erneute Vermessung und Wägung durchgeführt, um den Längenunterschied und Masseunterschied, welche die Zielgrößen dieser Prüfung sind, zu ermitteln.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass sich ÖNORM 3309-1 und ASTM C151 beim Ablauf darin unterscheiden, dass bei ASTM eine zusätzliche Aufzeichnung der Temperatur gefordert ist, laut ÖNORM nicht [32,12]. Weiters unterscheidet sich der Ablauf dadurch, dass er bei einer geregelten Prüfvorrichtung durchgeführt wird. Für die durchgeführte Prüfung gab es keine

zusätzliche Heizregelung. Der Ablauf musste gegebenenfalls manuell angepasst werden. Weitere signifikante Unterschiede sind, die die Zielvorgabe des Drucks nach Ende der Abkühlung von 0,7 bar verglichen zu 5 bar laut ÖNORM und der Ablauf zur Abkühlung der Prüfkörper in Wasser nach Beendigung der Autoklavprüfung, welche laut ASTM von 90°C auf 23°C mit gleichbleibender Kühlrate innerhalb von 15 min abzukühlen sind und anschließend bei Wassertemperatur von 23°C für 15 min gehalten werden sollen.

Aus den beiden Messungen vor der Prüfung und im Anschluss an die Prüfung sind eine Längenänderung und eine Massenänderung errechenbar. Da in ÖNORM 3309-1 kein Bezug auf die Masseänderung genommen wird, wurden die Massen mit derselben Waage wie für die ausgeformten Prüfprismen bestimmt [12]. Nach der Entnahme aus dem Wasserbad wurden die Prismen abgetupft und im Anschluss auf die Vermessung gewogen.

Im Rahmen des Versuchs sind weiters optische Feststellungen von Abplatzungen durchzuführen, welche eine Wiederholung des Versuchs erzwingen und bei zweimaligem Eintreten als nicht bestandene Prüfung zu werten sind. Abseits von Verfärbungen, welche bei allen Mischungen aufgetreten sind, wurden keine Abplatzungen registriert. Einzige signifikante Erscheinung war eine auftretende rötliche Verfärbung der Proben der Rezeptur S3-6k-25-R. Die Ursache dafür konnte jedoch nicht ermittelt werden und wurde auch nicht weiterverfolgt.

4 Ergebnisse der Untersuchungen

4.1 Probencharakterisierung

4.1.1 Chemische Analyse

In Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die Analyseergebnisse ersichtlich.

Tabelle 2: Chemische Analyse aus RFA ausgedrückt als Oxide

Probe	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	SiO ₂ [%]	MgO [%]	MnO [%]	P ₂ O ₅ [%]	TiO ₂ [%]	Cr ₂ O ₃ [%]
CEM 1	6,1	61,69	20,28	2,65	0,11	0,16	0,29	<0,01
HO gesamt	13,85	26,11	39,93	13,45	4,22	<0,01	0,57	0,02
HO nach Stabmühle	13,85	26,27	39,9	13,4	4,24	<0,01	0,57	0,02
S1 nach Kugelmühle	11,04	34,04	34,42	16,01	3,09	<0,01	0,34	0,04
S1 nach Stabmühle	11,04	34,21	34,32	15,95	3,09	<0,01	0,35	0,03
S2 nach Stabmühle	7,46	36,48	37,45	12,5	4,85	<0,01	0,38	0,037
S3 nach Stabmühle	7,46	36,48	37,45	12,5	4,85	<0,01	0,38	0,037

Tabelle 3: Eisengehalte, Glühverlust (GV) und Feuchte

Probe	Fe, ges [%]	Fe, met. [%]	FeO [%]	GV 850°C [%]	Feuchte [%]
CEM 1	2,13	<1,0	<0,70	2,08	0,39
HO gesamt	0,23	<1,0	<0,70	+0,99	0,04
HO nach Stabmühle	0,26	<1,0	<0,70	+0,96	0,07
S1 nach Kugelmühle	1,79	<1,0	<0,70	+0,37	0,15
S1 nach Stabmühle	1,76	<1,0	0,96	+0,51	0,04
S2 nach Stabmühle	1,51	<1,0	<0,70	+0,74	0,03
S3 nach Stabmühle	2,45	<1,0	<0,70	0,81	0,06

Aus diesen angeführten Werten lassen sich einige für die weitere Beurteilung relevante Kenngrößen berechnen. Da kein signifikanter Unterschied zwischen den Schlackeproben feststellbar war, wurden die Proben nach der Stabmühle miteinander verglichen. Da die Zementprobe nicht zerkleinert wurde, wurde diese von oben weitergeführt.

In Tabelle 4 sind die zur Beschreibung von Hochofenschlacken gängigen Größen C+M+S und das Verhältnis (C+M)/S für alle Schlackeproben und den verwendeten Zement ersichtlich.

Tabelle 4: Relevante Größen für weiterführende Beurteilung

Probe	CaO+MgO+SiO ₂ [%]	(CaO+MgO)/ SiO ₂
CEM 1	84,65	3,17
HO nach Stabmühle	79,6	0,99
S1 nach Stabmühle	84,5	1,46
S2 nach Stabmühle	86,5	1,31
S3 nach Stabmühle	86,5	1,31

4.1.2 Eluatanalyse

Die Ergebnisse der Eluatanalyse sind in Tabelle 5, Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 5: Eluatanalyse Teil 1

Probe	pH-Wert	Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Abdampfrückstand [mg/l]
CEM I	<12,790	12790	3285
HO	<11,620	758	300
S1	11,94	1446	427
S2	11,95	1489	422

Tabelle 6: Eluatanalyse Teil 2

Probe	Ammonium (als N) [mg/l]	Cyanid, lfsb [mg/l]	Chrom (VI) [mg/l]	Fluorid (als F) [mg/l]	Chlorid (als Cl) [mg/l]	Nitrat (als N) [mg/l]	Nitrit (als N) [mg/l]	Phosphat (als P) [mg/l]	Sulfat (als SO_4) [mg/l]
CEM I	0,656	<0,01	0,19	12,6	163,98	12,19	<0,01	7,99	444
HO	0,43	<0,01	<0,01	0,77	1,92	0,15	0,01	0,05	7,31
S1	0,16	<0,01	<0,01	0,73	1,83	0,15	0,02	0,05	5,7
S2	0,14	<0,01	<0,01	0,41	1,75	0,22	0,01	0,04	5,2

Tabelle 7: Eluatanalyse Teil 3

Probe	Al [mg/kg]	Ag [mg/kg]	Sb [mg/kg]	As [mg/kg]	Ba [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Co [mg/kg]
CEM I	0,03	<0,01	0,032	0,01	10,86	0,02	0,02	1,68	<0,01
HO	8,47	<0,01	<0,01	0,01	1,78	0,04	<0,01	0,01	<0,01
S1	45,12	<0,01	<0,01	0,02	3,78	<0,01	<0,01	0,05	<0,01
S2	12,05	<0,01	0,01	0,01	3,11	0,02	<0,01	0,06	<0,01

Tabelle 8: Eluatanalyse Teil 4

Probe	Fe [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Mo [mg/kg]	Ni [mg/kg]	Se [mg/kg]	V [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Hg [mg/kg]
CEM I	0,02	0,2	0,37	<0,01	0,03	<0,01	0,04	<0,01
HO	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,96	<0,01	0,02
S1	<0,01	0,06	0,09	<0,01	0,04	0,93	<0,01	<0,01
S2	<0,01	0,06	0,02	<0,01	0,02	0,79	<0,01	<0,01

Anhand dieser Analyse zeigt sich, dass das Eluationsverhalten der Schlacken im Vergleich zu Zement weniger gravierend ist außer für die Elemente Aluminium und Vanadium. Aluminium gilt in den meisten Verbindungen nicht als umweltgefährlich und kann daher vernachlässigt werden. Vanadiumbelastung ist bei den Schlacken signifikant und wird auch als Parameter von Interesse im Bundesabfallwirtschaftsplan erwähnt, ist jedoch gleich hoch wie bei Hochofenschlacke, die erfolgreich Einsatz in Zementen findet und wird daher nicht weiter beachtet. Die Werte für Chrom, welche für die Beurteilung von besonderem Interesse sind liegen deutlich unter den detektierten Werten im Zement und auch unter dem in einer Entscheidung des Rates der Europäischen Union definierten Maximalwert von 70 mg/kg

4.1.3 Mineralogische Analyse

Zur Abschätzung des Mineralphasenbestandes anhand der chemischen Analyse können die Proben im ternären Phasendiagramm $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2$ oder kurz CMS-System dargestellt werden [35]. Hierfür wurden die in Tabelle 2 ermittelten Werte für CaO , MgO und SiO_2 herangezogen und auf eine Gesamtmenge von 100% normiert. Sämtliche anderen auftretenden Phasen wurden ob der fehlenden Darstellung im Phasendiagramm vernachlässigt. Aus diesem Vorgehen resultieren die Werte in Tabelle 9, welche die Grundlage für die graphische Darstellung bilden.

Tabelle 9: Normierte Werte für C-M-S zur Darstellung im ternären Phasensystem

Probe	CaO, normiert [%]	MgO, normiert [%]	SiO₂, normiert [%]
CEM I	72,9	3,1	24,0
HO	33,0	16,8	50,1
S1	40,5	18,9	40,6
S2	42,2	14,5	43,3
S3	42,2	14,5	43,3

Im ternären Phasendiagramm eingezeichnet ergibt sich für die Probe CEM I die Darstellung in Abbildung 2 für die Probe HO die Darstellung in Abbildung 3, für die Probe S1 die Darstellung in Abbildung 4 und für die Proben S2 und S3, welche nach diesem Vorgehen dieselben normierten Zusammensetzungen aufweisen die Darstellung in Abbildung 5. Die Darstellung der Probe CEM I kommt im Primärausscheidungsfeld von CaO und im Konjugationsdreieck C – M – C₃S zu liegen. Dadurch ist zu erwarten, dass diese genannten Phasen miteinander im Gleichgewicht stehen.

Die Darstellung der Probe HO im CMS-System zeigt eine Zusammensetzung, welche im Primärausscheidungsfeld von Äkermanit (C₂MS₂) zu liegen kommt und im Konjugationsdreieck der Phasen Diopsid (CMS₂), Wollastonit (CS) und Äkermanit (C₂MS₂) liegt. Dadurch liegen diese Phasen miteinander im Gleichgewicht vor.

Die Zusammensetzung der Probe S1 kommt im Primärausscheidungsfeld von Merwinit (C₃MS₂) zu liegen und befindet sich im Konjugationsdreieck der Phasen Monticellit (CMS), Äkermanit (C₂MS₂) und Merwinit (C₃MS₂), wodurch diese Phasen in einer ersten Beurteilung im Gleichgewicht miteinander vorliegen.

Die Zusammensetzung der Proben S2 und S3 kommt aufgrund derselben Werte innerhalb des CMS-Systems im selben Punkt zu liegen. Die Zusammensetzung befindet sich im Primärausscheidungsfeld von Merwinit (C₃MS₂) und kommt gerade noch im Konjugationsdreieck der Phasen Merwinit (C₃MS₂), Monticellit (CMS) und Äkermanit (C₂MS₂) zu liegen.

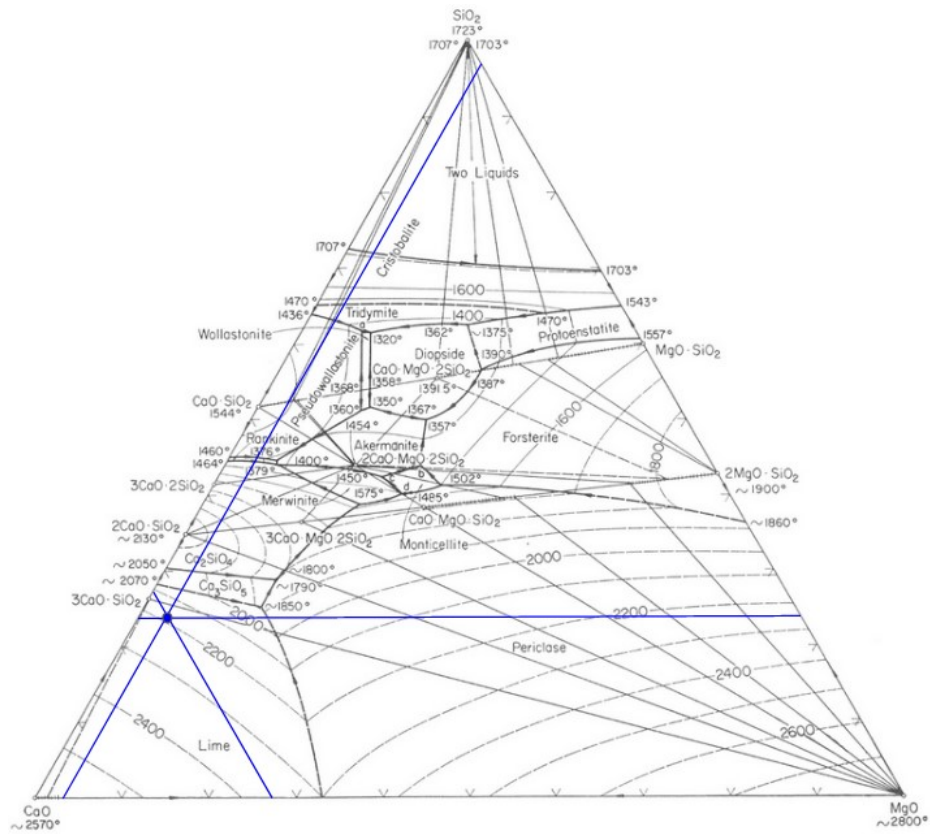


Abbildung 2: Chemische Zusammensetzung der Probe CEM I im ternären Phasensystem CMS

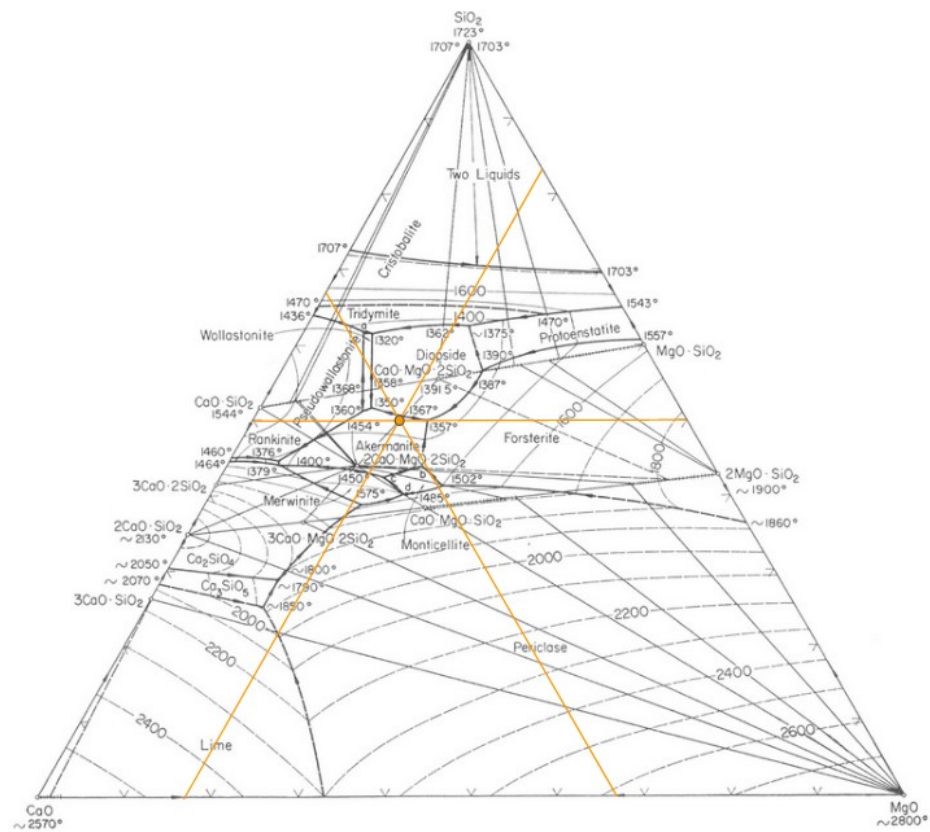


Abbildung 3: Chemische Zusammensetzung der Probe HO im ternären Phasensystem CMS

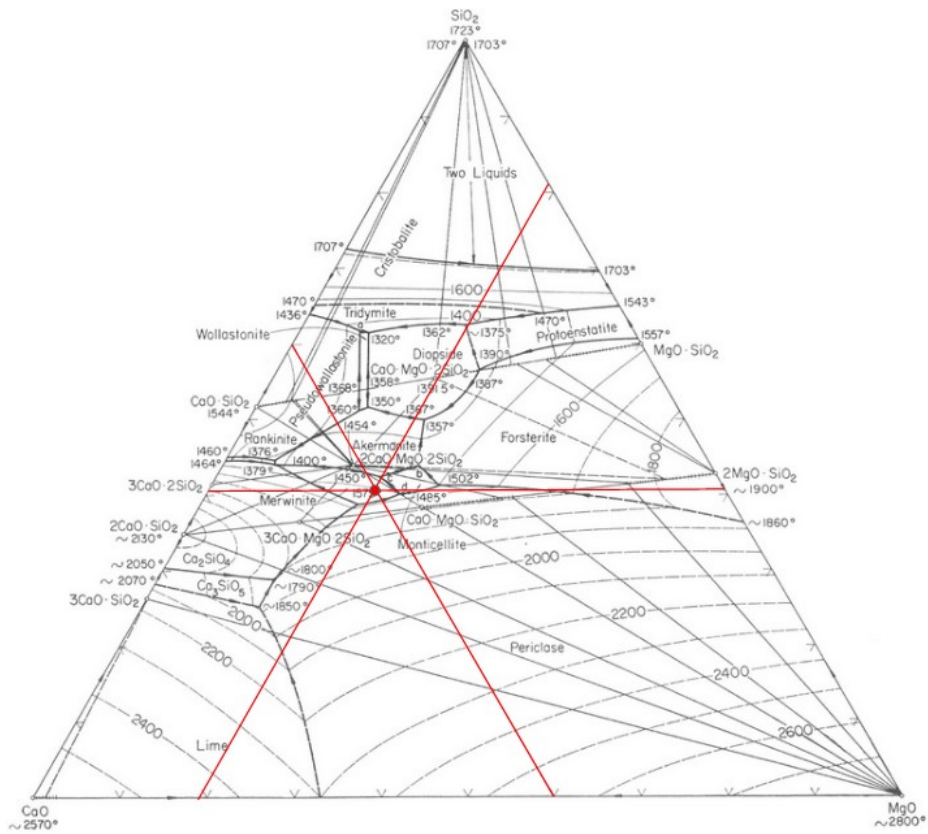


Abbildung 4: Chemische Zusammensetzung der Probe S1 im ternären Phasensystem CMS

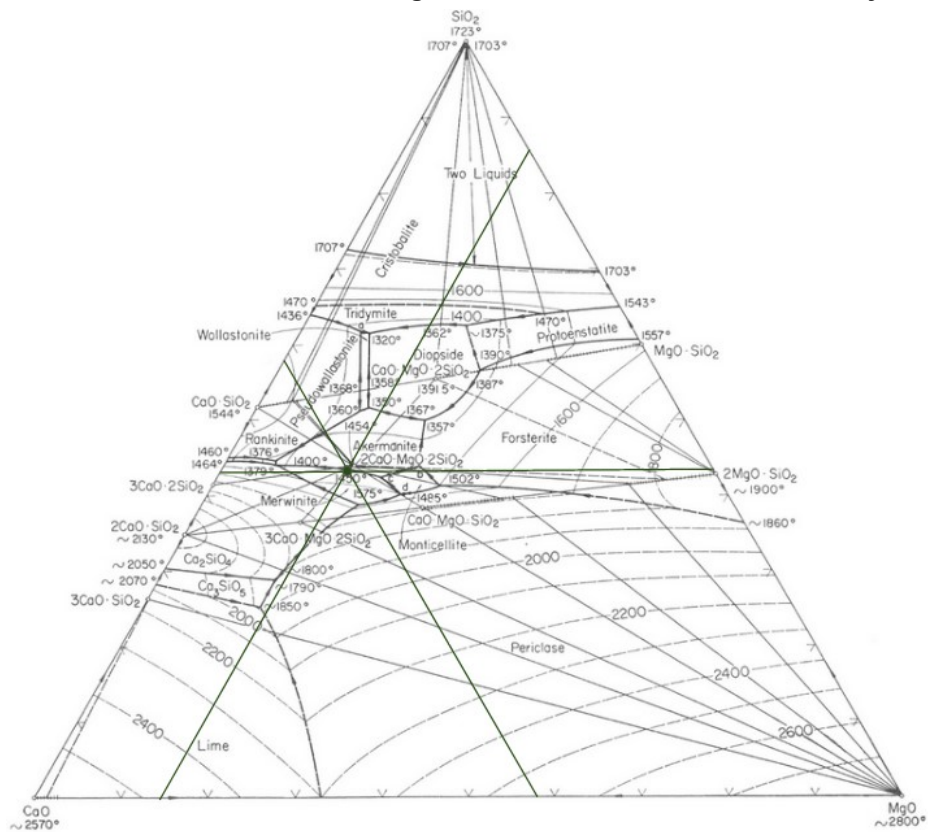


Abbildung 5: Chemische Zusammensetzung der Probe S2 und S3 im ternären Phasensystem CMS

Die detektierten Spektren der röntgendiffraktometrischen Analyse für die in 3.1 erwähnten Proben sind in bereits qualifizierter Form in Abbildung 6 bis Abbildung 10 gezeigt. Für die Zementprobe wurden die Phasen C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF und Anhydrit als Erstarrungsregler detektiert.

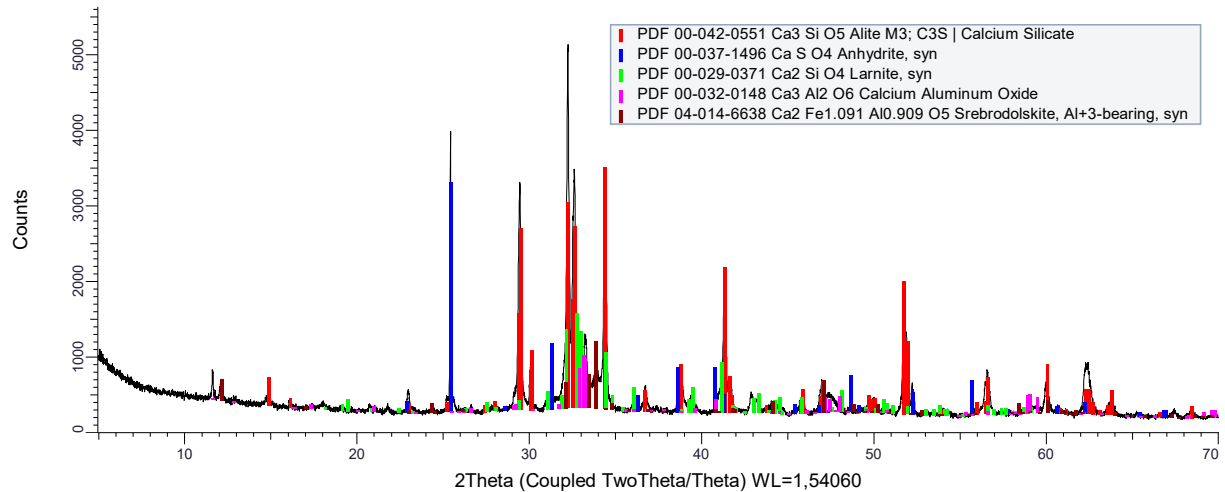


Abbildung 6: Röntgendiffraktogramm der Probe CEM I

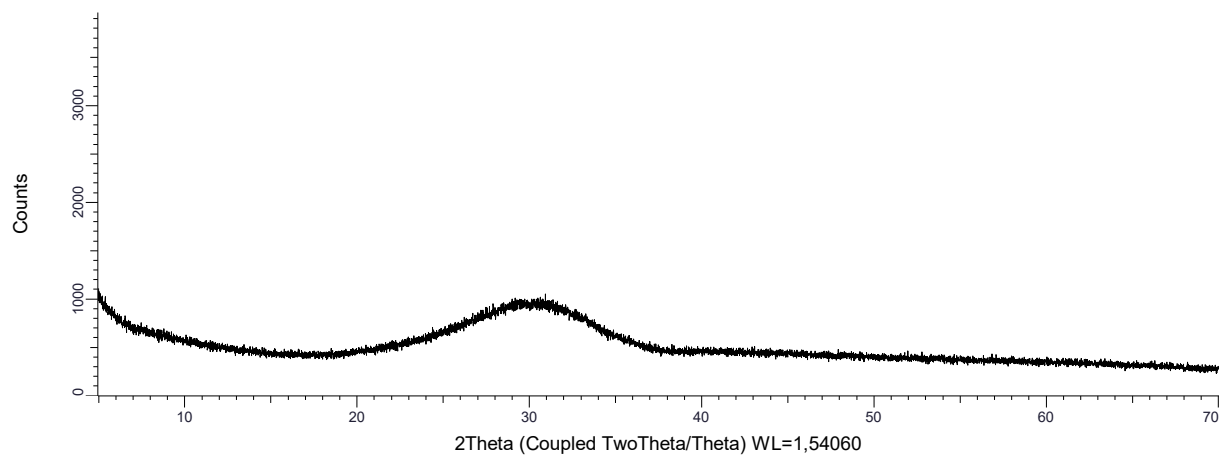


Abbildung 7: Röntgendiffraktogramm der Schlacke HO

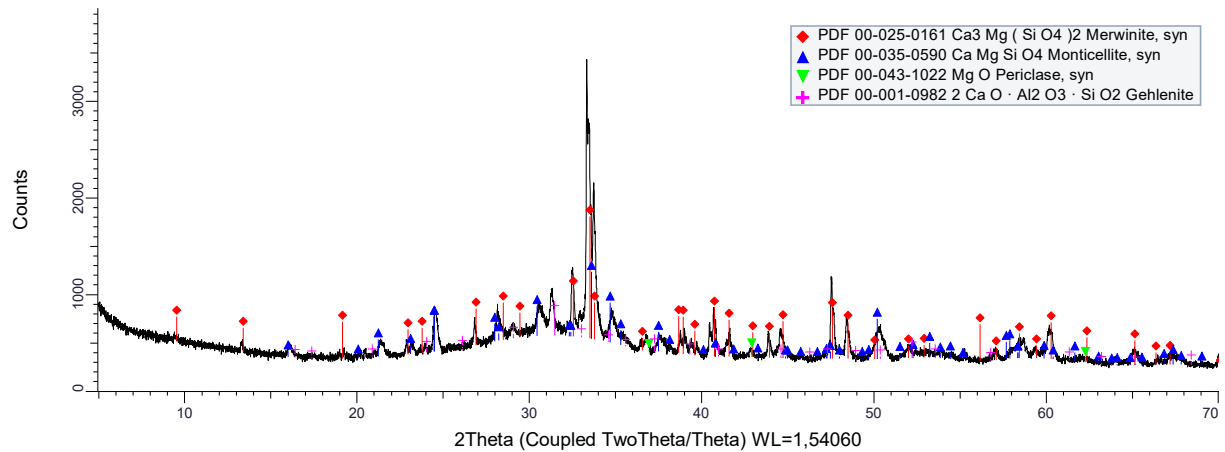


Abbildung 8: Röntgendiffraktogramm der Probe S1

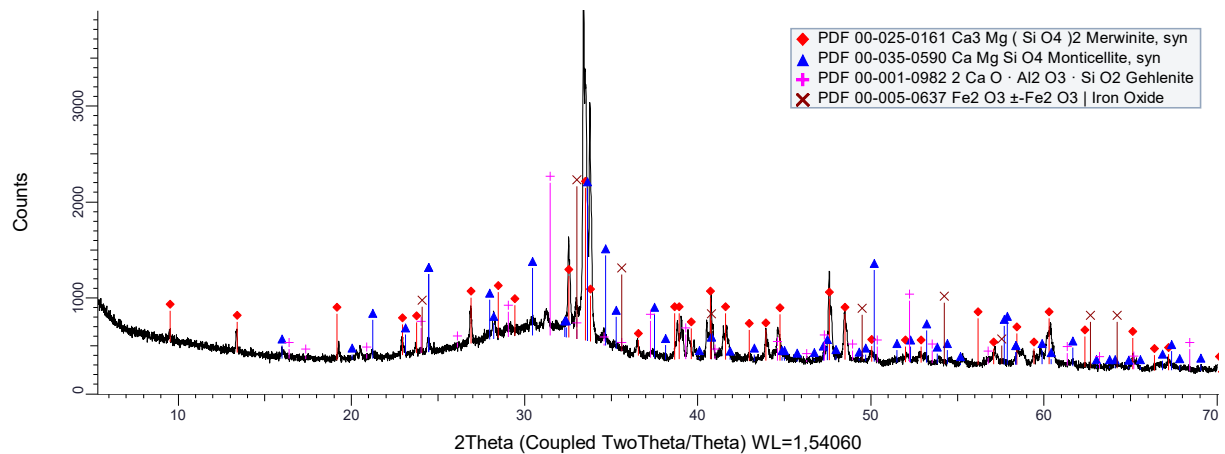


Abbildung 9: Röntgendiffraktogramm der Probe S2

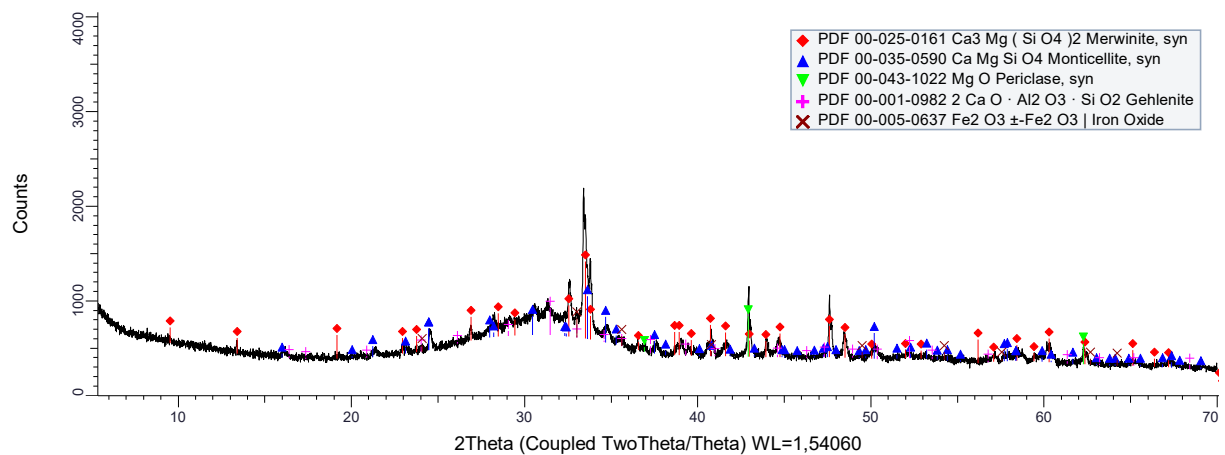


Abbildung 10: Röntgendiffraktogramm der Probe S3

Die Spektren der Probe HO sind in Abbildung 7 gezeigt. Hier konnte ausschließlich Glasphase detektiert werden. Damit steht dieses Ergebnis in Kontrast zur vorangehenden Beurteilung innerhalb des CMS-Systems, stimmt aber überein mit der Art der Abkühlung der Schlacke, welche nicht im Gleichgewicht, sondern möglichst rapide durchgeführt wird.

In der Probe S1 in Abbildung 8 konnten die kristallinen Phasen Periklas (M), Åkermanit (C_2MS_2), Merwinit (C_3MS_2), Monticellit (CMS) sowie ein gewisser Anteil an Glasphase identifiziert werden. Die vorliegenden Phasen decken sich mit der Beurteilung im CMS-System, wobei auch hier die Glasphase auf eine Abkühlung, welche nicht im Gleichgewicht stattgefunden hat, hindeutet.

Für die Probe S2 sind die detektierten Spektren in gleicher Weise in Abbildung 9 zu sehen. Hier wurden die Phasen Åkermanit (C_2MS_2), Merwinit (C_3MS_2), Monticellit (CMS) sowie erneut ein gewisser Anteil an Glasphase identifiziert. Die Spektren der Probe S3 sind in Abbildung 10 gezeigt. In dieser Probe wurden Periklas (M), Åkermanit (C_2MS_2), Merwinit (C_3MS_2), Monticellit (CMS) und Glasphase identifiziert. Obwohl diese beiden Proben bei der Beurteilung im CMS-System im selben Punkt zu liegen kamen, zeigen sich bei der Rietveldanalyse deutliche Unterschiede, vor allem hinsichtlich des glasigen Anteiles und der Anwesenheit von Periklas in S3 im Unterschied zu keinem detektierten Periklas in S2.

Die Rietveldanalyse ergab eine quantitative Phasenzusammensetzung wie in Tabelle 10 aufgelistet. Unterschiede sind vor allem beim Anteil an Glasphase, beim frei vorliegenden Anteil an Periklas (M) und beim Anteil an Merwinit (C_3MS_2) deutlich.

Tabelle 10: Quantitative Phasenzusammensetzung aus Rietveldanalyse

Probe	M [%]	C_2MS_2 [%]	C_3MS_2 [%]	CMS [%]	Glasiger Anteil [%]
HO	0	0	0	0	100
S1	7	3	36	24	31
S2	0	1	56	5	38
S3	8	3	28	12	48

4.1.4 Dichte

In Tabelle 11 sind die bestimmten Stoffdichten der Schlackeproben nach der Zerkleinerung in der Stabmühle, daher an Körnern <1 mm bestimmt angegeben. Bei CEM I wurde die Stoffdichte am bereits fertigen Produkt bestimmt. Die angegebene Standardabweichung wurde durch das Heliumpyknometer ausgegeben.

Tabelle 11: Mittelwerte der Stoffdichten

Probe	Dichte [g/cm^3]	STABW [g/cm^3]
CEM I	3,1174	0,1078
HO	2,8128	0,1341
S1	3,0975	0,0843
S2	3,0597	0,0669
S3	3,0994	0,1086

Da die Stoffdichte als intensives Merkmal von der weiteren Aufbereitung der Proben nicht verändert wird, wurden diese Werte für die weiteren Untersuchungen, in denen die Stoffdichte notwendig war, herangezogen. Hinsichtlich der festgestellten Dichten zeigen die Pfannenschlacken Stoffdichten, welche geringfügig niedriger sind als die Stoffdichte des Zementes. Die Hochofenschlacke besitzt eine deutlich niedrigere Stoffdichte.

4.2 Aufbereitung

4.2.1 Zerkleinerung mit Brecher

Die gemessenen Energieeinträge beim Brechen sind in Tabelle 12 angeführt. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass die angegebene Masse sämtliche Brechvorgänge in den genannten Maulweiten durchlaufen hat. Daher sind die angegebenen Energieeinträge addierbar.

Tabelle 12: Energieeintrag bei Brechen der Pfannenschlacken

Probe	Masse [g]	Maulweite [mm]	Nettoleistung [W]	Verweilzeit [s]	Energieeintrag [J]	spez. Energieeintrag [J/g]
S1	7609	10	145,92	344	50196,48	6,597
		8	144,13	98	14124,74	1,856
		5	170,184	264	44928,576	5,905
S2	3506	10	145,48	56	8146,88	2,324
		5	151,16	440	66510,4	18,970
S3	3701	10	148,56	98	14558,88	3,934
		5	158,9	308	48941,2	13,224
		2,5	160,74	118	18967,32	5,125

4.2.2 Zerkleinerung mit Stabmühle

In Tabelle 13 sind die in der Stabmühle zerkleinerten Aufgabemassen ohne die im Handmörser zerkleinerte Fraktion zusammengefasst, inklusive gefahrener Zyklen, Umdrehungen und spezifischen Energieeintrag zu sehen. Die genauen Abläufe der Zerkleinerung und die dazugehörigen Werte sind in Tabelle 39 für HO, Tabelle 40 für S1, Tabelle 41 für S2 und Tabelle 42 für S3 im Anhang ersichtlich.

Tabelle 13: Energieeintrag durch Stabmühle

Probe	Aufgabemasse [g]	Zyklen	Umdrehungen [1]	Spez. Energieeintrag [J/g]
HO	2467,5	9	647	7,3
S1	6032	25	5502	26,2
S2	2780,5	11	1712	22,3
S3	2771,5	11	1988	22,2

Hier zeigt sich, dass der spezifische Energieeintrag für die Schlacke HO im Vergleich zu den anderen Schlacken deutlich niedriger ist. Die Schlacke S1 zeigte in der Stabmühle den größten Widerstand gegen Zerkleinerung. Klar erkennbar während allen Zyklenmahlungen war die Akkumulation von schwer zerkleinerbaren Körnern binnen einiger Zyklen nach Start, wodurch die Einstellung der Umdrehungen laufend an diesen Umstand angepasst werden musste.

4.2.3 Zerkleinerung mit Kugelmühle

In Tabelle 14 sind die angesetzten Schüttdichten für alle Schlacken und die daraus resultierenden optimale Aufgaben ersichtlich. Zusätzlich sind auch die daraus folgenden Einzelchargen, welche gemahlen wurden, angegeben. In Tabelle 43 im Anhang ist die Berechnung dazu ersichtlich.

Tabelle 14: Schüttdichten

Probe	Schüttdichte [g/cm ³]	STABW [g/cm ³]	Aufgabe [g]	Einzelchargen
HO nach Stabmühle	1,171	0,004	554,04	11
HO 2000 Blaine	1,180	0,014	557,93	7
HO 4000 Blaine	1,003	0,004	474,25	4
S1 nach Stabmühle	1,620	0,066	766,44	11
S1 2000 Blaine	1,342	0,004	634,81	7
S1 4000 Blaine	1,106	0,024	523,29	4
S2 nach Stabmühle	1,602	0,015	757,87	4
S2 2000 Blaine	1,365	0,001	645,76	3
S2 4000 Blaine	1,194	0,008	564,89	1
S3 nach Stabmühle	1,535	0,021	726,22	4
S3 2000 Blaine	1,341	0,026	634,29	3
S3 4000 Blaine	1,125	0,010	532,33	1

In Tabelle 15 sind die Mahlfeinheiten für die erste Probe der Schlacke HO angegeben und die zugehörigen Energieeinträge in Tabelle 44 im Anhang zu finden. Die Visualisierung ist in Abbildung 11 zu sehen

Tabelle 15: Mahlverhalten Erste Probe HO

Umdrehungen	Spezifische Oberfläche [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]	Spez. Zerkleinerungsenergie [J/g]
2500	1820,7	34,4	93,09
7500	3247,7	155,4	273,23
17500	5394,0	158,8	622,62
20300	6016,0	41,0	721,42

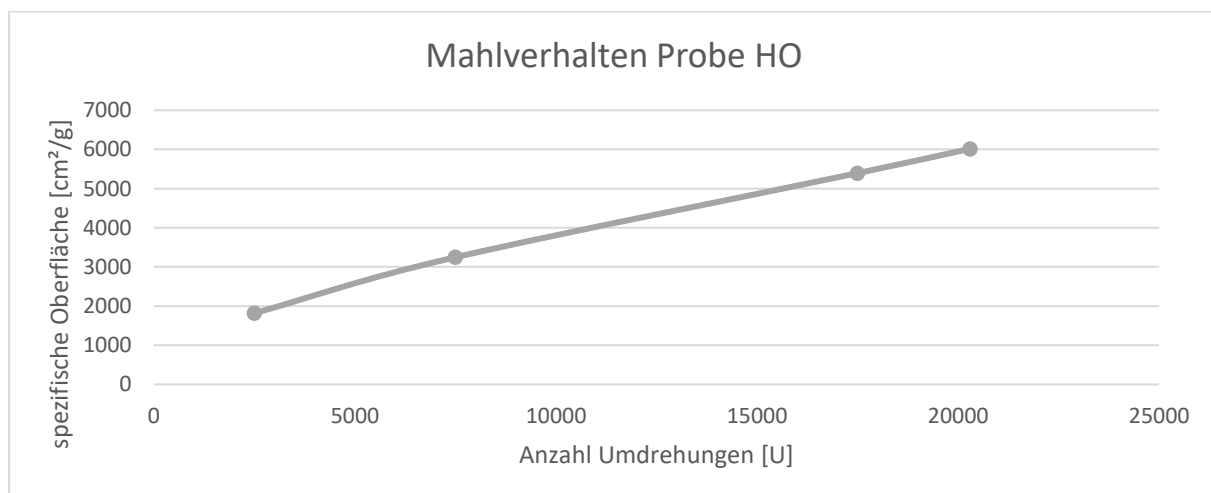


Abbildung 11: Mahlverhalten der ersten Probe von HO

Die in Tabelle 16 angeführten spezifischen Oberflächen sind ein Mittelwert aus dem Verfahren der Oberflächenmessung nach Blaine für die Schlacke S1. An dieser Stelle sein angemerkt, dass zu Beginn der ersten Probe für S1 die Falldauern sehr kurz waren, weshalb statt drei Werten pro Einzelmessung neun Werte aufgenommen wurden, um die Streuung der Zeiten etwas zu mindern.

Tabelle 16: Mahlverhalten Erste Probe S1

Umdrehungen	Spezifische Oberfläche [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]	Spez. Zerkleinerungsenergie [J/g]
500	404,3	46,0	13,71
1000	730,0	10,5	27,33
1500	1044,3	52,3	40,89
2500	1478,3	24,7	67,83
4000	2109,7	31,8	107,96
5000	2503,7	17,1	134,49
15000	4579,0	103,2	390,92
22500	5716,0	-	579,61
24350	6103,7	24,4	626,38

Aus dieser Tabelle und Tabelle 45 im Anhang ergeben sich unter Berücksichtigung des Energieeintrages durch die Mühle bezogen auf die Aufgabe die daneben angeführten spezifischen Energieeinträge. Da die Aufgabe während der Mahlung dieselbe blieb, sind die Energieeinträge addierbar. Das Mahlverhalten der ersten Probe der Schlacke S1 ist weiters in Abbildung 12 visualisiert.

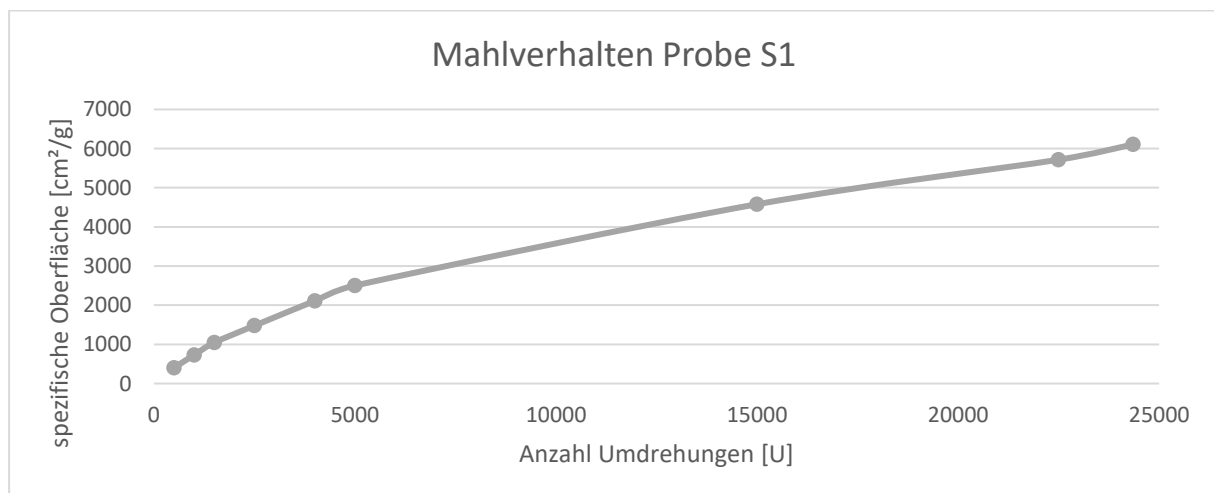


Abbildung 12: Mahlverhalten der ersten Probe von S1

Analog zu S1 sind in Tabelle 17 die Mahlfeinheiten und die zugehörigen Umdrehungen der ersten Probe von S2 angeführt. Die Energieeinträge sind in Tabelle 46 angegeben. In Abbildung 13 ist das Mahlverhalten ebenfalls visualisiert.

Tabelle 17: Mahlverhalten Erste Probe S2

Umdrehungen	Spezifische Oberfläche [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]	Spez. Zerkleinerungsenergie [J/g]
3800	1885,00	37,3	102,67
20000	4026,30	35,9	495,44
28000	4980,70	7,8	698,16
37000	5680,00	74,7	924,36
41500	5990,70	52,6	1038,32

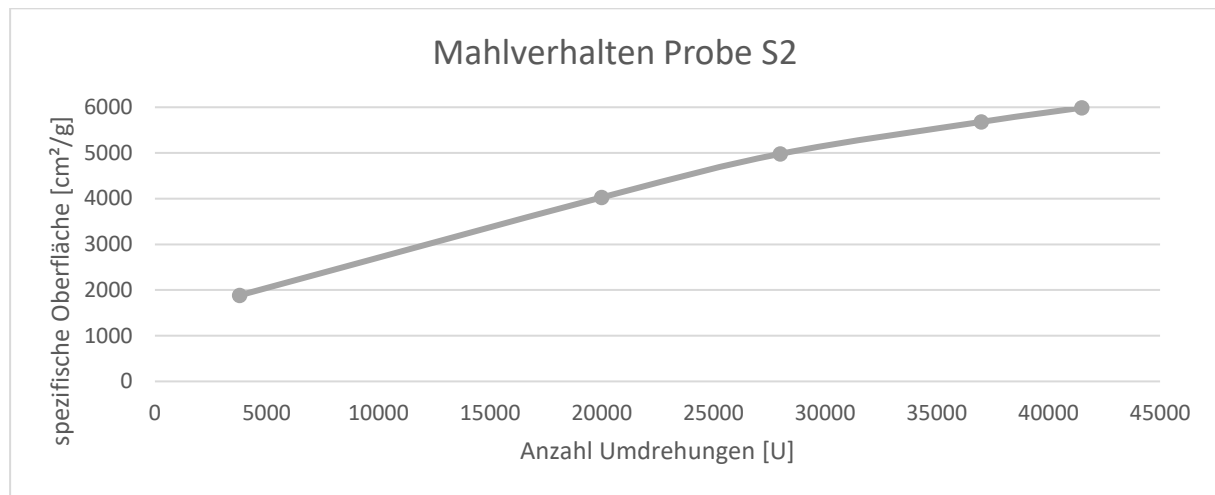


Abbildung 13: Mahlverhalten der ersten Probe von S2

In Tabelle 18 sind die Mahlfeinheiten für erste Probe der Schlacke S3 angegeben. Die Energieeinträge sind im Anhang in Tabelle 47 zu finden. Die Visualisierung ist in Abbildung 14 zu sehen

Tabelle 18: Mahlverhalten Erste Probe S3

Umdrehungen	Spezifische Oberfläche [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]	Spez. Zerkleinerungsenergie [J/g]
2500	1569,70	55,0	72,65
6800	2853,30	41,4	190,79
19000	4592,30	49,0	505,11
25100	5235,00	50,1	666,68
32800	5942,00	58,0	868,74

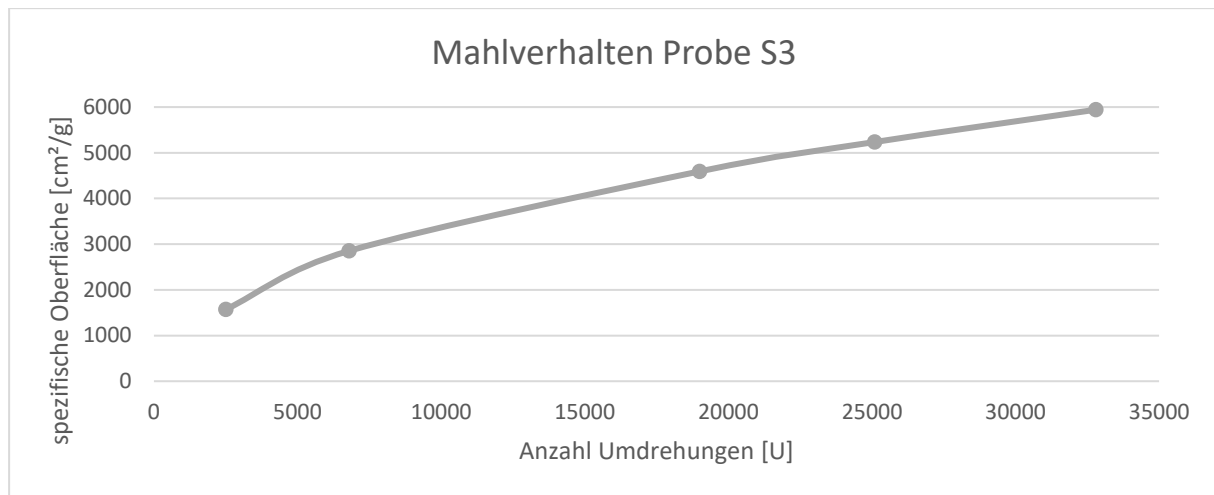


Abbildung 14: Mahlverhalten der ersten Probe von S3

Für die chargenweise Zerkleinerung wurden die Energieeinträge ebenfalls gemessen. Da hier jedoch wechselnde Bezugsmengen und ein Ablauf der Zerkleinerung angewendet werden mussten, welcher eine große Variabilität bei den Massen der Chargen aufweist, um möglichst wenig Probe durch etwaige Verluste zu verlieren, wird auf die Angabe verzichtet und stattdessen auf die angegebenen ersten Proben verwiesen.

Die gemessenen spezifischen Oberflächen für die Schlacke HO sind in Tabelle 48 für die Mahlung bis 2000 Blaine, in Tabelle 49 für die Mahlung bis 4000 Blaine, in Tabelle 50 für die Mahlung bis 6000 Blaine und in Tabelle 19 für die letztlich abgepackten Proben für die weiteren Untersuchungen angegeben. Für S1 sind die Werte in Tabelle 51 für die Mahlung bis 2000 Blaine, in Tabelle 52 für die Mahlung bis 4000 Blaine, in Tabelle 53 für die Mahlung bis 6000 Blaine und in Tabelle 20 für die letztlich abgepackten Proben für die weiteren Untersuchungen angegeben. In Analogie dazu sind für diese Werte für die Schlacke S2 in Tabelle 54 bis Tabelle 56 im Anhang zu finden. Für S3 sind diese in Tabelle 57 bis Tabelle 59 aufgelistet.

Diese in den folgenden Tabellen angegebenen Proben mit den zugehörigen Mahlfeinheiten wurden weiterführend für die Herstellung der Proben für die Festigkeitsprüfung und zur Feststellung der Raumbeständigkeit verwendet.

Tabelle 19: Übersicht abgepackte Mahlfeinheiten nach Homogenisierung HO

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm²/g]	STABW [cm²/g]	Gesamtmenge [g]
HO - 2000 Blaine	2,90	0,00	2037,0	10,58	2116,5
HO - 4000 Blaine	2,84	0,00	3996,0	13,75	2108,5
HO - 6000 Blaine	2,70	0,00	6017,3	23,76	2110,0

Tabelle 20: Übersicht abgepackte Mahleinheiten nach Homogenisierung S1

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]	Gesamtmenge [g]
S1 - 2000 Blaine	3,09	0,01	1992,0	32,97	2411,0
S1 - 4000 Blaine	3,08	0,00	3994,3	19,66	2395,0
S1 - 6000 Blaine	3,06	0,01	6021,0	22,52	2395,5

Tabelle 21: Übersicht abgepackte Mahleinheiten nach Homogenisierung S2

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]	Gesamtmenge [g]
S2 - 2000 Blaine	3,11	0,00	1968,0	20,81	1108,5
S2 - 4000 Blaine	3,11	0,00	4047,0	16,82	1092,8
S2 - 6000 Blaine	3,10	0,00	6036,3	19,35	1110,4

Tabelle 22: Übersicht abgepackte Mahleinheiten nach Homogenisierung S3

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]	Gesamtmenge [g]
S3 - 2000 Blaine	3,10	0,01	1986,7	52,27	1172,4
S3 - 4000 Blaine	3,10	0,00	4002,7	57,00	1169,8
S3 - 6000 Blaine	3,02	0,00	5954,7	31,09	1168,4

4.2.4 Mahleinheit Zement

Neben den Schlacken wurde auch die Mahleinheit des verwendeten Zementes ermittelt. Als Grundlage wurde die ermittelte Stoffdichte von vorher herangezogen.

Tabelle 23: Oberfläche Zement nach Blaine

Probe	Einwaage [g]	Massespezifische Oberfläche [cm ² /g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]
	2,94	4440,0	
CEM I	2,95	4470,0	4435,3
	2,95	4396,0	

4.2.5 Magnetscheidung zwischen den Schritten

Die abgeschiedenen Magnetprodukte, bei denen es sich optisch nicht um rein metallische Körner handelt, sondern wo weiters auch mit Schlacke umschlossene Stahlropfen enthalten sind, sind als Massen in der nachfolgenden Tabelle 24 angegeben. Die Anteile sind bezogen auf die Aufgabemasse vor Beginn der Zerkleinerung.

Tabelle 24: Ausbringen der Magnetprodukte Übersicht

Probe	Masse [g]	Anteil [%]	Anteil gesamt [%]
S1 nach Brecher	183,93	2,42	2,58
S1 nach Stabmühle	12,04	0,16	
S2 nach Brecher	86,63	2,47	2,70
S2 nach Stabmühle	7,96	0,23	
S3 nach Brecher	83,41	2,25	2,38
S3 nach Stabmühle	4,83	0,13	

Zur Illustration des Erscheinungsbildes der einzelnen Magnetprodukte sind nachfolgend beispielhafte Abbildungen angeführt. In Abbildung 15 ist das Magnetprodukt der Schlacke S1 nach der Zerkleinerung im Brecher sichtbar. Es handelt sich um metallische Körner und Schlackestücke, die Stahlropfen umschließen und ausreichend leicht waren, um vom Stabmagneten herausgehoben zu werden.



Abbildung 15: Magnetprodukt S1 nach Zerkleinerung mit Brecher

In Abbildung 16 ist ein solches Schlackestück mit Stahlkugel im inneren sichtbar. Dieses Korn stammt aus dem Magnetprodukt der Schlacke S2.



Abbildung 16: Korn aus Magnetprodukt S2 nach Brecher (eingeschlossene Stahlropfen)

In Abbildung 17 ist das Magnetprodukt der Schlacke S2 nach der Zerkleinerung in der Stabmühle zu sehen. Hier ist der Unterschied zu den Magnetprodukten nach der Zerkleinerung im Brecher deutlich sichtbar, da die zuvor eingeschlossenen Stahlropfen aufgeschlossen vorliegen und somit weniger Körner herausgehoben wurden, welche mit Schlacke verwachsen sind.

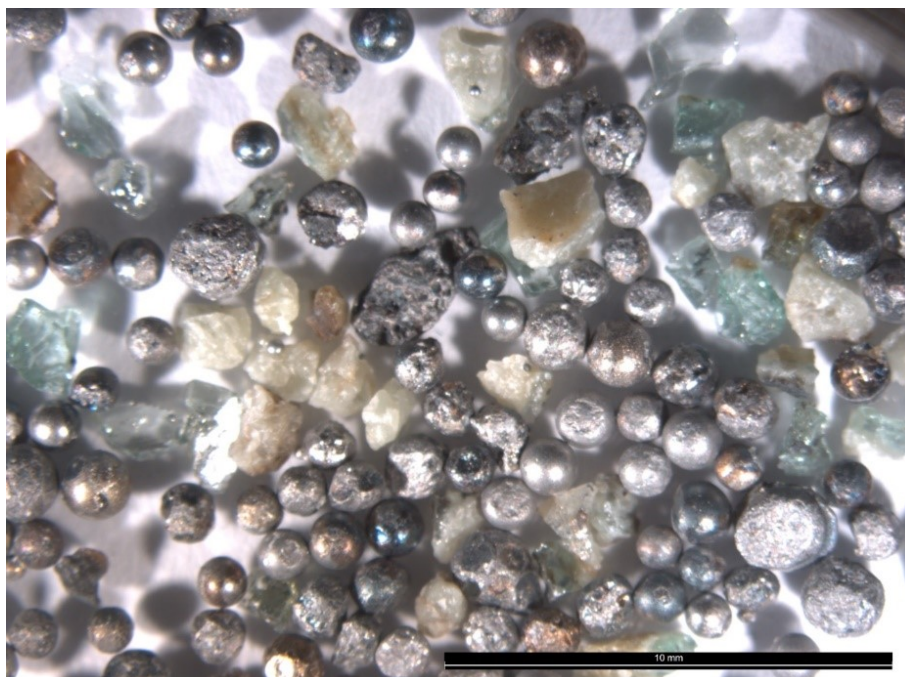


Abbildung 17: Magnetprodukt S2 nach Zerkleinerung in Stabmühle

In Abbildung 18 ist das Magnetprodukt der Schlacke S1 nach der Zerkleinerung in der Kugelmühle zu sehen. Wie zuvor erwähnt wurden diese Magnetprodukte nicht mehr berücksichtigt, da sie nicht von ausgebrochenen Teilen der eingesetzten Mahlkörper zu unterscheiden waren. Des Weiteren waren die ausgebrachten Massen im Bereich von keinem ganzen Gramm.

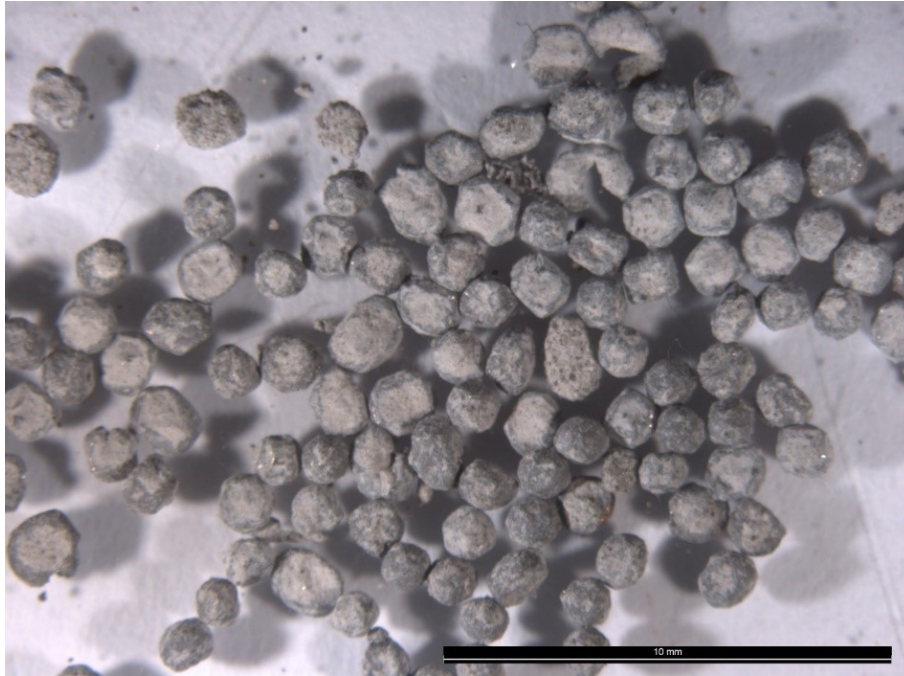


Abbildung 18: Magnetprodukt aus S1 nach Zerkleinerung in Kugelmühle

4.3 Probenherstellung, Festigkeiten und Raumbeständigkeit

4.3.1 Ausbreitmaße der hergestellten Proben

In Tabelle 25 sind die Mischungen, welche zur Prüfung nach 7 Tagen vorgesehen waren zu finden. In der obersten Zeile ist die Referenzprobe auf beiden Seiten ersichtlich. Zu den Rezepturen sind die ermittelten Ausbreitmaße angeführt. In Tabelle 30 sind die Proben, welche zur Prüfung nach 28 Tagen vorgesehen waren, aufgelistet. In der obersten Zeile ist die Referenzprobe auf beiden Seiten ersichtlich. Auch hier wurden 31 Mischungen hergestellt und dabei die angeführten Ausbreitmaße ermittelt.

Tabelle 25: Hergestellte Proben zur Prüfung der Festigkeit nach 7 Tagen

Probe	Ausbreitmaß [mm]	Probe	Ausbreitmaß [mm]
R-1-7	170,05	R-1-7	170,05
HO-2k-12,5-7	177,75	S1-2k-50-7	182,9
HO-4k-12,5-7	174,2	S1-4k-50-7	191,9
HO-6k-12,5-7	172,15	S1-6k-50-7	187,05
HO-2k-25-7	180,55	S2-2k-12,5-7	177,05
HO-4k-25-7	176,45	S2-4k-12,5-7	178,25
HO-6k-25-7	181,7	S2-6k-12,5-7	175,4
HO-2k-50-7	178,3	S2-2k-25-7	173,1
HO-4k-50-7	187,7	S2-4k-25-7	184,7
HO-6k-50-7	185,8	S2-6k-25-7	184,5
S1-2k-12,5-7	179,75	S3-2k-12,5-7	175,8
S1-4k-12,5-7	180,45	S3-4k-12,5-7	176,1
S1-6k-12,5-7	178,1	S3-6k-12,5-7	179,3
S1-2k-25-7	181,55	S3-2k-25-7	180,05
S1-4k-25-7	175,6	S3-4k-25-7	186,4
S1-6k-25-7	181	S3-6k-25-7	179,15

Tabelle 26: Hergestellte Proben zur Prüfung der Festigkeit nach 28 Tagen

Proben	Ausbreitmaß [mm]	Proben	Ausbreitmaß [mm]
R-1-28	167,7	R-1-28	167,7
HO-2k-12,5-28	169,2	S1-2k-50-28	189,7
HO-4k-12,5-28	176,7	S1-4k-50-28	195,25
HO-6k-12,5-28	176,35	S1-6k-50-28	189,4
HO-2k-25-28	176,65	S2-2k-12,5-28	176,05
HO-4k-25-28	180,95	S2-4k-12,5-28	173,95
HO-6k-25-28	181,6	S2-6k-12,5-28	175,45
HO-2k-50-28	175,05	S2-2k-25-28	170,4
HO-4k-50-28	190,6	S2-4k-25-28	178,4
HO-6k-50-28	191,2	S2-6k-25-28	179,15
S1-2k-12,5-28	177,3	S3-2k-12,5-28	173,4
S1-4k-12,5-28	177,85	S3-4k-12,5-28	180,3
S1-6k-12,5-28	181,75	S3-6k-12,5-28	180,85
S1-2k-25-28	189,35	S3-2k-25-28	175,55
S1-4k-25-28	186,2	S3-4k-25-28	184,1
S1-6k-25-28	188,15	S3-6k-25-28	181,6

Die Ausbreitmaße der Proben, welche zur Untersuchung der Raumbeständigkeit hergestellt wurden sind in Tabelle 27 angeführt.

Tabelle 27: Hergestellte Proben zur Prüfung der Raumbeständigkeit

Probe	Ausbreitmaß [mm]	Probe	Ausbreitmaß [mm]
R-1-R	173,6	R-1-R	173,6
HO-2k-25-R	178,45	S2-2k-25-R	184,4
HO-4k-25-R	181,7	S2-4k-25-R	188,95
HO-6k-25-R	177,9	S2-6k-25-R	183,05
HO-4k-50-R	187,25	S2-4k-50-R	190,95
HO-6k-50-R	183,85	S2-6k-50-R	188,95
S1-2k-25-R	182,3	S3-2k-25-R	179,8
S1-4k-25-R	183,95	S3-4k-25-R	187,85
S1-6k-25-R	187,55	S3-6k-25-R	182,95
S1-4k-50-R	194,15	S3-4k-50-R	188,55
S1-6k-50-R	189,65	S3-6k-50-R	188,8

Anhand der Ausbreitmaße ist sichtbar, dass mit höherem zugegebenen Schlackegehalt eine größere Fließfähigkeit feststellbar ist. Unterschiede zwischen den einzelnen zugegebenen Mahlfineinheiten sind anhand der vorgefundenen Resultate nicht eindeutig. Außerdem zeigen dieselben Ausgangsmischungen wie beispielsweise R-1-7, R-1-28 und R-1-R eine deutliche Streuung, welche die eindeutige Identifikation eines Trends erschweren.

4.3.2 Anfangsfestigkeit, Biegezugfestigkeit und E-Modul nach 7 Tagen

In Tabelle 28 sind die ermittelten Festigkeiten gemäß dem Vorgehen laut EN 196-1 als arithmetische Mittelwerte aus den Einzelwerten angegeben [33]. Mit * gekennzeichnete Werte für Druckfestigkeiten sind aufgrund zu großer Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert, daher einer Abweichung der Einzelwerte von 10% bei mindestens zwei Druckfestigkeitsprüfungen zu verwerfen. Da aufgrund der geringen zur Verfügung stehenden Probenmengen keine weiteren Werte als Ersatz für die Festigkeiten ermittelt werden konnten, wurden diese in weiterer Folge für die jeweiligen Angaben weiterverwendet. In der letzten Spalte der Tabelle ist die Druckfestigkeit der jeweiligen Mischung bezogen auf die Druckfestigkeit der Referenzprobe in % angegeben. Für diese Druckfestigkeiten gab es keinen heranziehbaren unteren Grenzwert, daher sei auf die letzte Spalte mit den Informationen zum Vergleich der Festigkeit mit der Referenzprobe verwiesen.

Tabelle 28: Festigkeiten nach 7 Tagen

Probe	Biegezugfestigkeit [MPa]	Druckfestigkeit [MPa]	STABW DF[MPa]	Referenz DF [%]
R-1-7	7,50	47,50	2,22	100
HO-2k-12,5-7	6,68	39,39*	3,67	82,92
HO-4k-12,5-7	7,22	43,32	1,47	91,19
HO-6k-12,5-7	7,38	39,05*	5,60	82,22
HO-2k-25-7	6,15	34,24	1,87	72,09
HO-4k-25-7	6,51	34,99	0,47	73,65
HO-6k-25-7	7,49	40,88	2,32	86,06
HO-2k-50-7	4,12	19,65	0,88	41,38
HO-4k-50-7	5,09	25,81	0,93	54,33
HO-6k-50-7	5,40	28,42	0,46	59,84
S1-2k-12,5-7	6,88	42,15	1,34	88,73
S1-4k-12,5-7	6,90	42,04	2,03	88,49
S1-6k-12,5-7	7,11	43,41	2,69	91,38
S1-2k-25-7	5,87	30,30*	3,74	63,80
S1-4k-25-7	6,50	36,95	1,46	77,78
S1-6k-25-7	6,74	36,82*	3,69	77,52
S1-2k-50-7	3,91	18,16	0,85	38,24
S1-4k-50-7	4,84	24,05*	2,29	50,63
S1-6k-50-7	5,33	26,92	1,87	56,57
S2-2k-12,5-7	7,09	39,84	2,36	83,87
S2-4k-12,5-7	7,28	41,45	2,39	87,27
S2-6k-12,5-7	7,05	42,49	2,89	89,45
S2-2k-25-7	6,10	31,74	0,89	66,82
S2-4k-25-7	6,35	35,73	1,59	75,23
S2-6k-25-7	6,84	37,99	1,38	79,98
S3-2k-12,5-7	6,81	38,32	2,45	80,67
S3-4k-12,5-7	7,57	38,70*	5,90	81,46
S3-6k-12,5-7	7,23	42,56	2,09	89,59
S3-2k-25-7	6,34	29,49*	6,56	62,09
S3-4k-25-7	6,61	35,24	1,85	74,19
S3-6k-25-7	7,03	39,75	1,62	83,68

Klar erkennbar ist eine höhere festgestellte Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit mit steigender Mahlfineinheit, wobei die meisten Ausnahmen dort gelten, wo die Werte für die Druckfestigkeit aufgrund der zu großen Abweichung zu verwerfen wären. Diese zeigen eine höhere Standardabweichung als die anderen Mittelwerte der Druckfestigkeit. Mit steigendem zugegebenen Schlackegehalt nehmen bei allen Schlacken die Biegezugfestigkeiten und Druckfestigkeiten ab.

In Tabelle 29 sind die E-Moduli für die genannten Mischungen gemäß dem Vorgehen wie in 3.3.2 beschrieben angegeben. Hier zeigen sich die Unterschiede weniger deutlich als bei den Festigkeiten davor. Dennoch nimmt der E-Modul für alle untersuchten Schlacken mit steigendem zugegebenen Schlackegehalt ab, während er für steigende Mahlfineinheit zunimmt.

Tabelle 29: E-Moduli nach 7 Tagen

Probe	E-Modul [GPa]	STABW [GPa]	Probe	E-Modul [GPa]	STABW [GPa]
R-1-7	40,11	0,18	R-1-7	40,11	0,18
HO-2k-12,5-7	38,60	0,56	S1-2k-50-7	32,53	0,75
HO-4k-12,5-7	38,95	1,49	S1-4k-50-7	34,97	0,37
HO-6k-12,5-7	39,94	0,02	S1-6k-50-7	35,90	1,42
HO-2k-25-7	39,14	1,19	S2-2k-12,5-7	39,68	1,62
HO-4k-25-7	37,75	1,85	S2-4k-12,5-7	42,45	0,14
HO-6k-25-7	39,26	0,98	S2-6k-12,5-7	41,49	0,33
HO-2k-50-7	34,30	0,87	S2-2k-25-7	38,44	0,97
HO-4k-50-7	35,96	0,17	S2-4k-25-7	40,57	1,25
HO-6k-50-7	35,34	0,63	S2-6k-25-7	40,67	1,76
S1-2k-12,5-7	40,13	2,22	S3-2k-12,5-7	42,63	0,68
S1-4k-12,5-7	41,38	1,09	S3-4k-12,5-7	40,96	1,02
S1-6k-12,5-7	40,07	0,52	S3-6k-12,5-7	43,16	0,39
S1-2k-25-7	37,52	0,92	S3-2k-25-7	40,99	0,27
S1-4k-25-7	37,91	0,42	S3-4k-25-7	42,68	0,35
S1-6k-25-7	37,69	0,56	S3-6k-25-7	41,27	1,63

4.3.3 Normfestigkeit, Biegezugfestigkeit und E-Modul nach nach 28 Tagen

Das Vorgehen für die Prüfung der Festigkeit und Parameter nach 28 Tagen folgte demselben Ablauf wie in 3.3.2 beschrieben

Die ermittelten Festigkeiten sind in Tabelle 30 ersichtlich. In der letzten Spalte sind die Druckfestigkeiten der Probe bezogen auf die Druckfestigkeit der Referenzprobe in % angegeben. Mit * gekennzeichnete Werte für Druckfestigkeiten sind aufgrund zu großer Abweichungen der Einzelwerte vom Mittelwert zu verwerfen. Mit ° gekennzeichnete Werte für Druckfestigkeiten sind aufgrund zu Unterschreitung des Grenzwertes für Einzelwerte, welcher als 30,0 MPa angesetzt war zu verwerfen. Die herangezogene Mindestfestigkeit für die Mittelwerte der Druckfestigkeiten war 32,5 MPa gemäß den Tabellenangaben zu Grenzwerten der Druckfestigkeit in EN 197-1 [25].

Tabelle 30: Festigkeiten nach 28 Tagen

Probe	Biegezugfestigkeit [MPa]	Druckfestigkeit [MPa]	STABW DF[MPa]	Referenz DF [%]
R-1-28	7,38	56,36	2,90	100,00
HO-2k-12,5-28	8,33	53,26	2,33	94,51
HO-4k-12,5-28	8,71	49,81*	7,22	84,52
HO-6k-12,5-28	8,47	49,86*	7,24	88,47
HO-2k-25-28	8,02	38,02	6,93	67,46
HO-4k-25-28	8,49	46,78*	7,96	83,00
HO-6k-25-28	9,11	57,76	3,09	102,48
HO-2k-50-28	6,93	34,15	1,97	60,59
HO-4k-50-28	8,08	41,57	7,03	73,75
HO-6k-50-28	8,67	50,70*	5,02	89,96
S1-2k-12,5-28	7,42	49,95	3,33	88,64
S1-4k-12,5-28	7,86	50,74	1,28	90,03
S1-6k-12,5-28	7,77	52,53	1,55	93,20
S1-2k-25-28	6,96	43,80	1,90	77,72
S1-4k-25-28	7,81	49,78*	5,01	88,33
S1-6k-25-28	7,73	48,39	2,37	85,86
S1-2k-50-28	5,72	30,20°	1,94	53,58
S1-4k-50-28	6,42	33,48	3,79	59,40
S1-6k-50-28	6,87	40,88	3,24	72,54
S2-2k-12,5-28	7,64	51,09	1,89	90,66
S2-4k-12,5-28	8,07	51,60*	6,30	91,55
S2-6k-12,5-28	8,14	52,51	2,87	93,18
S2-2k-25-28	6,96	43,36	1,84	76,93
S2-4k-25-28	7,81	48,58	2,25	86,21
S2-6k-25-28	8,20	43,12	4,84	76,51
S3-2k-12,5-28	7,73	48,37	1,53	85,83
S3-4k-12,5-28	8,58	39,94*	9,17	70,87
S3-6k-12,5-28	8,64	46,89*	7,63	83,20
S3-2k-25-28	7,32	44,67*	3,77	79,26
S3-4k-25-28	8,37	43,45*	4,44	77,09
S3-6k-25-28	8,14	44,63	8,68	79,19

Auch hier ist zu sehen, dass mit steigendem zugegebenen Schlackegehalt die Werte für Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit bei allen Schlacken abnehmen. Die Angabe des Verhaltens bei steigender Mahlfineinheit ist nicht so eindeutig sichtbar wie beim vorangehenden Vergleich der Werte nach 7 Tagen. Hier zeigen sich teils niedrigere Werte für Festigkeiten für die höchste Mahlfineinheit von 6000 Blaine verglichen mit der Mahlfineinheit von 4000 Blaine bei selbem zugesetzten Schlackegehalt. Es zeigen sich auch Unterschiede zwischen der Biegezugfestigkeit und der jeweiligen Druckfestigkeit bei diesem Trend, da diese beispielsweise bei S3 für 25% zugegebener Schlacke oder S1 bei 12,5% zugegebener Schlacke nicht derselbe Trend bei den Biegezugfestigkeiten über die Mahlfineinheit betrachtet vorherrscht wie bei den Druckfestigkeiten.

In Tabelle 31 sind die E-Moduli für die genannten Mischungen gemäß dem Vorgehen wie in 3.3.2 beschrieben angegeben. Hier ist die Beobachtung der Trends der ermittelten E-Moduli ähnlich zur vorangehenden Tabelle der Festigkeiten nach 28 Tagen verglichen mit den entsprechenden Werten nach 7 Tagen. Auch hier zeigen sich die Unterschiede weniger stark ausgeprägt als nach 7 Tagen und teils auch nicht mehr so eindeutig. Beispielsweise nimmt der E-Modul mit zugegebenem Schlackegehalt ab, jedoch weniger deutlich sichtbar. Mit steigender Mahlfineinheit nimmt der E-Modul zu, jedoch ist bei allen Schlacken mit 12,5% Schlackegehalt zu sehen, dass die höchste Mahlfineinheit nicht den höchsten festgestellten E-Modul aufweist.

Tabelle 31: E-Moduli nach 28 Tagen

Probe	E-Modul [GPa]	STABW [GPa]	Probe	E-Modul [GPa]	STABW [GPa]
R-1-28	42,10	1,11	R-1-28	42,10	1,11
HO-2k-12,5-28	44,82	0,76	S1-2k-50-28	40,30	0,84
HO-4k-12,5-28	44,44	0,97	S1-4k-50-28	39,84	0,83
HO-6k-12,5-28	44,33	0,19	S1-6k-50-28	40,46	0,55
HO-2k-25-28	43,08	0,71	S2-2k-12,5-28	44,58	0,60
HO-4k-25-28	44,64	0,91	S2-4k-12,5-28	44,01	0,45
HO-6k-25-28	45,10	0,78	S2-6k-12,5-28	43,52	0,79
HO-2k-50-28	46,45	1,82	S2-2k-25-28	43,50	0,60
HO-4k-50-28	41,85	0,57	S2-4k-25-28	43,68	0,66
HO-6k-50-28	42,52	0,60	S2-6k-25-28	43,99	0,77
S1-2k-12,5-28	42,74	1,47	S3-2k-12,5-28	43,14	0,57
S1-4k-12,5-28	44,93	1,52	S3-4k-12,5-28	43,37	0,67
S1-6k-12,5-28	44,21	1,02	S3-6k-12,5-28	43,30	0,69
S1-2k-25-28	44,09	0,94	S3-2k-25-28	42,42	0,17
S1-4k-25-28	40,54	0,18	S3-4k-25-28	43,86	0,89
S1-6k-25-28	42,87	0,27	S3-6k-25-28	42,47	0,71

4.3.4 Zeitliche Entwicklung der Abmaße und Raumbeständigkeitsprüfung

Als erste Indikation für die Raumbeständigkeit wurde die zeitliche Entwicklung der Abmaße betrachtet. Die Abmaße wurden nach dem Entformen und vor der Festigkeitsprüfung nach der Lagerung in Wasser nach einer Dauer von 6 bzw. 27 Tagen festgestellt. Anhand der Werte konnte keine eindeutige Indikation für expansives Verhalten gefunden werden. Bemerkenswert ist, dass die Mischungen mit Schlacke HO im Vergleich zu Mischungen mit anderen Schlacken am wenigsten Masse, daher Wasser während der Lagerung bis zur Prüfung aufnimmt. Die anderen Mischungen zeigen Werte, welche im vergleichbaren Ausmaß wie die Referenzprobe ohne Schlackenzugabe sind. Die vorgefundenen negativen Entwicklungen der Breite, Höhe und Länge sind eine direkte Folge der jeweiligen Schwindung und können vielfältige Ursachen haben, welche nicht einhergehend untersucht wurden.

Tabelle 32: Veränderungen der Abmaße nach 7 Tagen

Probe	ΔB [mm]	ΔH [mm]	ΔL [mm]	Δm [g]	Probe	ΔB [mm]	ΔH [mm]	ΔL [mm]	Δm [g]
R-1-7	0,04	-0,03	0,02	5,65	R-1-7	0,04	-0,03	0,02	5,65
HO-2k-12,5-7	-0,02	-0,07	0,03	5,08	S1-6k-12,5-7	0,04	-0,01	-0,07	5,52
HO-2k-25-7	0,06	-0,07	-0,03	4,27	S1-6k-25-7	0,04	0,00	0,03	5,67
HO-2k-50-7	-0,06	-0,16	-0,07	2,87	S1-6k-50-7	-0,01	0,04	0,02	5,33
HO-4k-12,5-7	0,08	-0,03	0,00	5,10	S2-2k-12,5-7	0,04	0,03	-0,07	5,25
HO-4k-25-7	-0,01	0,06	-0,08	5,10	S2-2k-25-7	0,01	0,04	0,08	5,53
HO-4k-50-7	0,02	-0,07	0,00	3,62	S2-4k-12,5-7	-0,03	0,01	-0,17	4,60
HO-6k-12,5-7	0,01	0,10	0,07	5,15	S2-4k-25-7	0,00	0,08	0,00	4,72
HO-6k-25-7	0,01	0,02	0,00	4,18	S2-6k-12,5-7	-0,03	0,03	-0,03	5,05
HO-6k-50-7	0,08	0,07	-0,03	3,98	S2-6k-25-7	0,00	-0,09	-0,03	5,02
S1-2k-12,5-7	-0,01	0,03	-0,03	4,75	S3-2k-12,5-7	-0,01	-0,06	-0,01	5,02
S1-2k-25-7	-0,02	0,08	-0,03	4,52	S3-2k-25-7	0,01	-0,03	0,05	4,38
S1-2k-50-7	0,09	-0,12	-0,03	4,87	S3-4k-12,5-7	0,02	-0,08	0,07	5,13
S1-4k-12,5-7	0,00	0,03	0,05	5,85	S3-4k-25-7	0,06	0,02	0,02	5,08
S1-4k-25-7	0,02	0,10	0,02	5,83	S3-6k-12,5-7	-0,01	-0,03	0,05	5,73
S1-4k-50-7	-0,02	0,03	0,00	4,38	S3-6k-25-7	0,08	0,07	0,05	5,53

Tabelle 33: Veränderung der Abmaße nach 28 Tagen

Probe	ΔB [mm]	ΔH [mm]	ΔL [mm]	Δm [g]	Probe	ΔB [mm]	ΔH [mm]	ΔL [mm]	Δm [g]
R-1-28	-0,05	0,03	0,02	6,83	R-1-28	0,04	-0,03	0,02	5,65
HO-2k-12,5-28	-0,02	-0,04	-0,05	6,88	S1-6k-12,5-28	-0,10	-0,05	-0,02	7,80
HO-2k-25-28	-0,02	0,04	-0,08	5,97	S1-6k-25-28	-0,06	-0,02	0,03	7,97
HO-2k-50-28	0,01	-0,10	-0,03	3,55	S1-6k-50-28	-0,01	0,06	-0,10	7,85
HO-4k-12,5-28	-0,01	-0,04	-0,17	6,88	S2-2k-12,5-28	-0,02	0,07	0,02	7,32
HO-4k-25-28	-0,04	-0,10	-0,13	6,57	S2-2k-25-28	-0,01	-0,03	-0,10	6,42
HO-4k-50-28	-0,03	-0,03	-0,03	5,07	S2-4k-12,5-28	-0,07	0,00	-0,10	7,60
HO-6k-12,5-28	-0,04	0,03	0,03	7,30	S2-4k-25-28	0,01	0,03	-0,17	6,83
HO-6k-25-28	-0,06	0,00	-0,08	6,62	S2-6k-12,5-28	-0,03	0,04	-0,03	6,90
HO-6k-50-28	-0,12	-0,08	-0,15	5,58	S2-6k-25-28	0,07	-0,02	-0,02	6,55
S1-2k-12,5-28	-0,04	0,08	-0,06	7,17	S3-2k-12,5-28	-0,07	-0,06	-0,07	7,75
S1-2k-25-28	-0,03	0,00	-0,10	7,78	S3-2k-25-28	0,02	-0,03	-0,12	6,58
S1-2k-50-28	-0,01	-0,07	-0,03	6,42	S3-4k-12,5-28	-0,11	-0,17	-0,05	7,35
S1-4k-12,5-28	-0,08	-0,24	-0,13	8,72	S3-4k-25-28	-0,04	-0,08	-0,02	7,13
S1-4k-25-28	-0,02	-0,07	-0,26	6,70	S3-6k-12,5-28	-0,02	-0,04	0,02	7,87
S1-4k-50-28	-0,02	-0,04	0,04	6,75	S3-6k-25-28	0,02	-0,08	0,02	8,07

Mithilfe der Raumbeständigkeitsprüfung mit dem Autoklav wurden die Längen- und Massenänderung wie in Tabelle 34 angegeben ermittelt.

Tabelle 34: Längen- und Massenänderung nach Autoklav

Probe	Längenänderung [mm/m]	STABW [mm/m]	Masseänderung [%]
R-1-R	0,61	0,26	-0,62
HO-2k-25-R	0,62	0,09	-0,08
HO-4k-25-R	0,87	0,34	-0,43
HO-6k-25-R	0,59	0,18	-0,70
HO-4k-50-R	0,82	0,26	0,01
HO-6k-50-R	0,89	0,28	-0,17
S1-2k-25-R	0,83	0,23	-0,17
S1-4k-25-R	0,75	0,18	-0,69
S1-6k-25-R	0,76	0,31	0,03
S1-4k-50-R	0,90	0,37	0,03
S1-6k-50-R	1,01	0,17	-0,36
S2-2k-25-R	0,90	0,08	-0,08
S2-4k-25-R	0,99	0,05	-0,43
S2-6k-25-R	1,20	0,32	-0,62
S2-4k-50-R	1,22	0,17	-0,20
S2-6k-50-R	1,04	0,05	-0,06
S3-2k-25-R	1,49	0,16	-0,21
S3-4k-25-R	0,75	0,37	-0,59
S3-6k-25-R	1,26	0,33	-0,31
S3-4k-50-R	0,87	0,13	-0,40
S3-6k-50-R	1,08	0,08	-0,40

Bei der Prüfung der Raumbeständigkeit wurde festgestellt, dass mit steigendem zugegebenem Schlackegehalt eine größere Längenänderung beobachtet werden kann. Bezogen auf die Mahlfeinheit ist die Beurteilung des Trends nicht eindeutig, wobei für die Schlacke HO bei 50% Schlackegehalt, S1 bei 50% Schlackegehalt, S2 bei 25% Schlackegehalt und S3 für 50% Schlackegehalt eine größere Längenänderung mit steigender Mahlfeinheit festgestellt werden kann. Jedoch zeigen die Schlacken in den jeweiligen anderen Gehalten einen davon abweichenden und teils deutlich in Kontrast dazu stehenden Trend, wobei bei S2 bei 50% zugegebener Schlacke mit steigender Mahlfeinheit eine geringere Längenänderung ersichtlich ist. Die beobachteten Längenänderungen befinden sich alle deutlich unter dem Grenzwert von 8 mm/m wie in ÖNORM B 3309-1 vorgegeben [12].

Als Vergleich zwischen der Änderung der Abmaße, insbesondere der Länge nach Lagerung in Wasser vor Prüfung der Festigkeiten und der Änderung der Länge infolge einer Autoklavprüfung kann in der nachstehenden Tabelle 35 zwischen den beiden Arten der Feststellung einer Längenänderung verglichen werden. Hier zeigt sich, dass die Mischungen, welche in Wasser gelagert wurden keine nennenswerte Expansion zeigen sondern eher eine Schwindung, während die Längenänderungen infolge der Autoklavprüfung stets im positiven Bereich ist und demnach eine Expansion infolge der Prüfung aufweisen.

Tabelle 35: Vergleich der Längenänderung nach Wasserlagerung und nach Prüfung im Autoklav

Probe	Längenänderung 7 Tage [mm/m]	Längenänderung 28 Tage [mm/m]	Längenänderung Autoklav [mm/m]
R-1	0,10	0,10	0,61
HO-2k-25	-0,21	-0,52	0,62
HO-4k-25	-0,52	-0,83	0,87
HO-6k-25	0,00	-0,52	0,59
HO-4k-50	0,00	-0,21	0,82
HO-6k-50	-0,21	-0,94	0,89
S1-2k-25	-0,21	-0,62	0,83
S1-4k-25	0,10	-1,61	0,75
S1-6k-25	0,21	0,21	0,76
S1-4k-50	0,00	0,26	0,90
S1-6k-50	0,10	-0,63	1,01
S2-2k-25	0,52	-0,62	0,90
S2-4k-25	0,00	-1,04	0,99
S2-6k-25	-0,21	-0,10	1,20
S3-2k-25	0,31	-0,73	1,49
S3-4k-25	0,10	-0,10	0,75
S3-6k-25	0,31	0,10	1,26

5 Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

5.1.1 Probencharakterisierung

Die untersuchten Proben aus Gießpfannenschlacke unterscheiden sich optisch und in der Beschreibung teils stark von in der Literatur beschriebenen Erscheinungsformen. Laut Literatur ist ein pulvriges und zerfallendes Erscheinungsbild für Gießpfannenschlacken üblich [28]. Jedoch wird oftmals nicht auf das genaue Produkt eingegangen, aus welchem die Schlacke entstanden ist, so dass nicht klar ist, welche Phasenzusammensetzung erwartet werden kann. Als Hauptursache für das beschriebene Erscheinungsbild wird die Transformation von $\beta\text{-C}_2\text{S}$ zu $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ und die damit verbundene starke Volumenexpansion von etwa 12% genannt. Diese Phasen lagen in den untersuchten Proben nicht vor, weshalb sie kein solches Zerfallsverhalten aufwiesen. Weiters handelt es sich bei in der Literatur untersuchten Schlacken oftmals um Proben, welche an von der Witterung exponierten Schlackeplätzen genommen wurden. Diese Art der Lagerung unterscheidet sich von den in dieser Arbeit untersuchten Schlacken dahingehend, dass die Proben während einer Probenahme aus den Gießpfannen entnommen wurden und an einer Stahlplatte frei erstarren gelassen wurden. Die schnellere Abkühlung und deutlich geringere Menge führte zu einer schnelleren Erstarrung. Außerdem waren die Proben keiner zwischenzeitlichen Exposition durch Witterung ausgesetzt.

Aus chemischer Sicht liegen sämtliche untersuchten Proben unter den heranziehbaren Grenzwerten für Glühverlust und Gehalt P_2O_5 gemäß ÖNORM 3309-1 [12]. Der Glühverlust ist mit einem charakteristischen Wert von $\leq 10,0\%$ der Masse und der Gehalt an P_2O_5 -lösliche Phosphate $\leq 0,01\%$ bzw. P_2O_5 gesamt $\leq 5,0\%$ angegeben.

Aus der Vorgabe laut EN 197-1 und laut Tabelle 4 ersichtlich erfüllt die als Referenzprobe für die Beurteilung der Eignung der Gießpfannenschlacken untersuchte Hochofenschlacke die Vorgabe des definierten (C+M)/S Verhältnisses von ≥ 1 gerade nicht. Da die Abweichung von der Zielvorgabe nicht so groß ist, wurde diesem Umstand in weiterer Folge keine Beachtung geschenkt. Erwähnenswert ist dasselbe Verhältnis für die Proben S1 mit 1,46, S2 mit 1,31 und S3 mit 1,31, welches von diesen Schlacken erfüllt wird. Die Grundbedingung, dass C+M+S als Massenanteile mehr als 2/3 der Zusammensetzung ausmachen wird durch alle Schlacken erfüllt.

Als Maß für die Basizität von Schlacken wird das Verhältnis von C/S herangezogen und wird in der Literatur für Gießpfannenschlacken aus aluminiumberuhigten Stahlprodukten im Bereich von etwa 2 angegeben, wobei dies stark von der Funktion der Gießpfannenschlacke abhängt [15]. Bei diesen Proben wurde dieses Verhältnis mit etwa 1 identifiziert, wie es für Pfannenschlacken von siliziumberuhigten Stahlprodukten angetroffen werden kann.

Aus der chemischen Analyse folgend ist für eine Verwendung als Zuschlagstoff laut ÖNORM B 3309-1 ab einem MgO Gehalt von 12% die Raumbeständigkeitsprüfung im Autoklav durchzuführen [12]. Diese Prüfung war bei allen untersuchten Schlacken notwendig. Die Schlacke S1 hat den Grenzwert von maximal 15% mit einem Wert von 15,95% sogar überschritten.

Das Eluationsverhalten der Schlacken ist vorwiegend aufgrund der Löslichkeit von Chrom [VI] Gegenstand von Interesse. Hier ist die genaue Beurteilung komplex, da hierfür unterschiedliche Richtlinien und Beurteilungsverfahren existieren, welche befolgt werden können und laut BAWP teils eine Einzelfallentscheidung heranzuziehen ist [17]. Als Kriterium wurde der Maximalwert von 70 mg/kg für Chrom gemäß einer Entscheidung des Rates der Europäischen Union verwendet [2]. Die untersuchten Schlacken liegen deutlich unter diesem Wert. Für die Schlacke S3 war hierfür nicht ausreichend Probe vorhanden, um diese

Untersuchung durchzuführen. Da sie jedoch viel Ähnlichkeit in der chemischen Zusammensetzung zur Schlacke S2 zeigt, wird davon ausgegangen, dass bei allen Schlacken das Umweltgefahrenpotenzial aufgrund von wasserlöslichem Chrom gering ist und sie daher als nicht gefährlich oder inert einzustufen sind.

Mineralogisch zeigte die Rietveldanalyse, dass bei S1 und S3 Periklas als kristalline Phase vorliegt. Periklas wird neben frei vorliegendem CaO als hauptverantwortlich für das Expansionsverhalten der Schlacken gemacht [14]. Erwähnenswert sich auch die starken Unterschiede beim glasigen Anteil der Probe, wobei in der Literatur erwähnt wird, dass Gießpfannenschlacken aufgrund der Basizität dazu tendieren kristallin vorzuliegen. Hier sei jedoch wieder angemerkt, dass Gießpfannenschlacken aus siliziumberuhigten Produkten weniger basisch sind als Gießpfannenschlacken aus aluminiumberuhigten Produkten und die Unterscheidung oft nicht getroffen wird [20]. Laut Literatur ist ein höherer glasiger Anteil vorteilhaft für die hydraulische Aktivität, da die Aktivierungsenergie der Glasphase beim Abbinden in der Regel höher ist als jene der kristallinen Phase selber Zusammensetzung [22]. Weiteres relevantes Ergebnis ist der jeweilige Anteil an Äkermanit (C_2MS_2), da diese Phase laut Literatur als nicht hydraulisch aktiv gilt. [8] Da Äkermanit mit maximal 3% Anteil an der Phasenzusammensetzung in der jeweiligen Schlacken vorgefunden wurde, konnte keine nennenswerte Beobachtung zu Unterschieden im hydraulischen Verhalten aufgrund dieser Phase gemacht werden.

5.1.2 Aufbereitung und Mahlbarkeit

Bei der Zerkleinerung zeigten die aufbereiteten Proben teils stark unterschiedliches Verhalten wie anhand von Tabelle 36 zu sehen ist. Die Zerkleinerung mit dem Brecher ist aufgrund der unterschiedlichen gewählten Maulweiten und Anzahl der Zerkleinerungsvorgänge nicht einwandfrei vergleichbar. Außerdem liegt für die Schlacke HO kein Wert vor, da diese Schlacke bereits fein genug für eine Mahlung in der Stabmühle war. Die Energieeinträge in der Stabmühle sind aussagekräftiger und zeigen, dass ein höherer Anteil an Glasphase sich positiv auf die Zerkleinerbarkeit auswirkt, wie laut Mikrorisstheorie nach Griffith zu erwarten ist [36]. Diese Beobachtung deckt sich nicht zur Gänze mit den gezeigten Werten, da weitere wichtige Einflussfaktoren, wie beispielsweise genaue Verwachsungsverhältnisse und sonstige relevante Parameter nicht berücksichtigt wurden. Bei der Stabmühle ist jedoch sichtbar, dass der spezifische Energieeintrag mit steigender Kristallinität und somit abnehmendem Glasanteil steigt.

Tabelle 36: Zerkleinerungsverhalten nach Aggregat aufgeteilt

Probe	Glasiger Anteil [%]	Spez. Energieeintrag Brecher [J/g]	Spez. Energieeintrag Stabmühle [J/g]	Spez. Energieeintrag Kugelmühle [J/g]
HO	100	-	7,3	721,42
S1	31	14,36	26,2	626,38
S2	38	21,30	22,3	1038,32
S3	48	22,31	22,2	868,74

Am relevantesten für die Betrachtung der Mahlbarkeit sind die gemessenen Energieeinträge bei der Kugelmühle. Hier unterscheiden sich die Werte in der Reihenfolge von jenen in der Stabmühle, was ein Indiz für Kristallgrößen sein kann. Wie erwähnt wurde die Zerkleinerung in der Kugelmühle als Durchlaufzerkleinerung ohne Siebung durchgeführt. Da sich die Bezugsgrößen bei der chargenweisen Zerkleinerung bei den Mahlfineinheiten jeweils geändert haben, sind in dieser Tabelle die Werte aus der Zerkleinerung der jeweils ersten Probe zu sehen, da dies die am einfachsten vergleichbaren Bedingungen zwischen den Mahlungen waren.

Die Mahlbarkeit kann anhand Abbildung 19 für die oben genannten Proben verglichen werden. Bemerkenswerterweise zeigt sich, dass die Probe S1 mit dem geringsten Glasanteil am einfachsten zu zerkleinern war. Jedoch muss erwähnt werden, dass die Zielmahlfeinheit mit den meisten Zwischenschritten erreicht wurde, während im Verlauf der Zerkleinerung in die Kugelmühle die gewählten Umdrehungszahlen immer größer wurden, um die Mahlfeinheiten schneller zu erreichen. Etwas mehr Energie für die Zerkleinerung benötigte die Probe HO. Diese war subjektiv jedoch am einfachsten zu Zerkleinern, da während der Mahlung die Anhaftungen an Mahlkörpern und in der Mühle am unauffälligsten waren. Sie verhielt sich zu Beginn der Zerkleinerung ähnlich zu Quarzsand, welcher als Reinigungsmittel für die Kugelmühle zwischen unterschiedlichen Proben eingesetzt wird, um Rückstände zu entfernen. Am energieintensivsten war die Zerkleinerung der Probe S2. Diese zeigte in der Phasenanalyse einen deutlich höheren Anteil an Merwinit (C_3MS_2), welcher der Grund für den vorgefundenen höheren Zerkleinerungswiderstand sein könnte. Merwinit (C_3MS_2) und Periklas (M) besitzen jeweils die Mohshärte 6, die höher ist als die von Åkermanit (C_2MS_2) mit 5 bis 5,5 und Monticellit (CMS) mit 5 ist. Die Hintergründe dazu wurden jedoch nicht weiter untersucht, da sie kein vorrangiges Ziel dieser Arbeit waren.

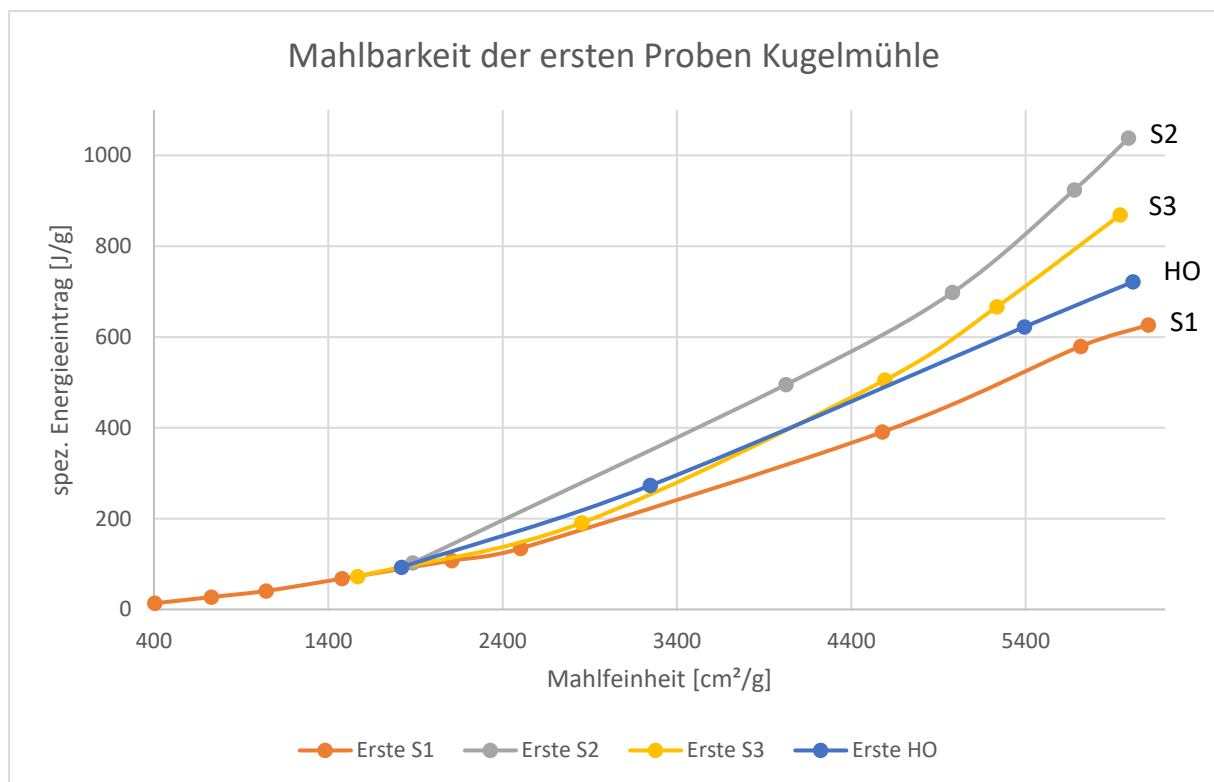


Abbildung 19: Darstellung der Mahlbarkeit der Proben in der Kugelmühle

Der herausgebrachte Anteil an Magnetprodukt deckt sich mit Literaturwerten und gilt auch in etwa als Grenzwert für den potentiellen Einsatz von Stahlwerksschlacken in Bindemittelanwendungen [3]. Laut Bundesabfallwirtschaftsplan können solche Gehalte ein Kriterium sein, um eine Verwertung zur Rückgewinnung der Metalle zu erwägen [17]. Eine solche Verwertung schließt eine anschließende Verwendung der aufbereiteten Schlacke in Bindemittelanwendungen nicht aus.

Anzumerken ist, dass bei die festgestellten Mahlfeinheiten der Produkte nach Homogenisierung, welche in Tabelle 19 bis Tabelle 22 angegeben sind durchwegs um etwa 50 Blaine niedrigere Werte vorgefunden wurden als bei den vorangehenden Einzelchargen vor der jeweiligen Homogenisierung. Hierbei kann es sich um eine reine Umlagerung der Körner infolge der Siebung handeln. Es ist aber auch möglich, dass durch die Durchführung

der Homogenisierung mit metallischen, leitfähigen Utensilien eine gewisse Indikation auf die erwähnte und beobachtete elektrostatische Aufladung der Schlacken durch die Mahlung ersichtlich ist.

5.1.3 Ausbreitmaß

Es ließ sich aufgrund der in Tabelle 25 bis Tabelle 27 aufgelisteten Ausbreitmaße keine konkrete und zuverlässige Aussage zur erwarteten Konsistenz der jeweiligen Mischung treffen. Daher wurde auf eine Feststellung Normsteife, der Erstarrungszeiten und eine darauffolgende Prüfung der Raumbeständigkeit nach EN 196-3 verzichtet, da die vorhandenen Probenmengen für eine umfassende Prüfung zu gering waren.

Da sich die Mischungen für eine Festigkeitsprüfung nach 7 und 28 Tagen und der Raumbeständigkeitsprüfung für die jeweilige Schlacke und den jeweiligen Gehalt vor der Formgebung nicht unterscheiden, wurden die gemessenen Werte zu Mittelwerten zusammengefasst sofern die zugegebene Schlacke und der Gehalt derselbe waren und in Abbildung 20 visualisiert. Hierbei stehen die blauen bzw. jeweils am weitesten links stehende Säulen für einen Mittelwert der Ausbreitmaße bei einer Mahlfeinheit von 2000 Blaine, wobei die Referenzprobe ohne zugegebene Schlacke hier berücksichtigt wurde. Die jeweils mittleren orangen Säulen stehen für die Mahlfeinheit 4000 Blaine. Die grauen bzw. am weitesten rechts stehenden Säulen stehen für die Mahlfeinheit 6000 Blaine. Es lässt sich erkennen, dass Schlackenzugabe zu einem größeren Ausbreitmaß führt als beim Referenzzement vorgefunden wird und dass mit steigendem Schlackengehalt das Ausbreitmaß zunimmt. Im Vergleich zur Hochofenschlacke zeigen die Gießpfannenschlacken ein größeres Ausbreitmaß bei selben Schlackegehalten. Untereinander verglichen zeigt die Schlacke S3 mit größtem glasigem Anteil und daher niedrigsten kristallinen Anteil ein kleineres Ausbreitmaß als S1 mit kleinstem glasigen Anteil der Pfannenschlacken. S2 nimmt Werte dazwischen ein, wobei dieser Trend bei einem Schlackengehalt von 12,5% nicht zutrifft, da S2 hier die geringsten Werte für das Ausbreitmaß zeigt.

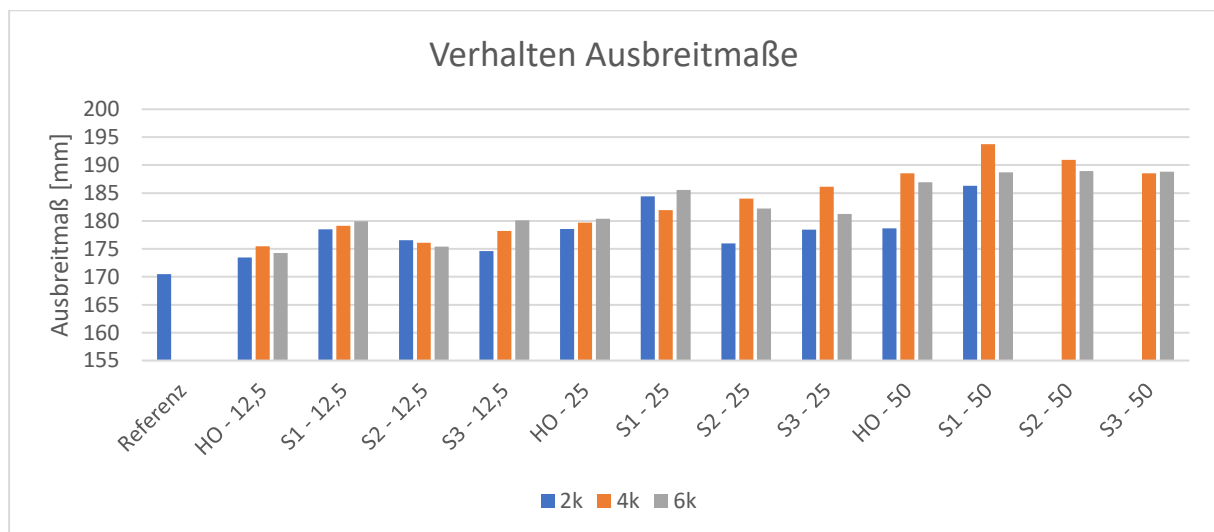


Abbildung 20: Verhalten Ausbreitmaße für Mischungen

Zusätzlich zu den angegebenen Ergebnissen ist noch die Tendenz des Blutens zu erwähnen. Bei höheren zugegebenen Schlackegehalten zeigte sich ein subjektiv größeres Maß an Bluten an der Glasscheibe, was eine Indikation für ein weniger rasches Abbinden ist. Auch hier konnte kein zuverlässiger Trend ausgemacht werden.

5.1.4 Zeitliche Entwicklung der Festigkeiten

Anhand der vorgefundenen Druckfestigkeiten, welche bei den Festigkeitsprüfungen festgestellt wurden, konnte beurteilt werden, dass sämtliche Rezepturen mit Ausnahme der Rezeptur S1-2k-50-28 nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit nach Beurteilungsverfahren wie in EN 196-1 und EN 197-1 beschrieben besitzen, welche über 32,5 MPa liegt [25]. Bei der erwähnten Rezeptur S1-2k-50-28 musste das Ergebnis aufgrund der Unterschreitung des Grenzwertes von Einzelwerten von 30,0 MPa verworfen werden. Generell sind aufgrund der gezeigten Streuungen bei den Druckfestigkeiten insgesamt 18 von 62 Werten zu verwerfen. Die Werten wurden dennoch angegeben, da die Versuche nicht wiederholt wurden. Die Werte wurden in Tabelle 28 und Tabelle 30 angegeben.

Um einen Eindruck für die zeitliche Entwicklung der Festigkeit zu erhalten, sind in Abbildung 21 für die Schlacke HO, in Abbildung 22 für die Schlacke S1, in Abbildung 23 für die Schlacke S2 und in Abbildung 24 für die Schlacke S3 bei einem Schlackengehalt von 25% die Entwicklung der Druckfestigkeiten von 7 auf 28 Tage zu sehen. Diese Art von Betrachtung wird in der Literatur verwendet, um zu beurteilen, ob sich das Abbindeverhalten der Pfannenschlacken über die Zeit ändert. Die vorgefundenen Ergebnisse lassen jedoch keine eindeutige Aussage zu, ob es zu einer Veränderung des Verhaltens kommt. Eindeutig erkennbar ist, dass eine höhere Mahlfeinheit zu höheren Festigkeiten führt, welche aber vorwiegend einen Einfluss auf die Anfangsfestigkeit nach 7 Tagen zeigt.

Wie bei der Schlacke HO deutlich erkennbar ist, wird bei größerer Mahlfeinheit eine höhere Anfangsfestigkeit festgestellt. Dieser Trend setzt sich bei der Schlacke HO auch bei der Normfestigkeit nach 28 Tagen fort und übersteigt für die höchste Mahlfeinheit sogar die Festigkeit der Referenzprobe ohne zugesetzte Schlacke.

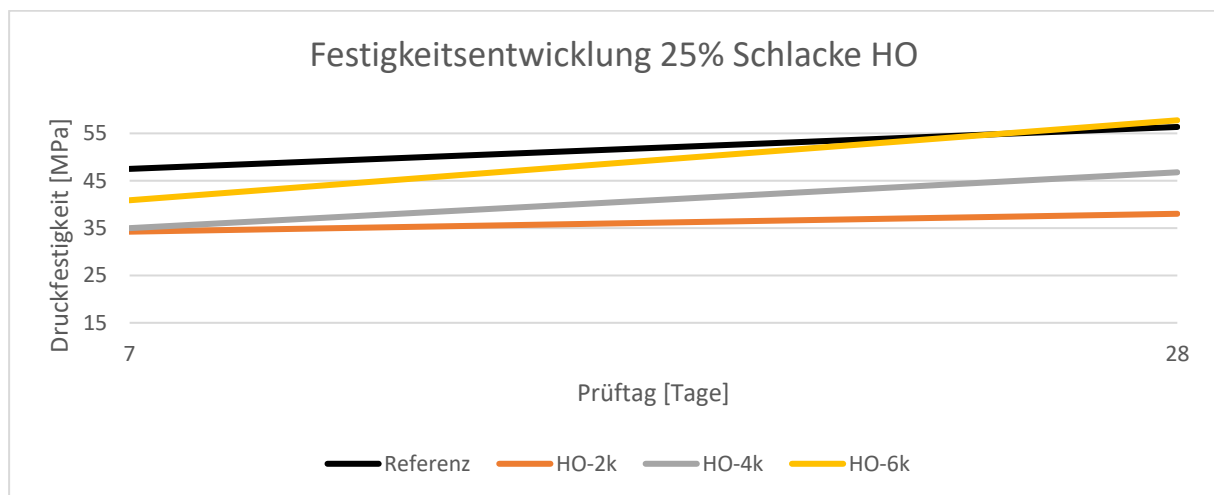


Abbildung 21: Festigkeitsentwicklung bei 25% Schlackengehalt für Schlacke HO

Für die Schlacke S1 ist dies bereits deutlich weniger eindeutig erkennbar, wobei die Mahlfeinheit 4000 Blaine bei der Anfangsfestigkeit einen geringfügig höheren Wert zeigt als für die Mahlfeinheit 6000 Blaine. Diese Entwicklung setzt sich auch bei der Festigkeit nach 28 Tagen fort, wobei die Druckfestigkeit bei 4000 Blaine höher ist als jene für 6000 Blaine. Hier sei jedoch erwähnt, dass die Druckfestigkeit von S1-4k-25-28 gemäß den Beurteilungskriterien laut EN 197-1 verworfen werden musste [25].

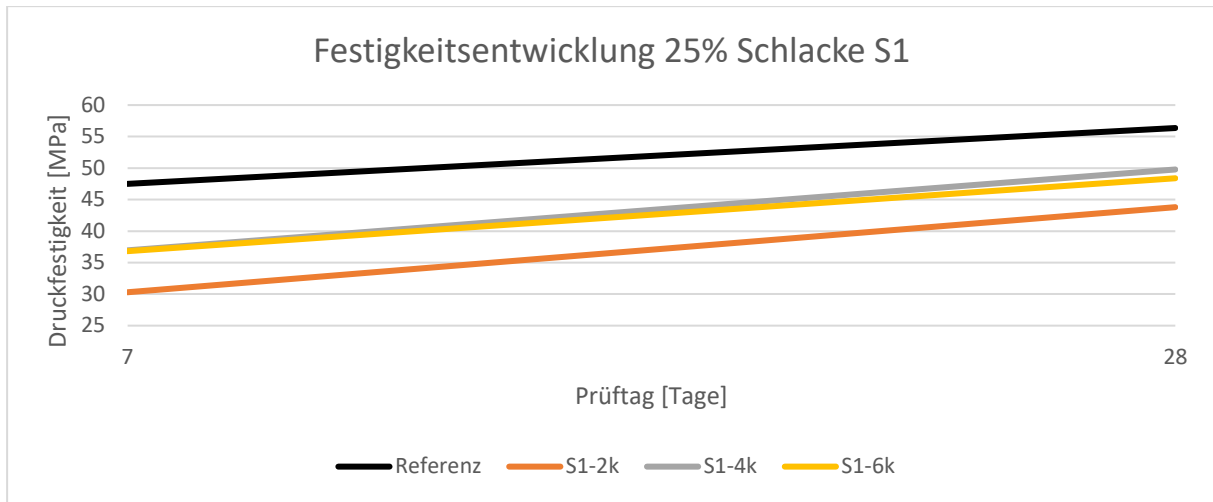


Abbildung 22: Festigkeitsentwicklung bei 25% Schlackegehalt für Schlacke S1

Bei der Schlacke S2 zeigt sich bei der Anfangsfestigkeit ebenso, dass eine höhere Mahlfeinheit der Schlacke eine größere Druckfestigkeit bedeutet. Bei der Normfestigkeit nach 28 Tagen zeigt sich auch hier, dass die erreichte Festigkeit bei der Mahlfeinheit 4000 Blaine jene mit 6000 Blaine übersteigt. Jedoch musste auch hier die Druckfestigkeit von S2-6k-25-28 verworfen werden.

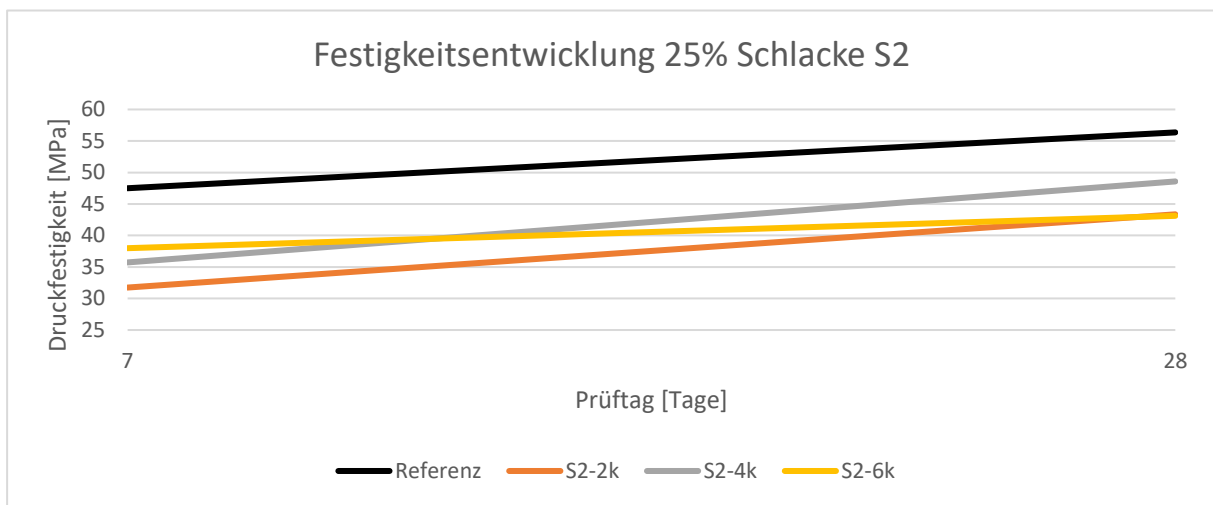


Abbildung 23: Festigkeitsentwicklung bei 25% Schlackegehalt für Schlacke S2

Für die Schlacke S3 ist derselbe Trend mit höherer Anfangsfestigkeit bei höherer Mahlfeinheit zu erkennen. Die Normfestigkeiten nach 28 Tagen zeigen hingegen, dass eine Mahlfeinheit von 2000 Blaine eine höhere Festigkeit aufweist als die Mahlfeinheit 4000 Blaine. Diese Darstellung ist jedoch irreführend, da bei dieser Schlacke alle Druckfestigkeiten bei 25% Schlackegehalt nach 28 Tagen zu verwerfen waren.

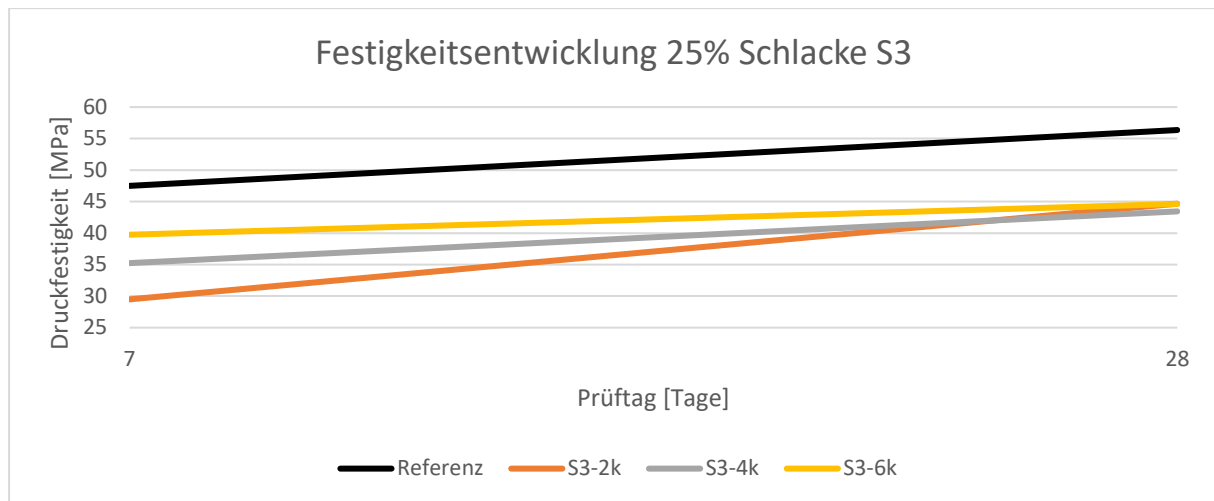


Abbildung 24: Festigkeitsentwicklung bei 25% Schlackegehalt für Schlacke S3

Anhand der festgestellten Festigkeiten zeigt sich, dass im Vergleich zur Schlacke HO die Anfangsfestigkeit nach 7 Tagen zusammengefasst über alle Mahlfeinheiten für einen Schlackegehalt von 12,5% für S1 eine 4,8% höhere, für S2 eine 1,7% höhere und für die Schlacke S3 eine 1,8% niedrigere Druckfestigkeit aufweist. Für 25% Schlackegehalt zeigt S1 eine 5,5% niedrigere, S2 eine 4,2% niedrigere und S3 eine 5,1% niedrigere Druckfestigkeit. Für S1 ist bei einem Schlackegehalt von 50% eine 6,4% geringere Druckfestigkeit nach 7 Tagen feststellbar. Aufgrund des höchsten glasigen Anteils bei S3 waren hier die höchsten Festigkeiten im Vergleich zu HO zu erwarten, wobei hier das Gegenteil festgestellt wurde.

Für die Normfestigkeit nach 28 Tagen zusammengefasst über alle Mahlfeinheiten wurde bei einem Schlackegehalt von 12,5% für S1 eine 0,2% höhere Festigkeit, für S2 eine 1,5% höhere Festigkeit und für S3 ein 11,6% geringere Festigkeit festgestellt. Für einen Schlackegehalt von 25% wurde für S1 ein 0,4% niedrigerer Wert, für S2 ein 5,3% niedrigerer Wert und für S3 ein 6,9% niedrigerer Wert festgestellt. Bei 50% Schlackegehalt zeigt S1 eine 17,3% geringere Festigkeit. Auch hier waren aufgrund des größten glasigen Anteils bei S3 die höchsten Festigkeiten zu erwarten, wobei dies auch hier nicht zu gelten scheint. In welchem Zusammenhang die mineralogische Zusammensetzung zur Festigkeitsentwicklung steht ist aus diesen festgestellten Druckfestigkeiten nicht eindeutig erkennbar, da je nach zugesetzten Schlackegehalt unterschiedliche Schlüsse gezogen werden können.

5.1.5 Zeitliche Entwicklung des E-Modul

In Tabelle 37 sind die Entwicklungen des dynamischen E-Modul über die Prüfkörper von 7 Tagen auf 28 Tage aufgelistet. Als ΔE -Modul ist hierbei der nominelle Zuwachs von 7 auf 28 Tage in MPa angegeben. Bei der prozentuellen Angabe wurde diese Änderung auf den E-Modul nach 7 Tagen bezogen. Es zeigt sich, dass der größte Zuwachs bei der Schlacke HO zu finden ist, wobei auch die Schlacke S1 und S2 teils hohe Zuwächse zeigen. Die Schlacke S3 zeigt den geringsten Zuwachs und demnach auch den geringsten Zugewinn an Steifigkeit.

Tabelle 37: Entwicklung des E-Modul

Probe	ΔE -Modul [GPa]	ΔE -Modul [%]	Probe	ΔE -Modul [GPa]	ΔE -Modul [%]
R-1	1,99	4,96	R-1	1,99	4,96
HO-2k-12,5	6,22	16,11	S1-2k-50	7,77	23,89
HO-4k-12,5	5,49	14,09	S1-4k-50	4,87	13,93
HO-6k-12,5	4,39	10,99	S1-6k-50	4,56	12,70
HO-2k-25	3,94	10,07	S2-2k-12,5	4,9	12,35
HO-4k-25	6,89	18,25	S2-4k-12,5	1,56	3,67
HO-6k-25	5,84	14,88	S2-6k-12,5	2,03	4,89
HO-2k-50	12,15	35,42	S2-2k-25	5,06	13,16
HO-4k-50	5,89	16,38	S2-4k-25	3,11	7,67
HO-6k-50	7,18	20,32	S2-6k-25	3,32	8,16
S1-2k-12,5	2,61	6,50	S3-2k-12,5	0,51	1,20
S1-4k-12,5	3,55	8,58	S3-4k-12,5	2,41	5,88
S1-6k-12,5	4,14	10,33	S3-6k-12,5	0,14	0,32
S1-2k-25	6,57	17,51	S3-2k-25	1,43	3,49
S1-4k-25	2,63	6,94	S3-4k-25	1,18	2,76
S1-6k-25	5,18	13,74	S3-6k-25	1,2	2,91

Neben der tabellarischen Darstellung sind die prozentuellen Zuwächse des E-Modul in Abbildung 25 visualisiert, wobei die blauen Säulen bzw. jene welche am weitesten links pro Gruppe stehen für die Mahlfineinheit 2000 Blaine stehen, wobei die Referenz ohne Schlackenzugabe hier zugerechnet wurde. Die orangen bzw. mittleren Säulen je Gruppe stehen für die Mahlfineinheit 4000 Blaine und die grauen bzw. jene Säulen, welche am weitesten rechts stehen für die Mahlfineinheit 6000 Blaine. Aus dem Diagramm lässt sich klar erkennen, dass der Zuwachs des E-Modul mit steigendem Schlackegehalt ansteigt. Hinsichtlich des Trends bezogen auf die Mahlfineinheit ist kein einheitliches Bild sichtbar. Bei der Schlacke HO sind bei den unterschiedlichen zugegebenen Schlackegehalten auch unterschiedliche Verhaltensweisen erfasst worden, wobei bei 12,5% zugegebener Schlacke mit zunehmender Mahlfineinheit der Zuwachs des E-Modul kleiner wird, während dies bei 25% zugegebener Schlacke nicht der Fall ist. Weiters ist ein Bezug zum Anteil an Glasphase aus diesem Diagramm heraus nicht möglich, da zwar die Schlacke mit höchstem Anteil an Glasphase die höchsten Zugewinne an Steifigkeit über die Zeit zeigte, jedoch die nachfolgende Schlacke beim Glasanteil, S3, in Kontrast dazu steht mit den geringsten Zuwächsen. Von den Pfannenschlacken sind die höchsten Zugewinne beim E-Modul bei der Schlacke S1, daher jener Schlacke mit höchstem kristallinem Anteil zu erkennen.

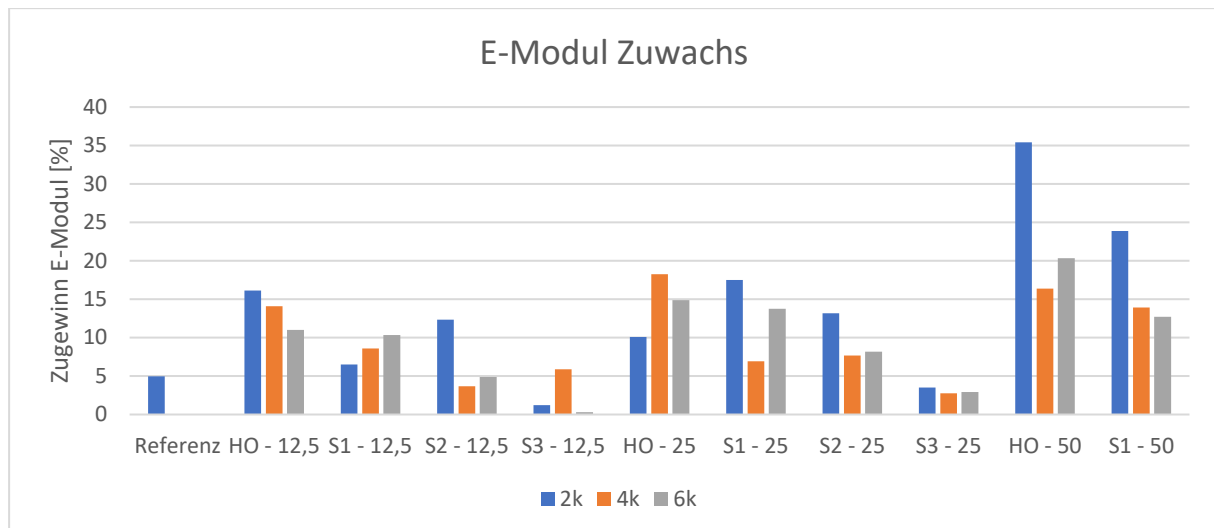


Abbildung 25: prozentuelle Zuwächse des E-Modul

Weiters ist hinsichtlich eines Vergleichs mit der Schlacke HO zu erwähnen, dass die Zugewinne an Steifigkeit bei den Pfannenschlacken deutlich geringer ausfielen. Bei einem Gehalt von 12,5% zugegebener Schlacke zeigten bei den Mahlfineinheiten zusammengefasst S1 etwa 38% weniger Zuwachs beim E-Modul, S2 etwa 49% weniger und S3 82% weniger. Bei einem Schlackengehalt von 25% sind es bei S1 etwa 12% weniger, bei S2 etwa 33% weniger und bei S3 etwa 79% weniger. Für den Schlackengehalt von 50% zeigte S1 einen um etwa 30% geringeren Zuwachs als HO. In diesem Vergleich zeigte daher die Pfannenschlacke mit höchstem kristallinem Anteil zwar einen geringeren Steifezugewinn als HO, aber jenen welcher der Entwicklung von HO am nächsten kommt, während die glasigste Pfannenschlacke S3 den geringsten Steifezugewinn mit sehr deutlichem Abstand zeigte. Diese Ergebnisse stehen in gewisser Weise in Kontrast zur Herangehensweise, dass die in Zement eingesetzte Schlacke möglichst glasig erstarrt sein sollte und für den Erfolg der mechanischen Aktivierung, da es möglich wurde eine sehr kristalline Schlacke zu einem vergleichbarem, wenn auch weniger stark ausgeprägtem Zuwachs des E-Modul aufzubereiten. Es sei jedoch erwähnt, dass dieses Kriterium des Zuwachses an E-Modul keine Forderung nach EN 197-1 ist und lediglich dem Vergleich zwischen den Schlacken dient, während eine glasige Erstarrung von Hochofenschlacke in EN 197-1 und in ÖNORM B 3309-1 explizit gefordert ist [12,25].

5.1.6 Raumbeständigkeit

Die Beurteilung der Raumbeständigkeit nach dem durchgeführten Verfahren ist in Abbildung 26 visualisiert. Dabei ist auch der laut ÖNORM B 3309-1 vorgegebene Grenzwert von 8 mm/m bzw. 8‰ Längenänderung eingezeichnet [12]. Aufgrund der vorher beschriebenen Abweichungen von der Norm konnte die Prüfung für jede Rezeptur positiv beurteilt werden. Da aber signifikant abgewichen wurde, dienen die vorgefundenen Werte weniger einer repräsentativen Aussage zur Raumbeständigkeit und mehr einem Vergleich zwischen den unterschiedlichen Proben, da bei diesem Prüfverfahren bei allen Rezepturen dieselben Bedingungen herrschten.

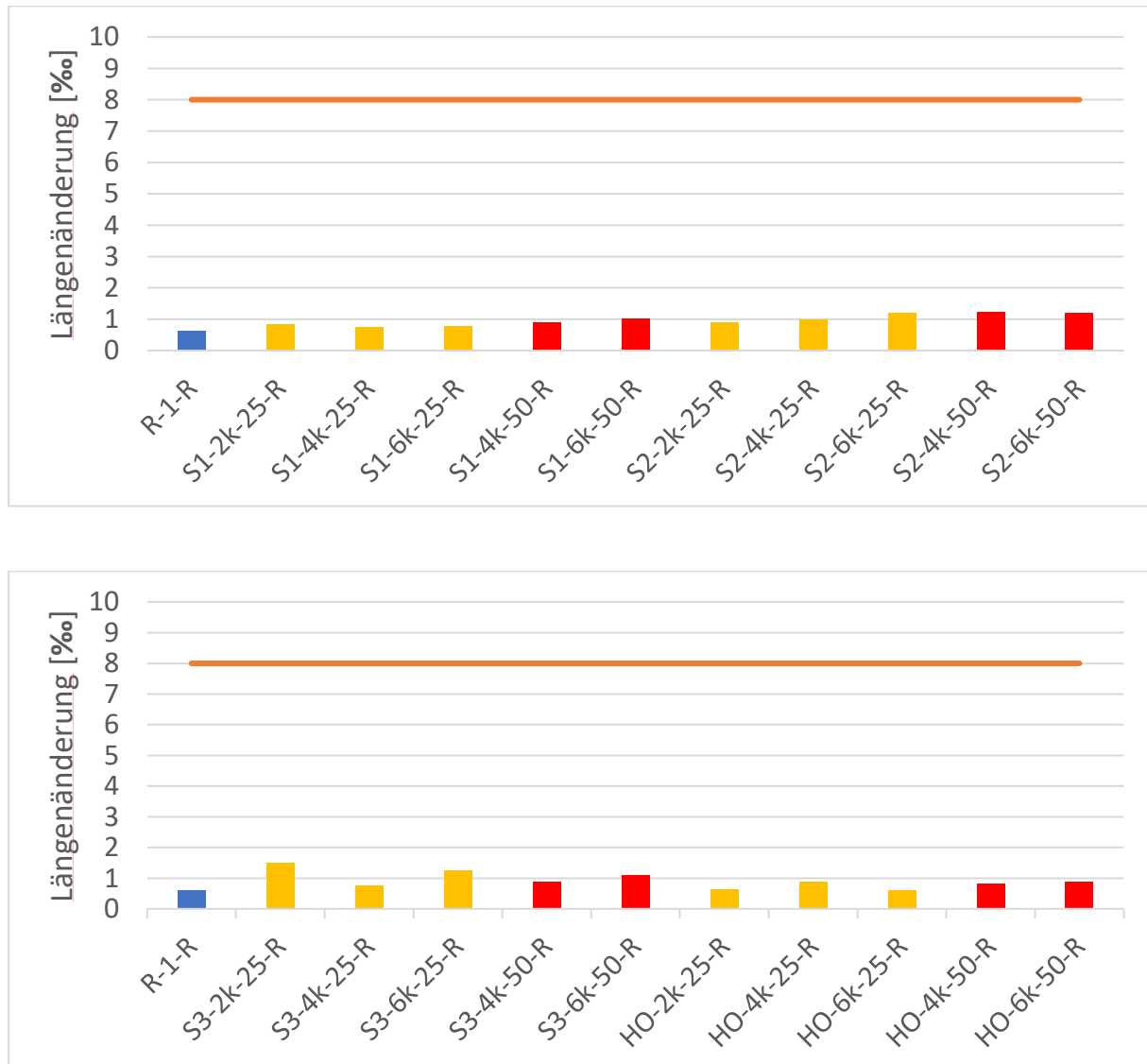


Abbildung 26: Darstellung der Längenänderungen nach Autoklavprüfung

In Abbildung 26 ist klar erkennbar, dass der Grenzwert stark unterschritten wird. Dieses Ergebnis deckt sich teilweise auch mit Literaturwerten, in denen bei 45% Gehalt an Stahlwerksschlacke unter Prüfung mit den dafür vorgesehenen Prüfkörpern eine maximale Längenänderung von 0,33‰ festgestellt wurde und daher der Grenzwert ebenso stark unterschritten wurde [37]. Demnach ist davon auszugehen, dass der Einfluss der geänderten Geometrie der Prüfkörper einen mindernden Einfluss auf die Längenänderung zeigt, diese jedoch nicht in so einem Ausmaß vorhanden ist, dass es das Ergebnis der Prüfung zur Gänze verfälscht.

Anhand der Abbildung ist auch erkennbar, dass die festgestellten Längenänderungen mit steigendem Schlackegehalt steigen. Die festgestellten Längenänderungen sind bei hohen zugegebenen Gehalten von 50% Schlacke für alle Proben auch mit höherer Mahlfineinheit angestiegen. Im Vergleich zur Schlacke HO zeigen die Pfannenschlacken bei 25% zugegebener Schlacke für S1 eine 12,5% größere Längenänderung, für S2 eine 48,6% größere Längenänderung und für S3 eine 68,3% größere Längenänderung. Da laut ÖNORM B 3309-1 die Prüfung der Raumbeständigkeit im Autoklav mit einem Gehalt von 50% zugegebener Schlacke und mit einer Mindestmahlfineinheit von 3750 Blaine durchzuführen ist, sind die folgenden Resultate aussagekräftiger, wobei die Mahlfineinheit von 2000 Blaine nicht geprüft wurde. Bei 50% Schlackegehalt zeigt S1 eine 11,7% größere Längenänderung, S2 eine 32,2% größere Längenänderung und S3 eine 14,0% größere Längenänderung. Diese Resultate decken sich im Vergleich zur Schlacke HO nicht mit der Erwartung, dass S1 und S3 aufgrund eines signifikanten vorliegenden Anteils an Periklas die höchste Änderung der Länge zeigen. Für einen Schlackegehalt von 25% zeigte S3 die größte Änderung, während S1 von den Pfannenschlacken die geringste Änderung im Vergleich zu HO zeigte, obwohl S1 mit 7% Periklas einen ähnlich hohen Anteil in der Phasenzusammensetzung wie S3 mit 8% Periklas aufweist. Für 50% Schlackegehalt zeigten die beiden Schlacken mit frei vorliegendem Periklas eine geringere Längenänderung im Vergleich zur Schlacke HO als jene Pfannenschlacke ohne frei vorliegendem Periklas. Dies deckt sich mit Beobachtungen aus der Literatur, welche nahelegen, dass ein vorgefundener Anteil an freiem MgO aufgrund der Komplexität der Zusammensetzung in Pfannenschlacken nicht direkt mit einem expansiven Verhalten korreliert werden kann [26].

Bei der Beurteilung sei erneut angemerkt, dass aufgrund der großen Abweichung von der Norm durch Verwendung einer gedrungeneren Form von Prüfkörpern keine absolute Aussage getroffen werden kann, ob die Pfannenschlacken laut ÖNORM B 3309-1 als raumbeständig zu identifizieren sind [12]. Jedoch sind die vorgefundenen Längenänderung nominell sehr klein, weshalb zumindest ein Vergleich zur Hochofenschlacke zulässig ist. Auch sei angemerkt, dass sich die gemessenen Werte in der Genauigkeit stark von der hierfür vorgesehenen Norm ASTM C151 durch Verwendung des length comparator unterscheiden, welcher eine Genauigkeit von mindestens 0,002 mm aufweisen muss, während mit einem Messschieber auf 0,05 mm genau abgelesen werden kann.

6 Resümee

Anhand der durchgeführten chemischen Untersuchungen lässt sich die Aussage treffen, dass Pfannenschlacken sich chemisch von Hüttensand unterscheiden, jedoch unter bestimmten Bedingungen in gleichen Einsatzgebieten verwendet werden können. Es ist jedoch darauf Acht zu geben, welche Beurteilungskriterien herangezogen werden, da diese eine mögliche Verwertung aufgrund der chemischen Zusammensetzung ausschließen könnten.

Anhand der durchgeführten Analyse des Eluats konnte festgestellt werden, dass eine in der Literatur erwähnte Umweltgefahr durch wasserlösliches Chrom [VI], welche von Pfannenschlacken ausgehen kann bei diesen untersuchten Proben nicht festgestellt werden konnte.

Die Pulverdiffraktometrie konnte deutliche Unterschiede zwischen der Phasenzusammensetzung von Pfannenschlacken und Hochofenschlacke zeigen. Am bedeutendsten sind die Unterschiede in der Glasigkeit der Proben und dem Vorhandensein von Periklas, welches neben Freikalk für das Expansionsverhalten von Schlacken verantwortlich gemacht wird.

Die Aufbereitung der Schlacken zeigte, dass sie grundsätzlich sehr viel Energieeintrag erfordern, unabhängig von deren Zusammensetzung. Es zeigten sich dennoch Unterschiede im Zerkleinerungsverhalten, insbesondere bei der Kugelmühle. Es konnte zwar kein eindeutiger Grund für die Unterschiede im Zerkleinerungsverhalten aufgrund der Phasenzusammensetzung festgestellt werden, jedoch sollten für etwaige Folgeuntersuchungen in Erwägung gezogen werden, die Pfannenschlacken ähnlich wie die Hochofenschlacke zu granulieren. Die Hochofenschlacke zeigte subjektiv gute Mahlbarkeit, obwohl S1 als untersuchte Schlacke mit dem größten kristallinen Anteil den niedrigsten spezifischen Energieeintrag zeigte.

Zu den Festigkeiten lässt sich aufgrund der durchgeführten Untersuchungen sagen, dass im Vergleich zur Probe mit Hochofenschlacke die 7-Tages Druckfestigkeit für Gehalte von 12,5% zugesetzter Schlacke im Bereich von 5% Unterschied in der Festigkeit sind. Für 25% zugesetzter Schlacke sind die Festigkeiten etwa 5% niedriger. Der Vergleich zwischen S1 und HO bei 50% zugesetzter Schlacke ergab etwa 6% niedrigere Festigkeiten.

Für die Festigkeiten nach 28 Tagen waren die Festigkeiten bei einem Schlackegehalt von 12,5% um bis zu 12% niedriger als bei Hochofenschlacke. Für einen Gehalt von 25% Schlacke waren es etwa 7% niedrigere Festigkeiten. Der deutlichste Unterschied konnte bei 50% Schlacke zwischen S1 und HO gesehen werden, wo die Festigkeiten etwa 17% niedriger waren.

Bei den Festigkeitsuntersuchungen zeigte die Schlacke S1 als Pfannenschlacke mit geringstem glasigem Anteil vergleichbare oder 4,8% höhere Druckfestigkeiten als die Schlacke HO bei 12,5% zugesetzter Schlacke, bei 25% geringfügig bis 5,5% niedrigere und für 50% Schlackegehalt bis zu 17% niedrigere Festigkeiten. Für S2 waren bei 12,5% zugesetzter Schlacke verglichen mit HO etwa 1,5% höhere Festigkeiten, für 25% zugesetzter Schlacke bis zu 5,3% geringere Festigkeiten. Für S3 wurden bei 12,5% zugesetzter Schlacke um bis zu 11,6% geringere Festigkeiten festgestellt. Bei 25% Schlackegehalt wurden bis zu 6,9% geringere Festigkeiten vorgefunden, obwohl S3 den höchsten glasigen Anteil der Pfannenschlacken aufwies. Diese Ergebnisse sprechen für den Erfolg der mechanischen Aktivierung der Schlacken durch Mahlung, wobei die Phasenzusammensetzung kein eindeutiges Bild liefert, wie sich eine Pfannenschlacke bei Einsatz in einem Zement hinsichtlich Entwicklung der Druckfestigkeit verhält.

Insgesamt zeigten die Festigkeitsuntersuchungen demnach, dass Rezepturen mit zugesetzten Pfannenschlacken, Festigkeiten erreichen konnten, welche vergleichbar oder geringfügig schlechter sind als jene vergleichbarer Rezepturen mit zugesetzter Hochofenschlacke. Dieses Ergebnis kann ebenfalls eine Motivation sein, die Untersuchungen mit granulierten Pfannenschlacken zu wiederholen, da laut Literatur eine höhere Glasigkeit zu einer höheren

hydraulischen Aktivität führt. Ebenso könnte das Vorhandensein von frei vorliegendem Periklas, welcher ausgeprägtes Expansionsverhalten und von Äkermanit, welcher als nicht hydraulisch aktiv beurteilt wird von vornherein unterbunden werden. Die untersuchten Pfannenschlacken sind laut chemischer Analyse weniger basisch als in der Literatur erwähnte Beispiele, bei denen eine Granulation möglich war.

Es sei an dieser Stelle jedoch angemerkt, dass die Festigkeitsuntersuchungen teilweise eine breite Streuung bei den ermittelten Festigkeiten zeigten und dass dadurch viele genannten Druckfestigkeit zu verwerfen wären. Da die Probenmengen jedoch begrenzt waren, wurde die Beurteilung darauf beschränkt. Für Folgeuntersuchungen wäre daher eine umfangreiche Probenmenge sinnvoll.

Hinsichtlich der verwendeten Mahlfineinheiten konnte festgestellt werden, dass eine höhere Mahlfineinheit in der Regel zu höheren Festigkeiten führt. Es sollte aber in Erwägung gezogen werden in Folgeuntersuchungen auf die Mahlfineinheiten von 2000 Blaine aufgrund der vergleichsweise geringsten Festigkeitsentwicklung und auf die Mahlfineinheit 6000 Blaine aufgrund des viel höheren Aufbereitungsaufwandes, im Vergleich zur Mahlfineinheit von 4000 Blaine geringfügig höheren Festigkeiten und größerer Reaktion bei der Raumbeständigkeitsprüfung im Autoklav zu verzichten.

In der Literatur wird Pfannenschlacke mit einem auffälligen Verhalten bei der Festigkeitsentwicklung über lange Zeiträume in Verbindung gebracht, wobei sich eine spätere Steigerung der Festigkeit zeigen. Da diese im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich waren kann dazu keine Aussage getroffen werden. Für Folgeuntersuchungen wäre die Festigkeitsentwicklung nach 90 Tagen als zusätzlicher Datenpunkt jedoch von Interesse

Hinsichtlich Raumbeständigkeit scheinen diese Pfannenschlacken eine größere Tendenz zur Expansion zu zeigen als Hochofenschlacke. Bei 25% Schlackegehalt waren die Längenänderung für S1 12,5% höher, für S2 48,6% höher und für S3 68,27% größer. Dies ist insofern bemerkenswert, da S1 und S3 vergleichbare Anteile an Periklas haben, jedoch einen großen Unterschied in der gezeigten Längenänderung aufweisen.

Die Prüfung auf Raumbeständigkeit wurde ebenso mit einem Schlackegehalt von 50% durchgeführt, wobei im Vergleich zur Hochofenschlacke für S1 11,70% höher, für S2 32,16% höher und für S3 14,04% höhere Werte für die Längenänderung gefunden werden konnten. Auch hier ist anzumerken, dass S2 die größte Abweichung zeigt, obwohl in dieser Probe kein Periklas gefunden wurde.

Zusammengefasst lässt sich daher sagen, dass diese untersuchten Pfannenschlacken, welche erfolgreich mechanisch aktiviert wurden, in gewissen Anwendungen als Zumahlstoff in Portlandzementen einsetzbar sind. Die hergestellten Bindemittel erreichen Festigkeiten welche laut EN 197-1 für die Festigkeitsklassen 32,5 gelten selbst bei hohen zugesetzten Schlackegehalten. Das Raumbeständigkeitsverhalten konnte nicht hinreichend aussagekräftig beurteilt werden, jedoch lassen die ermittelten Werte den Schluss zu, dass auch dieses Kriterium erfüllt werden kann. In Anwendungen, wo das Expansionsverhalten wenig Relevanz zeigt, da sie durch geschickte Zugabe von ausgleichenden Komponenten kontrolliert werden kann, kann Pfannenschlacke ebenso wie Hüttensand verwendet werden. Für etwaige Folgeuntersuchungen könnte ein Mischen von Hochofenschlacke mit geeigneten Pfannenschlacken eine Möglichkeit darstellen, um etwaige negative Effekte infolge von Expansion der Phasen zu minimieren.

7 Literatur

- [1] R. Dippenaar. 2005, "Industrial uses of slag (the use and re-use of iron and steelmaking slags)," *Ironmaking & Steelmaking*, Vol. 32, 35–46, DOI: 10.1179/174328105X15805
- [2] K. Čabanová, J. Vlček, J. Seidlerová, V. Matějka, P. Peikertová, I. Martausová and J. Kukutschová. 2018, "Chemical and phase composition of metallurgical slags and their effects on freshwater green algae," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, S2-S10, DOI: 10.1016/j.matpr.2018.05.051
- [3] M. Criado, X. Ke, J. L. Provis and S. A. Bernal. 2017, "Alternative inorganic binders based on alkali-activated metallurgical slags," in: *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites*, pp. 185–220
- [4] 2009-06, "Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen,". Berlin
- [5] I. Papayianni and E. Anastasiou. 2012, "Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, 400–407, DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015
- [6] N. Behera, A. Raddadi, S. Ahmad, N. Tewari and O. Zeghaibi. 2016, "Use of Al-Killed Ladle Furnace Slag in Si-Killed Steel Process to Reduce Lime Consumption, Improve Slag Fluidity," in: , pp. 1031–1039
- [7] ps, "Microsoft Word - EN_197-1_db.doc,"
- [8] D. Adolfsson, R. Robinson, F. Engström and B. Björkman. 2011, "Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, 865–871, DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.04.003
- [9] denona1, "Metalurgija_03_2016.indb,"
- [10] E. Bocci. 2018, "Use of ladle furnace slag as filler in hot asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, Vol. 161, 156–164, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.120
- [11] İ. Gökalp, V. E. Uz, M. Saltan and E. Tutumluer. 2018, "Technical and environmental evaluation of metallurgical slags as aggregate for sustainable pavement layer applications," *Transportation Geotechnics*, Vol. 14, 61–69, DOI: 10.1016/j.trgeo.2017.10.003
- [12] 2010-12, "Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) - Teil 1: Kombinationsprodukte (GC/GC-HS),"
- [13] S. Choi, J.-M. Kim, D. Han and J.-H. Kim. 2016, "Hydration properties of ladle furnace slag powder rapidly cooled by air," *Construction and Building Materials*, Vol. 113, 682–690, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.089
- [14] Y. Jiang, T.-C. Ling, C. Shi and S.-Y. Pan. 2018, "Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review," *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 136, 187–197, DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.04.023
- [15] A. Sáez-de-Guinoa Vilaplana, V. J. Ferreira, A. M. López-Sabirón, A. Aranda-Usón, C. Lausín-González, C. Berganza-Conde and G. Ferreira. 2015, "Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement," *Construction and Building Materials*, Vol. 94, 837–843, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.075
- [16] M. Tossavainen, F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. Lidstrom Larsson and B. Bjorkman. 2007, "Characteristics of steel slag under different cooling conditions," *Waste management (New York, N.Y.)*, Vol. 27, 1335–1344, DOI: 10.1016/j.wasman.2006.08.002
- [17] BMLFUW, "Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017, Teil 2,"
- [18] C. S. Gahan, M. L. Cunha and Å. Sandström. 2009, "Comparative study on different steel slags as neutralising agent in bioleaching," *Hydrometallurgy*, Vol. 95, 190–197, DOI: 10.1016/j.hydromet.2008.05.042
- [19] D. Feng, J. van Deventer and C. Aldrich. 2004, "Removal of pollutants from acid mine wastewater using metallurgical by-product slags," *Separation and Purification Technology*, Vol. 40, 61–67, DOI: 10.1016/j.seppur.2004.01.003
- [20] K. Tang, A. Ciftja, d. van, S. Wilson and G. Tranell. 2013, "Recycling of the rare earth oxides from spent rechargeable batteries using waste metallurgical slags," *Journal of*

- Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, Vol. 49, 233–236, DOI: 10.2298/JMMB120808004T
- [21] V. Z. Serjun, A. Mladenovič, B. Mirtič, A. Meden, J. Ščančar and R. Milačič. 2015, “Recycling of ladle slag in cement composites: Environmental impacts,” *Waste management (New York, N.Y.)*, Vol. 43, 376–385, DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.006
- [22] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo and A. Fernández-Jiménez. 2015, “An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders,” in: *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, pp. 19–47
- [23] L. Kriskova, Y. Pontikes, Ö. Cizer, G. Mertens, W. Veulemans, D. Geysen, P. T. Jones, L. Vandewalle, K. van Balen and B. Blanpain. 2012, “Effect of mechanical activation on the hydraulic properties of stainless steel slags,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, 778–788, DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.02.016
- [24] L. Kriskova, Y. Pontikes, F. Zhang, Ö. Cizer, P. T. Jones, K. van Balen and B. Blanpain. 2013, “VALORISATION OF STAINLESS STEEL SLAGS AS A HYDRAULIC BINDER,” *Acta Metallurgica Slovaca*, Vol. 19, 176–183, DOI: 10.12776/ams.v19i3.159
- [25] 2011-10, “Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement,”
- [26] Ana Luiza Borges Marinho, Carina Miranda Mol Santos, José Maria Franco de Carvalho, Julia Castro Mendes, Guilherme Jorge Brigolini and Ricardo André Fiorotti Peixoto, “Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites,”
- [27] E. Adesanya, H. Sreenivasan, A. M. Kantola, V.-V. Telkki, K. Ohenoja, P. Kinnunen and M. Illikainen. 2018, “Ladle slag cement – Characterization of hydration and conversion,” *Construction and Building Materials*, Vol. 193, 128–134, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.179
- [28] S. Bharati, V. M. Basavaraja, R. J. Jagadeesha, K. Jagteri, R. Sah, G. Prasad, T. Behl and S. Manjini. 2019, “From waste to wealth: recycling the secondary resource from steel ladle as a flux in Si-killed steelmaking process,” *Ironmaking & Steelmaking*, Vol. 46, 794–799, DOI: 10.1080/03019233.2018.1432251
- [29] Á. Rodríguez, J. M. Manso, Á. Aragón and J. J. Gonzalez. 2009, “Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag,” *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53, 645–651, DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.04.015
- [30] H. Schubert (Ed.). 20XX-, *Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik*. Weinheim
- [31] H. J. Steiner. 1996, “Characterization of laboratory-scale tumbling mills,” in: *Comminution 1994*, pp. 373–382
- [32] C01 Committee, “Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement,”. West Conshohocken, PA
- [33] 2005-04, “Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit,”
- [34] D. Meschede. 2015, *Gerthsen Physik*. Berlin, Heidelberg
- [35] E. M. Lewin, C. R. Robbins, H. F. McMurdie and M. K. Reser (Eds.). 1985, *Phase diagrams for ceramists*, 5th edn. Columbus, Ohio
- [36] Alan Arnold Griffith, “VI. The phenomena of rupture and flow in solids,”, 1921-01, DOI: 10.1098/rsta.1921.0006
- [37] S. Kourounis, S. Tsvilis, P. E. Tsakiridis, G. D. Papadimitriou and Z. Tsibouki. 2007, “Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 815–822, DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.03.008

8 Verzeichnisse

Abbildung 1: Erscheinungsbild von Pfannenschlacken nach Abkühlung (aus [28])	10
Abbildung 2: Chemische Zusammensetzung der Probe CEM I im ternären Phasensystem CMS	26
Abbildung 3: Chemische Zusammensetzung der Probe HO im ternären Phasensystem CMS	26
Abbildung 4: Chemische Zusammensetzung der Probe S1 im ternären Phasensystem CMS	27
Abbildung 5: Chemische Zusammensetzung der Probe S2 und S3 im ternären Phasensystem CMS	27
Abbildung 6: Röntgendiffraktogramm der Probe CEM I	28
Abbildung 7: Röntgendiffraktogramm der Schlacke HO	28
Abbildung 8: Röntgendiffraktogramm der Probe S1	29
Abbildung 9: Röntgendiffraktogramm der Probe S2	29
Abbildung 10: Röntgendiffraktogramm der Probe S3	29
Abbildung 11: Mahlverhalten der ersten Probe von HO	32
Abbildung 12: Mahlverhalten der ersten Probe von S1	33
Abbildung 13: Mahlverhalten der ersten Probe von S2	34
Abbildung 14: Mahlverhalten der ersten Probe von S3	35
Abbildung 15: Magnetprodukt S1 nach Zerkleinerung mit Brecher	37
Abbildung 16: Korn aus Magnetprodukt S2 nach Brecher (eingeschlossene Stahltropfen)	38
Abbildung 17: Magnetprodukt S2 nach Zerkleinerung in Stabmühle	38
Abbildung 18: Magnetprodukt aus S1 nach Zerkleinerung in Kugelmühle	39
Abbildung 19: Darstellung der Mahlbarkeit der Proben in der Kugelmühle	51
Abbildung 20: Verhalten Ausbreitmaße für Mischungen	52
Abbildung 21: Festigkeitsentwicklung bei 25% Schlackegehalt für Schlacke HO	53
Abbildung 22: Festigkeitsentwicklung bei 25% Schlackegehalt für Schlacke S1	54
Abbildung 23: Festigkeitsentwicklung bei 25% Schlackegehalt für Schlacke S2	54
Abbildung 24: Festigkeitsentwicklung bei 25% Schlackegehalt für Schlacke S3	55
Abbildung 25: prozentuelle Zuwächse des E-Modul	57
Abbildung 26: Darstellung der Längenänderungen nach Autoklavprüfung	58
(1) Berechnung der kritischen Drehzahl aus Kräftegleichgewicht	14
(2) Spezifischer Energieeintrag aus Mühlenformel nach Steiner	15
(3) Berechnung des dynamischen E-Modul	20

Tabelle 1: Ausgangsproben mit zugehöriger Ausgangsmasse	12
Tabelle 2: Chemische Analyse aus RFA ausgedrückt als Oxide	23
Tabelle 3: Eisengehalte, Glühverlust (GV) und Feuchte	23
Tabelle 4: Relevante Größen für weiterführende Beurteilung	23
Tabelle 5: Eluatanalyse Teil 1	24
Tabelle 6: Eluatanalyse Teil 2	24
Tabelle 7: Eluatanalyse Teil 3	24
Tabelle 8: Eluatanalyse Teil 4	24
Tabelle 9: Normierte Werte für C-M-S zur Darstellung im ternären Phasensystem	25
Tabelle 10: Quantitative Phasenzusammensetzung aus Rietveldanalyse	30
Tabelle 11: Mittelwerte der Stoffdichten	30
Tabelle 12: Energieeintrag bei Brechen der Pfannenschlacken	31
Tabelle 13: Energieeintrag durch Stabmühle	31
Tabelle 14: Schüttdichten	32
Tabelle 15: Mahlverhalten Erste Probe HO	32
Tabelle 16: Mahlverhalten Erste Probe S1	33
Tabelle 17: Mahlverhalten Erste Probe S2	34
Tabelle 18: Mahlverhalten Erste Probe S3	34
Tabelle 19: Übersicht abgepackte Mahlfeinheiten nach Homogenisierung HO	35
Tabelle 20: Übersicht abgepackte Mahlfeinheiten nach Homogenisierung S1	36
Tabelle 21: Übersicht abgepackte Mahlfeinheiten nach Homogenisierung S2	36
Tabelle 22: Übersicht abgepackte Mahlfeinheiten nach Homogenisierung S3	36
Tabelle 23: Oberfläche Zement nach Blaine	36
Tabelle 24: Ausbringen der Magnetprodukte Übersicht	37
Tabelle 25: Hergestellte Proben zur Prüfung der Festigkeit nach 7 Tagen	40
Tabelle 26: Hergestellte Proben zur Prüfung der Festigkeit nach 28 Tagen	40
Tabelle 27: Hergestellte Proben zur Prüfung der Raumbeständigkeit	41
Tabelle 28: Festigkeiten nach 7 Tagen	42
Tabelle 29: E-Moduli nach 7 Tagen	43
Tabelle 30: Festigkeiten nach 28 Tagen	44
Tabelle 31: E-Moduli nach 28 Tagen	45
Tabelle 32: Veränderungen der Abmaße nach 7 Tagen	46
Tabelle 33: Veränderung der Abmaße nach 28 Tagen	47
Tabelle 34: Längen- und Massenänderung nach Autoklav	47
Tabelle 35: Vergleich der Längenänderung nach Wasserlagerung und nach Prüfung im Autoklav	48
Tabelle 36: Zerkleinerungsverhalten nach Aggregat aufgeteilt	50

Tabelle 37: Entwicklung des E-Modul	56
Tabelle 38: Bestimmung der Stoffdichten	I
Tabelle 39: Zyklenmahlung in der Stabmühle HO	II
Tabelle 40: Zyklenmahlung in der Stabmühle S1	II
Tabelle 41: Zyklenmahlung in der Stabmühle S2	III
Tabelle 42: Zyklenmahlung in der Stabmühle S3	III
Tabelle 43: Berechnung der Schüttdichten	IV
Tabelle 44: Energieeinträge pro Mahlvorgang HO Erste	V
Tabelle 45: Energieeinträge pro Mahlvorgang S1 Erste	V
Tabelle 46: Energieeinträge pro Mahlvorgang S2 Erste	V
Tabelle 47: Energieeinträge pro Mahlvorgang S3 Erste	VI
Tabelle 48: Messwerte Zerkleinerung HO auf 2000 Blaine	VII
Tabelle 49: Messwerte Zerkleinerung HO auf 4000 Blaine	VII
Tabelle 50: Messwerte Zerkleinerung HO auf 6000 Blaine	VII
Tabelle 51: Messwerte Zerkleinerung S1 auf 2000 Blaine	VIII
Tabelle 52: Messwerte Zerkleinerung S1 auf 4000 Blaine	VIII
Tabelle 53: Messwerte Zerkleinerung S1 auf 6000 Blaine	VIII
Tabelle 54: Messwerte Zerkleinerung S2 auf 2000 Blaine	IX
Tabelle 55: Messwerte Zerkleinerung S2 auf 4000 Blaine	IX
Tabelle 56: Messwerte Zerkleinerung S2 auf 6000 Blaine	IX
Tabelle 57: Messwerte Zerkleinerung S3 auf 2000 Blaine	X
Tabelle 58: Messwerte Zerkleinerung S3 auf 4000 Blaine	X
Tabelle 59: Messwerte Zerkleinerung S3 auf 6000 Blaine	X
Tabelle 60: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen.....	XI
Tabelle 61: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung	XII
Tabelle 62: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen.....	XIII
Tabelle 63: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung	XIV
Tabelle 64: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen.....	XV
Tabelle 65: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung	XVI
Tabelle 66: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen.....	XVII
Tabelle 67: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung	XVIII
Tabelle 68: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen.....	XIX
Tabelle 69: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung	XX
Tabelle 70: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen.....	XXI
Tabelle 71: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung	XXII

Anhang

Tabelle 38: Bestimmung der Stoffdichten

Probe	Masse [g]	Volumen Einzelmessung [cm ³]	Mittelwert Volumen [cm ³]	Temperatur [°C]	Errechneter Mittelwert Dichte [g/cm ³]	Errechneter Mittelwert Dichte [g/cm ³]
CEM I	7,11	2,2850	2,2825	22,8	3,1150	3,1174
		2,2818				
		2,2807				
	7,80	2,5040	2,5015	22,9	3,1182	
		2,5003				
		2,5001				
7,78	2,4961	2,4943	22,9	3,1191		
	2,4933					
	2,4936					
HO	9,20	3,2681	3,2685	23,6	2,8147	2,8128
		3,2690				
		3,2684				
	8,43	2,9977	2,9983	23,7	2,8116	
		2,9984				
		2,9989				
9,18	3,2635	3,2646	23,7	2,8120		
	3,2654					
	3,2650					
S1	10,28	3,3168	3,3188	26,1	3,0975	3,0975
		3,3182				
		3,3214				
	10,83	3,4958	3,4963	26,0	3,0976	
		3,4957				
		3,4974				
10,34	3,3363	3,3382	25,9	3,0975		
	3,3376					
	3,3406					
S2	9,23	3,0104	3,0126	24,6	3,0638	3,0597
		3,0163				
		3,0110				
	9,43	3,0824	3,0832	24,7	3,0585	
		3,0827				
		3,0845				
9,68	3,1661	3,1668	24,8	3,0567		
	3,1684					
	3,1660					
S3	11,20	3,6162	3,6156	24,0	3,0977	3,0994
		3,6153				
		3,6152				
	11,91	3,8427	3,8431	24,1	3,0991	
		3,8436				
		3,8429				
11,85	3,8199	3,8207	24,1	3,1015		
	3,8205					
	3,8217					

Tabelle 39: Zyklenmahlung in der Stabmühle HO

Zyklus	ΔU	ΣU	Aufgabe [g]	GG [g]	ΔFG [g]	ΣFG [g]	UL [%]	Spez. FG-Bildung [g/U]	Δe [J/g]	EE [J]
1	120	120	500,0	69,5	426,0	426,0	16,31	3,55	4,0	1996,7
2	70	190	500,0	158,0	339,5	765,5	46,54	4,85	2,9	1999,6
3	50	240	500,5	237,0	259,5	1025,0	91,33	5,19	2,7	2002,3
4	48	288	500,0	252,0	243,5	1268,5	103,49	5,07	2,8	2005,1
5	52	340	500,5	262,5	237,5	1506,0	110,53	4,57	3,1	2008,2
6	55	395	500,5	264,5	235,5	1741,5	112,31	4,28	3,3	2011,5
7	60	455	500,0	256,0	242,5	1984,0	105,57	4,04	3,5	2015,0
8	62	517	493,0	231,0	259,5	2243,5	89,02	4,19	3,4	2018,4
9	130	647	231,0	6,5	224,0	2467,5	2,90	1,72	8,2	2026,6
										18083,4

Tabelle 40: Zyklenmahlung in der Stabmühle S1

Zyklus	ΔU	ΣU	Aufgabe [g]	GG [g]	ΔFG [g]	ΣFG [g]	UL [%]	Spez. FG-Bildung [g/U]	Δe [J/g]	EE [J]
1	215	215	500,0	246,5	242,5	242,5	101,65	1,13	12,6	6284,3
2	220	435	500,5	247,0	253,5	496,0	97,44	1,15	12,3	6296,6
3	210	645	501,0	257,5	245,0	741,0	105,10	1,17	12,2	6308,6
4	215	860	501,0	241,5	257,5	998,5	93,79	1,20	11,8	6320,5
5	212	1072	500,5	247,0	250,0	1248,5	98,80	1,18	12,0	6332,5
6	212	1284	501,0	257,5	247,0	1495,5	104,25	1,17	12,2	6344,6
7	212	1496	501,5	253,0	249,0	1744,5	101,61	1,17	12,1	6356,7
8	212	1708	501,5	262,0	240,0	1984,5	109,17	1,13	12,5	6369,2
9	219	1927	501,5	258,5	240,0	2224,5	107,71	1,10	12,9	6382,2
10	225	2152	500,5	264,0	235,0	2459,5	112,34	1,04	13,6	6395,7
11	225	2377	501,0	259,0	239,0	2698,5	108,37	1,06	13,3	6409,1
12	225	2602	501,5	266,5	232,0	2930,5	114,87	1,03	13,7	6422,8
13	250	2852	500,5	255,5	248,0	3178,5	103,02	0,99	14,3	6437,1
14	250	3102	501	245,0	252,0	3430,5	97,22	1,01	14,1	6451,2
15	250	3352	501	246,5	257,0	3687,5	95,91	1,03	13,8	6465,0
16	250	3602	501	245,5	252,5	3940,0	97,23	1,01	14,0	6479,0
17	250	3852	501,5	257,5	244,5	4184,5	105,32	0,98	14,5	6493,5
18	250	4102	500,5	255,0	246,0	4430,5	103,66	0,98	14,4	6507,9
19	250	4352	501,5	253,5	246,5	4677,0	102,84	0,99	14,4	6522,3
20	250	4602	501,5	246,5	258,5	4935,5	95,36	1,03	13,7	6536,0
21	250	4852	501,5	240,5	264,0	5199,5	91,10	1,06	13,4	6549,4
22	230	5082	501	229,5	272,5	5472,0	84,22	1,18	12,0	6561,4
23	210	5292	501	233,5	265,5	5737,5	87,95	1,26	11,2	6572,6
24	130	5422	406	226,5	181,0	5918,5	125,14	1,39	10,2	6582,8
25	80	5502	225,5	115,00	110,5	6029,0	104,07	1,38	10,3	6593,1
										160974,4

Tabelle 41: Zyklenmahlung in der Stabmühle S2

Zyklus	ΔU	ΣU	Aufgabe [g]	GG [g]	ΔFG [g]	ΣFG [g]	UL [%]	Spez. FG-Bildung [g/U]	Δe [J/g]	EE [J]
1	180	180	500,0	261,0	235,0	235,0	111,06	1,31	10,9	5429,2
2	190	370	500,0	213,0	286,0	521,0	74,48	1,51	9,4	5438,6
3	166	536	499,5	239,0	260,0	781,0	91,92	1,57	9,1	5447,7
4	160	696	499,5	240,5	257,0	1038,0	93,58	1,61	8,8	5456,5
5	156	852	500,0	248,0	251,0	1289,0	98,80	1,61	8,8	5465,3
6	155	1007	499,5	235,5	262,0	1551,0	89,89	1,69	8,4	5473,7
7	148	1155	499,0	248,5	251,0	1802,0	99,00	1,70	8,4	5482,1
8	147	1302	500,0	261,5	237,5	2039,5	110,11	1,62	8,8	5490,8
9	155	1457	500,0	240,0	255,5	2295,0	93,93	1,65	8,6	5499,4
10	150	1607	500,0	233,5	271,5	2566,5	86,00	1,81	7,8	5507,3
11	105	1712	390,0	178,0	214,0	2780,5	83,18	2,04	7,0	5514,2
										65719,0

Tabelle 42: Zyklenmahlung in der Stabmühle S3

Zyklus	ΔU	ΣU	Aufgabe [g]	GG [g]	ΔFG [g]	ΣFG [g]	UL [%]	Spez. FG-Bildung [g/U]	Δe [J/g]	EE [J]
1	210	210	500,0	239,5	256,0	256,0	93,55	1,22	11,6	5814,5
2	205	415	500,0	213,0	286,0	542,0	74,48	1,40	10,2	5824,6
3	180	595	500,5	247,5	251,5	793,5	98,41	1,40	10,1	5834,8
4	180	775	500,0	243,5	258,5	1052,0	94,20	1,44	9,9	5844,7
5	175	950	500,5	247,0	255,0	1307,0	96,86	1,46	9,7	5854,4
6	172	1122	500,5	260,0	239,0	1546,0	108,79	1,39	10,2	5864,6
7	180	1302	500,0	256,0	242,5	1788,5	105,57	1,35	10,5	5875,1
8	185	1487	500,0	246,5	257,5	2046,0	95,73	1,39	10,2	5885,3
9	180	1667	500,0	242,0	253,0	2299,0	95,65	1,41	10,1	5895,4
10	213	1880	599,5	303,0	298,0	2597,0	101,68	1,40	10,1	5905,5
11	108	1988	303,0	130,5	174,5	2771,5	74,79	1,62	8,8	5914,3
										64513,1

Tabelle 43: Berechnung der Schüttdichten

Probe	Einwaage [g]	Volumen ungestampft [cm ³]	Schüttdichte [g/cm ³]	Mittelwert [g/cm ³]
HO nach Stabmühle	178,23	152,0	1,1726	1,1713
	214,91	183,0	1,1744	
	268,42	230,0	1,1670	
HO- 2000 Blaine	148,97	128,0	1,1638	1,1796
	271,25	228,0	1,1897	
	183,7	155,0	1,1852	
HO- 4000 Blaine	121,8	121,0	1,0066	1,0026
	169,7	170,0	0,9982	
	215,66	215,0	1,0031	
S1 nach Stabmühle	246,39	150,0	1,6426	1,6204
	231,92	150,0	1,5461	
	250,86	150,0	1,6724	
S1 - 2000 Blaine	199,16	148,0	1,3457	1,3421
	202,86	151,0	1,3434	
	213,95	160,0	1,3372	
S1- 4000 Blaine	146,96	130,0	1,1305	1,1063
	169,12	153,0	1,1054	
	204,72	189,0	1,0832	
S2 nach Stabmühle	148,57	93,0	1,5975	1,6023
	235,38	148,0	1,5904	
	299,49	185,0	1,6189	
S2 - 2000 Blaine	204,93	150,0	1,3662	1,3652
	234,93	172,0	1,3659	
	294,55	216,0	1,3637	
S2- 4000 Blaine	77,18	65,0	1,1874	1,1943
	145,51	122,0	1,1927	
	197,25	164,0	1,2027	
S3 nach Stabmühle	225,87	145,0	1,5577	1,5354
	268,01	175,0	1,5315	
	294,27	194,0	1,5169	
S3- 2000 Blaine	207,01	151,0	1,3709	1,3410
	178,29	135,0	1,3207	
	252,96	190,0	1,3314	
S3- 4000 Blaine	166,8	147,0	1,1347	1,1254
	174,75	155,0	1,1274	
	211,7	190,0	1,1142	

Tabelle 44: Energieeinträge pro Mahlvorgang HO Erste

Umdrehungen	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	Nettoleistung [W]	Zeit Messabschnitt [s]	Energie Messabschnitt [J]	Spez. Zerkleinerungsenergie Messabschnitt [J/g]
2500U	1820,7	23,4	2201,94	51584,79	93,09
7500U	3247,7	22,7	4392,48	99819,45	180,14
17500U	5394,0	22,1	8768,08	193601,16	349,38
20300U	6016,0	22,3	2459,40	54746,44	98,80
Summe				399751,84	721,4175

Tabelle 45: Energieeinträge pro Mahlvorgang S1 Erste

Umdrehungen	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	Nettoleistung [W]	Zeit Messabschnitt [s]	Energie Messabschnitt [J]	Spez. Zerkleinerungsenergie Messabschnitt [J/g]
500 U	404,3	24,04	437,18	10510,55	13,71
1000 U	730,0	23,98	435,80	10450,10	13,63
1500 U	1044,3	23,86	435,58	10395,08	13,56
2500 U	1478,3	23,77	869,10	20655,97	26,94
4000 U	2109,7	23,60	1303,96	30773,18	40,13
5000 U	2503,7	23,43	868,34	20346,21	26,53
9250 U	-	22,93	3702,06	84894,11	110,71
15000 U	4579,0	22,35	4999,70	111735,48	145,71
22500 U	5716,0	22,16	6530,06	144688,99	188,69
24350 U	6103,7	22,09	1623,74	35861,45	46,77
Summe				480311,13	626,38

Tabelle 46: Energieeinträge pro Mahlvorgang S2 Erste

Umdrehungen	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	Nettoleistung [W]	Zeit Messabschnitt [s]	Energie Messabschnitt [J]	Spez. Zerkleinerungsenergie Messabschnitt [J/g]
3800 U	1885,00	23,59	3297,88	77801,27	102,67
20000 U	4026,30	20,90	14240,84	297644,51	392,77
28000 U	4980,70	21,80	7048,30	153625,26	202,72
37000 U	5680,00	21,63	7926,70	171420,14	226,20
41500 U	5990,70	21,78	3966,02	86360,94	113,96
Summe				786852,11	1038,32

Tabelle 47: Energieeinträge pro Mahlvorgang S3 Erste

Umdrehungen	Mittelwert Blaine [cm²/g]	Nettoleistung [W]	Zeit Messabschnitt [s]	Energie Messabschnitt [J]	Spez. Zerkleinerungsenergie Messabschnitt [J/g]
2500 U	1569,70	24,08	2191,06	52759,80	72,65
6800 U	2853,30	22,85	3755,10	85797,24	118,14
19000 U	4592,30	21,51	10614,12	228260,11	314,32
25100 U	5235,00	22,07	5317,54	117333,26	161,57
32800 U	5942,00	21,88	6707,72	146740,52	202,06
Summe				630890,93	868,74

Tabelle 48: Messwerte Zerkleinerung HO auf 2000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]
HO - 3120U Charge 1	2,91	0,00	2048,7	10,97
HO - 3110U Charge 2	2,90	0,01	2016,0	27,40
HO - 3120U Charge 3	2,90	0,00	2028,7	9,07
HO - 3110U Charge 4	2,90	0,00	2031,0	17,69
HO - 3120U Charge 5	2,90	0,00	2022,7	12,10
HO - 3110U Charge 6	2,90	0,00	2015,0	5,20
HO - 3120U Charge 7	2,90	0,00	2018,3	16,77
HO - 3110U Charge 8	2,90	0,01	2047,3	12,66
HO - 3120U Charge 9	2,90	0,00	2050,7	14,19
HO - 3110U Charge 10	2,90	0,00	2026,3	3,79
HO - 3120U Charge 11	2,89	0,00	1994,7	20,65

Tabelle 49: Messwerte Zerkleinerung HO auf 4000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]
HO - 7920U Charge I	2,83	0,00	4059,7	7,37
HO - 7820U Charge II	2,84	0,00	4049,0	26,15
HO - 7830U Charge III	2,84	0,00	4023,7	27,61
HO - 7840U Charge IV	2,84	0,00	3995,7	26,31
HO - 7850U Charge V	2,84	0,00	4020,3	22,50
HO - 7860U Charge VI	2,84	0,00	4016,3	13,20
HO - 4700U Charge VII	2,84	0,00	3992,7	10,50

Tabelle 50: Messwerte Zerkleinerung HO auf 6000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]
HO - 7900U Charge 1	2,70	0,00	6044,7	21,13
HO - 7900U Charge 2	2,70	0,00	6048,0	14,42
HO - 7900U Charge 3	2,70	0,00	6024,0	21,66
HO - 2400U Charge 4	2,70	0,00	5995,0	21,93
HO - 20300U Erste	2,71	0,01	6016,0	40,95

Tabelle 51: Messwerte Zerkleinerung S1 auf 2000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]
S1 - 3800 U Charge 1	3,07	0,02	1954,0	50
S1 - 4200 U Charge 2	3,10	0,00	2052,7	22,7
S1 - 4150 U Charge 3	3,09	0,01	1999,3	16,5
S1 - 4050 U Charge 4	3,08	0,01	2011,7	28,9
S1 - 4550 U Charge 5	3,09	0,01	2051,7	59,6
S1 - 4200 U Charge 6	3,09	0,01	1980,7	22,4
S1 - 4220 U Charge 7	3,09	0,02	2015,3	21,0
S1 - 4450 U Charge 8	3,09	0,01	2023,0	38,7
S1 - 2370 U Charge 9	3,08	0,02	2011,3	54,6

Tabelle 52: Messwerte Zerkleinerung S1 auf 4000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]
S1 - 7500 U Charge I	3,06	0,01	4027,3	40,13
S1 - 7500 U Charge II	3,08	0,01	4029,7	13,43
S1 - 7500 U Charge III	3,08	0,01	3992,0	27,87
S1 - 7500 U Charge IV	3,08	0,01	4013,3	11,93
S1 - 7500 U Charge V	3,08	0,00	4033,3	9,24
S1 - 7500 U Charge VI	3,07	0,00	4008,7	47,96
S1 - 7500 U Charge VII	3,07	0,01	4022,3	16,01

Tabelle 53: Messwerte Zerkleinerung S1 auf 6000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]
S1 - 10300 U Charge 1	3,06	0,00	6001,3	74,27
S1 - 11300 U Charge 2	3,06	0,01	6069,0	46,60
S1 - 9450 U Charge 3	3,07	0,01	5912,3	67,09
S1 - 3060 U Charge 4	3,07	0,01	5980,0	30,05
S1 - 24350 U Erste	3,06	0,00	6103,7	24,44

Tabelle 54: Messwerte Zerkleinerung S2 auf 2000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]
S2 - 4330U Charge 1	3,10	0,00	1967,3	17,21
S2 - 4400U Charge 2	3,10	0,00	1984,7	27,15
S2 - 4445U Charge 3	3,10	0,00	1979,3	20,60
S2 - 1840U Charge 4	3,10	0,00	2006,0	25,87

Tabelle 55: Messwerte Zerkleinerung S2 auf 4000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]
S2 - 13040U Charge I	3,10	0,00	4005,7	36,83
S2 - 13000U Charge II	3,10	0,01	4013,0	73,61
S2 - 3750U Charge III	3,11	0,00	4011,0	19,92

Tabelle 56: Messwerte Zerkleinerung S2 auf 6000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm ² /g]	STABW [cm ² /g]
S2 - 16580U Charge 1	3,10	0,00	6012,0	45,90
S2 - 41500 U Erste	3,08	0,00	5990,7	52,63

Tabelle 57: Messwerte Zerkleinerung S3 auf 2000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm²/g]	STABW [cm²/g]
S3 - 4000U Charge 1	3,05	0,00	2064,7	13,28
S3 - 4000U Charge 2	3,04	0,01	1966,3	37,17
S3 - 4000U Charge 3	3,07	0,02	1991,7	22,50
S3 - 3700U Charge 4	3,10	0,00	2026,0	25,63

Tabelle 58: Messwerte Zerkleinerung S3 auf 4000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm²/g]	STABW [cm²/g]
S3 - 10110U Charge I	3,10	0,00	4001,7	39,80
S3 - 9491U Charge II	3,10	0,00	3955,7	15,63
S3 - 5450U Charge III	3,10	0,00	3949,3	8,39

Tabelle 59: Messwerte Zerkleinerung S3 auf 6000 Blaine

Probe	Einwaage [g]	STABW [g]	Mittelwert Blaine [cm²/g]	STABW [cm²/g]
S3 - 16200 U Charge 1	3,02	0,00	5987,0	55,24
S3 - 32800 U Erste	3,03	0,00	5942,0	58,03

Tabelle 60: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm ³]
R-1-7	1	40,00	40,20	160,45	565,50	2,19
	2	40,00	40,20	160,40	560,90	2,17
	3	40,00	40,13	160,30	564,95	2,20
HO-2k-12,5-7	1	40,07	40,20	159,90	565,35	2,20
	2	40,10	40,33	159,80	564,65	2,18
	3	40,20	40,37	159,55	565,00	2,18
HO-4k-12,5-7	1	40,00	40,17	160,10	564,35	2,19
	2	40,00	39,93	159,95	558,50	2,19
	3	40,03	40,20	159,90	558,75	2,17
HO-6k-12,5-7	1	40,00	39,97	159,90	562,10	2,20
	2	40,00	40,20	159,90	563,20	2,19
	3	40,23	40,27	159,80	563,40	2,18
HO-2k-25-7	1	40,10	40,13	160,00	561,40	2,18
	2	40,03	40,13	159,95	563,95	2,19
	3	40,13	40,23	159,85	564,00	2,19
HO-4k-25-7	1	40,03	39,97	160,00	557,15	2,18
	2	40,20	40,00	159,85	559,75	2,18
	3	40,23	40,00	160,00	561,70	2,18
HO-6k-25-7	1	39,97	40,53	160,50	565,40	2,17
	2	40,10	40,13	160,45	569,40	2,21
	3	40,10	39,93	160,30	564,10	2,20
HO-2k-50-7	1	39,90	40,00	160,50	563,15	2,20
	2	40,10	40,43	160,45	565,45	2,17
	3	40,20	40,43	160,30	566,30	2,17
HO-4k-50-7	1	40,00	40,30	160,40	566,60	2,19
	2	40,00	40,30	160,20	567,20	2,20
	3	39,73	40,30	160,20	561,05	2,19
HO-6k-50-7	1	39,70	40,23	160,35	559,50	2,18
	2	40,00	40,20	160,30	564,30	2,19
	3	39,90	40,27	160,20	560,15	2,18

Tabelle 61: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm³]
HO-2k-12,5-7	1	40,13	40,20	159,90	570,60	2,21
	2	40,07	40,27	159,65	569,60	2,21
	3	40,10	40,23	159,80	570,05	2,21
HO-4k-12,5-7	1	40,10	40,23	160,10	569,45	2,20
	2	40,10	39,97	159,90	563,70	2,20
	3	40,07	40,00	159,95	563,75	2,20
HO-6k-12,5-7	1	40,00	40,13	160,00	567,20	2,21
	2	40,10	40,47	159,95	568,30	2,19
	3	40,17	40,13	159,85	568,65	2,21
HO-2k-25-7	1	40,17	40,03	160,00	565,50	2,20
	2	40,03	40,20	159,90	568,15	2,21
	3	40,23	40,07	159,80	568,50	2,21
HO-4k-25-7	1	40,07	40,03	159,90	562,00	2,19
	2	40,17	40,00	159,90	564,80	2,20
	3	40,20	40,10	159,80	567,10	2,20
HO-6k-25-7	1	40,00	40,47	160,60	569,45	2,19
	2	40,07	40,23	160,30	573,40	2,22
	3	40,13	39,97	160,35	568,60	2,21
HO-2k-50-7	1	39,90	40,00	160,40	565,90	2,21
	2	40,10	40,23	160,35	568,40	2,20
	3	40,03	40,17	160,30	569,20	2,21
HO-4k-50-7	1	40,03	40,20	160,30	570,35	2,21
	2	39,93	40,27	160,20	570,75	2,22
	3	39,83	40,23	160,30	564,60	2,20
HO-6k-50-7	1	39,87	40,27	160,25	563,50	2,19
	2	40,00	40,30	160,30	568,20	2,20
	3	39,97	40,33	160,20	564,20	2,18

Tabelle 62: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm ³]
S1-2k-12,5-7	1	40,30	40,07	159,75	567,40	2,20
	2	40,17	40,13	159,90	569,20	2,21
	3	40,00	40,23	159,95	571,65	2,22
S1-4k-12,5-7	1	40,03	40,13	160,30	558,30	2,17
	2	40,00	40,13	160,30	558,90	2,17
	3	39,77	40,20	160,15	559,40	2,18
S1-6k-12,5-7	1	40,00	40,27	160,05	561,20	2,18
	2	40,00	40,17	160,05	560,40	2,18
	3	40,03	40,20	160,00	560,80	2,18
S1-2k-25-7	1	40,03	40,03	160,00	557,20	2,17
	2	40,10	40,00	160,00	560,70	2,18
	3	40,20	40,17	159,80	557,80	2,16
S1-4k-25-7	1	40,13	40,17	160,05	562,80	2,18
	2	40,00	40,17	159,95	560,35	2,18
	3	40,10	40,23	159,90	559,30	2,17
S1-6k-25-7	1	40,00	40,17	159,95	558,70	2,17
	2	40,00	40,43	159,90	560,20	2,17
	3	40,20	40,40	159,80	558,55	2,15
S1-2k-50-7	1	40,00	40,10	160,20	556,40	2,17
	2	40,00	40,27	159,95	554,80	2,15
	3	40,00	40,20	159,90	555,20	2,16
S1-4k-50-7	1	40,20	40,23	159,80	560,00	2,17
	2	40,13	40,43	159,90	559,50	2,16
	3	40,10	40,23	159,85	561,50	2,18
S1-6k-50-7	1	39,97	40,23	160,50	555,30	2,15
	2	40,00	40,20	160,45	558,80	2,17
	3	40,17	40,17	160,40	556,30	2,15

Tabelle 63: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm³]
R-1-7	1	39,97	40,20	160,50	570,80	2,21
	2	40,07	40,10	160,45	566,70	2,20
	3	40,10	40,13	160,25	570,80	2,21
S1-2k-12,5-7	1	40,27	39,97	159,75	572,10	2,23
	2	40,20	40,27	159,85	574,05	2,22
	3	39,97	40,30	159,90	576,35	2,24
S1-4k-12,5-7	1	40,07	40,13	160,30	564,40	2,19
	2	39,93	40,23	160,30	564,90	2,19
	3	39,80	40,20	160,30	564,85	2,20
S1-6k-12,5-7	1	40,07	40,23	160,00	566,55	2,20
	2	40,03	40,20	159,95	565,80	2,20
	3	40,07	40,17	159,95	566,60	2,20
S1-2k-25-7	1	40,03	40,17	160,00	561,80	2,18
	2	40,03	40,20	159,90	565,40	2,20
	3	40,20	40,07	159,80	562,05	2,18
S1-4k-25-7	1	40,13	40,23	160,05	568,30	2,20
	2	40,07	40,23	159,95	566,25	2,20
	3	40,10	40,40	159,95	565,40	2,18
S1-6k-25-7	1	40,03	40,23	160,00	564,45	2,19
	2	40,10	40,37	159,90	565,60	2,19
	3	40,20	40,40	159,85	564,40	2,17
S1-2k-50-7	1	40,10	40,10	160,00	561,20	2,18
	2	40,10	40,07	159,95	559,60	2,18
	3	40,07	40,03	160,00	560,20	2,18
S1-4k-50-7	1	40,10	40,27	159,85	564,45	2,19
	2	40,10	40,43	159,85	563,85	2,18
	3	40,17	40,30	159,85	565,85	2,19
S1-6k-50-7	1	39,90	40,27	160,50	560,85	2,17
	2	40,10	40,27	160,45	563,95	2,18
	3	40,10	40,20	160,45	561,60	2,17

Tabelle 64: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm³]
S2-2k-12,5-7	1	40,00	40,10	159,80	562,20	2,19
	2	40,10	40,13	159,85	565,75	2,20
	3	40,17	40,30	160,00	568,45	2,19
S2-4k-12,5-7	1	40,13	40,20	160,00	566,95	2,20
	2	40,07	40,17	159,90	566,00	2,20
	3	40,20	40,17	159,95	567,90	2,20
S2-6k-12,5-7	1	39,90	40,13	159,85	559,55	2,19
	2	40,13	40,20	159,70	561,80	2,18
	3	40,13	40,07	159,50	559,00	2,18
S2-2k-25-7	1	40,00	40,53	159,80	559,70	2,16
	2	40,20	40,47	159,70	563,40	2,17
	3	40,07	40,33	159,50	562,20	2,18
S2-4k-25-7	1	40,00	40,27	160,00	563,50	2,19
	2	40,03	40,33	159,90	566,10	2,19
	3	40,20	40,20	159,70	567,90	2,20
S2-6k-25-7	1	40,10	40,33	159,95	562,30	2,17
	2	40,00	40,23	159,80	560,90	2,18
	3	40,07	40,27	159,70	562,85	2,18
S3-2k-12,5-7	1	40,03	40,27	160,13	562,10	2,18
	2	40,10	40,23	160,10	563,25	2,18
	3	40,03	40,07	160,10	560,65	2,18
S3-4k-12,5-7	1	40,03	40,30	160,15	563,85	2,18
	2	40,10	40,27	160,05	563,50	2,18
	3	40,17	40,27	159,95	563,50	2,18
S3-6k-12,5-7	1	39,83	40,07	160,20	555,00	2,17
	2	40,27	40,07	160,20	561,90	2,17
	3	39,93	40,00	160,15	557,10	2,18
S3-2k-25-7	1	39,93	40,33	160,30	566,10	2,19
	2	40,00	40,20	160,20	564,00	2,19
	3	40,03	40,27	160,20	565,10	2,19
S3-4k-25-7	1	40,07	39,90	159,65	558,00	2,19
	2	40,13	39,97	159,75	560,90	2,19
	3	40,07	40,10	159,80	559,65	2,18
S3-6k-25-7	1	40,00	40,10	159,95	555,95	2,17
	2	40,00	40,27	159,80	562,20	2,18
	3	40,00	40,17	159,85	558,00	2,17

Tabelle 65: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm³]
S2-2k-12,5-7	1	40,10	40,13	159,65	567,80	2,21
	2	40,10	40,27	159,80	570,90	2,21
	3	40,20	40,23	160,00	573,45	2,22
S2-4k-12,5-7	1	40,08	40,20	159,70	571,70	2,22
	2	40,10	40,17	159,80	570,50	2,22
	3	40,13	40,20	159,85	572,45	2,22
S2-6k-12,5-7	1	39,93	40,20	159,90	564,60	2,20
	2	40,10	40,27	159,65	566,90	2,20
	3	40,03	40,03	159,40	564,00	2,21
S2-2k-25-7	1	40,03	40,33	159,90	565,70	2,19
	2	40,17	40,50	159,80	568,75	2,19
	3	40,10	40,63	159,55	567,45	2,18
S2-4k-25-7	1	40,00	40,33	159,90	568,30	2,20
	2	40,03	40,40	159,90	570,80	2,21
	3	40,20	40,30	159,80	572,55	2,21
S2-6k-25-7	1	40,08	40,17	159,90	567,30	2,20
	2	40,00	40,20	159,80	565,90	2,20
	3	40,08	40,20	159,65	567,90	2,21
S3-2k-12,5-7	1	40,00	40,17	160,10	567,05	2,20
	2	40,10	40,20	160,10	568,20	2,20
	3	40,03	40,03	160,10	565,80	2,21
S3-4k-12,5-7	1	40,00	40,27	160,20	568,90	2,20
	2	40,17	40,17	160,05	568,65	2,20
	3	40,20	40,17	160,10	568,70	2,20
S3-6k-12,5-7	1	39,78	40,07	160,25	560,60	2,19
	2	40,30	40,00	160,25	567,60	2,20
	3	39,93	39,97	160,20	563,00	2,20
S3-2k-25-7	1	39,90	40,30	160,30	570,20	2,21
	2	40,00	40,17	160,30	568,55	2,21
	3	40,10	40,23	160,25	569,60	2,20
S3-4k-25-7	1	40,10	39,93	159,70	563,05	2,20
	2	40,17	40,03	159,75	565,65	2,20
	3	40,17	40,07	159,80	565,10	2,20
S3-6k-25-7	1	40,07	40,30	159,95	561,50	2,17
	2	40,07	40,30	159,95	567,55	2,20
	3	40,10	40,13	159,85	563,70	2,19

Tabelle 66: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm³]
R-1-28	1	40,05	40,60	159,88	567,05	2,18
	2	40,07	40,48	159,95	567,70	2,19
	3	40,03	40,47	159,95	566,80	2,19
HO-2k-12,5-28	1	40,33	39,90	160,30	562,60	2,18
	2	39,97	40,03	160,30	559,15	2,18
	3	39,90	40,07	160,20	558,50	2,18
HO-4k-12,5-28	1	40,07	40,03	159,90	562,70	2,19
	2	40,10	40,30	160,05	563,65	2,18
	3	40,10	40,23	159,90	567,30	2,20
HO-6k-12,5-28	1	39,80	40,00	160,45	555,00	2,17
	2	40,00	40,13	160,25	560,30	2,18
	3	39,83	40,03	160,10	555,90	2,18
HO-2k-25-28	1	40,00	40,07	160,00	558,15	2,18
	2	40,10	40,10	159,95	559,15	2,17
	3	40,10	40,13	159,80	560,50	2,18
HO-4k-25-28	1	40,13	40,10	160,15	564,30	2,19
	2	40,00	40,30	159,95	565,90	2,19
	3	40,20	40,20	159,95	562,40	2,18
HO-6k-25-28	1	39,93	40,13	160,60	565,25	2,20
	2	40,07	40,27	160,45	565,40	2,18
	3	40,07	40,07	160,40	565,80	2,20
HO-2k-50-28	1	40,00	40,07	160,00	564,05	2,20
	2	40,10	40,07	160,00	560,00	2,18
	3	40,10	40,20	159,90	563,30	2,19
HO-4k-50-28	1	40,00	40,23	160,05	563,65	2,19
	2	40,00	40,27	159,90	564,40	2,19
	3	40,10	40,27	159,95	565,45	2,19
HO-6k-50-28	1	40,17	40,23	160,00	559,40	2,16
	2	40,17	40,23	160,20	564,35	2,18
	3	40,13	40,10	159,80	559,95	2,18

Tabelle 67: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm³]
HO-2k-12,5-28	1	40,20	39,83	160,25	569,50	2,22
	2	40,03	39,97	160,20	566,00	2,21
	3	39,90	40,07	160,20	565,40	2,21
HO-4k-12,5-28	1	40,10	40,13	159,80	569,60	2,21
	2	40,03	40,20	159,85	570,40	2,22
	3	40,10	40,10	159,70	574,30	2,24
HO-6k-12,5-28	1	39,73	40,00	160,30	562,00	2,21
	2	39,93	40,23	160,30	567,60	2,20
	3	39,83	40,03	160,30	563,50	2,20
HO-2k-25-28	1	39,93	40,23	159,70	562,10	2,19
	2	40,17	40,20	159,85	568,40	2,20
	3	40,03	40,00	159,95	565,20	2,21
HO-4k-25-28	1	40,00	40,10	159,90	570,80	2,23
	2	40,00	40,13	159,90	572,40	2,23
	3	40,20	40,07	159,85	569,10	2,21
HO-6k-25-28	1	39,90	40,23	160,50	571,60	2,22
	2	40,00	40,13	160,40	572,00	2,22
	3	40,00	40,10	160,30	572,70	2,23
HO-2k-50-28	1	40,00	40,03	160,00	567,50	2,21
	2	40,03	40,00	159,95	563,70	2,20
	3	40,20	40,00	159,85	566,80	2,21
HO-4k-50-28	1	40,00	40,20	159,95	568,70	2,21
	2	40,00	40,23	159,85	569,50	2,21
	3	40,00	40,23	160,00	570,50	2,22
HO-6k-50-28	1	39,93	40,07	160,00	565,05	2,21
	2	40,13	40,17	159,85	569,80	2,21
	3	40,03	40,10	159,70	565,60	2,21

Tabelle 68: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm³]
S1-2k-12,5-28	1	40,15	40,13	160,30	569,35	2,20
	2	40,12	40,23	160,20	564,95	2,18
	3	40,15	40,12	160,23	561,45	2,18
S1-4k-12,5-28	1	40,15	40,40	160,60	558,15	2,14
	2	40,13	40,30	160,20	552,05	2,13
	3	40,10	40,28	160,20	553,85	2,14
S1-6k-12,5-28	1	40,10	40,27	159,90	563,65	2,18
	2	40,10	40,37	160,00	562,80	2,17
	3	40,23	40,25	159,85	563,30	2,18
S1-2k-25-28	1	40,05	40,33	160,10	563,30	2,18
	2	40,00	40,27	160,00	562,30	2,18
	3	40,33	40,47	159,90	560,85	2,15
S1-4k-25-28	1	40,07	40,37	160,25	564,60	2,18
	2	40,17	40,47	160,35	564,50	2,17
	3	40,23	40,43	160,35	567,50	2,18
S1-6k-25-28	1	40,17	40,18	160,00	555,00	2,15
	2	40,10	40,40	159,90	558,10	2,15
	3	40,20	40,27	159,80	559,10	2,16
S1-2k-50-28	1	40,32	40,55	160,25	570,75	2,18
	2	39,97	40,57	160,30	561,35	2,16
	3	39,97	40,43	160,20	557,35	2,15
S1-4k-50-28	1	40,00	40,13	159,80	555,65	2,17
	2	40,17	40,17	159,75	555,35	2,15
	3	40,10	40,27	159,68	554,80	2,15
S1-6k-50-28	1	40,10	40,00	160,05	554,80	2,16
	2	40,00	40,20	159,95	553,90	2,15
	3	40,00	40,13	160,00	553,25	2,15

Tabelle 69: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm³]
R-1-28	1	40,00	40,57	159,98	574,00	2,21
	2	40,00	40,53	159,95	574,50	2,22
	3	40,00	40,53	159,90	573,55	2,21
S1-2k-12,5-28	1	40,13	40,20	160,20	576,25	2,23
	2	40,07	40,33	160,25	572,10	2,21
	3	40,10	40,20	160,10	568,90	2,20
S1-4k-12,5-28	1	40,03	40,20	160,20	566,60	2,20
	2	40,07	40,00	160,20	560,80	2,18
	3	40,03	40,07	160,20	562,80	2,19
S1-6k-12,5-28	1	40,00	40,30	159,90	571,30	2,22
	2	40,00	40,23	159,90	570,70	2,22
	3	40,13	40,20	159,90	571,15	2,21
S1-2k-25-28	1	40,07	40,33	159,90	570,90	2,21
	2	40,10	40,33	159,90	569,90	2,20
	3	40,13	40,40	159,90	569,00	2,19
S1-4k-25-28	1	40,08	40,33	160,10	571,20	2,21
	2	40,10	40,37	160,03	571,25	2,21
	3	40,23	40,37	160,05	574,25	2,21
S1-6k-25-28	1	40,17	40,20	159,95	563,10	2,18
	2	40,03	40,37	159,95	565,80	2,19
	3	40,08	40,23	159,90	567,20	2,20
S1-2k-50-28	1	40,27	40,63	160,30	577,10	2,20
	2	39,97	40,40	160,25	567,80	2,19
	3	40,00	40,30	160,10	563,80	2,18
S1-4k-50-28	1	39,98	40,23	159,90	562,05	2,19
	2	40,17	40,10	159,90	562,40	2,18
	3	40,07	40,10	159,55	561,60	2,19
S1-6k-50-28	1	40,00	40,20	160,00	562,40	2,19
	2	40,00	40,13	159,80	561,80	2,19
	3	40,07	40,17	159,90	561,30	2,18

Tabelle 70: Abmaße Mörtelprismen nach Ausformen

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm ³]
S2-2k-12,5-28	1	40,10	40,27	159,80	565,90	2,19
	2	40,10	40,23	159,85	562,95	2,18
	3	40,10	40,00	159,90	563,90	2,20
S2-4k-12,5-28	1	40,00	40,27	160,10	561,10	2,18
	2	40,10	40,23	160,20	561,85	2,17
	3	40,07	40,30	160,20	562,75	2,18
S2-6k-12,5-28	1	40,00	39,97	160,00	560,35	2,19
	2	40,00	40,13	159,90	558,80	2,18
	3	40,10	40,20	159,90	561,15	2,18
S2-2k-25-28	1	40,18	40,03	160,20	563,55	2,19
	2	40,07	40,13	160,25	563,50	2,19
	3	39,90	40,03	160,25	562,20	2,20
S2-4k-25-28	1	40,00	40,23	160,35	562,50	2,18
	2	40,00	40,17	159,95	560,45	2,18
	3	40,20	40,20	159,80	564,65	2,19
S2-6k-25-28	1	40,00	40,00	159,95	558,15	2,18
	2	40,10	40,10	159,95	559,15	2,17
	3	40,10	40,13	159,80	560,50	2,18
S3-2k-12,5-28	1	39,93	40,00	160,50	555,25	2,17
	2	40,10	40,00	160,50	559,10	2,17
	3	40,10	39,90	160,40	556,30	2,17
S3-4k-12,5-28	1	40,10	40,07	160,15	559,45	2,17
	2	40,23	40,23	160,10	557,40	2,15
	3	40,20	40,33	160,10	565,80	2,18
S3-6k-12,5-28	1	40,00	40,30	159,90	559,90	2,17
	2	40,13	40,17	159,85	563,10	2,19
	3	40,20	40,40	159,90	564,60	2,17
S3-2k-25-28	1	40,10	40,20	159,60	558,60	2,17
	2	40,13	40,23	159,65	565,80	2,19
	3	40,00	40,13	159,75	561,25	2,19
S3-4k-25-28	1	40,17	40,13	160,00	562,60	2,18
	2	40,07	40,33	159,90	557,90	2,16
	3	40,00	40,13	159,85	558,25	2,18
S3-6k-25-28	1	39,90	40,23	160,00	553,30	2,15
	2	40,10	40,07	159,80	557,00	2,17
	3	40,07	40,47	159,40	557,10	2,16

Tabelle 71: Abmaße Mörtelprismen vor Festigkeitsprüfung

Rezeptur	Prisma	Breite [mm]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Masse [g]	Dichte [g/cm ³]
S2-2k-12,5-28	1	40,03	40,20	159,90	572,90	2,23
	2	40,10	40,30	159,90	570,30	2,21
	3	40,10	40,20	159,80	571,50	2,22
S2-4k-12,5-28	1	40,00	40,17	160,10	568,50	2,21
	2	40,00	40,27	160,00	569,30	2,21
	3	39,97	40,37	160,10	570,70	2,21
S2-6k-12,5-28	1	40,00	40,10	159,85	567,50	2,21
	2	40,00	40,13	159,95	565,80	2,20
	3	40,00	40,20	159,90	567,70	2,21
S2-2k-25-28	1	40,20	40,10	160,00	569,90	2,21
	2	40,00	40,10	160,20	570,00	2,22
	3	39,93	39,90	160,20	568,60	2,23
S2-4k-25-28	1	40,07	40,20	159,90	569,10	2,21
	2	40,00	40,20	159,90	567,50	2,21
	3	40,17	40,30	159,80	571,50	2,21
S2-6k-25-28	1	40,10	39,97	159,80	564,80	2,21
	2	40,13	40,13	160,00	565,55	2,19
	3	40,17	40,07	159,85	567,10	2,20
S3-2k-12,5-28	1	39,90	39,97	160,50	563,20	2,20
	2	40,03	39,93	160,40	566,90	2,21
	3	40,00	39,83	160,30	563,80	2,21
S3-4k-12,5-28	1	40,03	39,90	160,10	566,90	2,22
	2	40,07	40,10	160,00	564,50	2,20
	3	40,10	40,13	160,10	573,30	2,23
S3-6k-12,5-28	1	40,03	40,20	160,00	567,60	2,20
	2	40,13	40,23	159,85	570,95	2,21
	3	40,10	40,30	159,85	572,65	2,22
S3-2k-25-28	1	40,20	40,23	159,50	565,00	2,19
	2	40,13	40,13	159,55	572,30	2,23
	3	39,97	40,10	159,60	568,10	2,22
S3-4k-25-28	1	40,10	40,10	159,95	569,65	2,21
	2	40,00	40,17	159,85	565,30	2,20
	3	40,00	40,10	159,90	565,20	2,20
S3-6k-25-28	1	39,97	40,00	159,95	561,40	2,20
	2	40,17	40,03	159,80	565,10	2,20
	3	40,00	40,50	159,50	565,10	2,19