



Montanuniversität Leoben - University of Leoben

Department Metallurgie - Department of Metallurgy

Nichteisenmetallurgie - Nonferrous Metallurgy



DIPLOMARBEIT

Thema:

Ermittlung von Auswahlkriterien für feuerfeste Baustoffe in Aluminiumschmelzöfen



Ersteller:

Thomas Hauer

Betreuer:

Dipl.-Ing. Michael Potesser

Begutachtung:

Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Helmut Antrekowitsch

Leoben, Dezember 06

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Thomas Hauer

Leoben, Dezember 2006

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Studienjahr 2006 in der AMAG rolling GmbH in Ranshofen und an der Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben durchgeführt.

Ao.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Helmut Antrekowitsch, Leiter der Nichteisenmetallurgie sowie Herrn Dipl.-Ing. Helmut Suppan der Firma AMAG rolling GmbH, danke ich für die Übertragung dieser Diplomarbeit.

Ein herzlicher Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Michael Potesser und Herrn Erich Troger für die wertvolle Mithilfe bei der Durchführung der Versuche, sowie den Mitarbeitern der Firma AMAG rolling GmbH für ihre Unterstützung.

Der größte Dank gilt meiner Familie, die mir eine universitäre Ausbildung erst ermöglicht und mich immer unterstützt hat.

Leoben, November 2006

Thomas Hauer

Ermittlung von Auswahlkriterien für feuerfeste Baustoffe in Aluminiumschmelzöfen

AMAG rolling GmbH in Ranshofen ist ein weltweit tätiger Hersteller hochwertiger Aluminiumwalzprodukte. 80 % der Produktion werden in die Hauptmärkte Europa und Übersee exportiert. AMAG rolling ist heute Marktführer bei Glanzqualitäten für die Beleuchtungsindustrie und bei Trittblechen für den Einsatz in der Transport- und Maschinenbauindustrie.

Im Rahmen der Diplomarbeit werden Auswahlkriterien für feuerfeste Baustoffe in Aluminiumschmelzöfen entwickelt. Das theoretische Grundwissen und der Stand der Technik aus einer Literaturrecherche waren die Grundlage für die Versuche im Labormaßstab und führten zu Empfehlungen eines Produktions- und Prüfstandes. Allgemeine Grundlagen zu Aluminiumöfen und deren feuerfesten Auskleidung sowie die verschiedenen Belastungen sind Teil des theoretischen Abschnittes. Der experimentelle Teil umfasst einen ausgearbeiteten Versuchsvorgang, um feuerfeste Materialien unter unterschiedlichen Belastungsformen wie sie in der Sekundäraluminiumindustrie auftreten, zu testen.

Ziel der Arbeit ist eine Empfehlung zur Optimierung des Versuchstandes und des Versuchsaufbaues, sodass eine eindeutige Ermittlung von Anforderungsprofilen ermöglicht wird.

Kurzfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit werden Auswahlkriterien für feuerfeste Baustoffe in Aluminiumschmelzöfen entwickelt. Im ersten Teil der Arbeit, erfolgt eine kurze Bewertung der bisher eingesetzten Materialien im Aluminiumschmelzofen der Firma AMAG rolling GmbH und Beschreibung der unterschiedlichen Belastungsarten für feuerfeste Massen und Steine. Der praktische Bereich umfasst einen ausgearbeiteten Versuchsvorgang, um verschiedene feuerfeste Materialien unter unterschiedlichen Belastungsformen zu testen. Abschließend wird eine Empfehlung zur Optimierung von Versuchstand und Versuchsaufbau gegeben, sodass eine eindeutige Ermittlung von Anforderungsprofilen ermöglicht wird.

Abstract

In the diploma thesis criteria for refractory materials in a melting furnace for the secondary aluminium industry were developed. The first part gives a short summary of the used materials in the closed well furnace of Austria metal AG. Furthermore a description of the different types of load for refractory materials in the mentioned furnace was done. The practical part of the thesis includes the design, manufacture and start-up of a test facility for determination of behaviour of the lining system. Due of these investigations concerning the different load and refractory materials recommendations regarding the optimization of the testing equipment, experimental set up and the refractory materials can be given.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	PROBLEMSTELLUNG	2
3	ALUMINIUM	5
3.1	Terminologie in der Aluminiumindustrie	5
3.2	Sekundäraluminium.....	6
3.3	Sekundäraluminiumlegierungen	9
3.4	Schmelzöfen in der Sekundäraluminiumindustrie	9
3.4.1	Drehtrommelöfen.....	11
3.4.2	Induktionsofen	12
3.4.3	Herdöfen.....	13
3.4.4	Zweikammerverfahren.....	14
3.4.5	Pyrolyse / Blankglühen / Schmelzen	15
3.4.6	Schachtöfen	16
4	FEUERFESTE WERKSTOFFE	18
4.1	Feuerfeste Grundstoffe	19
4.2	Dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse	20
4.2.1	Nichtbaisische geformte Erzeugnisse	20
4.2.1.1	Silikasteine	20
4.2.1.2	Schamottesteine.....	21
4.2.1.3	Aluminareiche Steine	21
4.2.1.4	Zirkonhaltige Steine.....	22
4.2.1.5	Kohlenstoff- und Grafitsteine	22
4.3	Ungeformte feuerfeste Werkstoffe	23
4.3.1	Einteilung nach Art der Verwendung	24
4.3.2	Einteilung nach Art der Bindung.....	24
4.3.3	Einteilung nach den Produktarten	25
4.4	Feuerbetone	25
4.4.1	Rohstoffe und Komponenten.....	26
4.4.2	Granulate als Zuschlagsstoffe	26
4.4.2.1	Aluminiumsilikatische Granulate	27
4.4.2.2	Korund	28
4.4.2.3	Zirkoniumoxid (Baddeleyit) und -silikat (Zirkon)	28
4.4.2.4	Baisische oxidische und silikatische Granulate.....	29
4.4.3	Bindemittel.....	29
4.4.4	Zusatzstoffe	30
4.4.4.1	Mikrofüller	30
4.4.4.2	Verstärkend wirkende Komponenten	30
4.5	Anforderungen an feuerfeste Werkstoffe	31
4.5.1	Feuerfestigkeit.....	31

4.5.2	Temperaturwechselbeständigkeit.....	33
4.5.3	Chemische Beständigkeit.....	34
4.5.4	Festigkeitseigenschaften.....	36
4.6	Allgemeine Probleme mit Feuerbetonen.....	37
4.6.1	Flammtemperaturen der Brenner.....	37
4.6.2	Anti-Benetzungsmittel.....	37
4.7	Auswahl der geeigneten Feuerfestzustellung.....	38
4.7.1	Konstruktionsmerkmale.....	39
4.8	Zustellung ausgewählter Schmelzanlagen.....	41
4.8.1	Herdschmelzofen.....	41
4.8.2	Drehtrommelofen.....	43
4.8.3	Tiegelinduktionsöfen.....	43
5	VERSUCHSAUFBAU.....	44
5.1	Matrix Vorversuche.....	44
5.2	Matrix Hauptversuche.....	45
5.3	Versuchsmaterialien.....	46
5.3.1	Alugard HS85.....	46
5.3.2	Didurit 120 AL 0-6.....	47
5.3.3	Didurit 130 AL 0-6.....	47
5.3.4	Formula 5-A.....	48
5.3.5	Carath 1400 LC/Al.....	48
5.3.6	Carath 1650 ULC/AZS.....	49
5.3.7	Alu-Cast 90 HS.....	49
5.3.8	Refracast LC C-90.....	50
5.4	Probenherstellung.....	51
5.4.1	Absieben.....	51
5.4.2	Abmischen und Formen.....	52
5.4.3	Brennen.....	54
5.4.4	Veränderung der KG-Verteilung.....	54
5.4.5	Auswahl der Formen.....	55
6	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	56
6.1	Hitze und Infiltration (Fingerspizentest).....	56
6.2	Mechanischer Abrieb.....	57
6.3	Beurteilung Fingerspizentest.....	58
6.3.1	Klassifizierung (Gesamtbewertung).....	58
6.3.2	Beobachtungskriterien.....	59
6.3.2.1	Anhaftung.....	59
6.3.2.2	Infiltration.....	59
6.3.2.3	Rissbildung.....	59
6.3.2.4	Bröselig.....	59
7	VORVERSUCHE.....	60

7.1	Aluminiumbäder	60
7.2	Abdecksalz	61
7.3	Ergebnis Vorversuche	61
8	HAUPTVERSUCHE	62
8.1	Auswertung der Hauptversuche	62
8.2	Ergebnis Hauptversuche	63
9	ZUSAMMENFASSUNG	71
10	LITERATUR	72
11	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS VON A-Z	74
12	TABELLEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS	75
13	ANHANG	I

1 Einleitung

Die AMAG rolling GmbH ist führender Anbieter von hoch qualitativen Walzprodukten, Spezialprofilen, Gusslegierungen in Form von Masseln und Rundbarren. Die Produkte werden zu 100 % aus sekundärem Aluminium (z.B. Schrott, Späne usw.) produziert. Für die Umschmelzung der sekundären Rohstoffe verwendet die AMAG casting Herdöfen in verschiedenen Größen und Bauarten. Schon seit mehr als 60 Jahren ist AMAG ein Technologieführer der Aluminiumbranche. Die flexible, mittelständische Unternehmensgruppe mit Sitz in Ranshofen – Österreich. Sie ist heute einer der größten Aluminium-Recycler Europas an einem Standort, ca. 80.000 Tonnen hochwertiger Aluminiumlegierungen pro Jahr verlassen ihre Produktionsanlagen. Aus den am Markt verfügbaren Schrotten werden durch sachgerechte Sortierung und Aufbereitung und unter Einsatz der aktuell besten Schmelz- und Gießtechnologie hochwertige Aluminium-Gusslegierungen produziert. 80 % der Produktion werden in die Hauptmärkte Europa und Übersee exportiert. Dort ist die AMAG mit eigenen Vertriebsgesellschaften oder Repräsentanten vertreten.

In der Vergangenheit traten Probleme mit der feuerfesten Ausmauerung im Rampenbereich eines Ofens auf, die Haltbarkeit der Zustellung erreichte nicht die vorgegebenen Zeiten. Durch verschiedene Belastungen (Temperatur, chemischer Angriff usw.) wird die Ausmauerung an der Brücke so stark angegriffen, dass keine Haltbarkeiten über 12 Monate erzielt wurden.

Das Ziel dieser Arbeit ist, verschiedene feuerfeste Produkte auf ihre Einsatzfähigkeit und Eigenschaften zu testen. Das theoretische Grundwissen und der Stand der Technik aus einer Literaturrecherche waren die Grundlage für die Versuche im Labormaßstab und führten zu Empfehlungen eines Produktions- und Prüfstandes.

Die praktischen Untersuchungen umfassen den „Fingertip-Test“ d.h. die feuerfesten Proben wurden für 96 Stunden in flüssigen Aluminium untergetaucht und anschließend erfolgte die mechanische Belastung, dabei scheuerte ein Metallplättchen bei 700, 900 und 1000 °C 150 mal über die Steinoberfläche. Der Abriebtest, simulierte die Abkrätzeinheit die bei der Firma Austria Metall AG im Einsatz ist. Die Bewertung der Ergebnisse setzte sich aus fünf verschiedenen Teilbereichen zusammen, die Anhaftung und die Infiltration der Aluminiumschmelze, die Rissbildung, die Bröseligkeit an der Schnittfläche und den Materialabtrag durch die Abkrätzeinheit.

2 Problemstellung

In der Vergangenheit traten im Rampenbereich des Ofen 3 (siehe Abbildung 1) der Gießerei Haltbarkeitsprobleme auf. Die häufige Reparatur und Neuzustellung führte zu großen Standzeiten und hohen Kosten. Die angestrebte Haltbarkeit des Feuerfestmaterials sollte 12 Monate betragen, wurde aber durch keine der eingesetzten Materialien erreicht (siehe Abbildung 2). Bisher ist dies nur von der Formula 5A der Fa. *Stellar Materials Incorporated* übertroffen worden.

Die geringen Einsatzzeiten entstehen durch chemischen Angriff der Krätze, die direkt auf die Rampe gerichteten Brenner, und mechanischen Belastungen der Abkrätzeinheit.

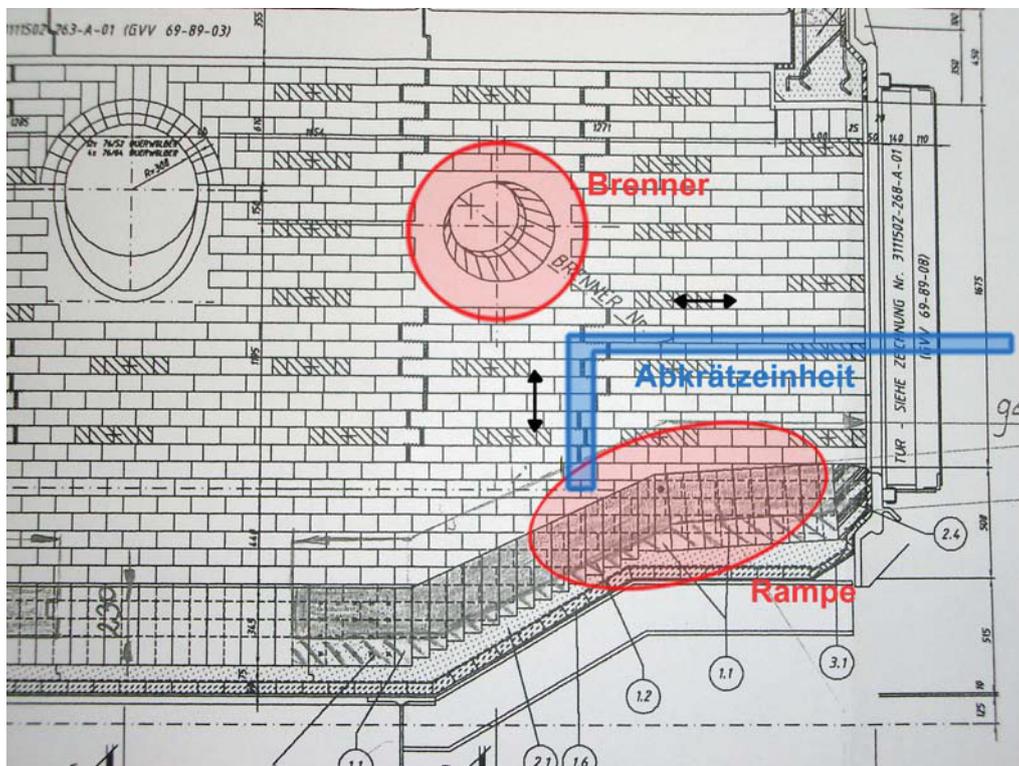


Abbildung 1: Skizze des Ofens

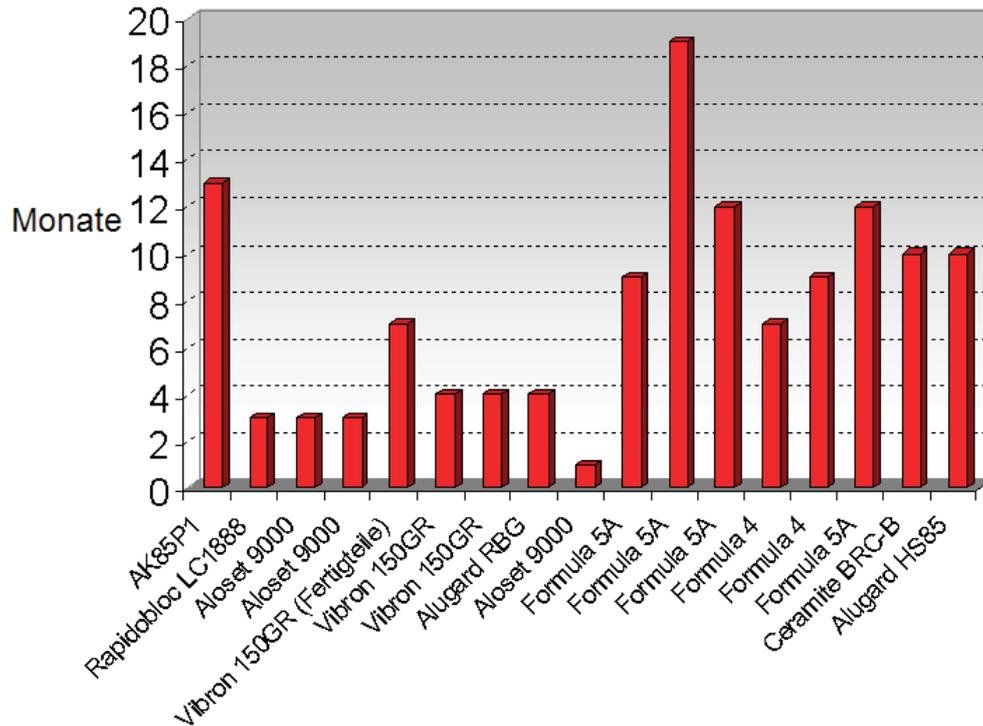


Abbildung 2: Haltbarkeit der bisher eingesetzten feuerfesten Erzeugnisse

Die bisher verwendeten Materialien (siehe Tabelle 1) sind nichtbasierte ungeformte feuerfeste Produkte, die einen hohen Al_2O_3 -Gehalt besitzen, aufgrund ihrer hohen chemischen Beständigkeit und der hohen Festigkeit werden diese häufig in Aluminiumöfen eingesetzt. Die besten Ergebnisse wurden in der Vergangenheit mit Formula 5A der Firma *Stellar* erreicht. Das größere Problem im Bezug auf den Verschleiß stellt die Abkrätzeinheit dar. Eine Stahlkonstruktion mit einem Gewicht von 5075 kg wird über die feuerfeste Auskleidung gezogen, um die Aluminiumkrätze vom flüssigen Metall abzuziehen. Durch den direkt auf die Rampe gerichteten Brenner entstehen hohe Temperaturen, die sich auf die mechanische Abriebfestigkeit und auf den Korrosionsschutz der feuerfesten Produkte negativ auswirken. Hohe Temperaturen führen zum Zerfall der Anti-Benetzungsmittel, es entstehen Gase, welche zu einer Erhöhung der Porosität und einer Zunahme der Korundbildung führen. Weiters wirkt das entstehende BaO und CaO als starke Flussmittel, sodass es zu Gefügeveränderungen und Abplatzungen in der feuerfesten Zustellung kommt. Aus diesen Gründen resultieren die geringen Haltbarkeiten der feuerfesten Massen.

Tabelle 1: Rampenmassen im Ofen 3

Ofenreparatur	Material	Al ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	Lieferant
Rampenerneuerung Türsturzerneuerung	AK 85P1	81,0	10,0	1,4	Gouda
Ofenbrücke erneuern	Rapidobloc LC 1888	90,0 - 95,0	1,5 - 3,0	0,2 - 0,3	Lafarge
Heißreparatur Ofenrampe (rechts)	Aloset 9000	?	?	?	Lafarge
Heißreparatur Ofenrampe (mitte)	Aloset 9000	?	?	?	Lafarge
Rampenerneuerung	Vibron 150 GR (Fertigteile)	73,0	11,0	1,2	Gouda
Rampenreparatur	Vibron 150 GR	73,0	11,0	1,2	Gouda
Rampenreparatur	Vibron 150 GR	73,0	11,0	1,2	Gouda
Rampensanierung	Alugard RBG	37,0	32,0	0,6	Gasser
Heißreparatur	Aloset 9000	?	?	?	Lafarge
Rampensanierung	Formula 5A	85,6	2,1	1,0	Stellar
Rampenreparatur	Formula 5A	85,6	2,1	1,0	Stellar
Rampenreparatur	Formula 5A	85,6	2,1	1,0	Stellar
Rampenreparatur	Formula 5A	86,3	2,6	0,9	Stellar
Rampenerneuerung	Formula 4	86,3	2,6	0,9	Stellar
Rampenreparatur	Formula 5A	85,6	2,1	1,0	Stellar
Rampenerneuerung	Ceramite BRC-B	50,0 - 70,0	5,0 - 15,0	-	Elkem
Rampenerneuerung	Alugard HS85	85,8	6,4	1,2	Gasser

3 Aluminium

Die allgemeinen Grundlagen des Aluminiums, wie die Herstellung, das Vorkommen und die Eigenschaften sind der einschlägigen Fachliteratur zu entnehmen.

3.1 Terminologie in der Aluminiumindustrie

Reinstaluminium ist unmittelbar aus Aluminium oder Rücklaufaluminium metallurgisch gewonnenes, darauf von den Hütten in Formen gegossenes Metall ^[1].

Hüttenaluminium ist das aus Tonerde durch Schmelzflusselektrolyse erzeugte Aluminium („Primäraluminium“).

Recyceltes Aluminium wird aus sekundären Vorstoffen, d.h. Alt- und/oder Neuschrotten, Spänen und Krätzen hergestellt („Sekundäraluminium“).

Als Refiner werden Unternehmen bezeichnet, die aus Alt- und Neuschrotten Gusslegierungen und Desoxidationsaluminium herstellen und in Form von Masseln und Flüssigaluminium ausliefern.

Remelter sind jene Betriebe, die aus meist sortenreinen Knetlegierungsschrotten wieder Knetlegierungen herstellen und in Form von Walzbarren und Pressbolzen ausliefern.

Altschrotte sind Produkte aus Aluminium, die nach ihrer Nutzung als sekundärer Rohstoff in die Recyclingsysteme gelangen.

Produktionsschrotte (Neuschrott) fallen bei der Verarbeitung von Halbzeug sortenrein in Form von Bearbeitungsresten, z.B. Spänen, Stanzresten, Abschnitten, Angüssen, Speisern und Ausschuss an.

Als Kreislaufschrott wird jener Produktionsschrott bezeichnet, der bei der Verarbeitung von Aluminium in einem Betrieb entsteht und in diesem sortenrein erfasst, erneut eingeschmolzen und verarbeitet wird ^[2].

3.2 Sekundäraluminium

Aluminium ist ein ausgezeichneter Recyclingwerkstoff, wofür es mehrere Gründe gibt: Der Wertverlust ist dank der im Aluminium gespeicherten Energie äußerst gering. Dies zeigen die hohen Erlöse, die sich mit Aluminiumschrotte erzielen lassen. Zur Sekundäraufbereitung ist unter gewissen Voraussetzungen im Vergleich zur Primärerzeugung bis zu 95 % weniger Energie aufzuwenden. In vielen Anwendungsbereichen bleibt Aluminium bereits in einem geschlossenen Materialkreislauf, es findet echtes Recycling statt. Das heißt: Aus einem Gussteil wird wieder ein Gussteil, aus einer Aluminium-Getränkedose wieder Flüssigmetall zur Herstellung neuer Getränkedosen.

Kann nicht dasselbe Produkt erzeugt werden, ist die neue Anwendung ebenso hochwertig wie die vorangegangene, ein Vorteil, den längst nicht alle Werkstoffe haben. Metalle sind in diesem Zusammenhang anderen Werkstoffen, wie z.B. den Polymeren, deutlich überlegen. Unter ihnen nimmt Aluminium eine Spitzenstellung ein, da bereits ausgereifte Technologien zur Verfügung stehen. Der hohe Materialwert der Aluminiumschrotte trägt zur Deckung der Logistik- und Aufbereitungskosten bei, so dass Erfassungs- und Verwertungssysteme subventionsfrei arbeiten. Für die Wiederverwertung von Aluminiumschrotte gibt es keine mengenmäßige Beschränkung. Sie können zu 100 % immer wieder in den Stoffkreislauf gebracht werden. Effektive Metall-Filtrationssysteme gewährleisten, dass das Sekundäraluminium dem Primäraluminium qualitativ gleichwertig ist.

In der Aluminiumindustrie wird zwischen Guss- und Knetlegierungen unterschieden: Gusslegierungen lassen sich nur gießen und werden danach nicht mehr verformt. Gewünschte Legierungselemente in den Schrotten sind hier vor allem Magnesium, Silizium und Kupfer. Knetlegierungen sind dagegen für die Umformung etwa für das Strangpressen, Walzen oder Schmieden bestimmt und müssen demnach gut umformbar sein. Wichtige Elemente sind dabei Magnesium, Silizium, Kupfer, Mangan, Zink und Eisen ^[2].

Die weltweite Produktion von Aluminium liegt im Jahr 2005 bei 31,2 Millionen Tonnen, der Anteil von Sekundäraluminium umfasst 25 % der jährlichen Gesamtproduktion, in den meisten Industriestaaten mit steigender Tendenz (siehe Abbildung 3).

Die Primäraluminiumproduktion in Deutschland erreichte 1984 ihren Höchstwert. Von 1985 bis 1988 blieb sie weitgehend stabil, um anschließend rapide zurückzugehen. Erst nach 1994 deutete sich eine leichte Erholung an, wobei die Energiepolitik dazu führte, dass 2005 und 2006 Elektrolysen schließen mussten. Der Verbrauch an Primäraluminium ist vom Trend her steigend. In der Sekundäraluminiumproduktion fand seit 1988 eine Verlangsamung des Produktionswachstums statt. Produktionsrückgänge waren zwischen 1991 und 1993 sowie

1994 und 1995 zu verzeichnen. Die Nachfrage verminderte sich ebenfalls zwischen 1991 und 1993. Daneben zeigen sich in beiden Industriesparten konjunkturelle Einbrüche im Zusammenhang mit den Ölpreisschocks der 70er Jahre. Konjunkturelle Einflüsse auf Produktionsrückgänge waren zu Beginn der 90er Jahre relevant. Von besonderer Bedeutung für die Aluminiumindustrie ist die Entwicklung der Sektoren Verkehr, insbesondere Automobilbau, Bau, Maschinenbau, Metalle, Elektrotechnik und Verpackungen.

Vor allem die steigenden Energiepreise werden als Grund dafür angeführt, dass die Primärerzeugung ins Ausland verlagert wird, dies gilt auch für Europa allgemein. Zu den Auslagerungsländern gehören Australien, Brasilien und Kanada. Weitere Staaten mit einer starken Zunahme der Aluminiumproduktion waren etwa Venezuela, Bahrain, Indien und Norwegen.

Da technische Entwicklungen es mittlerweile erlauben Sekundärlegierungen teilweise in Qualitäten der Primärlegierungen herzustellen, wird angenommen, dass Sekundäraluminium mehr und mehr in Anwendungsbereiche vordringen wird, die bisher dem Primäraluminium vorbehalten waren. Ein vollständiger Ersatz des Primäraluminiums durch Sekundäraluminium ist jedoch nicht möglich.

Da Sekundäraluminium in seiner Umweltbilanz hinsichtlich der Indikatoren Energie- und Wasserverbrauch, Abfallaufkommen und Emissionen mengenmäßig deutlich günstiger abschneidet als Primäraluminium, darüber hinaus zur Ressourcenschonung beiträgt, Eingriffe in die Natur durch Erzbergbau vermindert und die Entsorgungsseite (Deponie) entlastet, kann die Umstrukturierung hin zur Sekundärindustrie zumindest als relativ umweltentlastend gewertet werden.

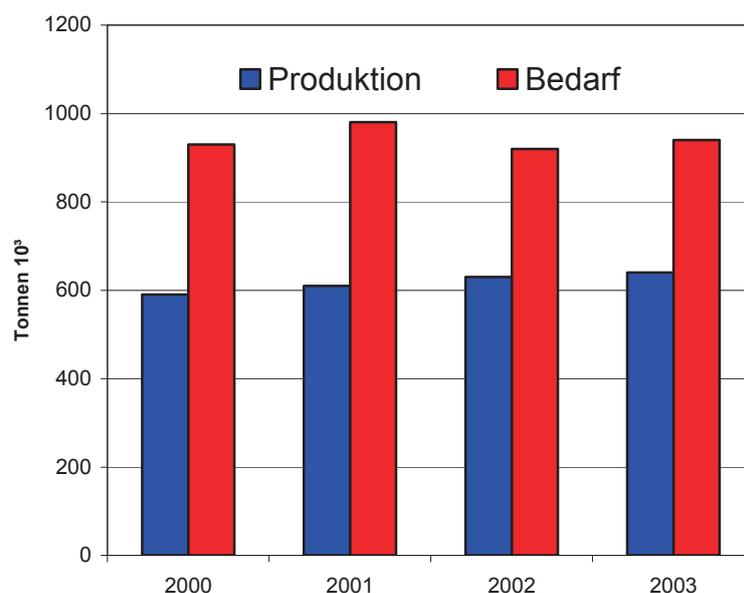


Abbildung 3: Produktion und Bedarf von Sekundäraluminium in Deutschland

Aluminiumschrotte sind Sekundärrohstoffe, die bei der Verwertung aluminiumhaltiger Produkte wie z.B. dem Automobil, Flugzeuge, aus der Bauwirtschaft oder bei der Produktion und Verarbeitung von Aluminium anfallen. Entsprechend ihrer Beschaffenheit und ihrer chemischen Zusammensetzung lassen sich die aluminiumhaltigen Sekundärrohstoffe nach folgenden Kategorien unterscheiden ^[2].

- Schrott aus:
 - ⇒ Unlegiertem Aluminium
 - ⇒ Draht und Kabel
 - ⇒ Einer einzigen Knetlegierung
 - ⇒ Zwei oder mehr Knetlegierungen der gleichen Legierungsgruppe
 - ⇒ Zwei oder mehr Knetlegierungen
 - ⇒ Gussstücken
 - ⇒ Nichteisenmetallen von Schreddern für Aluminiumseparationsverfahren
 - ⇒ Aluminiumseparationsverfahren von geschredderten Nichteisenmaterialien
 - ⇒ Gebrauchten Aluminiumgetränkedosen
 - ⇒ Aluminium- / Kupfer-Kühlern
- Späne aus einer einzigen Legierung
- Gemischte Späne aus zwei oder mehr Legierungen
- Schrott aus gebrauchten Aluminiumverpackungen
- Von Beschichtung befreiter Aluminiumschrott aus gebrauchten Aluminiumverpackungen
- Schrott aus Krätzen

Eine einwandfreie Aufbereitung von Schrott für Knetlegierungen kann nur in besonders eingerichteten Schmelzhütten erfolgen. In der Regel wird heute eine moderne Shreddertechnologie mit nachfolgender Nassstrenntechnik angewendet. Nach grober Sortierung oder Zerkleinerung und eventueller Schwimm-Sink-Scheidung erfolgt das Einschmelzen des Aluminiumschrottes. Anhaftende Metalle wie z.B. Eisen, Nickel oder Kupfer, deren Schmelzpunkte höher liegen als die von Aluminium, können durch Ausschmelzen des Aluminiums in einem Herdofen auf der Schmelzbrücke entfernt werden. Verbreitet ist derzeit auch das Schmelzen im Drehtrommelofen (siehe 3.4.1) unter einer Salzdecke.

Die Gusslegierungserzeugung aus Schrott ist im Allgemeinen auf die Entfernung störend hoher Magnesiumgehalte durch Einleiten von Chlorgas in das geschmolzene Metall beschränkt. Die Spülgasbehandlung mit Chlor und Stickstoff dient auch der Schmelzereinigung und bewirkt eine Entfernung von störenden Gasen wie Wasserstoff.

Allgemeine Praxis ist jedoch, unerwünscht hohe Fremdmittelgehalte durch Verdünnen der Schmelze mit Reinaluminium abzusenken ^[7].

Die Verwendung von Vorlegierungen erleichtert oder ermöglicht erst das Einbringen von Legierungselementen wie z.B. Oxide oder Boride, besonders solcher mit hohem Schmelzpunkt. Der Einsatz dieser Legierungen ermöglicht eine exakte Dosierung und Verteilung der Zusatzstoffe. Aluminium-Vorlegierungen sind genormt nach DIN EN 575. Lieferformen sind Masseln, Drähte, Kerbplatten und Bruchstücke.

3.3 Sekundäraluminiumlegierungen

Sekundäraluminiumlegierungen (siehe Tabelle 27) haben dieselbe Qualität wie gleichartige Legierungen aus Primäraluminium. Die Mischungen gehören zur Al-Si-Gruppe und Al-Mg-Gruppe, der Konzentrationsbereich für das Hauptlegierungselement reicht bis zu 20 %. Diese liegen daher im untereutektischen, eutektischen und übereutektischen Bereich des Al-Si-Zweistoffsystems.

3.4 Schmelzöfen in der Sekundäraluminiumindustrie

Kriterien zur Wahl der optimal geeigneten Schmelzöfen sind die Verunreinigung der Schrotte durch Oxide, anhaftendes Eisen und organisches Fremdmaterial, der Magnesiumgehalt, das Verhältnis Oberfläche zur Masse der Schrottteilchen sowie das jeweils dünnste Wandstärkemaß der Schrottteilchen.

Bei der Auswahl der Schmelzöfen sind auch technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Das Schmelzaggregat muss einen hohen thermischen Wirkungsgrad besitzen, da von ihm der Wirtschaftlichkeit abhängt. Bei der Ofenkonstruktion ist ebenso auf die Beschickung zu achten, denn die Bedienungsöffnungen müssen so angeordnet sein, dass diese in kürzester Zeit erfolgen kann.

Ausgehend von einer qualitativen Zuordnung leitet Abbildung 4 quantifizierbare Kriterien für die Zuordnung von Schrotten bzw. Abfällen/Reststoffen zu den einzelnen Schmelzaggregaten ab.

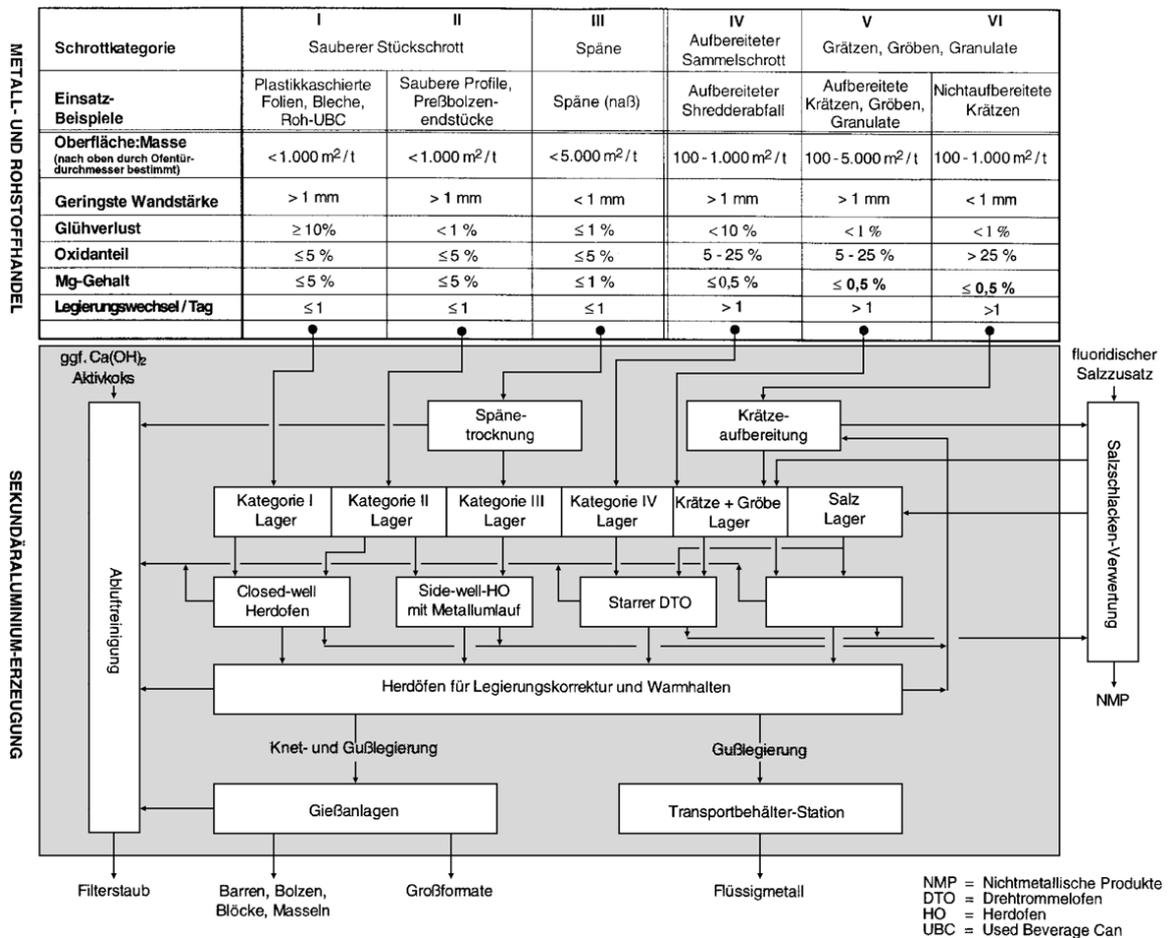


Abbildung 4: Sekundäraluminiumerzeugung zur Verarbeitung aller Schrottkategorien

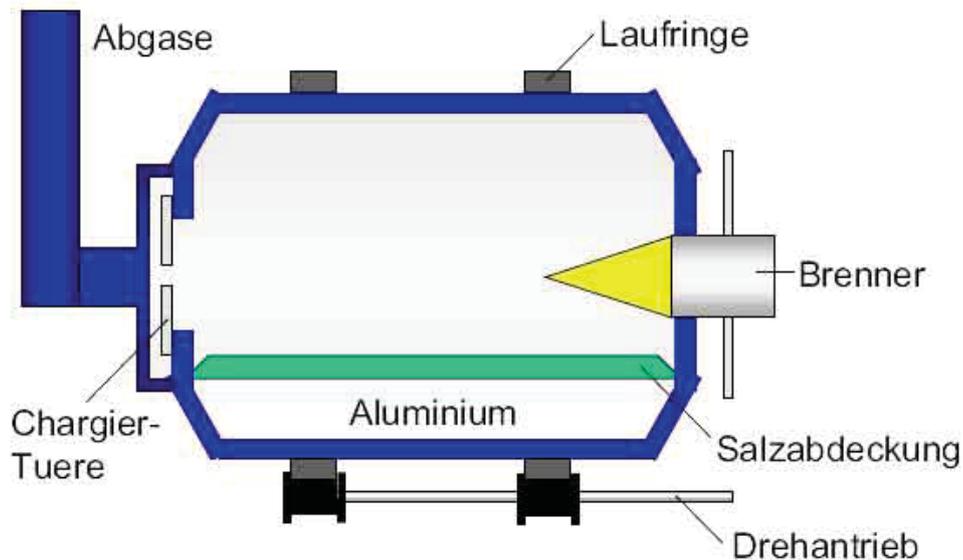
Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Schrotte mit oder ohne Salz einzuschmelzen. Im normalen Schmelzbetrieb ohne Salzabdeckung sind Metallverluste durch Oxidation der Oberfläche der heißen Aluminiumschmelze mittels Sauerstoff. Die Salzabdeckung einer Aluminiumschmelze erfüllt verschiedene Funktionen. Dies sind die Verhinderung der Oxidation des Aluminiums durch den Luftsauerstoff sowie die Gewährleistung eines guten Wärmeübergangs zwischen Brenner und Schmelze. Außerdem dient die Salzschieme der Aufnahme von Verunreinigungen, indem es die mit den Schrotten eingebrachten Unreinheiten aufnimmt. Als Schmelzaggregate finden die salzbetriebenen Trommelöfen, die starr oder kippar ausgeführt sind, salzlos betriebene Herdöfen oder Induktionsöfen Verwendung. Je höher der Oxidanteil in einem Schrott ist, desto eher wird dieser in einem Drehtrommelofen eingeschmolzen. Dadurch kommt es auch zu einem erhöhten Anfall an Salzschieme. Da das in der Vergangenheit praktizierte Deponieren von Salzschiemen in Österreich und Deutschland aus Gründen des Umweltschutzes nicht mehr zulässig ist, wird das Salz aus der Salzschieme wiedergewonnen. Zwei der wichtigsten Verfahren sind das REKAL- und SEGL-Aufbereitung.

3.4.1 Drehtrommelöfen

In Trommelöfen (Abbildung 5) können Aluminiumabfälle jeder Beschaffenheit sowie Aluminiummasseln eingeschmolzen werden. Auf Grund der besonderen Arbeitsweise des Ofens ist er für den Einsatz von Spänen und kleinstückigem Material besonders geeignet. In Drehtrommelöfen wird, wie der Name besagt, das Salzbad, hauptsächlich Natrium- und Kaliumchlorid durch Rotation mit dem geschmolzenen Metall vermischt. Beim Einschmelzen wird die entstehende Al_2O_3 -Schicht durch das Salz aufgenommen. Die Rotationsgeschwindigkeit kann bis zu 8 Umdrehungen pro Minute betragen. Zwischen den beiden Substanzen gehen Verunreinigungen aus dem geschmolzenen Metall in das Salzbad über, das anschließend als Salzschlacke aus dem Ofen abgelassen wird. Bei der Gewinnung einer Tonne Aluminium können bis zu 500 kg Salzschlacke anfallen. Die Beheizung erfolgt durch gasförmige oder flüssige Brennstoffe. Der Brenner ist an der Stirnseite angeordnet, bei umgekehrter Führung befinden sich die Flamme und die Abgasleitung auf der gleichen Seite. Bei dieser Ausführung können die Ofenlängen kürzer gehalten werden. Die Beschickung des Ofens kann über die Brenner- oder Abzugsseite erfolgen, die Abstichöffnungen für Metall und Schlacke lassen sich an der Stirnwand oder am Ofenmantel anbringen. Meist werden die Schlacke an der Stirnseite und das Metall am Ofenmantel entnommen ^[10].

Die Wärmeübertragung auf das Schmelzgut erfolgt durch Strahlung, weniger durch Konvektion.

- Für Schrott mit hoher Verunreinigung
- Rotiert langsam um waagrechte Achse
- Bis zu 60 t Fassungsvermögen
- Erzeugt Aluminium mit bester Qualität
- Unter Salzdecke (NaCl/KCl-Gemisch)
- Wirkt gegen Oxidation
- Reinigt Schmelze
- Pro Tonne Al ca. 500 kg Salzschlacke ^[3]

Abbildung 5: Drehtrommelofen ^[3]

3.4.2 Induktionsofen

Der Induktionstiegelofen stellt einen Transformator dar, dessen Primärspule an die Netzfrequenz angeschlossen ist und das Schmelzgut eine kurzgeschlossene Sekundärspule bildet. Es kommt zur Induktion von Wirbelströmen und dadurch zu einer Erwärmung des Schmelzgutes. Durch elektrodynamische Kräfte wird eine Badbewegung hervorgerufen, welche die festen Bestandteile des Schrottes sofort mit flüssigem Metall umspült, wodurch der Abbrandverlust herabgesetzt wird. Außerdem bewirkt die Badbewegung eine Homogenisierung der Schmelze und ermöglicht die Zugabe von Legierungselementen. Zum Einschmelzen von Aluminiumschrott ist der Netzfrequenz-Induktions-Tiegelofen besonders gut geeignet. Allerdings muss der Ofen mit grobstückigem Metall angefahren werden ^[10].

Bei einer Frequenz von 50 Hz können die Schrottpartikel eine Mindestgröße von 100 mm aufweisen, um eine entsprechende Erwärmung zu gewährleisten. Ein Induktionsrinnenofen ist in Abbildung 6 dargestellt ^[4].

- Außen angelegter Wechselstrom
- Durch Wirbelstrom aufgeheizt
- Gute Durchmischung
- Bis zu 12 Tonnen Fassungsvermögen
- Geringe Oxidation
- Hohe Schmelzleistung



Abbildung 6: Induktionsofen ^[5]

3.4.3 Herdöfen

In Herdöfen (Abbildung 7) wird vorwiegend Schrott eingesetzt, die Befeuung erfolgt durch Öl- oder Gasbrenner. Wannenöfen werden für eine Kapazität von 0,5 - 80 t gebaut. Wegen der Größe sind viele dieser Öfen nicht feststehend, sondern kippbar, um die Entleerung über eine Gießrinne zu erleichtern ^[7].

- Flache Wannen (auch „Wannenöfen“)
- Oft kippbar
- Große Fläche von oben und der Seite mit Flamme beheizt
- Große Oxidation
- Hoher Durchsatz

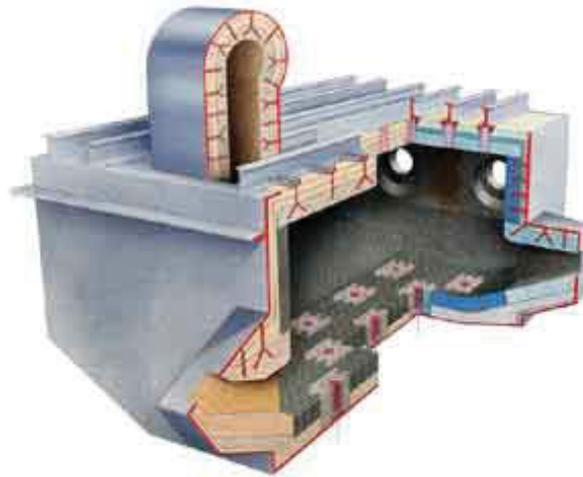
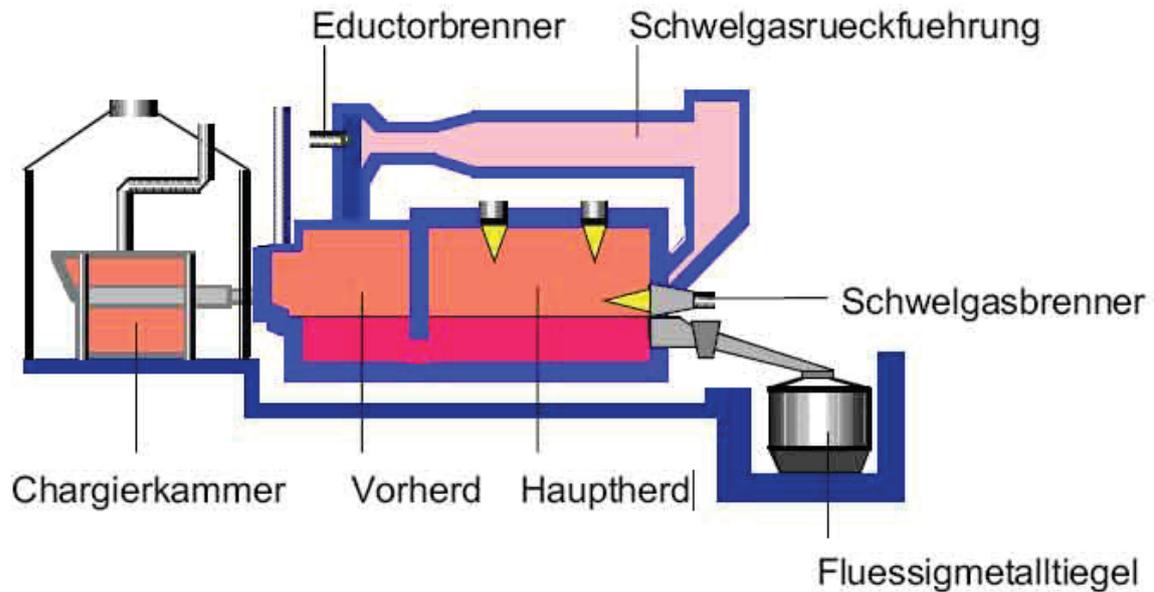


Abbildung 7: Kippbarer Schmelz-/Warmhalteofen ^[5]

3.4.4 Zweikammerverfahren

Wie aus der in Abbildung 8 gezeigten Skizze ersichtlich, gestattet die an den Ofen seitlich angebaute Wanne den Einsatz von Schrotten jeder Beschaffenheit. Das Metall wird in dem Hauptherd aufgeheizt, durch Umpumpen zirkuliert die Schmelze mit hoher Geschwindigkeit durch den Vorherd, wobei das feste Gut im Vorherd mit großer Schmelzleistung unter Luftabschluss bzw. Luftmangel verflüssigt wird und die organischen Substanzen zersetzt werden ^[11].

- Geeignet für lackierte, verölte und dünnwandige Schrotte
- Mit Vorherd und Schmelzofen (Hauptherd)
- Mögliche Nutzung des Energieinhaltes der Schwelgase für Schmelzprozess und Chargenvorwärmung
- Geringe Metallverluste, da Einschmelzen nahezu unter Luftabschluss
- Vollständige Erfassung und Reinigung aller im System anfallenden Gase ^[3]

Abbildung 8: Zweikammerofen ^[3]

3.4.5 Pyrolyse / Blankglühen / Schmelzen

Die Pyrolyse (Abbildung 9) ist ein Prozess, bei dem organisches Material unter Luftabschluss bzw. Luftmangel thermisch - hier zwischen 500 und 600 °C - zersetzt wird, wobei Pyrolysegase und Pyrolysekoks entstehen und das Aluminium in blanker Form anfällt. Als Pyrolysereaktor dient ein indirekt beheizter Drehrohrofen. Die für die Beheizung des Drehrohrs nötige Wärme wird anlagenintern durch Verbrennung der Pyrolysegase erzeugt. Als optimaler Anlageninput erwies sich ein Mix, welcher zu rund 60 % aus den „flexible packaging“ besteht. Für dieses, vorwiegend aus beschichteten Aluminiumfolien (Papier, Pappe, PE) bestehende Material, existiert heute kein anderes Aufbereitungsverfahren, welches direkt zum Flüssigmetall führt. Das pyrolytisch abgetrennte, vom Pyrokoks abgesiebte, anschließend blankgeglühte und von Störmetallen befreite Aluminium wird in spezielle Schmelzöfen "Vortex" eingerührt. Hieraus gelangt das Metall entweder direkt flüssig in die Gießerei oder wird in Massel abgegossen. Das erzeugte Sekundäraluminium hat hervorragende Qualität und dient u. a. als Rohstoff für innovative hochwertige Leichtmetall-Legierungen ^[8].

- Ideal für Verbundwerkstoffe
- Pyrolyse und Verbrennung sind getrennt
- Nutzung des Energieinhaltes der Pyrolysegase
- Geringe Metallverluste, da unter Luftabschluss
- Vollständige Erfassung und Reinigung aller im System anfallenden Gase
- 10 % teurer als herkömmliche Verfahren ^[3]

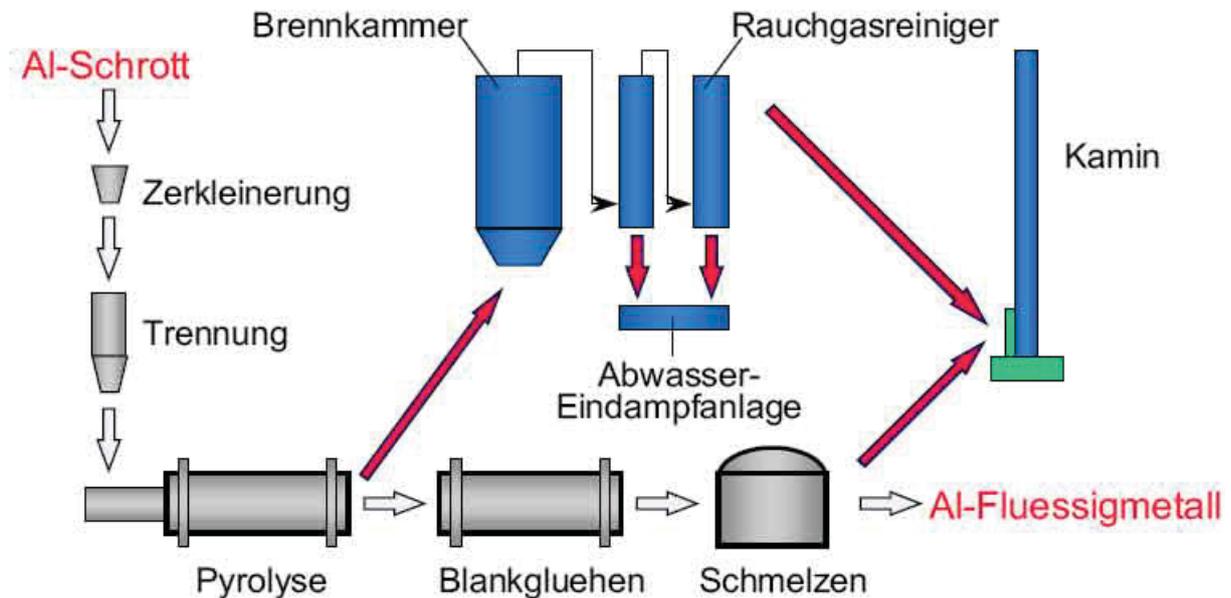


Abbildung 9: Pyrolyse / Blankgluehen / Schmelzen ^[3]

3.4.6 Schachtöfen

Es wurde in der Vergangenheit eine Reihe zum Einschmelzen von Schrotten besonders geeigneter Schachtöfen entwickelt.

Grundsätzliche Überlegungen zur Anwendung von Schachtöfen als Einschmelzöfen zielen auf die Ausnutzung der Abgasenthalpie zur Vorwärmung des Einsatzmaterials im Ofenschacht ab. Aufgrund ihrer robusten und einfachen Konstruktion ohne aufwendige Wärmerückgewinnungstechnik sind sie häufig in Formgießereien anzutreffen, wo sie zum Schmelzen von Gießereirücklauf eingesetzt werden.

Diese Herdschachtöfen werden als kombinierter Schmelz-, Warmhalte- und Vergießofen eingesetzt und können kippbar ausgeführt werden. Auch stationäre Bauformen mit Abstich sind in Gebrauch. Bei diesem erfolgt die Chargierung stückiger Schrotte in den seitlich am ovalen Herd angeordneten Schmelzschacht (Abbildung 10). In den Herd selbst können auch feinstückige Materialien wie z.B. trockene Späne, chargiert werden. Beim Durchtritt der

heißen Gase durch den Schacht wird der Schrott getrocknet und vorgeheizt. Die vollständige Entleerung des Ofens erfolgt durch Kippen des gesamten Ofens um die Gießschnauze oder durch Abstechen.

Für die Beheizung werden zwei Brenner verwendet. Die auf der Schmelzbrücke aufstehende Schrottsäule wird durch einen geneigt in der Seitenwand angebrachten Schmelzbrenner abgeschmolzen und läuft in den Herd ab. Das im Herd befindliche Schmelzbad wird durch den Warmhaltebrenner auf Temperatur gehalten ^[21].

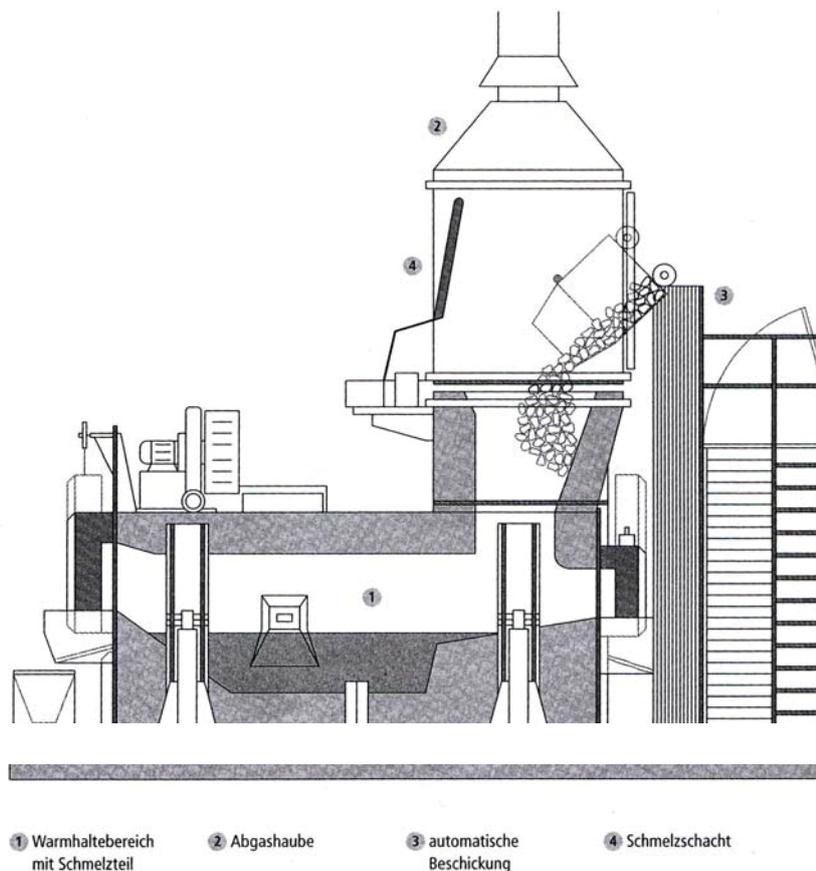


Abbildung 10: Schachtschmelz- und Warmhalteofen/Bauart STRIKO ^[21]

4 Feuerfeste Werkstoffe

Nach internationaler Festlegung sind feuerfeste Erzeugnisse nichtmetallische keramische Werkstoffe, einschließlich solcher, die Anteile an Metallen enthalten, die eine Feuerfestigkeit, d.h. einen Kegelfallpunkt(-temperatur) von ≥ 1500 °C haben. Die Ermittlung des Kegelfallpunktes erfolgt an kleinen, leicht schräg stehenden pyramidenförmigen Probekörpern, die zusammen mit keramischen Standardkegeln mit bekannter Falltemperatur erhitzt werden.

Die feuerfesten Werkstoffe haben zumeist keinen eindeutigen Schmelzpunkt, sondern schmelzen bzw. erweichen innerhalb eines mehr oder weniger engen Temperaturbereichs. Anstelle des Schmelzpunktes wird deshalb ein beim Erweichen feststellbarer Punkt durch die Prüfung des Kegelfallpunktes bestimmt.

Einige Erzeugnisse der Feuerfestindustrie entsprechen aufgrund ihres Kegelfallpunktes nicht der Definition „feuerfest“, sie erfüllen aber andere spezielle Merkmale feuerfester Werkstoffe und werden in Klassifikationen von feuerfesten Werkstoffen miterfasst und üblicherweise als feuerfeste Erzeugnisse bezeichnet.

Im allgemeinen Sprachgebrauch werden als feuerfest solche Erzeugnisse bezeichnet, die bei hohen Temperaturen (~ 600 °C bis 2000 °C) vor allem in Anlagen der Grundstoffindustrie zum Einsatz kommen ^[9].

Es werden vier Arten von feuerfesten Erzeugnissen unterschieden:

- Geformte Erzeugnisse (Steine)
- Ungeformte Erzeugnisse (Bau- und Reparaturmassen, Verfestigungsmittel,...)
- Funktionalprodukte (Konstruktionselemente)
- Wärmedämmende Erzeugnisse

4.2 Dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse

Die Gesamtporosität der dichten geformten feuerfesten Produkte liegt unter 45 %. Nachfolgend werden die wichtigsten Erzeugnisse aufgeführt.

4.2.1 Nichtbasische geformte Erzeugnisse

Diese Gruppe umfasst die Werkstoffe der $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Reihe und andere nach ihrem chemischen Reaktionsverhalten nicht näher eingruppierte Werkstoffe, wie SiC- und Kohlenstoffprodukte.

4.2.1.1 Silikasteine

Silikasteine bestehen chemisch zu über 93 Gew.-% aus SiO_2 (Tabelle 30 im Anhang). In der Regel liegt der SiO_2 -Gehalt bei 95 bis 97 Gew.-%. Nach ASTM C 416-84 sind folgende Grenzwerte festgelegt:

Al_2O_3	< 53 %
Fe_2O_3	< 2,5 %
TiO_2	< 0,2 %
CaO	< 4 %

Die weitere Unterteilung lehnt sich sehr stark an den jeweiligen Verwendungszweck an.

Von den physikalischen Eigenschaften (Tabelle 31 im Anhang) ist bei Silikasteinen primär das Wärmedehnungsverhalten für die Praxis wichtig. Der Verlauf der reversiblen Umwandlung wird durch die drei SiO_2 -Modifikationen geprägt. Beim Aufheizen dehnen sich die Steine stark aus, bei 800 bis 1000 °C ist das Maximum der thermischen Dehnung mit etwa 12 bis 15 mm/m erreicht.

Oberhalb ca. 600 °C besitzen gut umgewandelte Silikasteine aufgrund der geringen Änderung der Wärmedehnung eine außerordentlich gute Temperaturwechselbeständigkeit (TWB). Unter 500 °C sind sie jedoch extrem temperaturwechselempfindlich, weil in diesem Temperaturbereich der Gradient der thermischen Dehnung am höchsten ist.

Hochwertige Steine können im Einsatz unter günstigen Bedingungen im Temperaturbereich bis nahe 1700 °C eingesetzt werden.

Die Korrosionsbeständigkeit gegenüber sauren Schmelzen ist gut. Alkalihaltige Gase und Dämpfe können unterhalb von 1470 °C durch Bildung von Alkalisilikatschmelzen eine intensive Korrosion verursachen.

Wichtige Anwendungsgebiete für Silikasteine sind: Koks- und Gasöfen, Oberbau von Glasschmelzöfen, Winderhitzer und Deckel von Lichtbogenöfen ^[9].

4.2.1.2 Schamottesteine

Schamottesteine bestehen im Wesentlichen aus den Oxidkomponenten SiO_2 und Al_2O_3 . Wobei der SiO_2 -Gehalt zwischen 50 bis 80 % und der Al_2O_3 -Gehalt zwischen 10 bis 45 % liegt (Tabelle 32 im Anhang). Diese Steine werden nach ihrem Al_2O_3 -Gehalt unterschieden. Weitere Unterteilungsmerkmale sind das Formgebungsverhalten und der Anwendungszweck mit spezifischen Eigenschaftsgrenzwerten.

Schamottesteine enthalten:

Fe_2O_3	< 3 %	(eisenarme Sorten bis unter 1 %)
TiO_2	< 3 %	
$\text{CaO} + \text{MgO}$	< 4 %	
$\text{Na} + \text{K}_2\text{O}$	< 3,5 %	

Durch Einsatz von flussmittelarmen, insbesondere alkaliarmen Rohstoffen kann bei einem Schamottestein mit 40 % Al_2O_3 der Anteil der Glasphase auf 20 % gesenkt werden, bei etwa 55 % Mullit ($\text{Al}_9\text{Si}_3\text{O}_{19}$) und 20 - 25 % Cristobalit (SiO_2).

Der Anteil der Glasphase und deren chemischen Zusammensetzung und die Ausbildung des Mullites bestimmen das Erweichungsverhalten. Die Glasphase erweicht bei knapp 1000 °C, wobei das Erweichungsintervall wegen der hohen Viskosität des Glases groß ist. Somit bestimmt die Glasphase wesentlich die Eigenschaftswerte.

Hauptanwendungsgebiete sind: Feuerungsbau, Hochofen/Winderhitzer, Stahlwerksgießereien, Ofenanlagen der Nichteisenmetallindustrie, Koks- und Gasöfen, Glasindustrie, Floatglasherstellung und in der Zementindustrie ^[9].

4.2.1.3 Aluminareiche Steine

Aluminareiche Steine haben einen Al_2O_3 -Gehalt von mindestens 45 % bis über 99 % (Tabelle 34 im Anhang). Die Unterteilung erfolgt wie bei den Schamottesteinen in Gruppen nach dem Al_2O_3 -Gehalt. Die Benennung richtet sich nach den bei der Herstellung der Steine verwendeten Hauptrohstoffen.

Neben den Erzeugnissen aus nur einem aluminareichen Rohstoff mit einem Bindemittel, überwiegend 5 - 15 % Bindeton, kommen auch verschiedene Kombinationen von Rohstoffen, vor allem mit Schamotte, zur Anwendung. Der Zusatz von Schmelzkorund erhöht beispielsweise die Abriebfestigkeit (Tabelle 35 im Anhang) ^[9].

4.2.1.4 Zirkonhaltige Steine

Die zirkonhaltigen Werkstoffe teilen sich ein in die reinen Zirkonsilikatwerkstoffe, die zum Teil auch noch freies Zirkonoxid beinhalten, und die gesinterten Alumina-Zirkonia-Silika (AZS)-Werkstoffe, ein Gemisch aus Zirkon, Mullit und Korund sind (Tabelle 36 im Anhang).

Der Grundrohstoff ist das natürliche Zirkonsilikat (ZrSiO_4). Die theoretische Zusammensetzung des Zirkons ist 67,2 % ZrO_2 und 32,8 % SiO_2 . Zirkon zersetzt sich bei Temperaturen ab 1676 °C in ZrO_2 und SiO_2 . Bei Anwesenheit von Verunreinigungen bzw. Beimengen kann die Zersetzungstemperatur auf ~ 1500 °C absinken. Hier werden beispielsweise Gehalte von $> 0,2$ % Al_2O_3 oder $> 0,1$ % Fe_2O_3 genannt.

Zirkonhaltige Steine zeichnen sich durch hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber einer Vielzahl von aggressiven Medien, speziell sauren Schmelzen aus (Tabelle 37 im Anhang). Sie finden vorwiegend Verwendung in der Glasindustrie und der Stahlindustrie.

Dichte AZS-Werkstoffe werden in Bleiglaswannen und im Wannenboden von Kalk-Natron-Glaswannen eingebaut. Der Einsatz poröser AZS-Steine erfolgt in Kalk-Natron-Glaswannen im Vorderherdbereich und in der Arbeitswanne.

Die dichten Werkstoffe sind wegen ihrer Sprödigkeit sehr vorsichtig zu handhaben. Aufgrund ihrer vergleichsweise niedrigen TWB ist langsames An- und Abtempern unumgänglich.

Bei längerem Einsatz im Kontakt mit alkalireichen Schmelzen und unter hoher Temperaturbelastung zersetzt sich Zirkon und es bilden sich niedrigschmelzende Silikate neben Baddeleyit, eine Modifikation des Zirkoniumdioxids^[9].

4.2.1.5 Kohlenstoff- und Grafitsteine

Das chemische Element Kohlenstoff kommt als amorpher Kohlenstoff mit verschieden starker kristalliner Ordnung und in vier Modifikationen als kettenförmiges Carbon, als Fulleren mit kugelförmiger Käfigstruktur, als Grafit mit Schichtgitter und als kubischer Diamant vor (Tabelle 38 im Anhang).

Der amorphe Kohlenstoff und die grafitische Modifikation werden großtechnisch als Feuerfestmaterial aufgrund ihrer hervorragenden Hochtemperatureigenschaften eingesetzt. Kohlenstoff und Grafit haben keinen Schmelzpunkt, eine konstante bzw. leicht steigende Festigkeit mit steigender Temperatur, gute bis sehr gute elektrische Leitfähigkeit und niedrige Ausdehnungskoeffizienten.

Feuerfeststeine aus Kohlenstoff lassen sich in drei Gruppen unterteilen, in die amorphe, teil- oder semigrafitischen und Grafitsteine.

Die Rohdichten und Festigkeiten der Kohlenstoff- und Grafitsteine sind im Vergleich zu den meisten anderen feuerfesten Werkstoffen niedrig. Die thermische Ausdehnung ist gering, die

Wärmeleitfähigkeit hoch und bei Graphit sehr hoch. Die Temperaturwechselbeständigkeit (TWB) ist normalerweise für die üblichen Anwendungsfälle ausreichend (Tabelle 39).

Anwendungen sind beschränkt durch Anfälligkeit gegen Sauerstoff, Wasserdampf und CO₂ über 400 °C. Unter reduzierender Atmosphäre liegt ihre Anwendungsgrenztemperatur bei ca. 1100 °C, bei anderen Einsätzen bis 3000 °C und höher.

Bei der Herstellung von Aluminium besteht die Auskleidung der Elektrolysewanne aus Kohlenstoffsteinen. Diese Wanne dient nicht nur als Feuerfestzustellung sondern hauptsächlich als kathodische Stromabführung ^[9].

4.3 Ungeformte feuerfeste Werkstoffe

Dieser Begriff ist die richtige Bezeichnung für Werkstoffe, die heute noch häufig als „feuerfeste Massen“ oder generell als „Stampfmassen“ bezeichnet werden. Dabei stellen die Stampfmassen ohnehin nur einen kleinen Teil der ungeformten feuerfesten Erzeugnisse dar. Das Adjektiv „ungeformt“ drückt gleichzeitig den Hauptunterschied zum feuerfesten Stein aus, der ein bestimmtes Format hat, üblicherweise homogen vorgebrannt wurde und trocken oder mit geeignetem Mörtel verlegt werden muss. Demgegenüber können ungeformte feuerfeste Erzeugnisse am Verwendungsort meist hinter Schalungen in größeren Feldern eingebracht und bilden nach der Erhärtung die Ofenauskleidung ^[9].

Die in Normen ISO 1927 und DIN ENV 1402-1 verwendete allgemeine Definition für die ungeformten feuerfesten Erzeugnisse lautet:

„...Gemenge, die aus Zuschlagsstoffen und einem oder mehreren Bindemitteln bestehen, aufbereitet zum direkten Gebrauch, entweder im Anlieferungszustand oder nach Zugabe einer oder mehrerer geeigneter Flüssigkeiten, und die Anforderung in Bezug auf die Feuerfestigkeit nach ISO R 836 erfüllen. Sie können metallische, organische oder keramische Fasern enthalten.

Diese Gemenge sind entweder dicht oder isolierend.

Isolierende Gemenge sind solche, die eine Gesamtporosität von > 45 %, bestimmt nach EN 1094-4 an einem unter festgelegten Bedingungen gebrannten Probekörpern, besitzen.“

4.3.1 Einteilung nach Art der Verwendung

Gemäß ihrem Verwendungszweck werden die ungeformten feuerfesten Erzeugnisse in drei Gruppen unterteilt:

- Werkstoffe für monolithische Konstruktionen
- Werkstoffe für Reparaturen
- Werkstoffe für Verlegen und Verfugen

Während die letzte Gruppe eindeutig die feuerfesten Mörtel zuzuordnen sind, kommt es bei den erstgenannten zu Überschneidungen. Denn Teilreparaturen werden oft mit den gleichen Materialtypen ausgeführt, wie monolithische Konstruktionen.

4.3.2 Einteilung nach Art der Bindung

Es werden vier Bindungsarten unterschieden:

- Hydraulische Bindung mit Erstarren und hydraulischen Erhärten bei Raumtemperatur
- Keramische Bindung mit Erhärtung durch Versinterung beim Brand
- Chemische Bindung (anorganisch oder organisch-anorganisch) mit Erhärtung durch chemische, jedoch nicht hydraulische Reaktion bei Raumtemperatur oder bei einer Temperatur unterhalb der keramischen Bindung
- Organische Bindung mit Verfestigung oder Erhärtung bei Raumtemperatur oder bei höheren Temperaturen.

Selbstverständlich kommen häufig Misch-Bindungen vor, wie zum Beispiel bei einer phosphatgebundenen Stampfmasse (= chemisch-keramisch) oder bei einer hydraulisch erhärtenden Flick- und Reparaturmasse, die neben Tonerdezement nennenswerte Bindetonmengen enthält (= hydraulisch-keramisch). In solchen Fällen ist die Bindungsart anzugeben, die für die Erhärtung die Hauptrolle spielt.

4.3.3 Einteilung nach den Produktarten

Die umfangreiche Produktpalette an ungeformten feuerfesten Erzeugnissen wird wie folgt eingeteilt:

- Feuerbetone
- Formbare feuerfeste Werkstoffe
- Plastische Massen
- Rammassen (Stampfmassen)
- Stichlochmassen
- Spritzmassen
- Feuerfeste Mörtel

4.4 Feuerbetone

Beton ist ein künstlicher Stein, der aus einem Gemisch von Zement, Betonzuschlag (d.h. Granulat) und Wasser, ggf. auch von Betonzusätzen, durch Erhärten des Zementleims entsteht. Als Zemente gelten die genormten hydraulischen Bindemittel.

Konkreter ausgedrückt ist Beton ein Verbund- oder Kompositwerkstoff, der aus den Gemengebestandteilen Granulat und Zusatzstoffen, Mikrofüllstoffen, d.h. Korngemenge der verschiedensten Art und Größe, Bindemittel und Wasser oder anderen Anmach- bzw. Zusatzflüssigkeiten zunächst als formbare Masse, Frischbeton, von bestimmter Konsistenz gemischt wird und sich im Laufe der Zeit durch hydraulische Erhärtung des Zementleims bzw. durch spezifische Erhärtungsvorgänge nichthydraulischer Binder oder durch spezielle hydrothermale Härtung zu einem künstlichen Stein erhärtet.

In den meisten Angaben der Fachliteratur wird Zement mit hydraulischer Erhärtung als einziges und verbindliches Bindemittel für Betone angegeben. Die Verwendung von Zementen ist nun nicht für die Gesamtheit der Feuerbetone typisch, wenngleich in vielen Ländern im Allgemeinen nur die mit Tonerdezement gebundenen Feuerbetone als solche anerkannt und in der Literatur auch als solche beschrieben werden. Bei Betonen und betonartigen Feuerfestmaterialien wird aber inzwischen neben hydraulischen Bindern eine Vielzahl von Bindern mit verschiedenartigen Bindemechanismen angewendet und mit dem Prozess der Betonbindung verknüpft. Nach der einschlägigen Baustoffliteratur und praktischen Gepflogenheiten wird dies durch folgende, vom Bindemittel abgeleitete Begriffe für Betone belegt ^[12]:

Gips	→	Gipsbeton
Hydrothermal erzeugte Phasen	→	Silicabeton
Wasserglas	→	Wasserglasbeton
Bitumen	→	Bitumenbeton
Kunstharz	→	Kunstharz- oder Polymerbeton
Ton	→	Tonbeton

Der Begriff Beton ist also nicht generell an die Verwendung von hydraulischen Zementen gebunden, sondern resultiert aus dem oben beschriebenen Werkstoffbildungsprozess.

Feuerbeton ist ein nach betontypischen Technologien aus einem Gemenge von im allg. wärme- und hitzebeständigen oder feuerfesten Granulaten, ggf. Mikrofüllern, Zusatzmitteln, in der Regel anorganisch-chemischen, hydraulischen, aber auch organischen oder gemischten Bindemitteln und Wasser oder anderen Anmachflüssigkeiten durch Erhärten bei Raumtemperatur bis mäßigen Temperaturen hergestellter dichter poröser, mechanisch fester Werkstoff.

4.4.1 Rohstoffe und Komponenten

Entsprechend der im Abschnitt 4.4 wiedergegebenen Definition werden Feuerbetone und Massen, Gemenge, aus wärme- und hitzebeständigen sowie feuerfesten dichten oder porigen Komponenten, ggf. Zusatzstoffen, Bindemitteln und Anmachflüssigkeiten hergestellt. Das Gemenge ändert seinen Phasenbestand mehr oder weniger deutlich bei der Verfestigung und beim Erhitzen.

Die Charakterisierung der wichtigsten Rohstoffe erfolgt unter dem Gesichtspunkt der chemisch/mineralogischen Zusammensetzung, der physikalischen und technischen Eigenschaften^[12].

4.4.2 Granulate als Zuschlagsstoffe

Als feuerfeste Granulate sind alle die in der Feuerfestindustrie verwendeten natürlichen und künstlichen Roh- und Werkstoffe mit einer Korngröße $> 0,5$ mm geeignet. Feines Material ($< 0,1$ mm) dient als Mikrofüller und wird im Allgemeinen nicht als Zuschlagsstoff bezeichnet.

4.4.2.1 Aluminiumsilikatische Granulate

Wichtigste Vertreter dieser Gruppe von Granulatmaterialien sind die Schamotte und hochtonerdehaltigen Sinterprodukte. Diese werden in vielfältiger Form und als am häufigsten gebrauchte keramische Stoffe für Feuerbetone eingesetzt. Die Verwendung der Rohschamotte erfolgt nach entsprechender Klassierung.

Schamotte ist ein durch Brennen von kaolitischen, feuerfesten tonigen Rohstoffen (Tone, Kaoline) und Sintern hergestellter, z. T. Künstlich mit Al_2O_3 (Korund) angereicherter feuerfester Werkstoff mit wechselnder Zusammensetzung ^[12].

- saure Quarz-Schamotte (10 bis 30 % Al_2O_3)
- normale Schamotte (30 bis 45 % Al_2O_3)
- tonerdereiche Korund-Schamotte (46 bis 56 % Al_2O_3)
- hochtonerdehaltige Korund-Schamotte (56 bis > 75 % Al_2O_3)

Das Gefüge besteht aus Mullit, Quarz, Cristobalit, Korund und Glasphase in wechselnden Mengen. Die Zusammensetzung und einige Kennwerte sind in Tabelle 40 (siehe Anhang) wiedergegeben.

Den Schamottewerkstoffen liegt das System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ zugrunde. Die einzige Verbindung in diesem thermischen System ist Mullit, ein Mischkristall mit den Grenzzusammensetzungen A_3S_2 und A_2S . Sillimanit, Andalusit und Cyanit der Formel $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ kommen nur in der Natur vor.

In den sauren Quarzschamotte, 68 bis 85 % SiO_2 , ist ein Teil des freien SiO_2 als nicht umgewandelter Quarz vorhanden. Nachträgliche Umwandlung des Cristobalit bei Betriebstemperaturen kann unter Umständen zu irreversiblen Wachsen und zu Schäden führen.

Durch Anreicherung mit Korund wird der gesamte Al_2O_3 -Gehalt bis 75 % und höher gesteigert, was bessere thermomechanische Eigenschaften zur Folge hat. Diese Schamotte sind typische Kompositwerkstoffe und daher nicht in das Phasengleichgewicht $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ einzuordnen ^[12].

4.4.2.2 Korund

Ein wichtiges Granulatmaterial für hochfeuerfeste Betone ist Korund ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), aufgrund seines hohen Schmelzpunktes von 2050 °C und seiner großen mechanischen Widerstandsfähigkeit. Verwendet werden drei typische Grundtypen ^[12]:

- Schmelz- oder Elektrokorund
- Tabulartonerde
- Hohlkugelkorund

Die Eigenschaft von Korund- und Zirkoniumdioxid-Granulatwerkstoffen sind in Tabelle 41 (siehe Anhang) zusammengefasst.

Außer $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ treten in den Schmelzkorunden noch silikatische Glasphasen und andere kristalline Phasen, wie Mullit, Aluminate, Spinelle, und $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ auf.

Die Druckerweichung tritt bei etwa 1900 °C ein. Die Kriechgeschwindigkeit von Sinterkorund beträgt bei 1715 °C etwa 10^{-3} h^{-1} . Unter bestimmten Bedingungen kann eine Reaktion mit CaO unter Bildung von CA_6 stattfinden, die zu einer irreversiblen Volumendehnung führt.

Tabulartonerde ist ein hochgesintertes, sehr reines Al_2O_3 mit tafelförmigem Kristallhabitus > 0,1 mm, sie besteht bis zu 95 % aus Korund.

Für wärmedämmende Betone ist Hohlkugelkorund ein ausgezeichnetes gut zu verarbeitendes Material. Die Kugeln sind dünnwandig mit einem Durchmesser von max. 5 mm und bestehen aus $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ^[12].

4.4.2.3 Zirkoniumoxid (Baddeleyit) und -silikat (Zirkon)

Technisches Zirkoniumdioxid enthält > 90 % ZrO_2 . Es ist ein hartes, hochfeuerfestes Material deren chemische Zusammensetzung in Tabelle 41 zu sehen ist. Bei RT tritt es in der monoklinen Form auf, die sich zwischen 1000 und 1200 °C in die tetragonale Form reversibel umwandelt.

Zirkonsilikat ZrSiO_4 fällt als natürliches mineralisches Produkt an. Es zersetzt sich bei 1700 °C in ZrO_2 und SiO_2 unter Schmelzbindung ^[12].

4.4.2.4 Basische oxidische und silikatische Granulate

Zu den basischen Materialien zählen:

- Periklas (> 80 % MgO)
- Sinterdolomit (30 – 38 % MgO)
- Periklas-Chromit (55 – 80 % MgO)
- Chromit-Periklas (25 – 55 % MgO)
- Chromit (> 25 % Cr₂O₃, < 25 % MgO)
- Forsterit (50 – 60 % MgO)

4.4.3 Bindemittel

Im Hinblick auf Feuerbetone sind Bindemittel (Bindebaustoffe, Bindestoffe, Binder, Kittstoffe) reaktive Stoffe, die entweder mit Wasser angemacht oder in wässriger, z.T. kolloidaler Lösung vorliegend in Mischung mit den Granulaten und den Zusatzstoffen eine verarbeitbare Masse mit verschiedener Konsistenz ergeben. Die Erhärtung durch Verkittung der Granulate und Zusatzmittel führt zu einem kompakten und volumenstabilen Körper. Die verschiedenen Erhärtungs- und Bindemechanismen unterscheiden sich natürlich von der Art des Binders.

Bindemittel sind reaktive Stoffe, die entweder unter Mitwirkung von Wasser bzw. von und an Luft selbständig erhärten oder in Kombination mit feinstteiligen Komponenten (→ Binder im weitesten Sinn) zur Erhärtung führen. Folgende Einteilung erscheint zweckmäßig ^[12].

- Pulverförmige, mit Wasser hydraulisch erhärtende Verbindung, die ggf. mit dem Feinstanteil der Granulate oder mit einem zugesetzten Mikrofüller reagiert.
- Reaktive Lösungen, alkalisilikatische oder phosphorsauer, in Verbindung mit einem Mikrofüller.
- Feinteilige Oxide in Verbindung mit Sulfat-, Chlorid-, oder Phosphatlösungen.
- Feinteilige Oxide in Verbindung mit kalkalkalischen Lösungen (→ hydrothermale Erhärtung).
- Feinteilige aktivierte SiO₂- oder Alumosilikatsuspensionen (Keramobinder).
- Flüssige oder feste organische Substanzen.

4.4.4 Zusatzstoffe

Unter Zusatzstoffen sind alle Zusätze zu verstehen, die nicht in die Hauptgruppen Granulate und Bindemittel fallen. Dazu gehören vor allem gewisse Feinstzusätze (Mikrofüller) zur Optimierung der Bindemittel und Zusätze zur Erhärtungs- und Frischbetonbeeinflussung sowie zur Erzeugung gewisser Festbetoncharakteristika.

4.4.4.1 Mikrofüller

Zur Erzielung von optimalen Betoneigenschaften ist es notwendig, dem bestehenden Gemenge zusätzlich feinstkörnige feuerfester Materialien zuzugeben.

Ihre Aufgaben sind:

- Bindung des freien CaO im PZ-Beton
- Erhöhung der Viskosität der Schmelzphase
- Wirkung als Hohlraumfüller
- Verbesserung der Bindefähigkeit durch gleichzeitige Wirkung als Binderbestandteil
- Festigkeitserhöhung durch Verbesserung der keramischen Bindung
- Verringerung der Schwindung durch Verbindungsbildung ^[12]

Diese Füllstoffe bestehen auf Basis SiO₂, Tonerden, Magnesia und Chromerz.

4.4.4.2 Verstärkend wirkende Komponenten

Verschiedene Eigenschaftsverbesserungen, wie Steigerung von Festigkeit und Druckzähigkeit, Erhöhung der TWB werden durch Einlagerung von verstärkenden Komponenten herbeigeführt.

Als technisch-ökonomisch einsetzbare anorganischen-nichtmetallische Materialien kommen in erster Linie aluminiumsilikatische Fasern in Betracht. Zusammensetzungen verschiedener Fasern ist in Tabelle 42 zusammengefasst.

Diese sind im Allgemeinen glasig bis teilkristallin und entglasen völlig oberhalb 1250 °C, wobei sie schwinden und an Festigkeit verlieren. Die Anwendungstemperatur kann durch Zusätze von Cr₂O₃, TiO₂ oder ZrO₂ auf über 1500 °C erhöht werden ^[12].

4.5 Anforderungen an feuerfeste Werkstoffe

Verschiedene Mechanismen sind im Bezug auf den richtigen Einsatz von feuerfesten Werkstoffen zu berücksichtigen: Die Einsatztemperatur, der chemische Angriff des geschmolzenen Mediums und die mechanische Beanspruchung verschleißten das feuerfeste Material in verschiedener Weise.

4.5.1 Feuerfestigkeit

Unter Feuerfestigkeit wird die Fähigkeit eines Stoffes verstanden, hohe Temperaturen entsprechend einem bestimmten Segerkegelfallpunktes auszuhalten. Stoffe, die Temperaturen von 1500 °C widerstehen (Segerkegel 17 = SK 17), werden als „feuerfest“ bezeichnet. Stoffe mit einem Segerkegel 37 werden als „hochfeuerfest“ gekennzeichnet (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Charakteristische Segerkegelwerte ^[14]

Segerkegel klein 150 [°C/h] alt	Segerkegel klein 150 [°C/h] ISO	Temperatur [°C]	Bemerkung
17	150	1500	Feuerfest
37	183	1830	Hochfeuerfest
42	198	1980	Segerkegel mit höchster Falltemperatur

Ein feuerfester Baustoff besteht aus einem körnigen, porösen Haufwerk verschiedener hochschmelzender Kristalle, die durch bereits geschmolzene Stoffe miteinander verbunden sind. Die so genannten Bindemittel (siehe 4.4.3) besitzen den glasartigen Zustand, der die physikalischen Eigenschaften beim Übergang vom festen in den flüssigen Zustand nur allmählich verändern (siehe Abbildung 12).

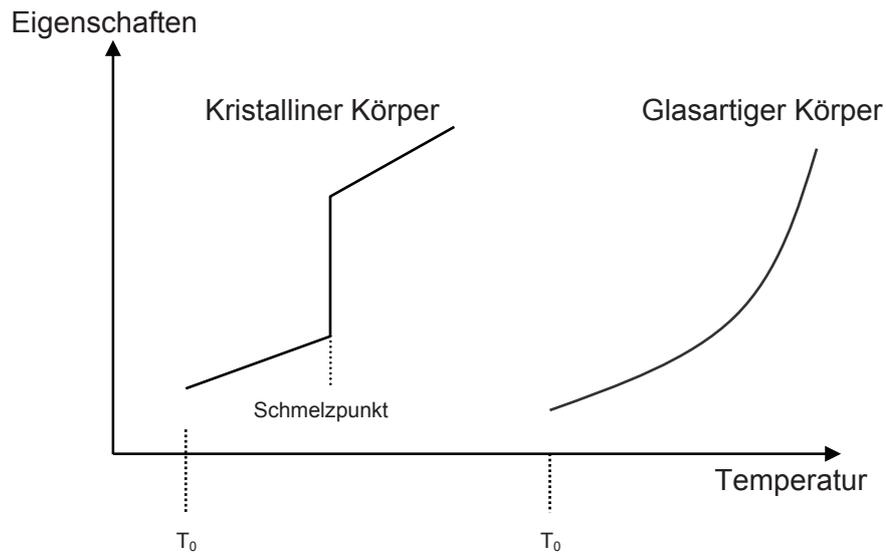


Abbildung 12: Die Eigenschaften kristalliner und glasartiger Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur

Eine ähnlich sprunghafte Veränderung kann festgestellt werden, wenn die Atome ihre ursprünglich belegten Plätze verlassen und eine neue Anordnung einnehmen. Diese Erscheinung tritt sowohl bei Metallen als auch bei Verbindungen auf und heißt Polymorphie. Diese führt bei feuerfesten Materialien, in denen Verbindungen mit zwei oder mehreren Modifikationen enthalten sind, zu typischen Eigenschaften und zu charakteristischem Verhalten beim Erhitzen.

Da die einzelnen Modifikationen der Verbindungen auch unterschiedliche Eigenschaften haben z.B. Dichte, so kann bei der Umwandlung das Volumen sich sprunghaft bzw. unstetig verändern. Bei Feuerfestmassen und Steinen kann dies zu Rissbildung und in besonders schweren Fällen zum Zerfall der Steine. Der Einsatzbereich von Materialien mit vielen Modifikationen kann aus diesen Gründen stark eingeschränkt werden.

In diesem Zusammenhang sei noch auf den Sintervorgang hingewiesen: Bei steigender Temperatur nimmt die Beweglichkeit der Atome zu und auf Grund von Platzwechselforgängen, Selbstdiffusion und Sammelkristallisation laufen Reaktionen auch unterhalb der Soliduslinie ab^[14].

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind einige Anwendungstemperaturen verschiedener feuerfester Produkte wiedergegeben.

Tabelle 3: Beispiele für verschiedene Anwendungstemperaturen

Produkt	Maximale Anwendungstemperatur [°C]
Silika	1650
Schamotte	1400
Magnesia	1700

4.5.2 Temperaturwechselbeständigkeit

Eine weitere wichtige Eigenschaft feuerfester Materialien ist die Widerstandskraft gegenüber Temperaturschwankungen, diese wird als Temperaturwechselbeständigkeit (TWB) bezeichnet.

Während des wenige Minuten dauernden Abstiches eines Schmelzofens sinkt die Temperatur der Ofenzustellung, durch die anschließende Beschickung mit z.B. kaltem Einsatz sinkt die Temperatur weiter, beim Anheizen und Einschmelzen steigt diese an. Ein Mauerwerk eines Ofens muss große Temperaturschwankungen ohne Bruch verkraften.

Mit dem Wärmezustand eines Körpers sind einige wichtige Erscheinungen verknüpft:

- Änderung des Volumens
- Änderung des Aggregatzustandes
- Änderung der Farbe
- Änderung des elektrischen Widerstandes

All diese Eigenschaften können auch zur Messung des Wärmezustandes eines Körpers herangezogen werden.

Die Prüfung der TWB erfolgt nach dem Wasserabschreckverfahren (DIN 51068 Blatt 1). Beim so genannten „Normalsteinverfahren“ wird ein Stein einseitig auf 950 °C erhitzt und anschließend mit dem erhitzten Ende in kaltes Wasser von 10 - 20 °C getaucht und somit abgeschreckt. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt (siehe Tabelle 4) bis der Stein zerstört ist bzw. bis mindestens 50 % der Oberfläche abgeplatzt ist ^[14].

Tabelle 4: Abschreckzahlen wichtiger Steinqualitäten ^[14]

Produkt	Abschreckzahl [-]
Schamotte	15
Mullit	25
Korund	15
Siliziumkarbid	25

Die Beständigkeit gegenüber TWB nimmt bei gleicher Menge an Grobkorn mit steigender Menge zu, mit höher liegender Brenntemperatur geht die Widerstandsfähigkeit zurück ^[14].

4.5.3 Chemische Beständigkeit

Das chemische Verhalten feuerfester Materialien bezieht sich im Wesentlichen auf die Wechselwirkung mit Fremdstoffen bei hohen Temperaturen, wie Schmelzen, Stäuben, Gasen usw. Bei Feuerbetonen kommt hauptsächlich das Verhalten gegenüber oxidischen, silikatischen oder metallischen Schmelzen, Staub- und Aschenanflügen, Eindringen von Gasen sowie Verschlackungen aller Art aus der Ofenatmosphäre in Betracht.

Das Verhalten des feuerfesten Materials und seine Widerstandsfähigkeit gegen chemische Korrosion hängen von vielen Faktoren ab ^[12]:

- Chemische Beziehung der Komponenten; eine saure Schlacke und ein basischer Stein ergeben eine chemische Reaktion.
- Temperatur: je höher die Temperatur, umso größer ist die Reaktionsgeschwindigkeit
- Viskosität: je größer die Dünnschmelze des angreifenden Stoffes ist, umso stärker ist in der Regel der chemische Angriff an die feuerfeste Auskleidung.
- Porosität (reaktionsbereite Oberfläche): je höher die Porosität ist, umso stärker ist auch der chemische Angriff.
- Gegenwart bestimmter dritter Komponenten.

Die Temperatur spielt dabei eine entscheidende Rolle, da Benetzungs- und Reaktionsfähigkeit mit der Temperatur stark zunehmen und die Viskositäten abnehmen. Besonders ist die chemische Natur (sauer, basisch, neutral) zu beachten, Materialien mit Chromerz, Chromit-Periklas oder Periklas haben gegenüber basischen Schmelzen günstige Eigenschaften. Produkte auf Basis Korund oder Sillimanit sind sowohl gegen saure, als auch basische Schmelzen besonders resistent verhalten ^[12].

Allgemein gilt, dass ein feuerfester Stein sich gegenüber chemischen Angriff umso widerstandsfähiger erweist, je kleiner das Reaktionsgefälle zwischen Schlacke oder einem anderen Flussmittel und dem feuerfesten Produkt ist.

Eine wichtige Gruppe chemischer Verbindungen sind die Oxide, d.h. Verbindungen von Elementen mit Sauerstoff, die z.B. bei der Verbrennung entstehen oder bei Korrosion gebildet werden können. Je nach Art ihrer Umsetzungsfähigkeit können sie gegliedert werden (siehe Tabelle 5) ^[14]:

- Basische Oxide verfügen über ein verhältnismäßig stark ausgeprägtes Reaktionsvermögen mit sauren Oxiden.
- Saure Oxide besitzen natürlich ein starkes Reaktionsvermögen mit basischen Oxiden.
- Amphotere Oxide können sich sowohl mit sauren als auch mit basischen Oxiden umsetzen, ihre Reaktionsfähigkeit hängt von der Umgebung und insbesondere von der Stärke des sauren bzw. basischen Reaktionspartners ab

Tabelle 5: Feuerfeste Oxide mit chemischer Formel, Schmelztemperatur und chem. Charakter ^[14]

Verbindung	Formel	Schmelztemperatur [°C]	Chemischer Charakter
Calciumoxid	CaO	2600	Basisch
Magnesiumoxid	MgO	2800	Basisch
Bariumoxid	BaO	1920	Basisch
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃	2050	Amphoter
Chromoxid	Cr ₂ O ₃	1990	Amphoter
Kieselsäure	SiO ₂	1700	Sauer
Titandioxid	TiO ₂	1780	Sauer
Zirkondioxid	ZrO ₂	2700	Sauer

Unabhängig von Umsetzungen zwischen Feuerfestmaterialien und Gas- und Schlackenflüssen können auch Reaktionen bei einer einfachen Berührung von zwei verschiedenen zusammengesetzten feuerfesten Materialien bei hohen Temperaturen (über 1600 °C) in der Ofenwand ablaufen.

Im nachfolgenden Absatz wird ein praktisches Beispiel eines chemischen Angriffs beschrieben:

Wenn in den Rauchgasen Alkalioxide, vorzugsweise Natrium- und Kaliumoxid, mitgeführt werden, so reagieren diese Basen mit den sauren Bestandteilen der Zustellung unter Bildung niedrigschmelzender Verbindungen und Eutektika. Dies führt zur Versinterung und damit auch zum Nachschwinden und zur Verringerung der Feuerfestigkeit. Schamotte-, Sillimanit- und Korundmaterialien können in den Randzonen Alkalioxide aufnehmen: die Umsetzungen führen zur Bildung von Nephelin ($\text{NaAlSiO}_3 = \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) und von Kaliophilit ($\text{KAlSiO}_3 = \text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Die mit der Entstehung dieser Mineralien verbundenen Volumenausdehnungen führen zum Abspringen dünner Schalen ^[14].

4.5.4 Festigkeitseigenschaften

Die mechanische Festigkeit umfasst einen ganzen Komplex von Widerstandsfähigkeiten gegenüber den verschiedensten äußeren mechanischen Beanspruchungen. Von diesen sind hinsichtlich Ermittlung und Gebrauch die Druck- und Biegefestigkeit von größerer technischer Bedeutung als die Zug-, Spaltzug-, und Scherfestigkeit.

Bei Modellbetrachtungen zur Festigkeit muss zwischen der theoretischen und der praktischen Festigkeit unterschieden werden. Die praktischen Festigkeiten sind erheblich geringer, sie liegen in Größenordnungen von etwa 1 % der theoretischen. Dieser große Unterschied beruht auf der Gegenwart von Fehlstellen, Volumen- und Oberflächenrissen.

In verschiedenen Produktionsanlagen wird das feuerfeste Material auf mechanischen Verschleiß, Abrieb und Erosion beansprucht. Eine gute Widerstandsfähigkeit gegenüber solchen Einwirkungen sichert eine erhöhte Lebensdauer.

Korundbetone mit Hochtonerdezement wurden in den fünfziger Jahren von amerikanischen Autoren als besonders widerstandsfähig beschrieben, die neben den phosphatgebundenen Korundmassen eine gewisse Rolle spielten. Allerdings ergab eine seinerzeit von Venable (1959) veröffentlichte Gegenüberstellung des relativen Erosionswiderstands von Phosphatbetonen (Kennziffer 90 bis 100) und Feuerbetonen (13 bis 35) und der Vergleich mit SiC-Stein (80 bis 100) und Korundstein (30 bis 50), dass übliche Feuerbetone, die etwa den Schamottesteinen entsprechen, nicht mit den besten Materialien konkurrieren können.

Der Abriebwiderstand wird durch hohe Reinheit der Komponenten, wenig Zusätze und dichte Kornpackung günstig, durch einen hohen Anmachwasseranteil dagegen ungünstig beeinflusst^[12].

Der Abriebwiderstand nimmt mit Erhöhung der Festigkeit der feuerfesten Produkte zu.

4.6 Allgemeine Probleme mit Feuerbetonen

Mit dem Einsatz von feuerfesten Massen in Aluminiumschmelzöfen sind einige Probleme verbunden. Einen Überblick dieser soll das nachfolgende Kapitel geben.

4.6.1 Flammentemperaturen der Brenner

Der Einsatz von Brennern mit hohen Flammentemperaturen von bis zu 1900 °C macht den Einsatz von Feuerbetonen mit hoher Anwendungstemperatur notwendig. Abbildung 13 zeigt den Temperaturverlauf einer Regenerativbrennerflamme in einen Aluminiumschmelzofen.

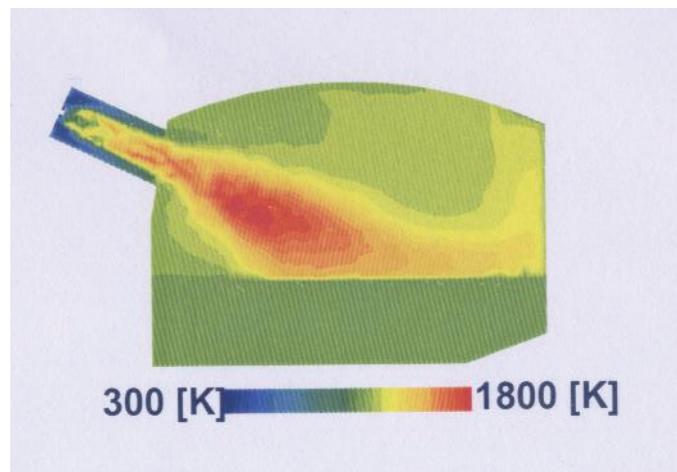


Abbildung 13: Temperaturverlauf im Aluminiumschmelzofen

4.6.2 Anti-Benetzungsmittel

Bei Temperaturen ab 900 °C zerfallen die Anti-Benetzungsmittel BaSO_4 oder CaF_2 .



BaO und CaO wirken im Feuerbeton als starke Flussmittel, die entstehende Gefügeveränderung führt zu Abplatzungen an der Oberfläche. Dies bedeutet einen voreilenden Verschleiß und kürzere Einsatzzeiten der feuerfesten Zustellung.

SO_3 und F_2 entweichen aus dem Feuerbeton als Gas, damit verbunden sind die Erhöhung der Porosität und die Zunahme der Korundbildung.

4.7 Auswahl der geeigneten Feuerfestzustellung

Welche der zahlreichen Steine oder Massen bei einer Neuzustellung oder Reparatur angewendet werden soll, ist von Fall zu Fall verschieden und muss auf die speziellen Anwendungen und Erfordernisse abgestimmt sein. Die Vor- und Nachteile von feuerfesten Betonen in Bezug auf Steinen ist in Tabelle 6 zusammengefasst.

In vielen Fällen haben die Gieß- und Spritzmassen den Vorzug des geringen Arbeitsaufwandes beim Einbau. Bei besonderer chemischer Beanspruchung der Ausmauerung werden keramisch oder chemisch und keramisch abbindende Massen verwendet.

Bei Massen ist die Wärmedämmung im Allgemeinen besser als bei Steinen. Die Schichtstärken lassen sich bei den Massen besser an die Erfordernisse anpassen, da keine Bindung an die Steinabmessungen gegeben ist.

Das Arbeiten mit feuerfesten Massen hat gegenüber der „klassischen Methode“ mit Steinen den Vorteil der schnelleren Zustellzeit. Durch Schleudern, Vibrieren oder Spritzen können große Mengen an Massen in kurzer Zeit eingebracht werden.

Feuerfeste Betone besitzen, wie oben beschrieben, eine bessere Wärmedämmung. Durch die Ausbildung von unterschiedlichen Schichten mit voneinander abweichendem Sinterzustand verfügen sie über bessere Temperaturwechselbeständigkeiten.

Auch im technischen Umgang zeigen sich Vorteile von Massen, da die Zahl der durchlässigen Fugen geringer ist, außerdem ist der mechanische Widerstand gegen Erschütterung und Schlag höher als beim entsprechenden Konstruktionsteil aus Steinen.

Selbstverständlich haben auch feuerfeste Betone Nachteile, Fehlerquellen können z.B. in der unsachgemäßen Auswahl der Sorten gesehen werden. Natürlich ist auch die Konstruktion auf das Arbeiten mit Massen hin auszurichten.

Mögliche Fehler in der Verarbeitung der Massen führen oft zu kürzeren Standzeiten und höheren Verschleiß. Besonders hervorzuheben ist, dass das Trocknen, das Formgebungsverfahren und das Brennen bei der Herstellung von Steinen unter den günstigsten Bedingungen im Feuerfestbetrieb vorgenommen werden. Während bei der Konstruktion mit Massen erst im Betrieb ihre endgültige Eigenschaften erhalten und das Lieferwerk lediglich die korrekte Zusammensetzung garantieren kann.

Tabelle 6: Vor- und Nachteile des Einsatzes von Massen gegenüber Steinen ^[18]

Vorteile in der Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Schneller Einbau • Geringere Stillstandskosten • Geringere Lieferzeiten • Geringere Lagerhaltung
Vorteile in den keramischen Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> • Bessere Wärmedämmung • Höhere TWB • Flexiblere Struktur
Vorteile im konstruktiven Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Zahl durchlässiger Fugen • Bessere mechanischer Widerstand gegen Erschütterungen • Verformbarkeit auch in schwierigen Formaten • Bessere Anpassung an die Flammenführung • Unabhängigkeit von Wandstärken • Einsparungsmöglichkeit von Material und Qualität
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Mögliche Fehler in der Auswahl der Sorten • Mögliche Fehler in der Konstruktion • Mögliche Fehler in der Verarbeitung • Mögliche Fehler in der Behandlung des Aggregates bis zur Betriebsreife

4.7.1 Konstruktionsmerkmale

Außer der richtigen Qualitätsauswahl sind für die Haltbarkeit einer feuerfesten Zustellung die Ofenkonstruktion und die Konzeption des Zustellaufbaus von Bedeutung. Hierbei müssen einige Punkte beachtet werden.

Ofengeometrie

Die Grundfläche eines Ofens kann rechteckig oder rund sein. Daraus ergibt sich, dass das Sohlenprofil entweder zylindrisch oder mit einer kalottenförmigen Wölbung festgelegt ist ^[21].

Armierung

Bei runden Öfen bildet ein geschlossener Armierungspanzer die Bewehrung, welcher die auftretenden Kräfte aus Wärmedehnung der Ausmauerung sowie den statischen Druck der Schmelze aufnehmen muss. Bei rechteckigen Grundflächen bildet eine Kombination aus Verplattung und lotrechten Armierungssäulen, welche oben und unten verbunden sind, die die Kräfte aufnehmen ^[21].

Wärmedurchgang

Prinzipiell kann man über den Wandaufbau die Lage der Isothermen im Mauerwerk deutlich verändern. Den Ort der Isothermen in den einzelnen Mauerwerksbereichen bestimmt im Wesentlichen, wie tief Material in den Stein eindringen kann, bevor es erstarrt. Durch eine Zwangskühlung des Mantels bzw. des Bodens, z.B. durch Kühlsegmente, kann der Temperaturgradient in der Zustellung vergrößert werden ^[21].

Zustellart

Zur Erzielung höchster Stabilität und Haltbarkeit gemauerter Zustellung müssen maßgenaue Steine mit planen Auflagefläche verwendet werden. Aus Stabilitätsgründen ist sowohl bei runden als auch bei rechteckigen Ofensohlen eine Verlegung im Längsverband zu bevorzugen.

Zur Erzielung eines dichten Mauerwerks ist auf engste Steinfugen zu achten ^[21].

Einbau von Dehnfugen

Bei Öfen großer Dimensionen, z.B. bei Herdöfen, bei denen man keine komplette dehnfugenlose Zustellung durchführen kann, muss im Bereich der Dehnungseinlagen auf so genannte Gleitfugeneffekte geachtet werden, d.h. abbindende Mörtelfugen in Richtung des vorgegebenen Dehnungsweges sind zu vermeiden ^[21].

Monolithische Zustellung

Die Zustellungen, die aus feuerfesten Massen hergestellt werden, haben als Vorteil die Anpassbarkeit an die Ofengeometrie und die Ausbildung formatunabhängiger Wandstärken. Dies hat besonderes beim Einstellen vorgegebener Wärmedurchgänge Vorteile. Obwohl der Ausdruck monolithische Zustellung ein fugenloses Feuerfestfutter suggeriert, sind auch bei so zugestellten Aggregaten Fugen notwendig. Diese Arbeitsfugen ergeben sich, weil man nicht beliebig große Felder einbringen kann und an den Feldgrenzen dann Fugen entstehen.

Bei monolithischen Zustellung spielen die folgenden Vorgänge eine wesentliche Rolle ^[21]:

- Schwindung beim Trocknen durch Abbindereaktionen,
- Schwindung oder Wachsen beim ersten Aufheizen sowie
- reversible Längenänderungen durch Temperatureinwirkung.

Wärmedehnung

Die chemische Zusammensetzung eines feuerfesten Baustoffes ist bestimmend für sein Dehnungsverhalten. Darüber hinaus sind Temperatur, Ofengröße sowie freier Dehnungsraum Faktoren für die Berechnung der Wärmedehnung ^[21].

Temperaturschwankungen schon ab etwa 200 °C bewirken eine Dimensionsänderung des Baukörpers. Nicht elastisch eingespanntes Mauerwerk unterliegt dadurch größeren Druckschwankungen, welche sich nachteilig auswirken. Beim Abkühlen führt dies zu drucklosen Mauerwerk mit Schwindungsrissen, die beim Wiederaufheizen erfahrungsgemäß, selbst wenn sie nicht verunreinigt sind, offene Fugen hinterlassen können, in welches flüssiges Metall eindringt. Bei elastisch eingespanntem Mauerwerk bewirken Federn zumindest teilweise ein Egalisieren des Dehnungsschwindungsverhaltens der Steine ^[21].

4.8 Zustellung ausgewählter Schmelzanlagen

Im folgenden Kapitel werden Zustellkonzepte für einige ausgewählte Aluminiumschmelzöfen beschrieben.

4.8.1 Herdschmelzöfen

Für große Herdschmelzöfen kommen im Badbereich dichte, hochwertige Schamottesteine zum Einsatz oder bei höherer Temperaturbeanspruchung und aggressiven Schmelzen werden tonerdereiche, chemisch gebundene, gebrannte oder wärmebehandelte Materialien auf Korundbasis mit infiltrationshemmenden Zusätzen verwendet, die mit entsprechenden Feuerkitten verlegt werden. Neben den geformten Erzeugnissen sind im Badbereich und als Sicherheitsfutter infiltrationsbeständige Massen in Verwendung. Wärmedämmende Erzeugnisse, die zur Hinterfütterung als Dauerfutter Einsatz finden, sind üblicherweise Feuerleichtsteine bzw. Feuerleichtbeton. Im Unterbadbereich von Aluminiumschmelz- und Gießöfen muss die erste Isolierschicht gleichzeitig als Sicherheitsfutter dienen ^[21].

In der Abbildung 14 ist eine mögliche Zustellvariante mit feuerfesten Steinen und Massen eines Herdschmelzofens dargestellt. Die verschiedenen Stein- bzw. Massesorten sind mit A, B, C und D gekennzeichnet, deren chemische Zusammensetzung und Klassifikation werden in Tabelle 7 wiedergegeben.

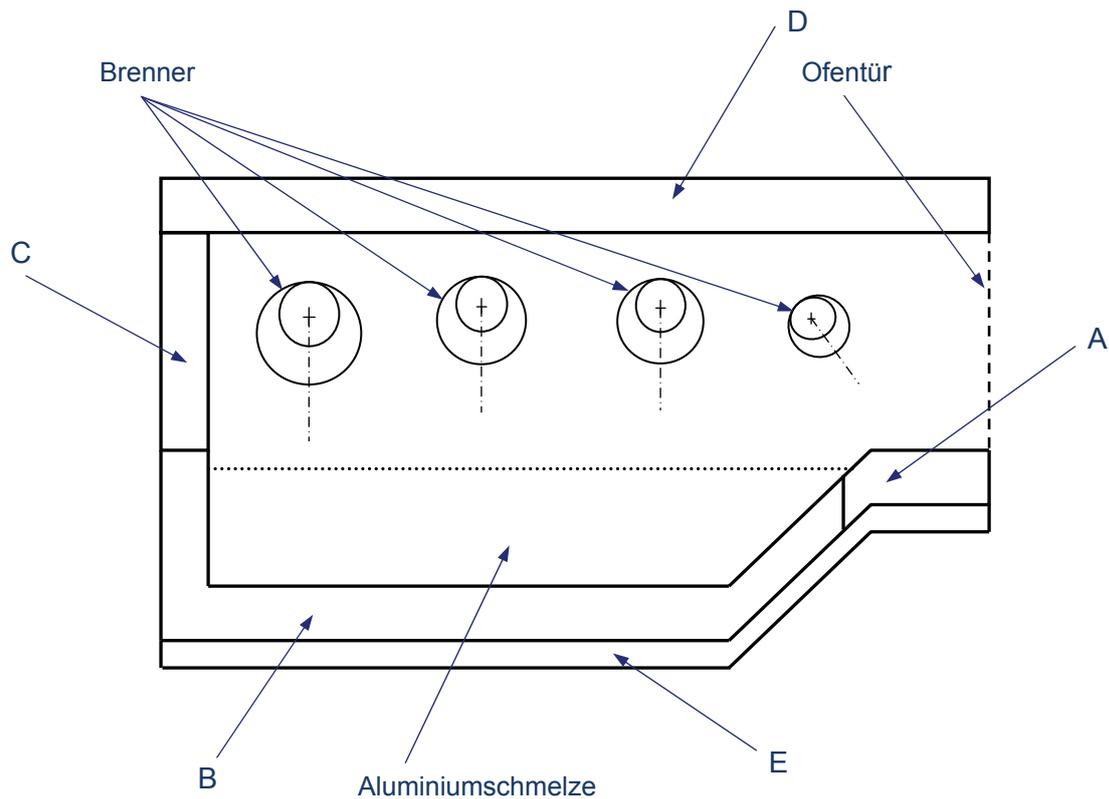


Abbildung 14: Skizze einer möglichen Ofenzustellung

Tabelle 7: Zusammenfassung einer möglichen Ofenzustellung

Kurzzeichen	Klassifikation	Rohstoff	Al ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	CaO [%]	ZrO ₂ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MgO [%]
A	Zementarmer Feuerbeton	Bauxit	80	10	2	-	1	-
B	Tonerdereicher Stein	Bauxit	80	10	-	-	2	1
C	Schamottestein	Schamotte	45	50	1		2	1
D	Feuerbeton	Synthetische Rohstoffe	60	15	-	20	1	-
E	Feuerleichtbeton	Leichtschamotte	40	30	10	-	3	1

4.8.2 Drehtrommelöfen

Drehtrommelöfen haben als Verschleißfutter eine Zustellung aus tonerdehaltigen Schamottesteinen mit möglichst geringem Fe_2O_3 -Gehalt. Die Abstiche für Metall und Schlacke werden z.B. mit Feuerbetonen auf tonerdereicher Schamotte- oder Bauxitbasis, ggf. mit Zirkonzusatz, zugestellt. Das wärmeisolierende Dauerfutter besteht aus Feuerleichtbetonen auf Schamottebasis an den Stirnseiten und aus Fasermatten und Feuerleichtsteinen im Trommelbereich.

4.8.3 Tiegelinduktionsöfen

Auch bei großen Tiegelinduktionsöfen ist eine Zustellung mit geformten Produkten unüblich. Normalerweise erfolgt die Auskleidung mit Ramm- oder Stampfmassen unter Verwendung von Dauerschablonen. Normalerweise wird nur eine keramisch bindende Masse auf Mullitbasis mit z.B. 68 % Al_2O_3 ggf. mit benetzungsverringernenden Zusätzen eingebracht. Der Schutz der Induktionsspule erfolgt durch Lagen von Glimmerprodukten oder Faserteilen. Der Ofenunterbau wird entweder aus Schamottesteinen unter Verwendung von entsprechenden Feuerkitten oder aber auch monolithisch aus Feuerbeton auf Basis tonerdereicher Schamotte oder Bauxit aufgebaut. Der Ofendeckel ist mit Feuerleichtbeton auf Schamottebasis zugestellt.

Problematisch sind bei der Auskleidung von Rinneninduktionsöfen die Induktorrinnen. Große Öfen mit einer Kapazität über 25 t werden mit abflanschbaren Induktoren ausgeführt, weil aufgrund des hohen Verschleißes eine leichte Reparaturmöglichkeit gegeben sein muss. Die Zustellung erfolgt bei größeren Öfen in einer Kombination von geformten und ungeformten Produkten. Es kommen die gleichen Steinsorten und Massen wie beim Tiegelinduktionsöfen zur Anwendung ^[21].

5 Versuchsaufbau

Im folgenden Kapitel werden die Abläufe der Vor- und Hauptversuche graphisch in einer Matrix dargestellt.

5.1 Matrix Vorversuche

In Abbildung 15 ist der Versuchsablauf der Vorversuche erkennbar. Hier wurde nur mit einer Sorte von Feuerfestmassen gearbeitet, um die aggressivste Aluminiumlegierung für die Hauptversuche zu bestimmen.

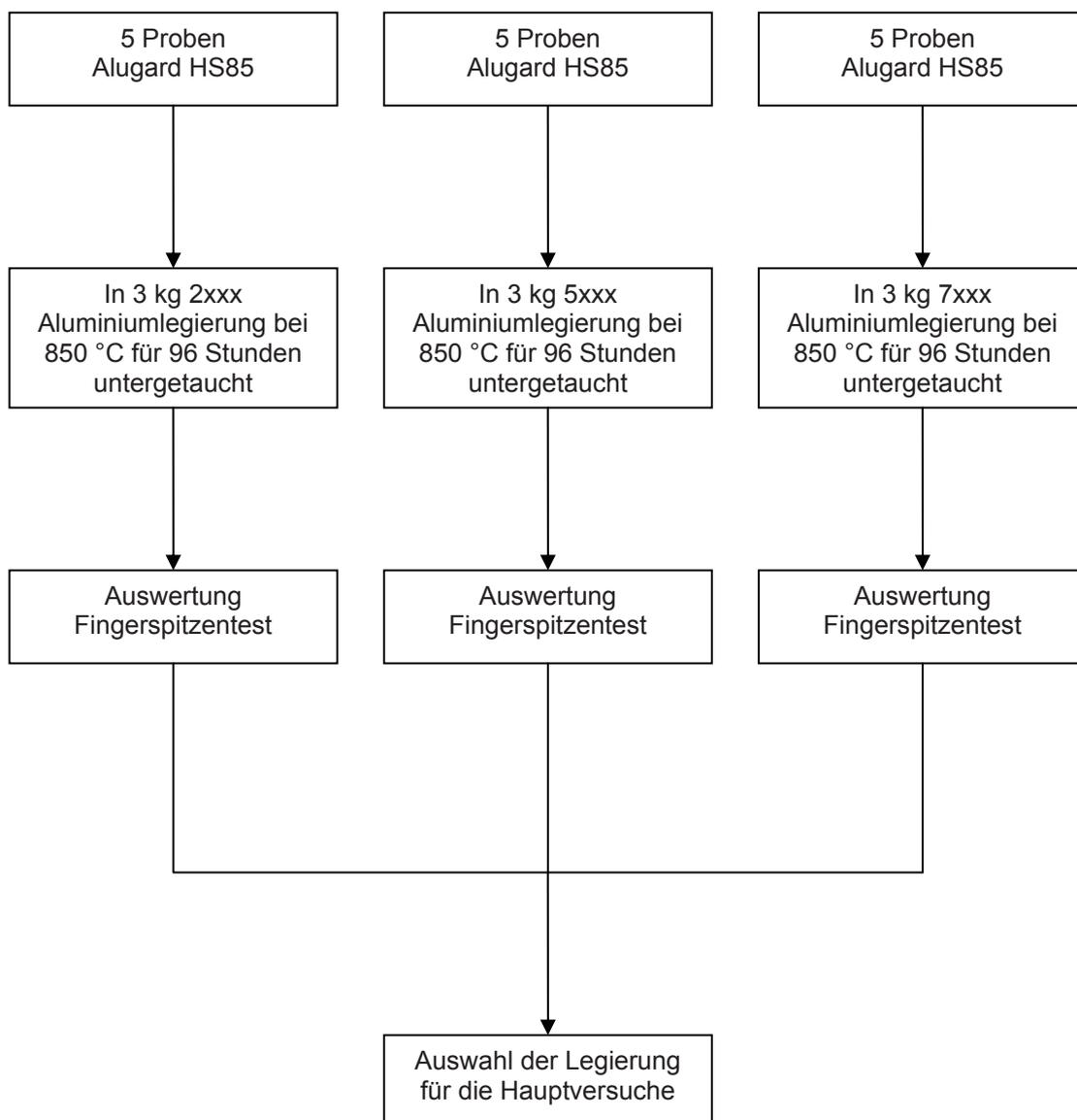


Abbildung 15: Versuchsablauf der Vorversuche

5.2 Matrix Hauptversuche

In Abbildung 16 ist der Versuchsablauf der Hauptversuche erkennbar, mit allen zur Verfügung gestellten Massen (siehe Kapitel 5.3) wurden die Experimente durchgeführt, um die geeignete feuerfeste Zustellung zu ermitteln.

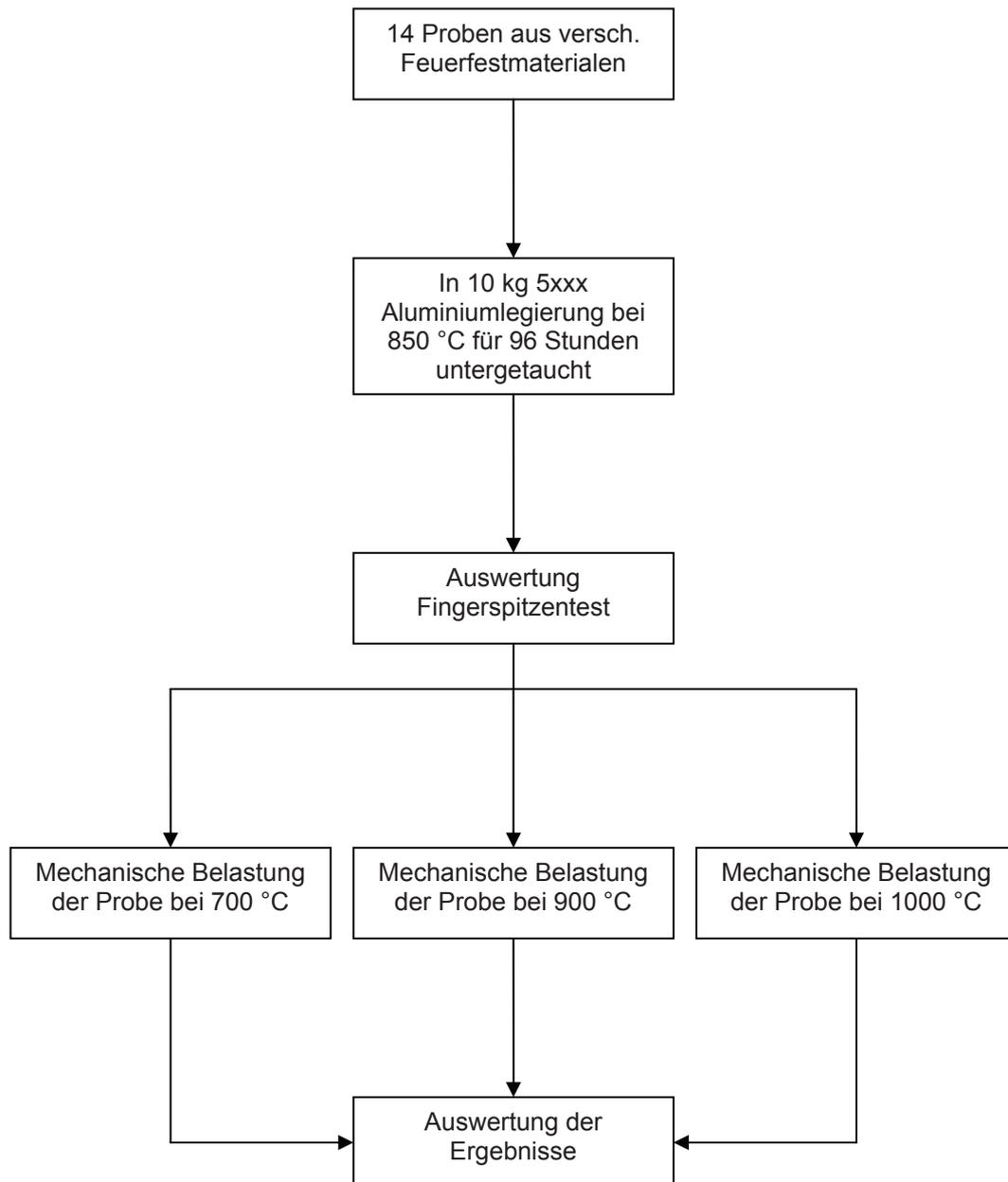


Abbildung 16: Versuchsablauf der Hauptversuche

5.3 Versuchsmaterialien

Vor Beginn der Versuchsreihe wurden verschiedene Firmen kontaktiert, welche feuerfeste Produkte produzieren oder verkaufen, um mit unterschiedlichen feuerfesten Massen bei den Versuchen arbeiten zu können. Kontaktierte Firmen:

- Vesuvius Group sa/nv
- RHI AG
- Stellar Materials Incorporated
- August Rath jun. GmbH
- Gouda Feuerfest Deutschland GmbH
- Refratechnik Steel GmbH

Die von den Firmen zugesandten Feuerbetonen unterschieden sich nur minimal in ihrer Zusammensetzung, optischen Aussehen und in ihrer Korngrößenverteilung. Im folgenden Kapitel werden die verschiedenen Materialien mit den von den Herstellern bereitgestellten Produktblättern beschrieben.

5.3.1 Alugard HS85

Alugard bzw. Kingcast HS85 der Firma *Vesuvius Group sa/nv* ist ein zementarmes, tonerdereiches Material auf Basis von kalziniertem Bauxit (Tabelle 8).

Anmachwasserbedarf:	3,6 l/100 kg
Max. Korngröße:	9,5 mm
Max. Arbeitstemperatur:	1700 °C
Dichte (110 °C):	3160 kg/m ³
KDF (1000 °C):	233,0 MN/m ²

Tabelle 8: Chemische Analyse: Alugard HS85

SiO ₂ [%]	TiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]
6,4	3,2	85,8	1,2	2,4	0,2

5.3.2 Didurit 120 AL 0-6

Didurit 120AL der Firma *RHI AG* ist ein zementarmer Feuerbeton mit Aluminium-Infiltrationsschutz (Tabelle 9).

Anmachwasserbedarf:	5,5 l/100 kg
Max. Korngröße:	6 mm
Max. Arbeitstemperatur:	1200 °C
Dichte:	2750 kg/m ³
KDF (1000 °C):	100,0 MN/m ²

Tabelle 9: Chemische Analyse: Didurit 120AL 0-6

SiO ₂ [%]	TiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]
10,0	2,5	77,5	1,5	2,5

5.3.3 Didurit 130 AL 0-6

Didurit 120AL der Firma *RHI AG* entspricht einem zementarmen Feuerbeton mit Aluminium-Infiltrationsschutz (Tabelle 10).

Anmachwasserbedarf:	4,4 l/100 kg
Max. Korngröße:	6 mm
Max. Arbeitstemperatur:	1300 °C
Dichte:	3100 kg/m ³
KDF (1000 °C):	180,0 MN/m ²

Tabelle 10: Chemische Analyse: Didurit 130AL 0-6

SiO ₂ [%]	MgO [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]
0,1	0,9	94,3	0,1	4,4

5.3.4 Formula 5-A

Formula 5-A der Firma *Stellar Materials Incorporated* stellt einen zementarmen Feuerbeton mit hohem Tonerdeanteil dar (Tabelle 11).

Phosphatbinderbedarf:	12,5 - 13,7 l/100 kg
Max. Arbeitstemperatur:	1649 °C
Dichte:	2803 kg/m ³
KDF (1093 °C):	72,0 MN/m ²

Tabelle 11: Chemische Analyse: Formula 5-A

SiO ₂ [%]	P ₂ O ₅ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	andere [%]
2,09	5,15	85,59	1,01	6,16

5.3.5 Carath 1400 LC/Al

Carath 1400 LC/Al der Firma *Aug. Rath jun. GmbH* besteht aus einem zementarmen Feuerbeton auf einer Rohstoffbasis von mullitreichen Schamott (Tabelle 12).

Anmachwasserbedarf:	6,5 l/100 kg
Max. Korngröße:	< 10 mm
Max. Arbeitstemperatur:	1400 °C
Dichte:	2300 kg/m ³
KDF (110 °C):	100 MN/m ²

Tabelle 12: Chemische Analyse: Carath 1400 LC/Al

SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]
41	50	1,3

5.3.6 Carath 1650 ULC/AZS

Carath 1650 ULC/AZS der Firma *Aug. Rath jun. GmbH* ist ein „ultra-low-cement“ Feuerbeton auf Rohstoffbasis Periklas (Tabelle 13).

Anmachwasserbedarf:	6,2 l/100 kg
Max. Korngröße:	< 3 mm
Max. Arbeitstemperatur:	1650 °C
Dichte:	2800 kg/m ³
KDF (110 °C):	35 MN/m ²

Tabelle 13: Chemische Analyse: Carath 1650 ULC/AZS

MgO [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]
89,0	6,5	1,7

5.3.7 Alu-Cast 90 HS

Alu-Cast 90 HS der Firma *Gouda Feuerfest Deutschland GmbH* hat nach Angaben des Herstellers einen sehr hohen chemischen Widerstand gegenüber geschmolzenem Aluminium und hohe Festigkeitswerte (Tabelle 14).

Anmachwasserbedarf:	4 - 4,5 l/100 kg
Max. Korngröße:	6 mm
Max. Arbeitstemperatur:	1600 °C
Dichte:	3050 kg/m ³
KDF (1000 °C):	150 MN/m ²

Tabelle 14: Chemische Analyse: Alu-Cast 90 HS

SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]
2,5	90	2,5

5.3.8 Refracast LC C-90

Refracast LC C-90 der Firma *Refratechnik Steel GmbH* ist ein zementarmer Feuerbeton auf einer Korund Rohstoffbasis (Tabelle 15).

Anmachwasserbedarf:	5,6 – 6,4 l/100 kg
Max. Korngröße:	7 mm
Max. Arbeitstemperatur:	1600 °C
Dichte:	3000 kg/m ³
KDF (1000 °C):	120 MN/m ²

Tabelle 15: Chemische Analyse: Refracast LC C-90

SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]
3,0	88,0	0,5	5,0

5.4 Probenherstellung

Vor Beginn der Vor- bzw. Hauptversuche mussten aus den vorhandenen Granulaten Probenkörper hergestellt werden. Die folgende Abbildung 17 gibt eine Zusammenfassung über die durchgeführte Probenherstellung wieder. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Arbeitsschritte genau beschreiben.

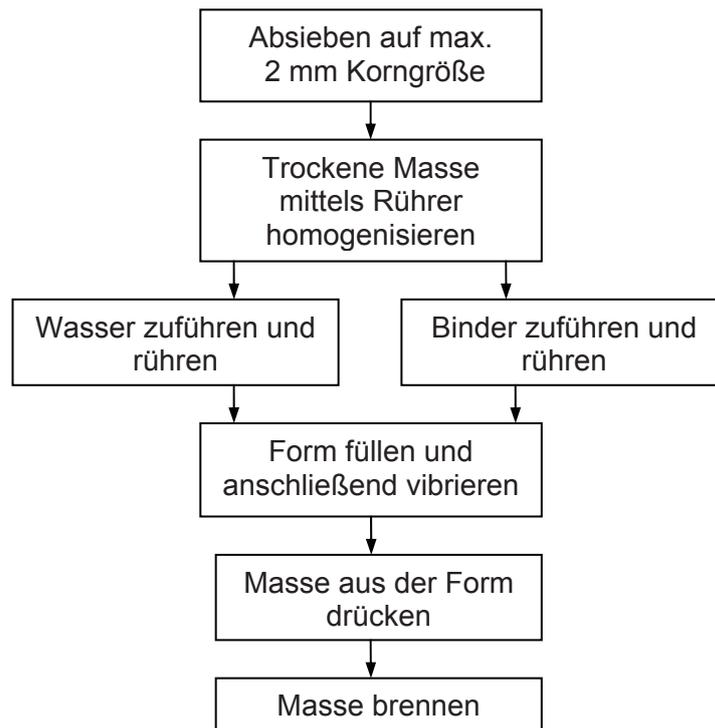


Abbildung 17: Überblick Probenherstellung

5.4.1 Absieben

Aufgrund der geringen Abmessungen der Probenkörper 25,4 mm x 25,4 mm x 50,8 mm wurden die trockenen Massen auf 2 mm Korngröße abgesiebt, um ein Ausbrechen von großen Körnern beim Abriebversuch zu verhindern. Die Siebung fand auf einer *KHD Humboldt Wedag*-Siebmaschine statt, anschließend wurden die keramischen Fasern dem Gemenge wieder zugeführt und gemischt.

5.4.2 Abmischen und Formen

Die Homogenisierungszeit der trockenen Masse (Abbildung 18) mittels Rührereinrichtung (Abbildung 19) betrug 7 min, dann erst wurde das Wasser zugeführt und 10 min lange in das Granulat eingerührt.



Abbildung 18: Alugard HS85



Abbildung 19: Rührereinrichtung

Nach dem Abmischen erfolgte das Eindrücken der feuchten Masse in die Stahlform (siehe Abbildung 20). Anschließend wurde die Masse in der Form vibriert und mit einem Stempel aus der Form gedrückt. Diese Vorgangsweise stellte sich als zu zeitaufwendig heraus, so dass nach dem Herstellen der jeweils 14 Proben der ersten vier Massen (Alugard, Rath 1400, Rath 1650, Formula) in der Stahlform, die Umstellung auf 14 teilbare Holzformen (Abbildung 21) erfolgte (Didurit 120 AL, Didurit 130 AL, Alu-Cast 90 HS).

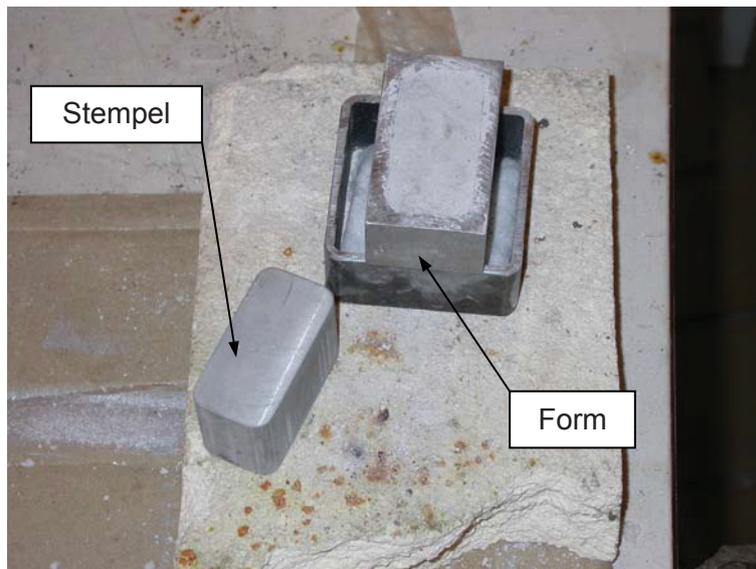


Abbildung 20: Gefüllte Stahlform und Stempel

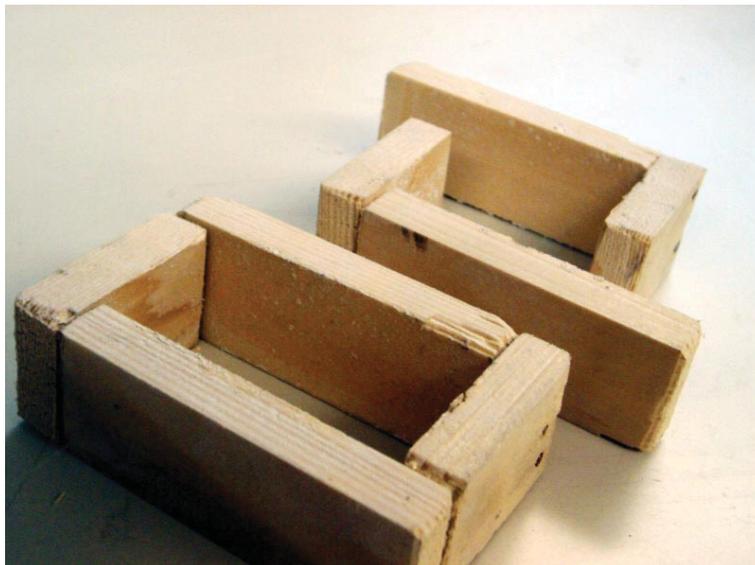


Abbildung 21: Teilbare Holzformen

5.4.3 Brennen

Nach der Herstellung der Probenkörper wurden diese in zwei verschiedenen Öfen für 15 Stunden bei 800 °C gebrannt. Es erfolgte ein Halten von zwei Stunden bei 150 °C. Nach dem Brennen wurden jeweils vier Proben mittels Feuerfestkleber zu Stangen (siehe Abbildung 22) verbunden, um das Ein- und Ausbringen in den Tiegel zu erleichtern.

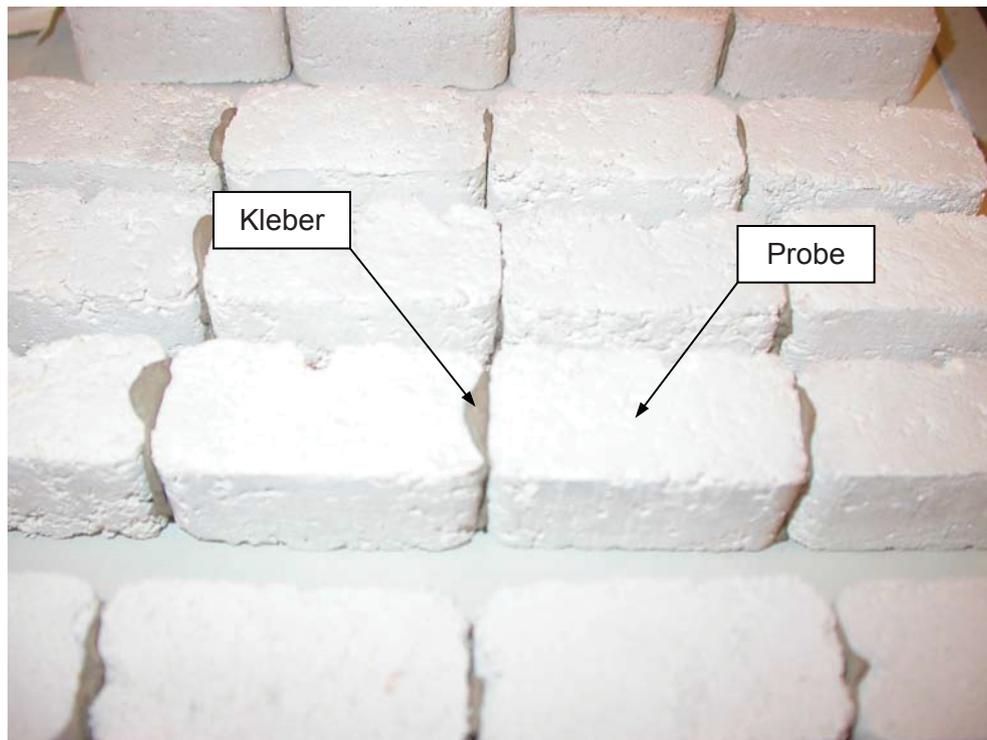


Abbildung 22: Zusammengeklebte Proben

5.4.4 Veränderung der KG-Verteilung

Durch das einheitliche Absieben auf 2 mm Korngröße wurde die Korngrößenverteilung stark verändert. Aufgrund der kleinen Abmessungen der Proben war ein Absieben notwendig, ansonsten hätten sich große Körner (bis 9 mm) aus der Probenoberfläche herausgerissen und ein Messen der Abriebtiefe wäre nicht mehr möglich gewesen. Durch das Verändern der Korngrößenverteilung kam es zu einem Abfall der Festigkeit und zu einer Verringerung der Porosität. Die Feuerfestmassen Didurit 120 AL, Didurit 130 AL und Alu-Cast zeigten den stärksten Festigkeitsabfall und konnten nicht für den Abriebtest herangezogen werden.

5.4.5 Auswahl der Formen

Zusätzlich zum Festigkeitsabfall aus der Veränderung der Korngrößenverteilung wurde bei den Feuerfestmassen Didurit 120, Didurit 130 und Alu-Cast statt der Stahlformen auf unbehandelte, teilbare Holzformen umgestellt. Die Veränderung erfolgte um eine einfachere Probenherstellung zu ermöglichen, die Holzformen entzogen den feuchten Massen aber zu viel Wasser, was wiederum zu einem zusätzlichen Festigkeitsabfall führte.

Teilbare und lackierte Holz- oder Metallformen die einen Feuchtigkeitsentzug des Feuerbetons verhindern würden, stellen eine mögliche Alternative zu den verwendeten Formen dar.

6 Versuchsdurchführung

Die Ergebnisfindung anhand der durchgeführten Versuche ist in den folgenden Kapiteln zu entnehmen. Die Untersuchungen gliedern sich in zwei große Teilbereiche:

- Fingerspizentest
- Abriebtest

6.1 Hitze und Infiltration (Fingerspizentest)

Für jeden Test wurden vierzehn auf 815 °C aufgeheizte Proben in 10 kg Aluminiumlegierung (siehe Abbildung 23) bei 850 °C für 96 Stunden untergetaucht. Das Abdecksalz verhinderte eine Oxidation des flüssigen Metalls.

Danach erfolgte die Untersuchung der geschnitten Proben auf Infiltration ^[13].

- Aluminiumlegierung: 5xxx (wurde im Vorversuch ermittelt)
- Probengröße: 25,4 x 25,4 x 50,8 mm
- Feuerfestmassen:
 - ⇒ Alugard HS85
 - ⇒ Didurit 120AL 0-6
 - ⇒ Didurit 130AL 0-6
 - ⇒ Formula 5-A
 - ⇒ Carath 1400 LC/Al/0-4
 - ⇒ Carath 1650 ULC/AZS/0-5
 - ⇒ Alu-Cast 90 HS

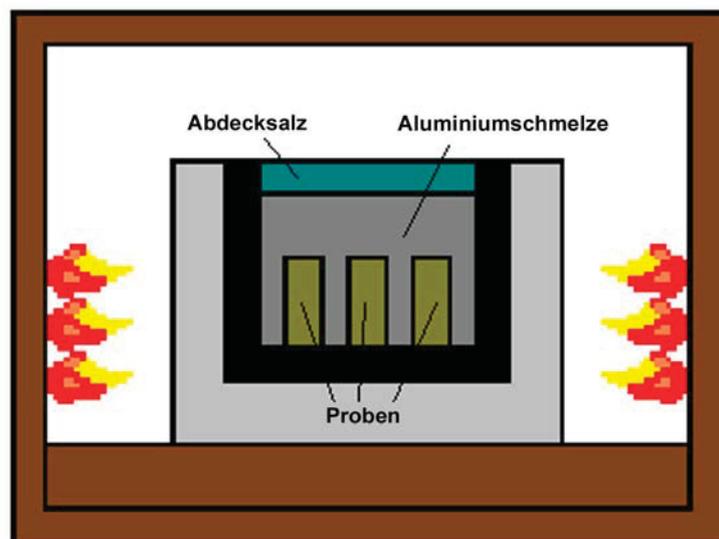


Abbildung 23: Schematischer Ofenaufbau ^[13]

6.2 Mechanischer Abrieb

Die Probe wurde in eine Einspannvorrichtung, die von einem Halbschalenofen (700, 900 und 1000 °C) umgeben ist, gelegt. Die mechanische Belastung erfolgte mittels eines Metallplättchens, das die Abkrätzeinheit simulierte, welches über einen adaptierten Hartmetallverschleißprüfstand (siehe Abbildung 24) in horizontaler Richtung mit konstanter Kraft über die Proben scheuerte.

Originale Abkrätzeinheit AMAG: 1180 mm · 30 mm bei 5075 kg

Versuchsabkrätzeinheit: 25,4 mm · 1 mm

Berechnung Umrechnungsfaktor α :
$$\alpha = \frac{1180 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm}}{25,4 \text{ mm} \cdot 1 \text{ mm}} = 1393,7$$

Masse Abkrätzeinheit m_{ab} :
$$m_{ab} = \frac{5075 \text{ kg}}{\alpha} = 3,6 \text{ kg}$$

Anzahl Abriebbewegungen: 150

Temperatur Halbschalenofen: 700, 900 und 1000 °C

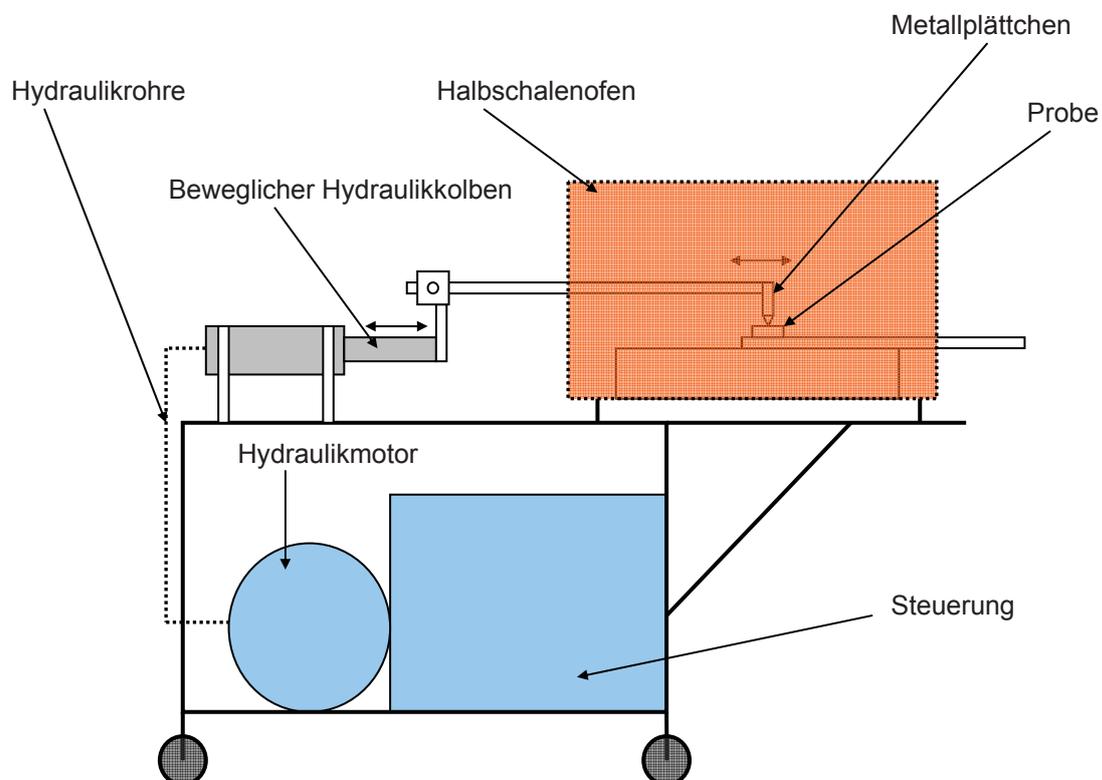


Abbildung 24: Skizze des Prüfstandes

6.3 Beurteilung Fingerspitzentest

Der Versuchsaufbau und die Bewertung wurden von der Firma ALCAN Inc. unter dem Namen „Finger-Tip-Test“ entwickelt ^[1].

Die Klassifizierung und die verschiedenen Beobachtungskriterien werden im folgenden Kapiteln aufgezeigt.

6.3.1 Klassifizierung (Gesamtbewertung)

In Tabelle 16 ist die Bewertung des Fingerspitzentests zusammengefasst.

Tabelle 16: Klassifizierung Fingerspitzentest ^[13]

Bewertung	Kategorie	Beobachtungen
1	Guter Widerstand	<ul style="list-style-type: none"> • leichte Anhaftung • keine Infiltration • keine Rißbildung und/oder Bröseligkeit
2	Guter bis mittlerer Widerstand	<ul style="list-style-type: none"> • starke Anhaftung • keine Infiltration • keine Rissbildung und/oder Bröseligkeit
3	Mittlerer Widerstand	<ul style="list-style-type: none"> • starke Anhaftung • wenig Infiltration • keine Rissbildung und/oder Bröseligkeit
4	Schlechter bis mittlerer Widerstand	<ul style="list-style-type: none"> • starke Anhaftung • starke Infiltration • keine Rissbildung und/oder Bröseligkeit
5	Schlechter Widerstand	<ul style="list-style-type: none"> • starke Anhaftung • starke Infiltration • leichte Rissbildung und/oder Bröseligkeit
6	Kein Widerstand	<ul style="list-style-type: none"> • starke Anhaftung • starke Infiltration • starke Rissbildung und/oder Bröseligkeit

6.3.2 Beobachtungskriterien

Die Beurteilung der Proben erfolgte an der Oberfläche makroskopisch und nach dem Schneiden der Proben wurde die Schnittfläche fotografiert und mittels Analysesoftware ausgewertet.

6.3.2.1 Anhaftung

Ist an der Probenoberfläche keine Metallschicht sichtbar, wird dies nicht als Anhaftung gewertet. Lässt sich die anhaftende Metallschicht mit dem Finger abreiben, so stellt dies eine leichte Anhaftung dar. Starke Anhaftung sind jene Metallschichten, die sich nicht mit den Fingern abreiben lassen.

6.3.2.2 Infiltration

Zeigt die Schnittfläche der Probe keine mit dem Auge sichtbare Anzeichen für eine Infiltration, so liegt keine Infiltration vor. Als wenig wird eine Infiltrationstiefe von ≤ 2 mm gewertet. Stark infiltriert sind jene, die eine Infiltrationsschichtdicke von über 2 mm aufweisen.

6.3.2.3 Rissbildung

Weist die Schnittfläche der Probe keine mit dem Auge sichtbares Anzeichen von Rissen auf, weder an der Oberfläche noch an der Schnittfläche, so stellt dies keine Rissbildung dar. Wenn die Probe nur an der Oberfläche und am Rand der Schnittfläche Risse zeigt, ist dies als leichte Rissbildung zu werten. Eine als stark beurteilte liegt dann vor, wenn eine Rissbildung vorliegt, die an der Oberfläche und an der Schnittfläche bis zu deren Symmetrieachse reichen.

6.3.2.4 Bröselig

Wenn die Probe eine glatte Schnittfläche zeigt, die sich auch beim Reiben mit dem Finger nicht abschälen lässt, wird dies als keine Brösiligkeit gewertet. Eine raue Schnittfläche, welche nicht abzureiben ist, wird als leichte Brösiligkeit beurteilt. Als stark wird eine raue Oberfläche, die sich abreiben lässt gewertet.

7 Vorversuche

Diese Voruntersuchung diente zur Feststellung der aggressivsten Aluminiumlegierung, die bei der Firma AMAG GmbH in Verwendung ist.

Für jeden Test wurden fünf Proben (vorgeheizt auf 815 °C) in ungefähr 3 kg Aluminiumlegierung (siehe Abbildung 23) bei 850 °C für 96 Stunden untergetaucht. Der Oxidationsschutz erfolgte durch ein Abdecksalz (siehe 7.2). Danach wurden die Proben geschnitten und mittels Mikroskop die Infiltration beobachtet und ausgewertet.

Beim Fingerspizentest kamen drei verschiedene Aluminiumlegierung aus dem AMAG GmbH Produktionsprogramm zum Einsatz. Die Legierung mit der stärksten Infiltration wird dann für die Hauptversuche verwendet ^[13].

- Probengröße: 25,4 x 25,4 x 50,8 mm
- Feuerfestmasse: Vesuvius ALUGARD HS 85 (derzeit im Ofen 3 der Firma AMAG GmbH in Verwendung)

7.1 Aluminiumbäder

Die für die Vorversuche gewählten Aluminiumlegierungen und deren chemische Zusammensetzung sind in der folgenden Aufzählung wiedergegeben.

- Legierung 2xxx (AMAG-Bezeichnung: ARX 1):
AlCuMg und AlCuSiMn (aushärtbar). Etwa 4 % Cu und weitere Legierungselemente (Mg, Si, Mn, Fe). Je nach Zusammensetzung sprechen diese Legierungen bevorzugt auf Warm- oder Kaltaushärtung an. Fe-Beimengungen unterbinden die Kaltaushärtung, ein kleiner Mg-Zusatz stellt diese wieder her.
- Legierung 5xxx (AMAG-Bezeichnung: AG45N.1):
AlMg (naturhart). Etwa 4,5 % Mg. Zugfestigkeit und Dehngrenze nehmen mit steigendem Mg-Gehalt kontinuierlich zu, während die Bruchdehnung bis etwa 3 % Mg abnimmt.
- Legierung 7xxx (AMAG-Bezeichnung: 7075.3):
AlZnMg (aushärtbar). Summe Zn und Mg auf 6 - 7 % begrenzt, da es sonst zu Spannungsrisskorrosion kommt. Zn erhöht die Festigkeit nur unbedeutend, die Kombination von Zn und Mg führt allerdings zu einer deutlichen Festigkeitssteigerung.

7.2 Abdecksalz

Als Oxidationsschutz dient ein Schmelzsalz (FOSECO COVERAL AL-AS 912) mit einer Aufnahmekapazität für Verunreinigungen von 50 % des Eigengewichts.

Die chemische Zusammensetzung des Abdecksalzes ist:

- 69 % Natriumchlorid
- 29 % Kaliumchlorid
- 2 % Flusspat

7.3 Ergebnis Vorversuche

Als aggressivstes Aluminiumbad (siehe Tabelle 17) stellte sich die Legierung 5xxx (AMAG-Bezeichnung: AG45N.1) heraus, da bei dieser die verwendete Masse Aluguard HS85 am stärksten infiltriert wurde. Die Infiltrationszone an den Seitenflächen aller fünf Proben war über 2 mm groß. Die zehn Proben der zwei anderen Legierungen zeigten eine Infiltration von weniger als 2 mm.

Tabelle 17: Auswertung der Vorversuche

Aluminium-legierung	Anhaftung	Infiltration	Rissbildung	Bröselig	Ergebnis
2xxx	keine	wenig	keine	nein	3
5xxx	keine	stark	keine	nein	4
7xxx	keine	wenig	keine	nein	3

8 Hauptversuche

Nach dem Ende der Vorversuche wurde die Legierung 5xxx (siehe Kapitel 7) für die Hauptversuche verwendet.

8.1 Auswertung der Hauptversuche

Zur Beurteilung der Hauptversuche wird neben der Betrachtung der Oberfläche der Proben nach Anhaftung, Bröseligkeit und Rissbildung auch die Infiltrationstiefe herangezogen.

Die Durchführung der Abriebversuche erfolgte nach den Fingerspizentests. Es konnten nur drei Seiten der Probe zur Bestimmung der Infiltrationstiefe verwendet werden (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26), der abgeriebene Seite der Probe und die dazugehörige Infiltration konnte nicht vermessen werden.

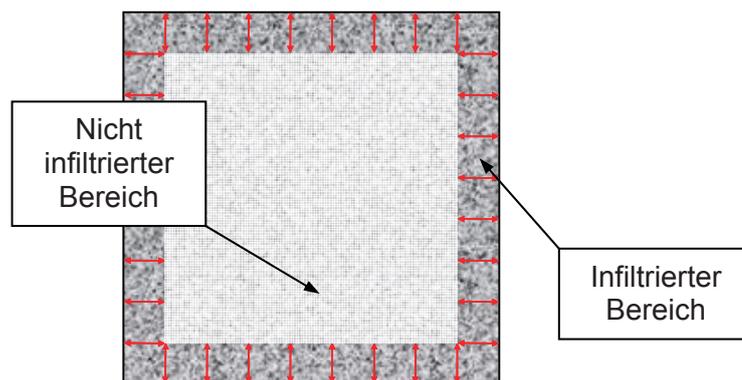


Abbildung 25: Messpunkte an der Probe ohne Abriebtest

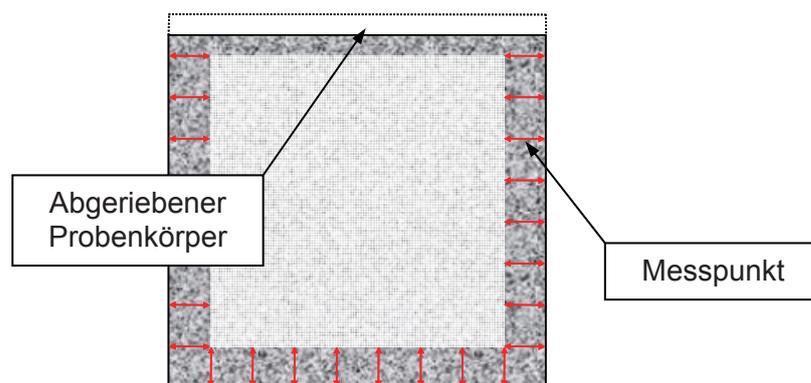


Abbildung 26: Messpunkte an der Probe nach dem Abriebtest

Nach dem Abriebversuch wurden die Proben normal zur Längsachse geschnitten und die Schnittflächen fotografiert. Die Vermessung und Auswertung der Fotos (siehe Abbildung 27) erfolgten mit dem Programm „Clemex Vision“. Aus 20 Messwerten einer Probe wurde der Mittelwert errechnet und bewertet (siehe 6.3.2.2).

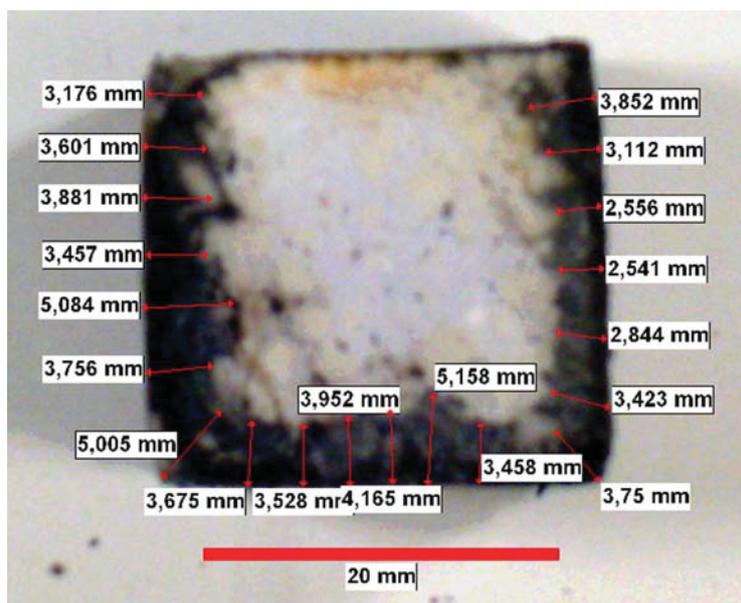


Abbildung 27: Foto der geschnittenen Probe Aluguard HS85

8.2 Ergebnis Hauptversuche

Pro Feuerbeton sind 5 Proben mit je 20 Messpunkten (siehe Tabelle 18) zur Beurteilung der Infiltration herangezogen worden. Das Produkt Formular 5A zeigte keine messbare Infiltration an den fünf Proben und daher wird die Infiltrationstiefe mit $< 0,20$ mm angegeben, und als nicht infiltriert bewertet.

Tabelle 18: Ergebnisse Infiltration Hauptversuche

Feuerfestmaterial	Infiltration Probe 1 [mm]	Infiltration Probe 2 [mm]	Infiltration Probe 3 [mm]	Infiltration Probe 4 [mm]	Infiltration Probe 5 [mm]	Mittelwert Infiltration [mm]
Formular 5-A	$< 0,20$	$< 0,20$	$< 0,20$	$< 0,20$	$< 0,20$	$< 0,20$
Aluguard HS85	1,38	1,03	1,11	0,87	0,80	1,04
Refracast	1,10	1,51	1,12	0,92	0,85	1,10
Didurit 120	1,95	1,70	1,77	1,51	1,68	1,72
Didurit 130	1,49	1,59	1,24	-	-	1,44
Carath 1400	2,71	2,01	1,51	2,30	1,86	2,08
Carath 1650	2,80	1,86	3,70	3,14	3,12	2,92
Alu-Cast	2,03	2,33	2,47	2,76	3,05	2,53

Nach der Beurteilung der Infiltration erfolgte die Gesamtbewertung des Fingertiptests, d.h. neben der Infiltration wurden auch die Anhaftung (siehe 6.3.2.1), Rissbildung (siehe 6.3.2.3) und die Bröseligkeit (siehe 6.3.2.4) untersucht. Das beste Ergebnis lieferte das Feuerfestprodukt Formular 5A (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Ergebnisse Fingertiptest Hauptversuche

Feuerfest-material	Anhaftung	Infiltration	Rissbildung	Bröselig	Ergebnis
Formular 5-A	keine	keine	keine	nein	1
Alugard HS 85	keine	wenig	keine	nein	2
Refracast	keine	wenig	keine	nein	2
Carath 1400	keine	stark	keine	nein	3
Carath 1650	keine	stark	keine	nein	3
Didurit 120	keine	wenig	leicht	stark	5
Didurit 130	keine	wenig	leicht	stark	5
Alu-Cast	keine	stark	leicht	stark	6

Die Auswertung des Abriebtests (siehe Tabelle 20) folgte an die Beurteilung des Fingertiptests. Als größte mögliche Infiltrationstiefe stellten sich 2 mm heraus, daraus resultieren die in sechs gleich große Teilbereiche aufgeteilten Bewertungsabstände mit 0,33 mm. Die Vermessung der Proben erfolgte vor dem Test und anschließend mit den abgeriebenen verglichen, um die Tiefe des Abriebes zu bestimmen.

Die Feuerbetone Didurit 120 AL, Didurit 130 AL und Alu-Cast hielten der Belastung des Abriebtest nicht stand, nach wenigen Hüben über die Proben wurden diese zerstört und konnten nicht zur Beurteilung herangezogen werden. Die Gründe für die geringe Festigkeit sind aus dem Kapitel 5.3.8 zu entnehmen.

Tabelle 20: Beurteilung Abriebtiefe

Bewertung	Abrieb [mm]
1	0,00 bis 0,33
2	0,34 bis 0,66
3	0,67 bis 1,00
4	1,01 bis 1,33
5	1,34 bis 1,66
6	1,67 bis 2,00

Die Werte aus den Tabellen wurden in Diagramme übertragen und als „Bestfit“-Funktion die potentielle Funktion herangezogen.

Die Tabelle 21 und Abbildung 28 zeigt das Ergebnis der Masse Alugard bzw. Kingcast HS85 der Firma *Vesuvius Group sa/nv*, ein zementarmer und tonerdereiches Material auf Basis von kalziniertem Bauxit. Der Versuch bei 700 °C wies geringe Abriebwerte auf (1 Bewertungspunkte), jedoch bei steigender Temperatur verlor das Material an Festigkeit und die Masse fiel in das Mittelfeld zurück, bei 1100 °C zeigten sich die schlechtesten Abriebwerte aller getesteten Proben (6 Bewertungspunkte). Ersichtlich ist dies am starken Anstieg der Kurve, der exponentielle Verlauf ergibt sich durch den Festigkeitsverlust. Als Endergebnis kam es zu einer Bewertungsnote von drei Punkten.

Tabelle 21: Abriebtest Alugard HS 85

Temperatur [°C]	Mittelwert Abrieb [mm]	Bewertung
700	0,20	1
900	0,32	1
1000	1,88	6

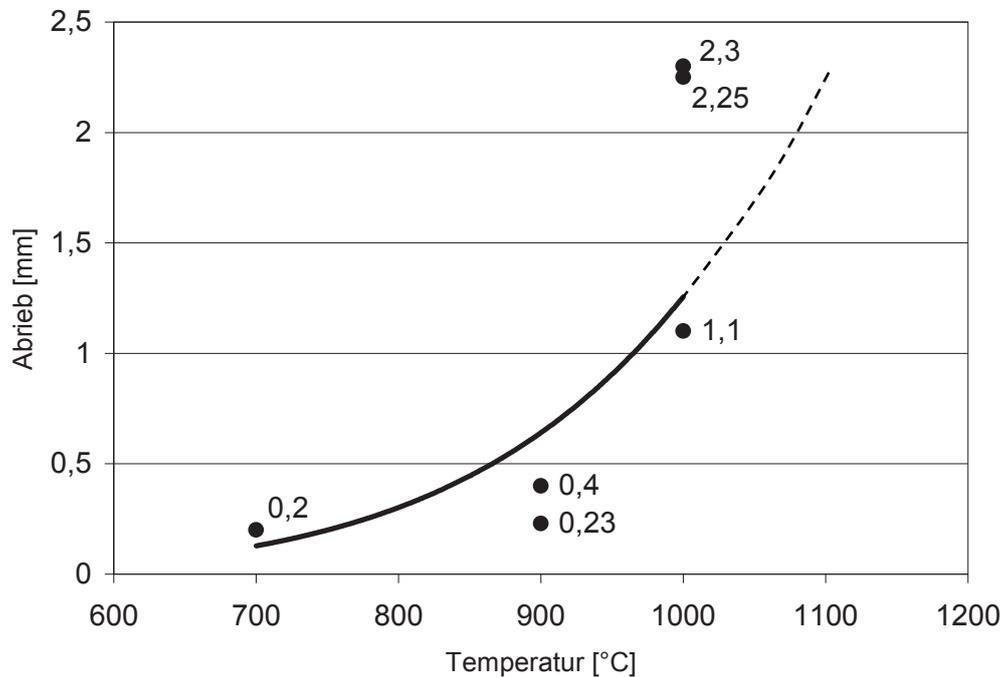


Abbildung 28: Abriebtest Alugard HS 85

In Tabelle 22 und Abbildung 29 ist das Abriebergebnis der Masse Formula 5-A der Firma *Stellar Materials Incorporated*, zementarmer Feuerbeton mit hohem Tonerdeanteil, der exzellente Festigkeitseigenschaften bei den durchgeführten Versuchen präsentierte. Bei 700 °C erreichte die Masse eine Bewertungsnote von eins, die sie bei 900 und 1000 °C auf zwei verschlechterte. Der Abrieb in mm zeigt einen linearen Verlauf über die gesamte Temperaturachse. Insgesamt wurden zwei Bewertungspunkte vergeben, dass hinter der Masse Refracast LC C-90 den zweiten Platz zusammen mit den Massen Carath 1400 und Carath 1600 bedeutete.

Tabelle 22: Abriebtest Formula 5-A

Temperatur [°C]	Mittelwert Abrieb [mm]	Bewertung
700	0,33	1
900	0,44	2
1000	0,51	2

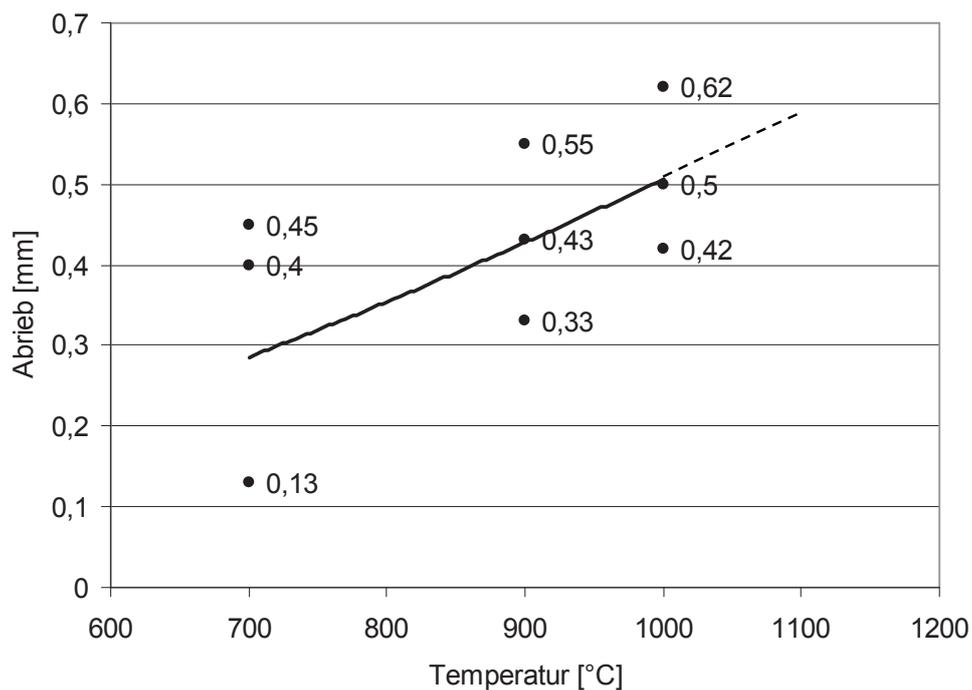


Abbildung 29: Abriebtest Formula 5-A

Die Tabelle 23 und Abbildung 30 zeigen das Ergebnis des zementarmen Feuerbetons Carath 1400 LC/Al/0-4 der Firma *Aug. Rath jun. GmbH*. Diese Masse ist ein Schamott auf mullitreicher Rohstoffbasis. Der Beton wies ähnliche Ergebnisse wie die Masse Formula 5-A auf, wodurch dieselbe Endbewertung von zwei Punkten auftritt. Jedoch weist dieser Versuch im Vergleich zu den anderen Massen eine geringe Streuung der einzelnen Abriebwerte bezogen auf jeweils eine Temperatur.

Tabelle 23: Abriebtest Carath 1400

Temperatur [°C]	Mittelwert Abrieb [mm]	Bewertung
700	0,31	1
900	0,34	2
1000	0,51	2

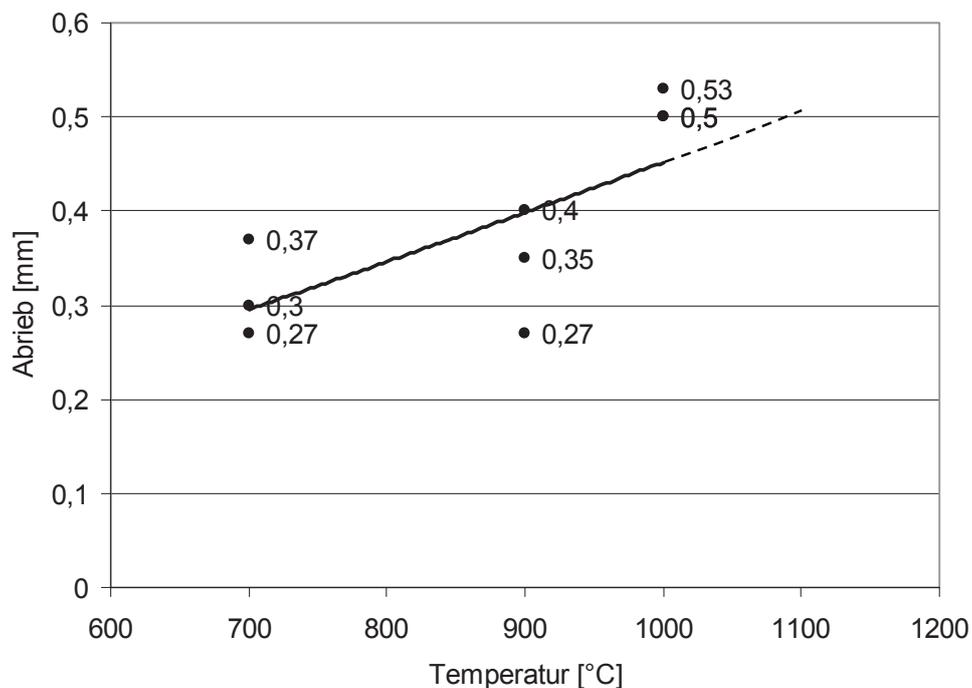


Abbildung 30: Abriebtest Carath 1400

Carath 1650 ULC/AZS/0-5 der Firma *Aug. Rath jun. GmbH* ist ein „ultra-low-cement“ Feuerbeton auf Rohstoffbasis Periklas, das Ergebnis ist in Tabelle 24 und Abbildung 31 wiedergegeben. Die beiden Massen der Firma *Aug. Rath jun. GmbH* haben zwar zwei grundsätzlich unterschiedliche chemische Zusammensetzungen, Carath 1400 besitzt einen hohen Al_2O_3 -Anteil, die Masse Carath 1650 einen hohen MgO -Anteil, wiesen aber ähnliche Werte beim Abriebtest auf. Einzig bei der Temperatur von 700 °C zeigte der Feuerbeton Carath 1650 schlechtere Ergebnisse und erreichte dadurch nur zwei Bewertungspunkte. Der Verlauf über der Temperatur kann als linear angenommen werden.

Tabelle 24: Abriebtest Carath 1650

Temperatur [°C]	Mittelwert Abrieb [mm]	Bewertung
700	0,34	2
900	0,47	2
1000	0,48	2

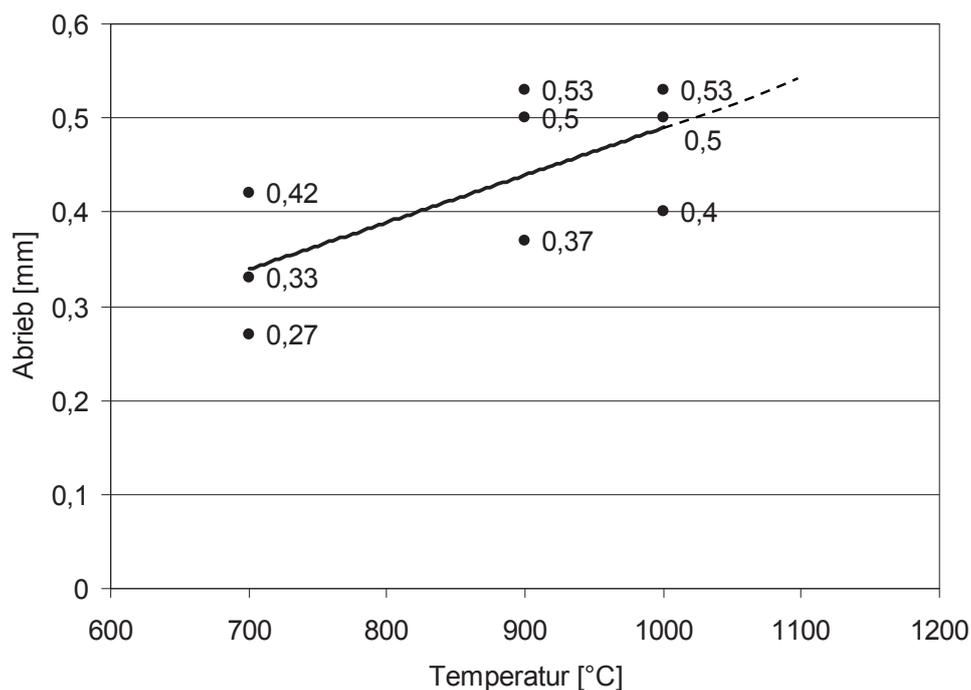


Abbildung 31: Abriebtest Carath 1650

Tabelle 25 und Abbildung 32 zeigen die Ergebnisse von Refracast LC C-90 der Firma *Refratechnik Steel GmbH*, ein zementarmer Feuerbeton auf einer Korund Rohstoffbasis. Dieser Beton erwies sich als widerstandsfähigstes Material im Abriebtest, er erzielte die geringsten Abriebwerte bei 700, 900 und 1000 °C. Dies führte zum besten Ergebnis (1 Bewertungspunkt) unter den getesteten Massen.

Tabelle 25: Abriebtest Refracast LC C-90

Temperatur [°C]	Mittelwert Abrieb [mm]	Bewertung
700	0,17	1
900	0,22	1
1000	0,27	1

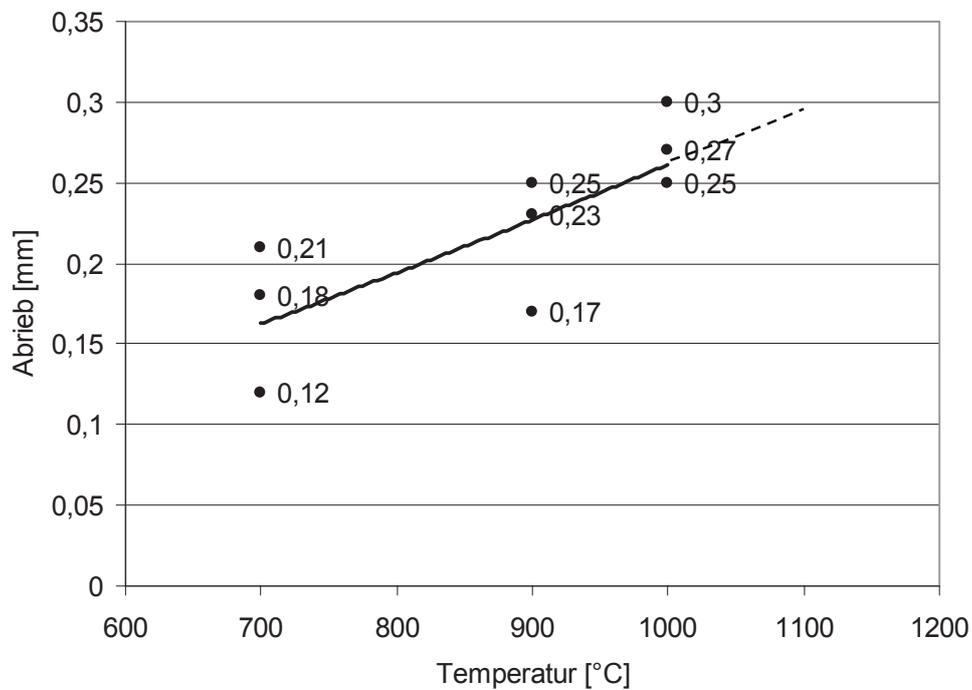


Abbildung 32: Refracast LC C-90

In der nachfolgende Tabelle 26 ist das Ergebnis der Hauptversuche dargestellt. Zusammengefasst sind hier die Beurteilungen aus dem Fingerspitzentest und dem Abriebtest. Die besten Ergebnisse lieferten die Feuerbetone Refracast und Formular 5-A, die beide einen Wert von 3 erreichten. Am schlechtesten gereiht, mit einem Wert von 12, wurde die Masse Alu-Cast, die weder im Fingerspitzentest noch im Abriebtest befriedigende Ergebnisse lieferte.

Tabelle 26: Endergebnisse Hauptversuche

Feuerfest-material	Ergebnis Fingerspitzentest	Ergebnis Abriebtest	Endergebnis
Refracast	2	1	3
Formular 5-A	1	2	3
Carath 1400	3	2	5
Carath 1650	3	2	5
Aluguard HS 85	2	3	5
Didurit 120 AL	5	6	11
Didurit 130 AL	5	6	11
Alu-Cast	6	6	12

9 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden mehrere Beurteilungskriterien für feuerfeste Massen beim Einsatz in Aluminiumschmelzöfen entwickelt. Der experimentelle Teil gliederte sich in zwei verschiedene Versuche, die unterschiedliche Zerstörungen der Feuerbetone hervorriefen. Als erstes verweilten Feuerfestproben 96 Stunden in einem Aluminiumbad, was einem von der Firma *RHI AG* entwickelten „Finger-Tip-Test“ entspricht. Anschließend erfolgte eine mechanische Belastung der Proben unter hoher Temperatur, die eine Äbkrätzeinheit simulierte. Für den Abriebtest wurden die Proben auf 700, 900 und 1000 °C erhitzt und ein Metallplättchen scheuerte über die Probe. Die Auswertung gliederte sich in fünf verschiedene Gebiete, die Anhaftung und die Infiltration der Aluminiumschmelze, die Rissbildung, die Bröseligkeit an der Schnittfläche und den Materialabtrag durch die Äbkrätzeinheit.

Die besten Endergebnisse in den Fingerspizentests und Abriebtests lieferten die Feuerbetone Refracast und Formular 5-A. Am schlechtesten abgeschnitten hat die Masse Alu-Cast, die weder im Fingerspizentest noch im Abriebtest gute Resultate zeigte. Die Festigkeit der Feuerbetone Didurit 120 AL, Didurit 130 AL und Alu-Cast wurde durch die Probenherstellung so stark verändert, dass sie die mechanische Belastung des Abriebtests zerstörte und dies zu schlechten Beurteilungsnoten führte.

Um Fehler bei der Probenherstellung zu vermeiden, sollte die fertig abgemischte und gebrannte Masse direkt vom Hersteller bezogen werden. Aus den gelieferten Standardsteinen können dann beliebig viele Proben mit bestimmten Abmessungen mittels Diamantscheibe herausgeschnitten werden. Die Probengröße von 25,4 x 25,4 x 50,8 mm macht ein Absieben notwendig. Größere Probenabmessungen sind für den Abriebtest von Vorteil, jedoch für den Fingerspizentest müssen größere Tiegel verwendet werden, um mehrere Proben gleichzeitig testen zu können. Dies bedeutet große Tiegel- und Widerstandsofenabmessungen.

Beim Abriebtest sollte eine Temperatur bis 1400 °C erreicht werden, um praxisbezogene Ergebnisse zu liefern. Dazu muss ein neuer Versuchsaufbau, der einen Ofen und eine überarbeitete Probenaufnahme beinhaltet, erarbeitet werden, denn die hohen Temperaturen machen den Einsatz von Stahl für die Probenaufnahme unmöglich. Bei dem derzeitigen Versuchsaufbau sind die Ofenabmessungen zu groß, der Ofen sollte den verwendeten Probengrößen angepasst werden.

10 Literatur

- [1] KRIST Thomas: Leichtmetalle; Vogel-Verlag, Würzburg 1969
- [2] <http://www.oea-alurecycling.org/index.html/> 27.04.2005
- [3] <http://www.igora.ch/index/dosen/dos-faqs.htm?id=24/> 10.05.2005
- [4] PAWLEK Franz: Metallhüttenkunde; de Gruyter-Verlag, Berlin-New York 1983: ISBN 3-11-007458-3
- [5] <http://www.rhi-ag.com/> 15.05.2005
- [6] KAMMER Katrin: Aluminiumtaschenbuch: Band 1; Aluminium-Verlag, Düsseldorf 2002: ISBN 3-87017-274-6
- [7] KAMMER Katrin: Aluminiumtaschenbuch: Band 2; Aluminium-Verlag, Düsseldorf 2002: ISBN 3-87017-274-6
- [8] <http://www.pius-info.de/> 18.05.05
- [9] ROUTSCHKA Gerald: Taschenbuch Feuerfeste Werkstoffe; Vulkan-Verlag, Deutschland 2001: ISBN 3-8027-3150-6
- [10] SCHNEIDER Kurt: Die Verhüttung von Aluminiumschrott, 5. Auflage; Metall-Verlag GmbH, Berlin 1970
- [11] The Secondary Aluminium Industry, OEEC Documentation Report of Technical Assistance Mission No. 19 1952, Seite 12
- [12] PETZOLD Armin, ULBRICHT Joachim: Feuerbeton und betonartige feuerfeste Massen und Materialien, 1. Auflage; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1994
- [13] ALCAN Total Immersion Test (Fingertip Test); RHI AG 2005
- [14] AGST Joachim: Die feuerfesten Baustoffe, J. Sczimarowsky u. U. Agst Kapellen, Dokumentation 1976
- [15] FANZOTT Senta M.: Moderne Feuerfest-Technik, Bibliothek der Technik Band 35; Verlag Moderne Industrie AG & Co, Landsberg/Lech 1989
- [16] AGST Joachim: Schmelz- und Gießöfen in der Aluminium-Industrie; J. Sczimarowsky u. U. Agst Kapellen, Dokumentation 1980
- [17] The Technical Association of Refractories: Refractories Handbook; Tokyo 1998: ISBN 4-925133-01-2
- [18] GELSDORF, G., SCHELLBERG F. und SCHULTE K.: Feuerfeste Massen, Feuermörtel und Feuerkitt und ihre Anwendung; Wiesbaden 1973
- [19] RHI Refractories: Aluminium, Feuerfestlösungen für die Aluminiumindustrie; RHI AG 2005

- [20] DIDIER Refractories: Feuerfeste werkstoffe für den Ofenbau / Refractory Materials for Furnace Construction 2005
- [21] KRONE Klaus: Aluminiumrecycling; Aluminium-Verlag, Düsseldorf 2000: ISBN 3-00-003839

11 Abkürzungsverzeichnis von A-Z

A	Al_2O_3
C	CaO
S	SiO_2
HTZ	Hochtonerdezement
PZ	Portlandzement
RT	Raumtemperatur
TWB	Temperaturwechselbeständigkeit

12 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

- Tabelle 1: Rampenmassen im Ofen 3
Tabelle 2: Charakteristische Segerkegelwerte
Tabelle 3: Beispiele für verschiedene Anwendungstemperaturen
Tabelle 4: Abschreckzahlen wichtiger Steinqualitäten
Tabelle 5: Feuerfeste Oxide mit chemischer Formel, Schmelztemperatur und chem. Charakter
Tabelle 6: Vor- und Nachteile des Einsatzes von Massen gegenüber Steinen
Tabelle 7: Zusammenfassung einer möglichen Ofenzustellung
Tabelle 8: Chemische Analyse: Alugard HS85
Tabelle 9: Chemische Analyse: Didurit 120AL 0-6
Tabelle 10: Chemische Analyse: Didurit 130AL 0-6
Tabelle 11: Chemische Analyse: Formula 5-A
Tabelle 12: Chemische Analyse: Carath 1400
Tabelle 13: Chemische Analyse: Carath 1650
Tabelle 14: Chemische Analyse: Alu-Cast 90 HS
Tabelle 15: Chemische Analyse: Refracast LC C-90
Tabelle 16: Klassifizierung Fingerspizentest
Tabelle 17: Auswertung der Vorversuche
Tabelle 18: Ergebnisse Infiltration Hauptversuche
Tabelle 19: Ergebnisse Fingertiptest Hauptversuche
Tabelle 20: Beurteilung Abriebtiefe
Tabelle 21: Abriebtest Alugard HS 85
Tabelle 22: Abriebtest Formula 5-A
Tabelle 23: Abriebtest Carath 1400
Tabelle 24: Abriebtest Carath 1650
Tabelle 25: Abriebtest Refracast LC C-90
Tabelle 26: Endergebnisse Hauptversuche
Tabelle 27: Zusammensetzung von Sekundäraluminiumlegierungen
Tabelle 28: Feuerfeste Werkstoffe
Tabelle 29: Eigenschaften der feuerfesten Grundstoffe
Tabelle 30: Chemische Zusammensetzung der Silikasteine
Tabelle 31: Physikalische Eigenschaften der Silikasteine
Tabelle 32: Chemische Zusammensetzung der Schamottesteine
Tabelle 33: Physikalische Eigenschaften der Schamottesteine
Tabelle 34: Chemische Zusammensetzung aluminareicher Steine
Tabelle 35: Physikalische Eigenschaften aluminareicher Steine
Tabelle 36: Chemische Zusammensetzung zirkonhaltiger Steine
Tabelle 37: Physikalische Eigenschaften zirkonhaltiger Steine
Tabelle 38: Chemische Zusammensetzung von Kohlenstoffsteinen
Tabelle 39: Physikalische Eigenschaften von Kohlenstoffsteinen
Tabelle 40: Chemische Zusammensetzung von Schamotten
Tabelle 41: Chemische Zusammensetzung von Korund- und Zr-dioxid Granulatwerkstoffen
Tabelle 42: Chemische Zusammensetzung von Faserwerkstoffen
- Abbildung 1: Skizze des Ofens
Abbildung 2: Haltbarkeit der bisher eingesetzten feuerfesten Erzeugnisse
Abbildung 3: Produktion und Bedarf von Sekundäraluminium in Deutschland
Abbildung 4: Sekundäraluminiumerzeugung zur Verarbeitung aller Schrottkategorien
Abbildung 5: Drehtrommelofen
Abbildung 6: Induktionsofen
Abbildung 8: Zweikammerofen
Abbildung 9: Pyrolyse / Blankglühen / Schmelzen
Abbildung 10: Schachtschmelz- und Warmhalteofen/Bauart STRIKO

- Abbildung 11: Grundstoffpyramide feuerfester Erzeugnisse
- Abbildung 12: Die Eigenschaften kristalliner und glasartiger Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur
- Abbildung 13: Temperaturverlauf im Aluminiumschmelzofen
- Abbildung 14: Skizze einer möglichen Ofenzustellung
- Abbildung 15: Versuchsablauf der Vorversuche
- Abbildung 16: Versuchsablauf der Hauptversuche
- Abbildung 17: Überblick Probenherstellung
- Abbildung 18: Aluguard HS85
- Abbildung 19: Röhreinrichtung
- Abbildung 20: Gefüllte Stahlform und Stempel
- Abbildung 21: Teilbare Holzformen
- Abbildung 22: Zusammengeklebte Proben
- Abbildung 23: Schematischer Ofenaufbau
- Abbildung 24: Skizze des Prüfstandes
- Abbildung 25: Messpunkte an der Probe ohne Abriebtest
- Abbildung 26: Messpunkte an der Probe nach dem Abriebtest
- Abbildung 27: Foto der geschnittenen Probe Aluguard HS85
- Abbildung 28: Abriebtest Aluguard HS 85
- Abbildung 29: Abriebtest Formula 5-A
- Abbildung 30: Abriebtest Carath 1400
- Abbildung 31: Abriebtest Carath 1650
- Abbildung 32: Refracast LC C-90

13Anhang

Tabelle 27: Zusammensetzung von Sekundäraluminiumlegierungen

Legierungsnummer	Kurzzeichen	Werkstoffnummer	Si [%]	Mg [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]
230	G-ALSi12	3.2581	11,0 bis 13,5	0,05	0,1 bis 0,4	0,5	0,05	0,10
231	G-ALSi12(Cu)	3.2583	11,0 bis 13,5	0,3	0,2 bis 0,5	0,8	1,0	0,5
230/10	G-ALSi10Mg	3.2381	9,0 bis 11,0	0,20 bis 0,50	0,1 bis 0,4	0,5	0,10	0,10
233	G-ALSi10Mg(Cu)	3.2383	9,0 bis 11,0	0,20 bis 0,50	0,1 bis 0,4	0,6	0,3	0,3
226	G-ALSi8Cu3	-	7,5 bis 9,5	≤ 0,3	0,2 bis 0,5	0,8	2,0 bis 3,5	1,2
225	G-ALSi6Cu4	3.2151	5,0 bis 7,5	0,1 bis 0,3	0,3 bis 0,6	1,0	3,0 bis 5,0	2,0
235	G-ALSi5Mg	3.2341	5,0 bis 6,0	0,4 bis 0,8	0,1 bis 0,4	0,5	0,05	0,10
243	G-ALMg3	3.241	0,5	2,5 bis 3,5	≤ 0,4	0,5	0,05	0,10
241	G-ALMg3(Cu)	3.3243	1,3	2,0 bis 4,0	≤ 0,6	0,6	0,3	0,3
245	G-ALMg5	3.3261	0,5	4,5 bis 5,5	≤ 0,4	0,5	0,05	0,10

Tabelle 28: Feuerfeste Werkstoffe ^[9]

Formel	Kurzzeichen	Mineralname	Schmelzpunkt [°C]	Dichte [g/cm ³]	Wärme- dehnung bis 1000°C [%]	Wärmelei- tfähigkeit [W/mK]	Mittlere spez. Wärme [kJ/kgK]
SiO ₂	S	β-Quarz	-	2,65	-	8	-
SiO ₂	S	Cristobalit	1725	2,29 - 2,32	1 - 1,4	-	1,15
SiO ₂	S	Kieselglas	-	2,20	0,06	1,4	-
Al ₂ O ₃	A	Korund	2050	3,99	0,8	53	1,1
MgO	M	Periklas	2840	3,58	1,4	61	1,2
CaO	C	-	2580	3,32	1,3	25	0,95
ZrO ₂	Z	Baddeleyit	2680	5,56	0,8	19	0,7
Cr ₂ O ₃	Cr	Eskolait	2275	5,22	0,75	-	0,75
3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ (Al ₆ Si ₄ O ₁₃)	A3S2	Mullit	1840	3,16	0,45	9	1,1
2MgO·SiO ₂ (Mg ₂ SiO ₄)	M2S	Forsterit	1890	3,21	1,1	9	1,05
ZrO ₂ ·SiO ₂ (ZrSiO ₄)	ZS	Zirkon	1775	4,60	0,45	6	0,75
MgO·Al ₂ O ₃ (MgAl ₂ O ₄)	MA	Spinell	2135	3,58	0,85	21	1,1
MgO·Cr ₂ O ₃ (MgCr ₂ O ₄)	MCr	Picro- chromit	2350	4,42	0,7	-	0,9
CaO·Al ₂ O ₃ (CaAl ₂ O ₄)	CA	-	1600	2,98	0,76	-	1,0
CaO·2Al ₂ O ₃ (CaAl ₄ O ₇)	CA2	-	1750	2,91	0,62	-	1,05
C	α-C	Graphit	3600	2,26	0,3 - 0,5	> 400	1,5
C	Amorph	Ruß	3600	1,7-1,8	0,4	-	2
SiC	-	-	2300	3,21	0,5	130	1,1
Si ₃ N ₄	-	-	1900	3,18	0,27	35	0,7
B ₄ C	-	-	2450	2,51	0,44	35	0,94
BN	-	-	3000	2,25	0,37	50	0,8

Tabelle 29: Eigenschaften der feuerfesten Grundstoffe

Werkstoff	Formel	Allgemeine Eigenschaften
Silika	SiO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Festigkeit bei großen Temperaturen • Geringe Dichte • Hohe Wärmedehnung bei tiefen Temperaturen • Niedrige Wärmedehnung bei hohen Temperaturen
Aluminareich	Al ₂ O ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Feuerfestigkeit • Hohe mechanische Festigkeit • Hohe Verschlackungsbeständigkeit • Hohe Dichte • Relativ hohe Wärmeleitfähigkeit
Schamotte	SiO ₂ Al ₂ O ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Wärmedehnung • Geringe Wärmeleitfähigkeit • Geringe Dichte • Geringe Festigkeit bei hohen Temperaturen • Geringe Verschlackungsbeständigkeit
Zirkonhaltige	ZrO ₂ SiO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Temperaturwechselbeständigkeit • Hohe Verschlackungsbeständigkeit • Hohe Dichte
	ZrO ₂ CaO	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Benetzbarkeit • Geringe Wärmeleitfähigkeit • Hohe Korrosionsbeständigkeit • Hohe Dichte
Kalk	CaO	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Verschlackungsbeständigkeit • Hohe Benetzbarkeit • Geringe Beständigkeit gegen Feuchte
Magnesia	MgO	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Feuerfestigkeit • Relativ geringe Festigkeit bei hohen Temperaturen • Hohe Beständigkeit gegen basische Schlacken • Geringe Temperaturwechselbeständigkeit
Kohlenstoff	C	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Feuerfestigkeit • Hohe Verschlackungsbeständigkeit • Geringe Oxidationsbeständigkeit

Tabelle 30: Chemische Zusammensetzung der Silikasteine ^[9]

	Al₂O₃ [%]	SiO₂ [%]	Fe₂O₃ [%]	CaO [%]	Na₂O+K₂O [%]
Silika-Koksofensteine	0,8 - 0,9	95	0,6 - 0,7	2,7	0,2
Silika-Glasofensteine	0,2 - 0,7	95,5	0,3	2,2 - 2,4	0,1 - 0,2
Kieselglas kompakt		99,5			
Gepresste Kieselglassteine	0,3 - 3	94	0,1 - 0,4	1,2 - 4	0,1
Kieselglasschlicker gegossen		99			

Tabelle 31: Physikalische Eigenschaften der Silikasteine ^[9]

	Dichte [g/cm³]	Offene Porosität [%]	Kaltdruckfestigkeit [N/mm²]	Druckerweichen (DE) T₀₅ [°C]	therm. Dehnung 1000°C [%]
Silika-Koksofensteine	2,31-2,35	18 - 23	30 - 60	1610 - 1650	1,3
Silika-Glasofensteine	2,31-2,35	19,5 - 21,5	30- 40	1630 - 1670	1,4 - 1,5
Kieselglas kompakt	2,2	0	200	1200	0,06
Gepresste Kieselglassteine		13 - 24	25 - 35		0,1 - 0,3
Kieselglasschlicker gegossen	2,2	13 - 16	50 - 80		0,06

Tabelle 32: Chemische Zusammensetzung der Schamottesteine ^[9]

Typische Werkstoffsorten	Al₂O₃ [%]	SiO₂ [%]	Fe₂O₃ [%]
A 40 t	40 - 45	50 - 55	1 - 2
A 35 t	35 - 40	55 - 60	1,5 - 2,5
A 30 t	30 - 35	59 - 64	1,7 - 3,0
A 25 t	20 - 30	64 - 75	1,6 - 3,0
A 40 h	40 - 45	50 - 55	1,3 - 2,5
A 35 h	35 - 40	55 - 60	1,6 - 2,5
A 30 h	30 - 35	59 - 64	1,7 - 3,0
A 25 h	20 - 30	64 - 75	1,6 - 3,0

Tabelle 33: Physikalische Eigenschaften der Schamottesteine ^[9]

Typische Werkstoffsorten	SK [°C]	(DE) T ₀₅ [°C]	therm. Dehnung 1000°C [%]	TWB Wasserabschreck.
A 40 t	1740 - 1760	1380 - 1450	0,60	20 - 25
A 35 t	1730	1360	0,55	15 - 20
A 30 t	1680	1340	0,55	15 - 20
A 25 t	1580	1260	0,50	5 - 15
A 40 h		1330	0,60	20 - 25
A 35 h		1290	0,55	15 - 25
A 30 h		1260	0,55	15 - 20
A 25 h		1230	0,50	10 - 15

Tabelle 34: Chemische Zusammensetzung aluminareicher Steine ^[9]

	Al ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	TiO ₂ [%]	Cr ₂ O ₃ [%]	ZrO ₂ [%]	Na ₂ O + K ₂ O [%]
Reiner Korundstein	99	0,3	0,3	0,1			< 0,4
Sinterkorundstein	90 - 95	4 - 9	< 0,6				< 0,5
Bauxitstein	80 - 85	10 - 15	< 2,5	< 3			< 0,7
Schmelzmullitstein	75	24	0,3	0,1			< 0,3
Sintermullitstein	72	26	< 1				< 0,6
Sillimanitsteine	55 - 65	33 - 43	< 1,5	< 1			< 0,8
Korundhalt. Steine	50 - 65	30 - 48	< 2				< 1,7
Steine aus mullitisirten Rohstoffen	50 - 55	43 - 47	< 2				< 1,3
Chem. Gebundener Korund-Chromoxidstein	70	22	0,8	P ₂ O ₅ : 3	5		
Korund-Chromoxidstein	10 - 80	3 - 20	< 3	< 3	5 - 8	0-7	0,3 - 4
Phosphatgebundener Bauxitstein	79	6	1,3	P ₂ O ₅ : 3	BaSO ₄ : 8		

Tabelle 35: Physikalische Eigenschaften aluminareicher Steine ^[9]

	Dichte [g/cm ³]	Offene Porosität [%]	Kaltdruck- festigkeit [N/mm ²]	(DE) T ₀₅ [°C]	therm. Dehnung 1000°C [%]	TWB Wasserabschreck.
Reiner Korundstein	3,14	20	60	> 1700	0,8	15
Sinter- korundstein	3,0 - 3,2	13 - 17	100 - 180	> 1700	0,8	20 - 25
Bauxitstein	2,8	20	80	1480	0,7	> 30
Schmelz- mullitstein	2,6	16	80	> 1700	0,6	> 30
Sintermullit- stein	2,55	16	100	1650		15
Sillimanit- steine	2,5 - 2,6	15 - 16	70 - 80	1590	0,55	> 25
Korundhalt. Steine	2,4 - 2,5	17 - 18	60 - 80	1450	0,5	20
Steine aus mullitisierten Rohstoffen	2, -2,4	13 - 19	60 - 100	> 1400	0,5	25
Chem. gebundener Korund- Chromoxid- stein	2,75	13	200	1650	0,8	20
Korund- Chromoxid- stein	3,1 - 3,9	2 - 20	60 - 300	> 1650	0,8	> 30
Phosphatgeb undener Bauxitstein	3,05	14,5	130	1170	0,7	15

Tabelle 36: Chemische Zusammensetzung zirkonhaltiger Steine ^[9]

	Al ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	TiO ₂ [%]	CaO [%]	MgO [%]	ZrO ₂ + HfO ₂ [%]
Dichtes Zirkonsilikat isostatisch gepresst	0,2 - 0,5	30 - 34	< 0,1	0,8 - 1,8	< 0,1	< 0,1	64 - 68
Standard Zirkon	0,5 - 2	32 - 34	< 0,3	< 1	< 0,2	< 0,2	64 - 66
Zirkon-Mullit isost. gepresst	45 - 47	19 - 21	< 0,1	< 0,2	< 0,2	< 0,2	32 - 35
AZS, porös	65 - 76	10 - 15	< 0,3	< 0,2	< 0,1	< 0,1	10 - 23

Tabelle 37: Physikalische Eigenschaften zirkonhaltiger Steine ^[9]

	Dichte [g/cm³]	Offene Porosität [%]	Kaltdruckfestigkeit [N/mm²]	(DE) T₀₅ [°C]	therm. Dehnung 1000°C [%]	TWB Luft-Wasserabschreck.
Dichtes Zirkonsilikat isostatisch gepresst	4,1 - 4,4	1 - 9	> 100		0,5	1 ≥ 30 (Luft)
Standard Zirkon	3,6 - 3,8	15 - 22	> 60	1700	0,5	> 20
Zirkon-Mullit isost. gepresst	3,4 - 3,6	< 1	> 300		0,65	1 - 3
AZS, porös	2,8 - 3,2	15 - 24	< 60	> 1650	0,6	20 ≥ 30

Tabelle 38: Chemische Zusammensetzung von Kohlenstoffsteinen ^[9]

	Al₂O₃ [%]	SiO₂ [%]	SiC [%]	C [%]
Kohlenstoffstein				> 92
Teilgrafitstein				> 94
Grafitstein				> 99
Kohlenstoffstein, mikroporös	0 - 12	0 - 5	3 - 15	> 60
Teilgrafitstein, mikroporös	0 - 12	0 - 5	3 - 15	> 60

Tabelle 39: Physikalische Eigenschaften von Kohlenstoffsteinen ^[9]

	Dichte [g/cm³]	Offene Porosität [%]	Kaltdruckfestigkeit [N/mm²]	Asche [%]
Kohlenstoffstein	1,80 - 1,85	11 - 18	25 - 45	< 10
Teilgrafitstein	2,14 - 2,19	17 - 25	18 - 30	< 5
Grafitstein	2,20 - 2,25	15 - 30	13 - 25	< 1
Kohlenstoffstein, mikroporös	2,00 - 2,05	12 - 19	40 - 80	20 - 40
Teilgrafitstein, mikroporös	2,10 - 2,35	17 - 25	30 - 60	20 - 40

Tabelle 40: Chemische Zusammensetzung von Schamotten ^[9]

	Al ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	RO [%]	R ₂ O [%]
Saure-Schamotte	< 25	> 68	2,5	-	2
Normal-Schamotte	30 - 45	50 - 70	1 - 3	1 - 2	1 - 2
Kaolin-Schamotte	42 - 45	50 - 55	1,5	1,5	1,5
Korund-Schamotte	58 - 65	32 - 38	1 - 3	1 - 2	1
Mullit-Schamotte	70 - 78	20 - 25	0,5 - 1	0,5	< 1

Tabelle 41: Chemische Zusammensetzung von Korund- und Zr-dioxid Granulatwerkstoffen ^[9]

	Al ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	RO, R ₂ O [%]	ZrO ₂ [%]
Normal- (Elektro-) Korund	> 94	< 1,5	< 0,3	-
Tabulartonerde	99,5	0,05	0,2	-
Hohlkugelkorund	98	1,5	< 0,5	-
Baddeleyit (ZrO₂)	-	-	-	> 95
Zirkon (ZrSiO₄)	< 1	33	< 0,3	62 - 67

Tabelle 42: Chemische Zusammensetzung von Faserwerkstoffen

	Al ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	C [%]	Cr [%]	Ni [%]
Aluminiumsilikat-Faser	50 - 70	25 - 50	-	-	-
C-Stahl-Faser	-	-	0,15 - 0,3	-	-
Edelstahlfaser	-	-	< 1	18 - 27	20 - 36
Edelstahl-Drahthäcksel	-	-	-	16 - 26	10 - 22