



Montanuniversität Leoben - University of Leoben

Department Metallurgie - Department of Metallurgy

Nichteisenmetallurgie - Nonferrous Metallurgy



# DIPOLMARBEIT

„gesperrt“

Thema:

## Optimierung der metallothermischen Ferromolybdänproduktion



Ersteller:

Sonja Zeiler

Betreuer:

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

Dipl.-Ing. Robert Ressel

Leoben, September 07

## **Optimierung der metallothermischen Ferromolybdänproduktion**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Produktion von Ferromolybdän nach dem metallothermischen Herstellungsverfahren und wurde in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Treibacher Industrie AG erstellt.

Die Berechnung der Möllerkomponenten erfolgt derzeit nach einer Berechnungsmethode, die lediglich die Analysen der Molybdänkonzentrate in Bezug auf Mo-Gehalt und O-Gehalt und des Ferrosiliziums bezüglich des Si-Gehaltes berücksichtigt. Die Mengen der Rohstoffe Alugrieß, Walzenzunder, Eisenschrott und Kalk bleiben ungeachtet deren Zusammensetzung stets konstant und auch die Wärmeentwicklung bei der Reaktion wird in der Möllerberechnung nicht berücksichtigt. Zahlreiche Ofendurchbrüche in der Vergangenheit zeigen sehr deutlich, dass die Wärmeentstehung beim Prozess sehr unterschiedlich sein kann, was zu einer erhöhten Unfallgefahr aller beteiligten Personen führt. Ferner bringt die unzureichende Möllerberechnung auch wirtschaftliche Nachteile, wie die Entstehung von Fehlchargen und einen unter Umständen zu hohen Reduktionsmittelverbrauch mit sich. In die neue Kalkulation sind Faktoren wie Zusammensetzung, Viskosität und Schmelzpunkt der Schlacke sowie Reaktionsenthalpie des Prozesses miteinzubeziehen. In Verbindung mit einer entsprechend angepassten Verfahrensweise sollte durch diese Maßnahmen eine optimale Wärmebilanz des Ferromolybdänabbrandes (und damit Minimierung der Ofendurchbruchgefahr), eine Steigerung des Molybdän-Ausbringens sowie eine Minimierung des Reduktionsmittelbedarfs erreicht werden.

Zur Charakterisierung der derzeitigen Verfahrensweise wurden Versuche hinsichtlich der Möllerrhomogenität durchgeführt. Weiters erfolgte eine genaue Untersuchung der Abläufe in der Möllermischanlage. Auch wurde eine Probenahmeverrichtung konstruiert, um die Absetzzeit des Molybdäns in der Schlacke zu ermitteln. Die Realisierung von Abbrandversuchen im Maßstab 1:10 führten aufgrund von hervorragenden Ergebnissen zu anschließenden Versuchsabbränden im Produktionsbetrieb.

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die benutzten Quellen, wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Sonja Zeiler

---

---

## Danksagung

Ich bedanke mich für die großartige Unterstützung bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit bei meinen Betreuern seitens der Nichteisenmetallurgie Herrn Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Helmut Antrekowitsch und Herrn Dipl.-Ing. Robert Ressel.

Weiters möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Forschung und Entwicklung der Firma Treibacher Industrie AG, vor allem bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Markus Hochenhofer für die fortwährende Unterstützung bei den praktischen Versuchen bedanken. Besonderer Dank gebührt auch den Mitarbeitern des Bereiches Ferrolegierungen, insbesondere Herrn Christian Klaming und Felix Hornbanger, mit deren Einsatz und Hilfsbereitschaft die Durchführung der Arbeit erst möglich wurde.

---

## **Abstract**

The Treibacher Industrie AG produces ferromolybdenum according to a metallothermic production procedure. In the past there were irregularities at the production, which should be removed in this project. The primary intention was to realise preparatory work and investigations for a new and extensive calculation of the burden, on basis of empirical data which is capable to calculate an ideal burden composition in dependence of the present raw materials.

In order to capture the actual state of the production plant, a characterization of the raw materials and the products occurred at the beginning. In further consequence the burden mixing plant was analysed with regard to the running periods. The realization of numerous burnup attempts allowed estimating the homogeneousness of the burden. Further investigations were carried out concerning the deposition behavior from molybdenum in the slag. After the realization of pilot experiments in the relation 1:10, which delivered excellent results concerning the molybdenum yield, test runs took place in the production plant.

Subsequent a study of the possibilities of the utilisation of ferromolybdenum slag was carried out, whereby the depository might be avoided in future.

---

## Kurzfassung

Die Treibacher Industrie AG produziert Ferromolybdän nach einem metallothermischen Produktionsverfahren. In der Vergangenheit gab es Unregelmäßigkeiten in der Produktion, deren Ursachen im Rahmen dieses Projektes beseitigt werden sollen. Das primäre Ziel war es, Vorarbeit und Untersuchungen für eine neue und umfangreiche Möllerberechnungsmethode auf Basis empirischer Daten durchzuführen, welche in der Lage ist, eine jeweils ideale Möllerszusammensetzung in Abhängigkeit der vorliegenden Rohstoffe zu berechnen.

Um den Ist-Zustand des Produktionsbetriebes zu erfassen, erfolgte eingangs eine Charakterisierung der Einsatzstoffe und der Produkte. In weiterer Folge wurde die Möllermischanlage hinsichtlich ihrer Laufzeiten untersucht. Die Durchführung von zahlreichen Abbrandversuchen ermöglichte eine Abschätzung der Homogenität des Möllers. Weitere Untersuchungen wurden bezüglich des Absetzverhaltens von Molybdän in der Schlacke durchgeführt. Nach der Realisierung von Pilotversuchen im Verhältnis 1:10, welche hervorragende Ergebnisse betreffend der Molybdän-Ausbeute lieferten, erfolgte die Durchführung von Betriebsversuchen im Produktionsbetrieb.

Neben der Optimierung des Abbrandes sollte im Rahmen des Projektes auch eine Literaturrecherche über die Möglichkeiten einer Ferromolybdänschlackenverwertung durchgeführt werden, wodurch deren künftige Deponierung umgangen werden könnte.

---

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
<b>EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>3</b>
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>4</b>
<b>2 GRUNDLAGEN.....</b>	<b>6</b>
2.1 Eigenschaften und Anwendungen von Molybdän .....	6
2.2 Metallurgische Grundlagen bei der Produktion von Ferromolybdän .....	7
2.2.1 Karbothermisches Verfahren.....	9
2.2.2 Metallothermische Reduktion .....	10
2.3 Untersuchung der Einflussparameter auf einen metallothermischen Abbrand bei der Herstellung der FeMo-Legierung .....	11
2.3.1 Einfluss der Aluminiumkorngröße auf den Prozess.....	11
2.3.2 Einfluss der Chargenmenge auf die Mo-Ausbeute.....	13
2.3.3 Einfluss des CaO/Al-Verhältnisses auf die Mo-Ausbeute.....	14
2.3.4 Einfluss der Aluminiummenge auf die Metallausbeute.....	15
2.4 Schlackenmetallurgie des Molybdäns .....	16
2.4.1 Einfluss der Schlackenzusammensetzung auf die Aktivität der Komponenten .....	16
2.4.2 Verteilungszahl $L_{Mo}$ zwischen Schlacke und Metall.....	18
2.4.3 Viskosität der Schlacken .....	21
2.5 Modellierung metallothermischer Reaktionen .....	26
<b>3 PRAKTISCHE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>29</b>
3.1 Beschreibung der Ferromolybdän Produktionseinheit .....	29
3.1.1 Möllermischanlage.....	29
3.1.2 Abbrandstelle.....	30

---

---

3.1.3	Schlackenaufbereitung .....	32
3.1.4	FeMo–Brecherstraße.....	33
3.1.5	Filteranlagen.....	33
3.2	Charakterisierung der Einsatzstoffe und Rohstoffe.....	36
3.2.1	Molybdänkonzentrat .....	36
3.2.2	Aluminiumgrieß.....	38
3.2.3	Ferrosilizium .....	40
3.2.4	Kalk .....	42
3.2.5	Filterstaub.....	42
3.2.6	Walzenzunder.....	42
3.3	Charakterisierung der Produkte .....	43
3.3.1	Ferromolybdän .....	44
3.3.2	Schlacke .....	44
3.4	Verwendete Analysengeräte .....	45
3.4.1	ICP Analyse.....	45
3.4.2	Korngrößenverteilung .....	46
3.4.3	RFA-Analyse .....	46
3.4.4	Leco-Gerät.....	46
3.4.5	Rasterelektronenmikroskop.....	47
3.5	Vorversuche zur Bestimmung der Homogenität des Möllers und des Absetzverhaltens von Molybdän .....	48
3.5.1	Möllermischanlage und Homogenität des Möllers.....	48
3.5.2	Die Untersuchung des Absetzverhaltens von Molybdän .....	58
3.6	Einfluss der Homogenität des Möllers und der Abkühlgeschwindigkeit auf den FeMo-Abbrand im versuchstechnischen Maßstab .....	61
3.7	Einfluss der Homogenität des Möllers und der Abkühlgeschwindigkeit auf den FeMo-Abbrand im großtechnischen Maßstab im Betrieb Ferrolegierungen.....	67
3.8	Berechnung der Basisdaten für das Möllerberechnungsmodell .....	76

---



---

3.8.1	Berechnung des thermodynamischen Gleichgewichtes und der umgesetzten Energie anhand von HSC 5.11 .....	80
3.8.2	Viskositätsberechnungen nach Urbain .....	86
3.8.3	Schlackenschmelzpunktberechnungen mit dem Softwarepaket FactSage 5.5 <sup>®</sup> .....	87
<b>4</b>	<b>VERWERTUNGSMÖGLICHKEITEN VON SCHLACKEN AUS DER FERROMOLYBDÄNPRODUKTION .....</b>	<b>88</b>
4.1	Zusammenfassung der wichtigsten Normen .....	88
4.2	Abschließende Betrachtungen .....	94
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>95</b>
<b>6</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>97</b>
6.1	Literatur .....	97
6.2	Abkürzungsverzeichnis .....	100
6.3	Tabellenverzeichnis .....	102
6.4	Abbildungsverzeichnis .....	104
<b>ANHANG A</b>	<b>.....</b>	<b>110</b>
<b>ANHANG B</b>	<b>.....</b>	<b>121</b>
<b>ANHANG C</b>	<b>.....</b>	<b>139</b>

---

# 1 Einleitung

Die Geschichte der Treibacher Industrie AG (TIAG) beginnt mit Dr. Carl Auer von Welsbach. Er war einer der bedeutendsten Forscher seiner Zeit mit den Forschungsschwerpunkten Spektralanalyse und Seltene Erden. Im Jahre 1898 gründete er die damaligen Treibacher Chemischen Werke.

Heute gehört das Unternehmen zu den international führenden Herstellern auf dem Gebiet Chemie und Metallurgie. Die Zentrale befindet sich in Althofen (Österreich). Weiters gibt es Niederlassungen in Kanada, Japan, China und Slowenien. Das gesamte Unternehmen beschäftigt etwa 600 Mitarbeiter.

Die vorliegende Arbeit wurde für den Geschäftsbereich Stahl- und Gießereiindustrie (Betrieb Ferrolegierungen) erstellt. Die Verkaufsprodukte dieses Bereiches sind Legierungen wie Ferrovanadium und Ferromolybdän, die als Legierungsprodukte in der Stahlindustrie dienen. Die Elemente Vanadium und Molybdän sind wichtige Legierungsmetalle, die in Baustählen und Werkzeugstählen, beziehungsweise rostfreien Stählen verwendet werden.

Hochleistungsmaterialien für verschiedene Anwendungen von Strukturkeramik und Beschichtungen produziert der Geschäftsbereich Keramische Bauteile und Beschichtungen.

Der Bereich Funktionskeramik vertreibt Hochleistungswerkstoffe mit Einsatzgebieten in der Elektro- und Szintillatorkeramik, in keramischen ionenleitenden Membranen und in der Biokeramik.

In das Geschäftsfeld Hartmetalle und Energiespeicher fällt die Produktion und Vermarktung metallischer Hartstoffe (Carbide) in Pulverform zur Herstellung von Hartmetallwerkzeugen und die Produktion von Wasserstoffspeicherlegierungen.

Selten Erd-Produkte werden im Bereich Seltene Erden und Chemikalien produziert und kommen bei Herstellern von Elektronik, Spezialgläsern, Keramik, Katalysatoren, Batterien sowie Pharmazeutika zum Einsatz.

Die Treibacher Industrie AG ist auch auf dem Bereich Recycling sehr aktiv, derzeit konzentrieren sich die Bemühungen darauf, metallhaltige Abfälle zu verwerten, dazu zählen Katalysatoren und Rückständen die Vanadium, Molybdän oder Nickel enthalten. Weiters ist das Unternehmen zur Behandlung von gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen autorisiert, die Hauptentsorgungsstoffe sind Altfarben und -lacke, Werkstättenabfälle, Lösemittelgemische und Altöle [1].

---

Die vorliegende Arbeit wurde für den Betrieb Ferrolegierung (FL) erstellt. Das vorrangige Ziel war es, Vorversuche durchzuführen und Vorarbeit für die Erstellung einer genauen Möllerberechnungsmethode bei der metallothermischen Produktion von Ferromolybdän zu leisten. Eine genaue Berechnung der Zusammensetzung des Möllers soll Probleme im Produktionsbetrieb minimieren und die Sicherheit für die Belegschaft maximieren. Die neue Möllerberechnung berücksichtigt neben Rohstoffspezifikationen auch Parameter wie Zusammensetzung, Viskosität und Schmelzpunkt der Schlacke und entstehende Wärme des Prozesses. Da die durchzuführenden Berechnungen und die dazugehörigen Versuche sehr umfangreich sind und den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden, ist das Modell nur ansatzweise beschrieben. Die bereits durchgeführten Berechnungen sind im Anhang zu finden.

Ein weiteres Ziel dieser Diplomarbeit war, die Verwertungsmöglichkeit der Ferromolybdänschlacken zu untersuchen. Zu diesem Zweck soll eine Literaturstudie durchgeführt werden, welche Normen und Vorschriften betreffend Verwertung von Schlacken in Österreich beinhaltet.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Eigenschaften und Anwendungen von Molybdän

Die erstmalige Produktion von Ferromolybdän erfolgte im Jahre 1900 in Frankreich von der Firma Girod aus dem Rohstoff Wulfenit. Als die Lagerstätte Climax in Colorado gefunden und in Betrieb genommen wurde, stieg die Molybdänproduktion stark an, da man hier Molybdänglanz abbauen konnte und somit nicht mehr wie bisher auf die Gewinnung von Wulfenit angewiesen war.

Die Weltproduktion von Molybdänerzen betrug im Jahre 2003 etwa 125.000 t Molybdäninhalt. China, Chile und die USA verfügen über rund 85 % der Molybdänreserven weltweit. Molybdänit ( $\text{MoS}_2$ ) ist das wichtigste Molybdänerz, weiters sind noch Wulfenit ( $\text{PbMoO}_4$ ) und Powellit ( $\text{CaMoO}_4$ ) erwähnenswert [2].



Abbildung 1: Molybdänit [3]

Abbildung 2: Wulfenit [3]

Abbildung 3: Powellit [3]

Molybdän ist ein graues Metall, mit nur einer Modifikation. Seine Kristallstruktur ist kubisch raumzentriert. Es besitzt eine gute Beständigkeit gegenüber zahlreichen Säuren, wie z.B. Flusssäure, Salzsäure, Phosphorsäure, Essigsäure, Chromsäure und Schwefelsäure, sowie gegenüber flüssigen Metallen wie Wismut bis zu 1425 °C, Natrium bis 1500 °C, Silizium, Kupfer und auch gegenüber den meisten nichtmetallischen Schlacken und geschmolzenem Glas. Molybdän wird jedoch von oxidierenden Säuren wie Salpetersäure und Königswasser angegriffen und oxidiert schnell an der Luft oder in oxidierender Atmosphäre bei Temperaturen über 500 °C. In Tabelle 1 sind die physikalischen Eigenschaften von Molybdän aufgelistet [2].

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Molybdän [4]

Ordnungszahl	42
Atommasse	95,95 g/mol
Schmelzpunkt	2.620 °C
mittlerer lin. therm. Ausdehnungskoeffizient zw. 20 und 100 °C	$5,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
zw. 20 und 700 °C	$5,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
spezifische Wärme bei 20 °C	0,251 J/g
bei 1.000 °C	0,293 J/g
Dichte bei 25 °C	10,22 g/cm <sup>3</sup>
Zugfestigkeit geglüht	700 – 1.000 N/mm <sup>2</sup>
kaltverformt	1.800 N/mm <sup>2</sup>
Elastizitätsmodul bei 25 °C	330.000 N/mm <sup>2</sup>
bei 980 °C	280.000 N/mm <sup>2</sup>
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C	1,465 J/(cm·s)
bei 1.000 °C	1,047 J/(cm·s)
spez. elektrischer Widerstand bei 20 °C	5,7 µΩ/cm
bei 1.000 °C	27 µΩ/cm
Normalpotential Mo/Mo <sup>3+</sup>	0,2 V

Reines Molybdän dient als hitzebeständiger Werkstoff, zum Beispiel in Widerstandsdrähten von Heizwicklungen, für Elektroden in Glasschmelzöfen, für Anoden in Elektronenstrahlröhren oder für Glühdrähte in Glühlampen. Molybdän wird auch für korrosionsanfällige Bauteile in der chemischen Industrie verwendet. Der Großteil der Verwendung entfällt allerdings auf die Produktion von Molybdänlegierungen. Legierungen mit Titan, Wolfram Zirkonium oder Niob dienen dem Bau von Raketentriebwerken [7].

## 2.2 Metallurgische Grundlagen bei der Produktion von Ferromolybdän

Der chemische Prozess der Reduktion beruht auf dem Prinzip der Aufnahme von Elektronen. Ein oxidisch vorliegendes Metall (Metalloxid) nimmt Elektronen auf und liegt dann metallisch vor. Als Elektronenquelle dient meist Kohlenstoff, weil er in Form von Koks ein billiges Reduktionsmittel ist. Es können aber auch andere Metalle als Elektronenquelle fungieren, die eine größere Affinität zum Sauerstoff haben als das zu reduzierende Metall. Der Elektronendonator bildet mit dem nichtmetallischen Teil der Verbindung die Schlacke. Das Gleichgewicht des Metalls M mit seinem Oxid kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:



Die Standard-Gibbs-Energie ( $\Delta_f G^0$ , freie Bildungsenthalpie) ist folgendermaßen definiert

$$\Delta_f G^0 = -R \cdot T \cdot \ln K^0 \quad (2)$$

R...Gaskonstante

T...Temperatur

$K^0$ ...thermodynamische Gleichgewichtskonstante

In folgender Abbildung sind die Linien der freien Bildungsenthalpie in Abhängigkeit von der Temperatur für einige Reduktionsmittel und für die Molybdänoxide  $MoO_2$  und  $MoO_3$  dargestellt [2].

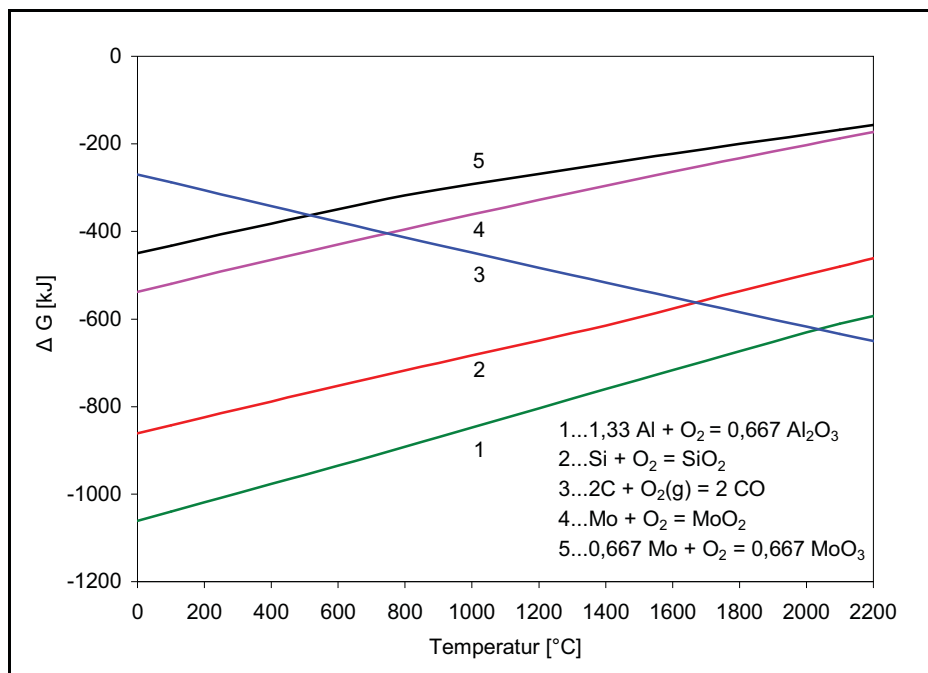


Abbildung 4: Freie Bildungsenthalpie in Abhängigkeit von der Temperatur [7]

Molybdänverbindungen können sehr leicht Elektronen aufnehmen bzw. abgeben, daher eignen sie sich sehr gut als Katalysatoren für Oxidations- und Reduktionsreaktionen.

Ferromolybdän kann entweder durch karbothermische Reduktion (Reduktion mit Kohlenstoff) oder durch metallothermische Reduktion, wobei hier Aluminium und Silizium als Reduktionsmittel dienen, hergestellt werden. Heute wird fast nur noch das metallothermische Verfahren angewendet, weil dieses keine hohen Investitionen erfordert, der Arbeitsaufwand geringer und das Verfahren leichter zu kontrollieren ist aber auch in nur einem Schritt ein verkaufsfähiges Produkt sowie eine absetzbare Schlacke produziert werden kann. In

Abbildung 4 ist deutlich ersichtlich, dass mit Aluminium besser reduziert werden kann als mit Silizium, da die freie Bildungsenthalpie des Aluminiums negativer ist. Die Abbildung 4 zeigt auch, dass die Reduktion mit Kohlenstoff erst ab etwa 800 °C stattfinden kann, da bei niedrigeren Temperaturen die Bildungsenthalpie des Kohlenstoffs höher ist, als die der Molybdänoxide [7].

### 2.2.1 Karbothermisches Verfahren

Wie bereits erwähnt, dient beim karbothermischen Verfahren Kohlenstoff als Reduktionsmittel. Folgende Reaktionen finden statt:



In der Praxis wird dieser Prozess bei etwa 1700 °C – 2000 °C durchgeführt, um die Bildung des Karbides  $\text{Mo}_2\text{C}$  weitgehend zu vermeiden.

Für die karbothermische Reduktion verwendet man meist Lichtbogen-Reduktionsöfen. Die Wände des zylindrischen Ofengefäßes sind mit Magnesit ausgekleidet. Als Rohstoffe dienen Rösterz, das zu ca. 90 % aus  $\text{MoO}_3$  besteht, reine Eisenerze und Walzensinter. Kalk und Flussspat fungieren als Flussmittel, Holzkohle oder Torfkoks als Reduktionsmittel. Es erfolgt die Brikettierung des Rösterzes mit der Reduktionskohle um die Verstaubung gering zu halten. Zuerst werden die Briketts in die Schlackenreste der vorigen Charge getaucht, um die  $\text{MoO}_3$ -Verflüchtigung zu vermeiden. Das Molybdän(VI)oxid wird zu Molybdän(IV)oxid reduziert, unter Zugabe der Flussmittel kommt es zur Entstehung einer möglichst dünnflüssigen Schlacke, sodass sich der Ferromolybdänblock sauber absetzen kann. Der gesamte Vorgang dauert etwa 20 bis 28 Stunden, wobei ein produzierter Ferromolybdänblock etwa 1,5 bis 2 Tonnen wiegt. Nach Abkühlen des Blockes erfolgt die Zerkleinerung. Die Schlacke enthält etwa 8 % - 10 % Molybdänoxid und muss daher, ebenso wie die Flugstäube, weiter aufbereitet werden.

Die gesamte Molybdänausbeute dieses Prozesses liegt bei ungefähr 95 % - 98 %. Tabelle 2 zeigt die Verbrauchsmengen der einzelnen Einsatzstoffe bei der karbothermischen Reduktion [4] [6].

Tabelle 2: Verbrauchszahlen bei der karbothermischen Ferromolybdänherstellung [4]

		Einphasenofen 300 kW	Dreiphasenofen 1500 kW
Rösterz	kg	1160	1420
Umschmelzschlacke	kg	280	333
Schlackenmetall	kg	165	168
Nagelschrott	kg	172	230
Hammerschlag	kg	290	102
Kalk	kg	150	178
Flussspat	kg	150	178
Holzkohle	kg	255	310
Elektrodenmasse	kg	95	135
Energie	kWh	4300	4450
Erhaltene Produkte:			
Verkaufsmetall	kg	1000	1000
Umschmelz	kg	270	250
Staub	kg	66	nicht angegeben

## 2.2.2 Metallothermische Reduktion

Unter metallothermischer Reduktion versteht man im Allgemeinen die pyrometallurgische Gewinnung hochschmelzender Metalle. Es findet eine exotherme Reaktion zwischen dem Reduktionsmetall und einer Metallverbindung statt. Bei dieser Reaktion wird so viel Wärme freigesetzt, dass von außen keine Energie zugeführt werden muss. Das Metall wird aus dem Oxid reduziert und scheidet sich ab, das oxidierte Reduktionsmetall geht in die Schlacke. Diese Reaktion lässt sich folgendermaßen beschreiben, wobei M das zu gewinnende Metall und R das Reduktionsmetall darstellt:



Die treibende Kraft dieser Reaktion liegt in der großen Affinität des Reduktionselementes zum Sauerstoff. Die Reaktion läuft umso besser, je größer der Unterschied der Sauerstoffaffinitäten zwischen den beiden Metallen ist. Als quantitatives Maß für diese treibende Kraft wird die freie Bildungsenthalpie herangezogen (siehe Seite 7).

Kommt Aluminium als Reduktionsmittel zum Einsatz spricht man von Aluminothermie, bei Silizium von Silikothermie. Bei der Produktion von Ferromolybdän werden Aluminium und Silizium als Reduktionsmittel verwendet. Käme nur Aluminium zum Einsatz, wäre die Wärmeentwicklung zu groß und es tritt eine heftige explosionsartige Umsetzung, welche eine starke Verflüchtigung des Molybdänoxides bewirken würde, auf. Mit Silizium als alleiniges Reduktionsmittel liefere die Reduktion sehr träge und langsam ab und die Schlacke-Metall-Trennung wäre nicht optimal. Daher setzt man als Reduktionsmittel Aluminium und



Ferrosilizium ein, um einen gut kontrollierbaren Prozess mit bestmöglicher Schlacke-Metall-Trennung zu erhalten.

Das metallothermische Verfahren der Ferromolybdänproduktion ist vor allem in der Stahlindustrie für die Produktion von kohlenstoffarmen Stählen von Vorteil [5] [8].

## 2.3 Untersuchung der Einflussparameter auf einen metallothermischen Abbrand bei der Herstellung der FeMo-Legierung

In Folgendem werden Einflussparameter, wie Aluminiumkorngröße, Chargenmenge, CaO/Al-Verhältnis und Aluminiummenge auf die Mo-Ausbeute bei der metallothermischen Herstellung einer FeMo-Legierung beschrieben. Die Ausbeute des Molybdäns ist wie folgt definiert:

$$\text{Mo - Ausbeute} = \frac{(\text{Masse der Ferrolegierung}) \cdot (\text{gemessener Mo - Gehalt})}{\text{theoretischer Mo - Gehalt (stöchiometrisch)}} \cdot 100 \quad (6)$$

Die Ausbeuten dieser Versuche liegen im Bereich von etwa 80 %. Dieser Wert ist aufgrund der Chargenmenge von etwa 200 g zu niedrig, und entspricht nicht den realen Ausbeuten in der Ferrolegierungsproduktion. In Kapitel 2.3.2 wird näher auf dieses Problem eingegangen. Eine Versuchscharge zur Produktion von 100 g Ferromolybdän (60 % Mo, 40 % Fe) setzt sich folgendermaßen zusammen (Tabelle 3):

Tabelle 3: Zusammensetzung der Versuchschargen

Rohstoff	Menge [g]
MoO <sub>3</sub>	101,7
Al	34,0
Fe	40,0
CaO	35,0
Summe	210,7

### 2.3.1 Einfluss der Aluminiumkorngröße auf den Prozess

In Abbildung 5 ist der Einfluss von Aluminiumpulversorten mit unterschiedlichen Korngrößen auf die Ausbeute von Molybdän dargestellt.

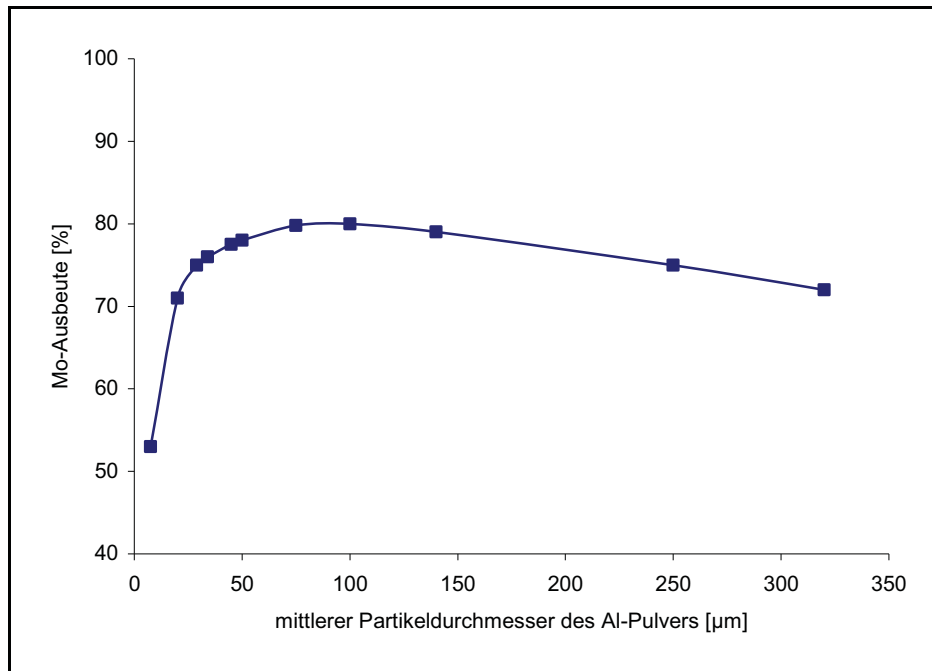


Abbildung 5: Abhängigkeit der Molybdänausbeute vom mittleren Partikeldurchmesser (200g Charge) [10]

Das Diagramm zeigt deutlich, dass die Feinheit des Aluminiumpulvers einen großen Einfluss auf die Molybdänausbeute hat. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Partikeldurchmesser die Molybdänausbeute stark zunimmt und bei 100 µm ein Maximum erreicht wird. Bei größeren Aluminiumkörnern nimmt der Einfluss auf die Ausbeute ab, es ist ein leichtes Sinken des Molybdänertrages zu beobachten.

Ein Aspekt, der bei der Betrachtung der Einflüsse der Partikeldurchmesser nicht außer Acht gelassen werden darf, ist die maximal erreichbare Temperatur. Mit unterschiedlich feinem Aluminiumpulver erreicht man unterschiedlich hohe Temperaturen und kann diese über einen gewissen Zeitraum halten (siehe Abbildung 6).

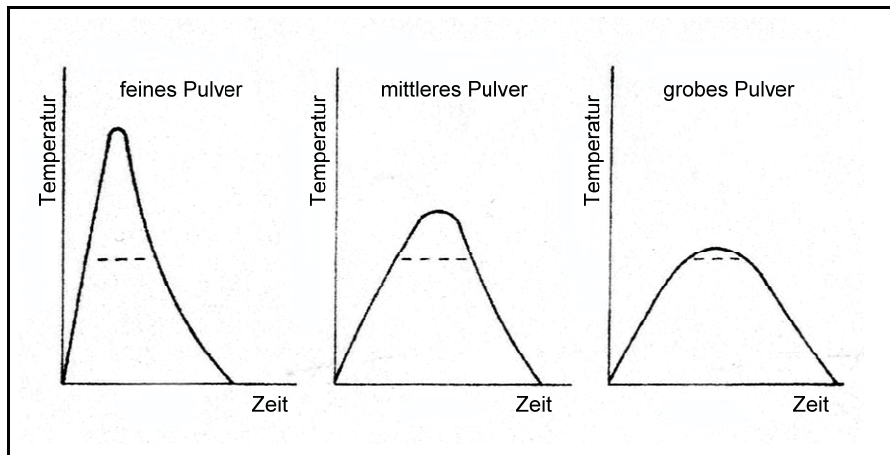


Abbildung 6: Temperatur-Zeit-Profil bei unterschiedlich eingesetzten Aluminiumpulvern [10]

Mit feinem Pulver wird eine sehr hohe Temperatur erreicht, allerdings läuft die Reaktion so schnell ab, dass die Temperatur auch schnell wieder sinkt, wenn das gesamte Aluminium oxidiert ist. Es können nicht alle Einsatzstoffe ausreichend schmelzen. Bei der Reduktion mit einem Aluminiumpulver mittlerer Größe verläuft die Reaktion zwar langsamer und es wird eine nicht so hohe Temperatur erreicht wie mit feinem Pulver, aber die Reaktion dauert länger und somit haben die Einsatzstoffe mehr Zeit zu schmelzen. Mit einem groben Pulver hingegen ist die Reaktion so langsam, dass die erforderliche Temperatur erst gar nicht überschritten wird, wobei ein ausreichendes Schmelzen und Trennen der Phasen nicht möglich ist [10].

### 2.3.2 Einfluss der Chargenmenge auf die Mo-Ausbeute

Die Abbildung 7 zeigt den Einfluss der Chargenmenge auf die Ausbeute des Molybdäns.

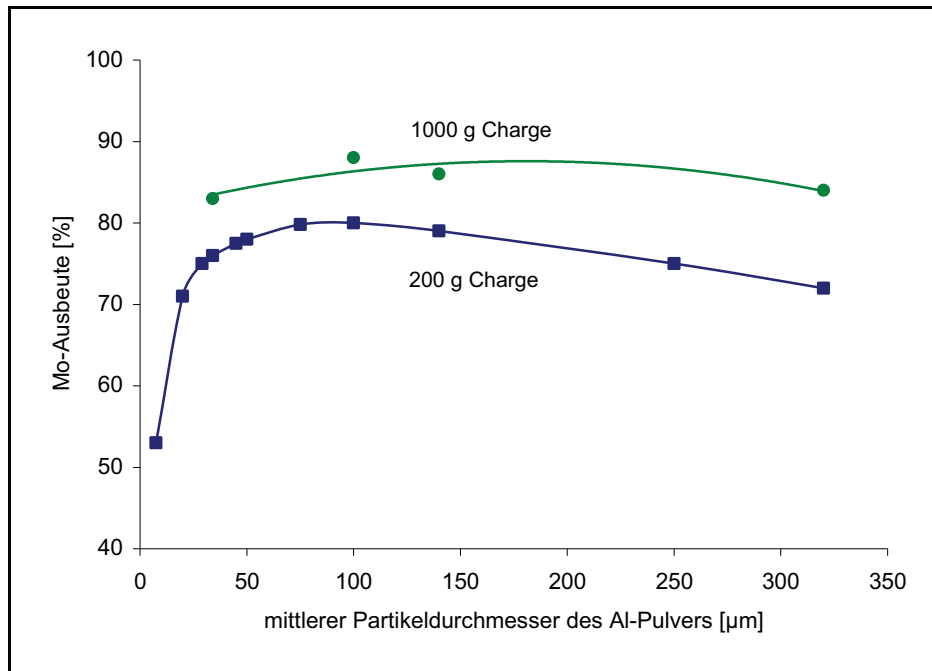


Abbildung 7: Einfluss der Aluminiumpartikelgröße und der Chargenmenge auf die Metallausbeute [10]

Je größer die Charge gewählt wird, desto größer ist auch die Metallausbeute, da die Schmelze länger flüssig bleibt und die Molybdänpartikel mehr Zeit haben sich von der Schlacke ins Metall abzusetzen als bei einer sehr kleinen Charge, bei der die Schmelze sehr schnell erstarrt. Dies ist in Abbildung 7 zu sehen, wo die Ausbeute der 200 g Charge deutlich unter der der 1000 g Charge liegt [10].

### 2.3.3 Einfluss des CaO/Al-Verhältnisses auf die Mo-Ausbeute

Flussmittel haben den Zweck, die Trennung von Metall und Schlacke zu unterstützen, indem sie den Schmelzpunkt der Schlacke und somit auch die Viskosität verringern. Reines Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) schmilzt bei 2042 °C, die Zusammensetzung  $2 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  hingegen bereits unter 1400 °C. Kalziumoxid wird häufig als Flussmittel eingesetzt, weil es sehr effektiv und preiswert ist. In Abbildung 8 ist die Abhängigkeit der Metallausbeute vom Verhältnis Kalziumoxid zu Aluminium ersichtlich.

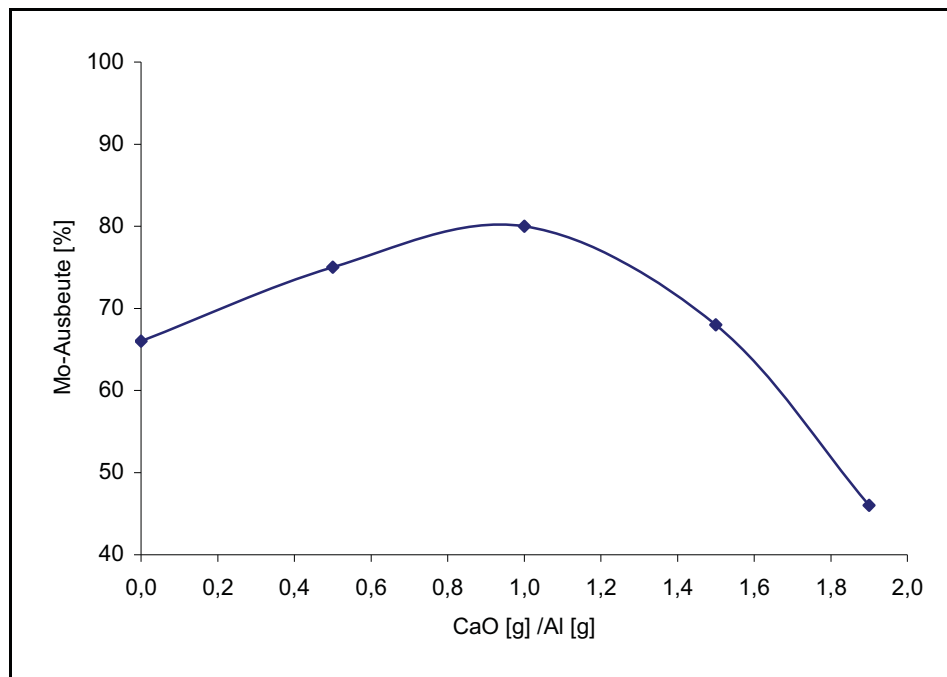


Abbildung 8: Einfluss des CaO/Al-Verhältnisses auf die Metallausbeute (200 g Charge) [10]

Aus der Abbildung 8 ist zu erkennen, dass sich ein Zugabeverhältnis von CaO/Al von 1,0 als das Optimum für die Thermitreaktion erweist. Die Zugabe von Kalziumoxid verringert allerdings auch die Temperatur der gesamten Reaktion, weil ein Teil der bei der Reduktion erzeugten Energie für das Schmelzen des Kalziumoxides verbraucht wird [10].

### 2.3.4 Einfluss der Aluminiummenge auf die Metallausbeute

Die Menge des eingesetzten Aluminiums kann die Reaktion sehr stark beeinflussen. In Abbildung 9 ist die Metallausbeute in Abhängigkeit von der Aluminiummenge dargestellt.

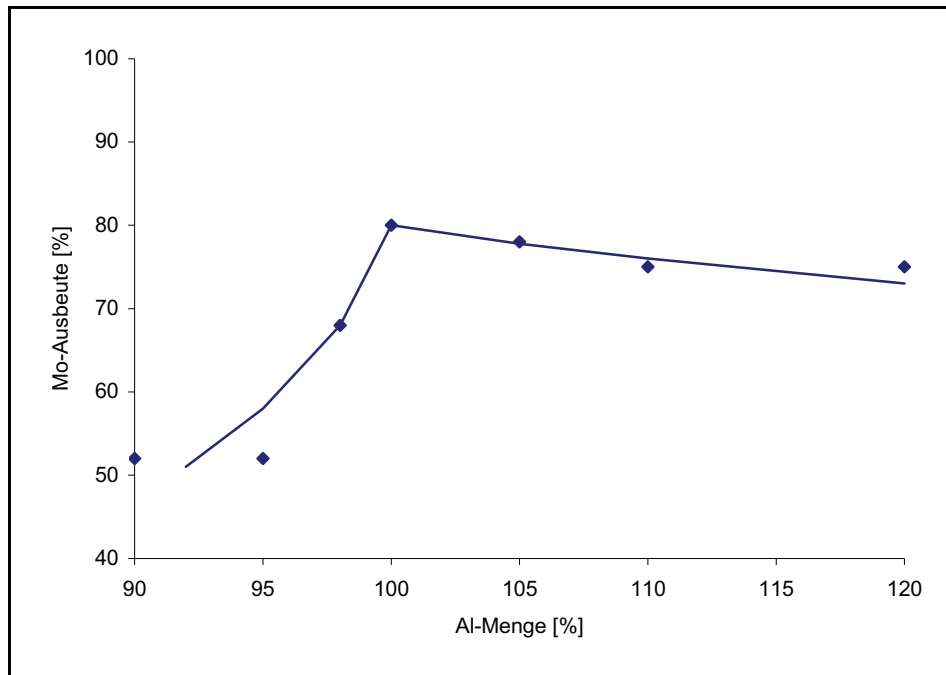


Abbildung 9: Einfluss der Aluminiummenge auf die Metallausbeute (200 g Charge, Aluminiumpulver Nr. 120, CaO/Al ~ 1) [10]

Wird zu wenig Aluminium eingesetzt, kann die Reduktion nicht vollständig ablaufen, weshalb die Molybdänausbeuten bei Al-Mengen unter 100 % sehr niedrig ausfallen. Die Versuche haben auch gezeigt, dass sich ein Überschuss an Aluminium negativ auf die Metallausbeute auswirkt [10].

## 2.4 Schlackenmetallurgie des Molybdäns

Nachfolgend werden einzelnen Parameter hinsichtlich der Schlackenmetallurgie des Molybdäns beschrieben. Im Besonderen wird auf den Einfluss der Schlackenzusammensetzung auf die Aktivität der Komponenten, die Verteilungszahl zwischen Metall und Schlacke und die Viskosität von Schlacken eingegangen.

### 2.4.1 Einfluss der Schlackenzusammensetzung auf die Aktivität der Komponenten

Die Abhängigkeit der Viskosität von der Schlackenzusammensetzung ist sehr kompliziert und wird heute fast ausschließlich mit Hilfe von komplexen Rechenmodellen ermittelt. Im Folgenden werden einige Zusammenhänge aus der Literatur dargestellt.

Den gefundenen Zusammenhang zwischen Basizität und Aktivität von  $\text{MoO}_3$  im System  $\text{CaO-SiO}_2\text{-MoO}_3$  zeigt Abbildung 10.

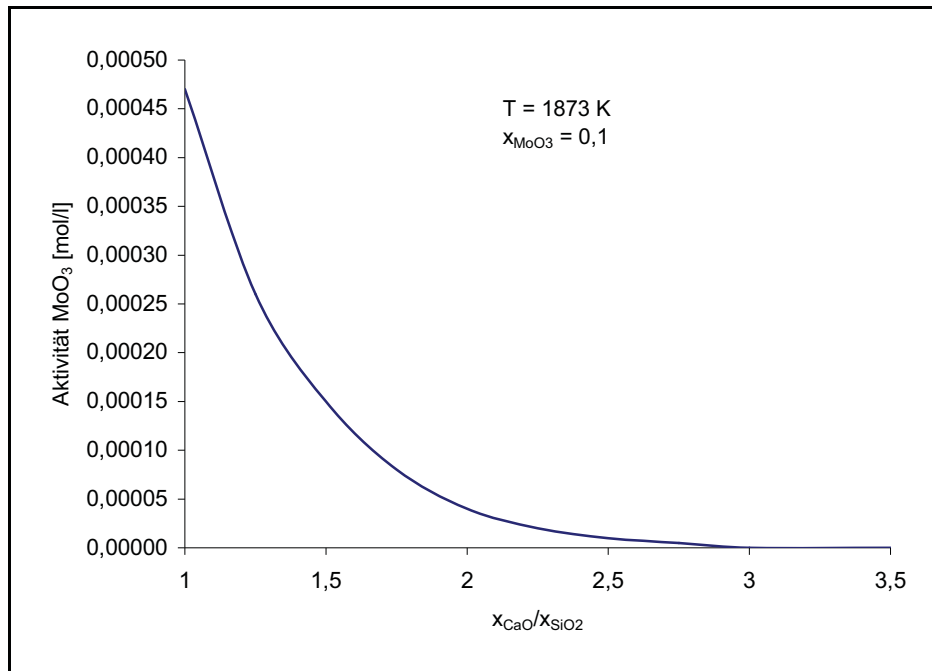


Abbildung 10: Einfluss der Basizität auf die Aktivität von MoO<sub>3</sub> [16]

x<sub>MoO<sub>3</sub></sub>...Molenbruch Molybdäntrioxid

x<sub>CaO</sub>/x<sub>SiO<sub>2</sub></sub>...Basizität

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Basizität die Aktivität von MoO<sub>3</sub> stark abnimmt. Bei einem CaO/SiO<sub>2</sub>-Verhältnis von 1 ist die Aktivität von MoO<sub>3</sub>  $4,5 \cdot 10^{-4}$  mol/l. Mit steigender Basizität zeigt die Kurve eine quadratische Abnahme und erreicht bei einem Verhältnis von 2,8 die Aktivität 0.

Abbildung 11 stellt die Abhängigkeit der Aktivitäten von CaO, SiO<sub>2</sub> und CaMoO<sub>4</sub> vom Gehalt MoO<sub>3</sub> bei einer Basizität von 1,75 im System CaO-SiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> dar.

MoO<sub>3</sub> kann in geschmolzenen Schlacken bei hohen Temperaturen nicht als Phase existieren, es reagiert mit CaO und bildet die neue Phase CaMoO<sub>4</sub>.

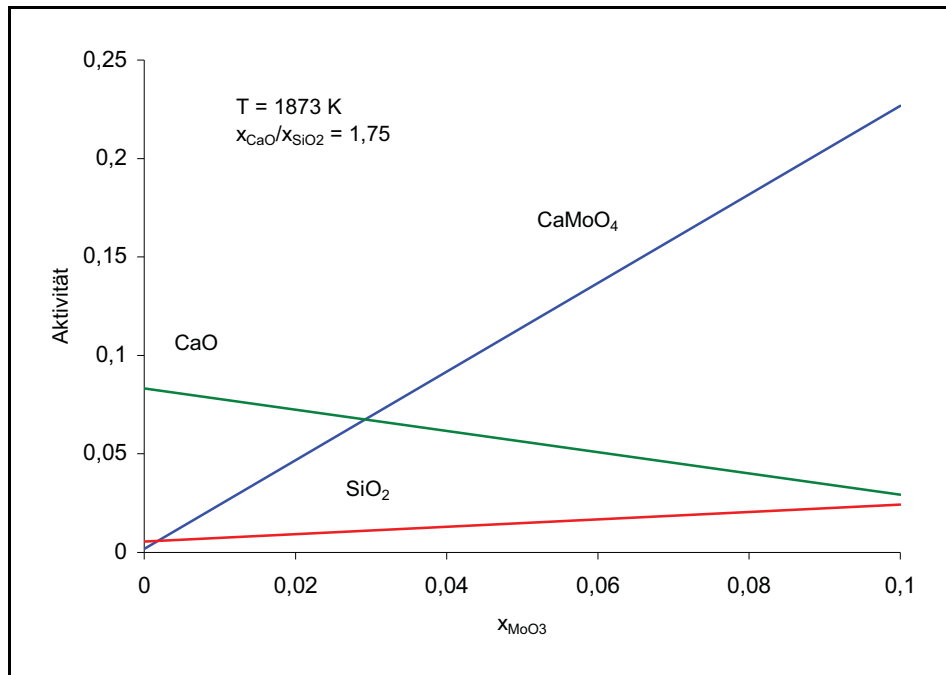


Abbildung 11: Einfluss des MoO<sub>3</sub>-Gehaltes auf die Aktivität verschiedener Komponenten [16]

Wie in Abbildung 11 dargestellt ist, steigt die Aktivität von CaMoO<sub>4</sub> und SiO<sub>2</sub> mit steigendem MoO<sub>3</sub>-Molenbruch stark an. Im Gegensatz dazu nimmt die Aktivität von CaO ab.

#### 2.4.2 Verteilungszahl $L_{\text{Mo}}$ zwischen Schlacke und Metall

Die Darstellung der Verteilungszahl zwischen CaMoO<sub>4</sub> in der Schlacke und Molybdän im Metall ist in Abbildung 12 in Abhängigkeit des Siliziumgehaltes ersichtlich. Die Definition der Verteilungszahl  $L_{\text{Mo}}$  lautet wie folgt:

$$L_{\text{Mo}} = \frac{x_{\text{CaMoO}_4}}{[\% \text{Mo}]} \quad (7)$$



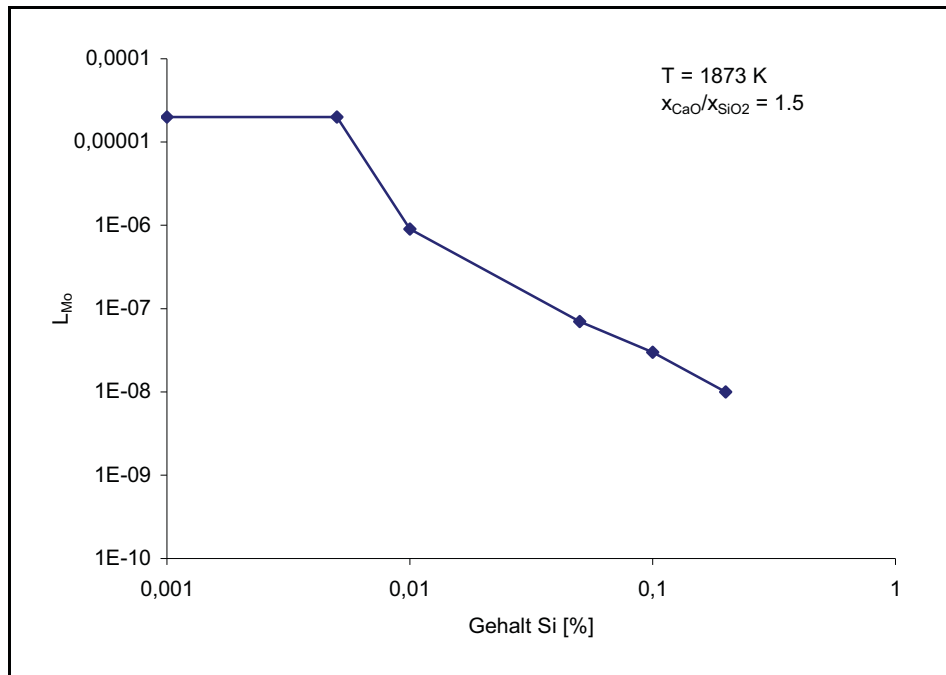


Abbildung 12: Einfluss des Si-Gehaltes auf die Verteilungszahl von Molybdän [16]

Steigt der Siliziumgehalt im Metall, sinkt die Verteilungszahl von Molybdän, was bedeutet, dass ein Anstieg des Siliziumgehaltes eine höhere Molybdänausbeute mit sich bringt.

In Abbildung 13 ist der Einfluss der Basizität auf die Verteilungszahl für Molybdän dargestellt.

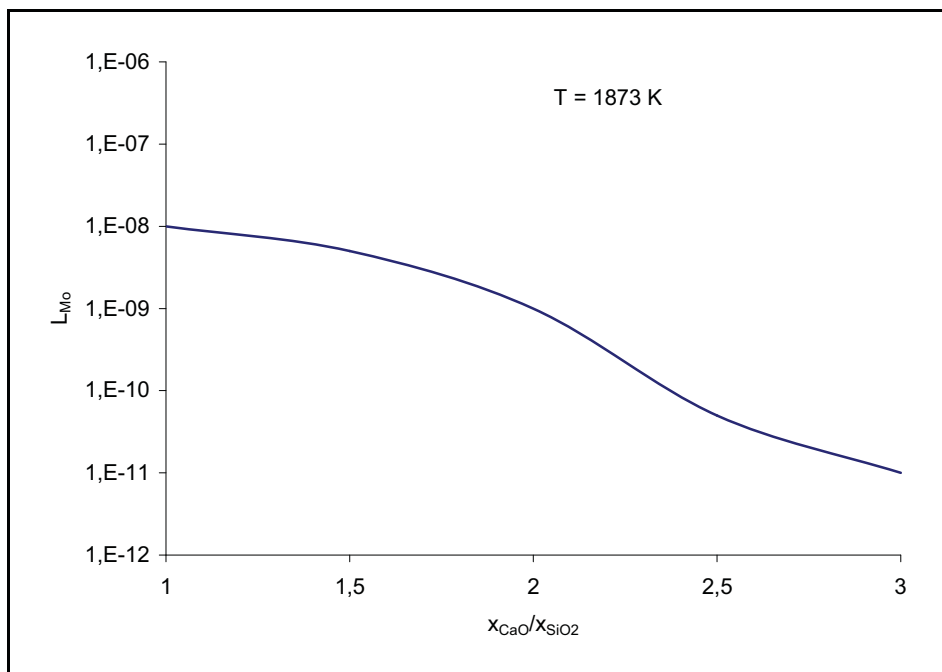


Abbildung 13: Einfluss der Basizität auf die Verteilungszahl für Molybdän [16]

Wie aus Abbildung 13 zu erkennen ist, sinkt mit steigendem  $\text{CaO/SiO}_2$ -Verhältnis die Verteilungszahl. Eine hohe Basizität ist somit mit höheren Molybdänausbeuten verbunden [16].

Am Technical Center der United States Steel Corporation in Pennsylvania wurde das Gleichgewicht zwischen flüssiger Molybdänlegierung und deren Schlacke bei verschiedenen Basizitäten untersucht. Die Basizitäten variierten zwischen Null ( $\text{SiO}_2$ -gesättigt) und unendlich (ohne  $\text{SiO}_2$ ). Die Darstellung der Molybdänverteilung erfolgt in Abhängigkeit von der Eisenverteilung zwischen Schlacke und Metall.

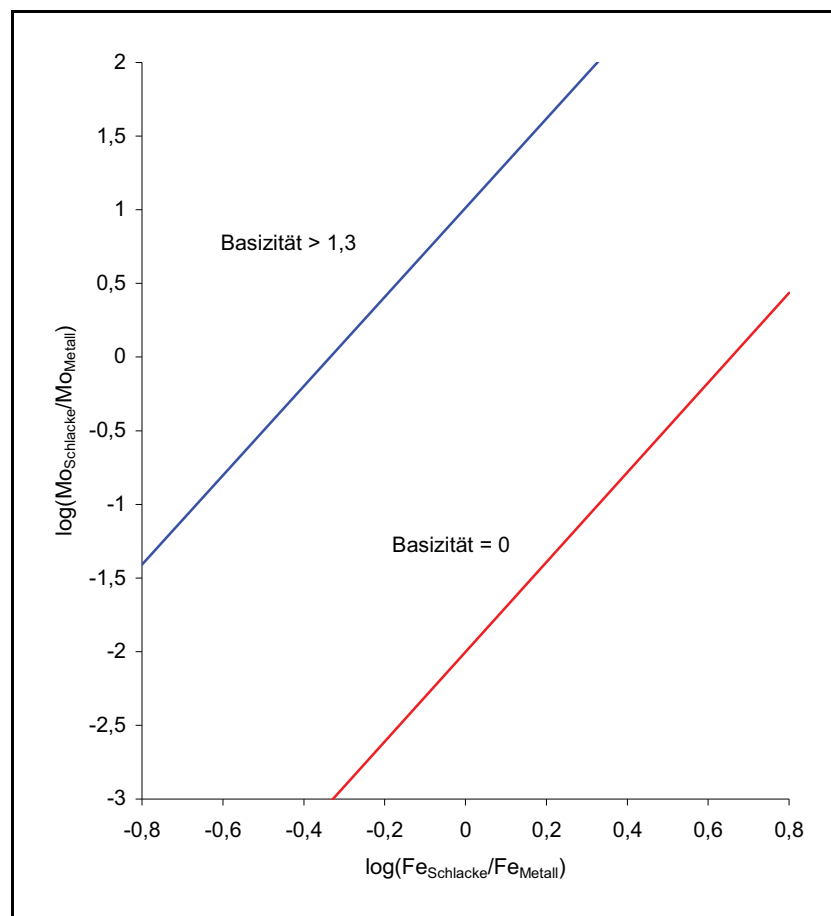


Abbildung 14: Schlacke-Metall-Verteilung für Molybdän und Eisen bei 1450 °C [17]

Ist der Wert der Verteilungszahl Null, so bedeutet dies, dass sich gleich viel Eisen bzw. Molybdän im Metall wie in der Schlacke befindet. Werte größer Null besagen, dass mehr Eisen bzw. Molybdän im Metall ist als in der Schlacke.

Die Darstellung zeigt, dass bei steigender Eisenverteilung zwischen Schlacke und Metall auch die Werte der Molybdänverteilung ansteigen. Bei einer Basizität von 0 und einem logarithmierten Schlacke-Metallgleichgewicht von 0 ist das Gleichgewicht von Mo ungefähr -2. Es befindet sich deutlich auf der Schlackenseite. Eine Erhöhung der Basizität auf über 1,3

bewirkt eine Verschiebung des Gleichgewichts von Schlacke und Metall des Molybdäns auf Seiten des Metalls [17].

### 2.4.3 Viskosität der Schlacken

#### Theoretische Grundlagen

Die Viskosität  $\eta$  ist der Korrelationsfaktor zwischen der Schubspannung  $\tau$  und dem Geschwindigkeitsgradienten  $\gamma$  einer Newton'schen Flüssigkeit:

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (8)$$

Es wird angenommen, dass sich Schlacken wie Newton'sche Flüssigkeiten verhalten. Die Viskosität ist abhängig von der Temperatur und der Zusammensetzung eines Fluides. Die Darstellung der Temperaturabhängigkeit erfolgt durch die Arrhenius Gleichung:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{(E/R \cdot T)} \quad (9)$$

E...Aktivierungsenergie

R...Gaskonstante

T...Temperatur in [K]

Die Abhängigkeit der Viskosität von der Zusammensetzung von Schlacken ist in verschiedenen Rechenmodellen beschrieben [14].

#### Ermittlung der Viskosität von Schlacken

Um die Viskosität von Schlacken zu ermitteln, verwendet man heute fast ausschließlich Rechenmodelle. Früher musste die Viskosität allerdings experimentell gemessen werden. Dazu standen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die im Folgenden kurz erklärt werden.

Beim *Kapillar- oder Auslaufverfahren* ist die Auslaufgeschwindigkeit der flüssigen Schmelze durch eine Kapillare mit bekannten Abmessungen das Maß für die Viskosität der Schmelze. Aufgrund der Einfachheit des Verfahrensablaufes kommt diese Art der Viskositätsmessung gerne bei Schlacken mit Temperaturen unter 1200 °C zur Anwendung.

Bei Viskositätsmessungen nach dem *Falkörperverfahren* erfolgt die Messung der Zeit, die benötigt wird, um eine Platinkugel mit gleich bleibender Kraft aus der Schmelze zu ziehen.

Beim so genannten *Rotationsverfahren* rotiert ein Körper mit gleich bleibender Winkelgeschwindigkeit in der Schmelze. Das Maß für die Viskosität ist der Widerstand, den die Schmelze diesem Körper entgegensetzt.

Der Unterschied des *Schwingkörperverfahrens* zu dem zuvor genannten Verfahren ist, dass ein Körper um seine Längsachse schwingt anstatt zu rotieren. Die Dämpfung, die der Körper durch die Schlacke erfährt, gibt Auskunft über deren Viskosität.

Das *Schwingtiegelverfahren* ist dem Schwingkörperverfahren sehr ähnlich. Wie der Name schon sagt, schwingt die flüssige Schmelze zusammen mit dem Tiegel. Das Maß für die Viskosität ist die Dämpfung der Schwingung durch die Trägheit der Schmelze [23].

Ein sehr häufig angewendetes Modell ist das Berechnungsmodell nach Urbain. Dieses beruht auf Viskositätswerten, die an binären und ternären Systemen gemessen wurden.

Die Kationen der Schlacke werden in drei Kategorien eingeteilt:

- Kristallbildner: Kationen wie  $\text{Si}^{4+}$  oder  $\text{P}^{5+}$ ; diese bilden Polyanionen wie  $\text{SiO}_4$ ,  $\text{Si}_2\text{O}_7$ ,  $\text{PO}_4$  und sind in tetraedischer Position
- Modifikatoren: zum Beispiel  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$
- Amphotere: Kationen wie  $\text{Al}^{3+}$  oder  $\text{Fe}^{3+}$  können als Kristallbildner oder Modifikatoren agieren

Zur Berechnung ist eine genaue chemische Analyse der Schlacke erforderlich. Anhand des eingegebenen Gewichtsprozents jeder Komponente werden die Molenbrüche berechnet. Dann errechnet das Modell die entsprechenden Molenbrüche für ein hypothetisches ternäres System  $\text{TO}_2\text{-A}_2\text{O}_3\text{-MO}$  indem T ein Kation in tetraedischer Position darstellt, A ein amphoterer Kation und M einen Modifikator. Nach Einbezug einiger weiterer Parameter erhält man die Viskosität bei einer eingegebenen Temperatur. Die Berechnungen erfolgen mithilfe folgender Formeln:

$$\mu = A \cdot T \cdot e^{-\frac{1000 \cdot B}{T}} \quad (10)$$

$$A = e^{-m \cdot B + n} \quad (11)$$

$$B = \frac{B_{Mg} \cdot X_{MgO} + B_{Ca} \cdot X_{CaO} + B_{Mn} \cdot X_{Mn}}{X_{MgO} + X_{CaO} + X_{MnO}} \quad (12)$$

$\mu$ ...Viskosität [Poise]

A...preexponentialer Faktor

B...exponentialer Faktor

$B_{Mg}$ ...exponentialer Faktor für Mg

$B_{Ca}$ ...exponentialer Faktor für Ca

$B_{Mn}$ ...exponentialer Faktor für Mn

$X_{MgO}$ ...Molenbruch für MgO

$X_{CaO}$ ...Molenbruch für CaO

$X_{MnO}$ ...Molenbruch für MnO

m,n...experimentielle Parameter

## Einfluss der Basizität auf die Viskosität von Schlacken

Für den Ablauf der Reaktionen in der flüssigen Schlacke ist die Kenntnis der Viskosität von wesentlicher Bedeutung. Grundsätzlich gilt, dass Schlacken mit hoher Basizität ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ), also kalkreiche Schlacken, schneller zähflüssig werden, als Schlacken mit niedriger Basizität. Das liegt vor allem daran, dass kalkreiche Schlacken zu Kristallbildungen im heterogenen Bereich neigen. Diese Eigenschaft zeigt sich im Viskositätsverlauf in Abhängigkeit von der Temperatur durch einen steileren Anstieg der Viskosität bei geringeren Temperaturen (siehe Abbildung 15).

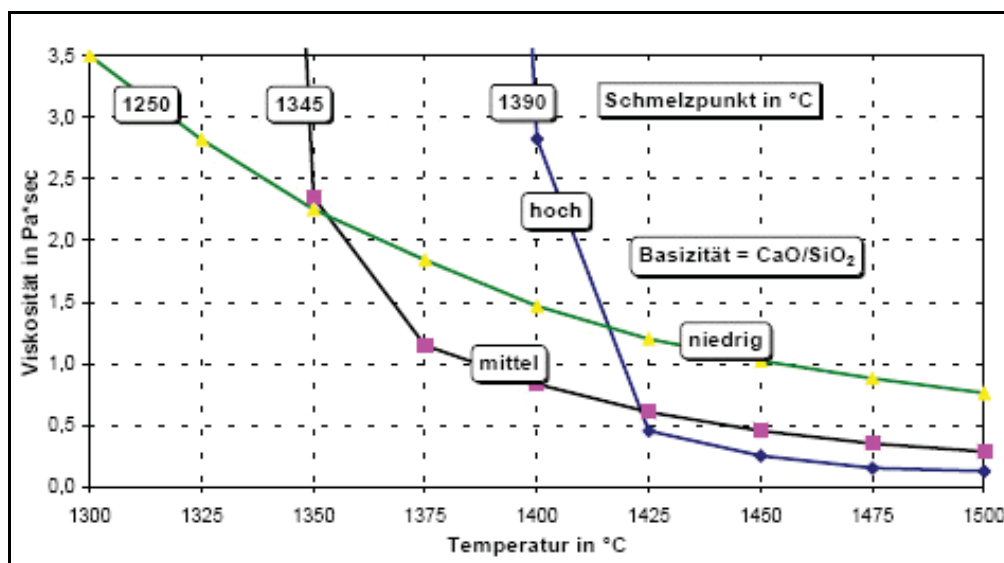


Abbildung 15: Viskositätsverlauf über der Temperatur von unterschiedlichen Schlacken [15]

Abbildung 15 stellt die Viskosität von Schlacken unterschiedlicher Basizitäten dar. Mit zunehmendem CaO/SiO<sub>2</sub>-Verhältnis steigt der Schmelzpunkt an. Bei einer Temperatur von 1425 °C bedingt eine niedrige Basizität eine hohe Viskosität und umgekehrt. Bei niedrigeren Temperaturen hingegen steigt die Viskosität bei hoher Basizität stärker an als bei niedriger Basizität.

Neben CaO und SiO<sub>2</sub> haben auch viele andere Komponenten wie Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, FeO, CaF<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> Einfluss auf die Viskosität.

Im Allgemeinen sind Schlacken deutlich viskoser als Metalle bei der gleichen Temperatur. Außerdem wird die Schlackenviskosität viel stärker durch die Temperatur und Zusammensetzung beeinflusst als die Viskosität der Metalle [15].

### **Einfluss der O/Si–Rate auf die Viskosität von Schlacken**

Das Department of Metallurgical Engineering des National Institute of Technology in Indien untersuchte die Sauerstoff/Silizium-Rate (O/Si-Rate) zur Beurteilung von Schlacken und deren Viskosität. Diese O/Si–Rate informiert über das Vorhandensein verschiedener Oxide, die Berechnung ist durch Gleichung 13 gegeben:

$$O/Si - Rate = \frac{\sum x_i n_i}{x_s n_s} \quad (13)$$

$x_i$ ...Molenbruch des i-ten Oxides

$n_i$ ...Anzahl der Sauerstoffionen im i-ten Oxid

$x_s$ ...Molenbruch des Silikates

$n_s$ ...Anzahl der Siliziumatome im Silikat

Für reines Silikat hat die O/Si-Rate den Zahlenwert 2, bei Anwesenheit von alkalischen oder erdalkalischen Oxiden steigt das Verhältnis Sauerstoff zu Silizium auf Werte größer 2. Es ist leicht zu berechnen und gibt Auskunft über die Struktur der Schlacke und deren Depolymerisationsgrad.

Aus dem System CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> wurden die Viskositäten für 14 verschiedene Schlacken berechnet und in Abhängigkeit von der O/Si-Rate aufgetragen. Die Gewichtsanteile von SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> variierten dabei in großen Bereichen (bei SiO<sub>2</sub> von 30 % - 65 %, bei Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> von 0 % - 35 %). Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt.

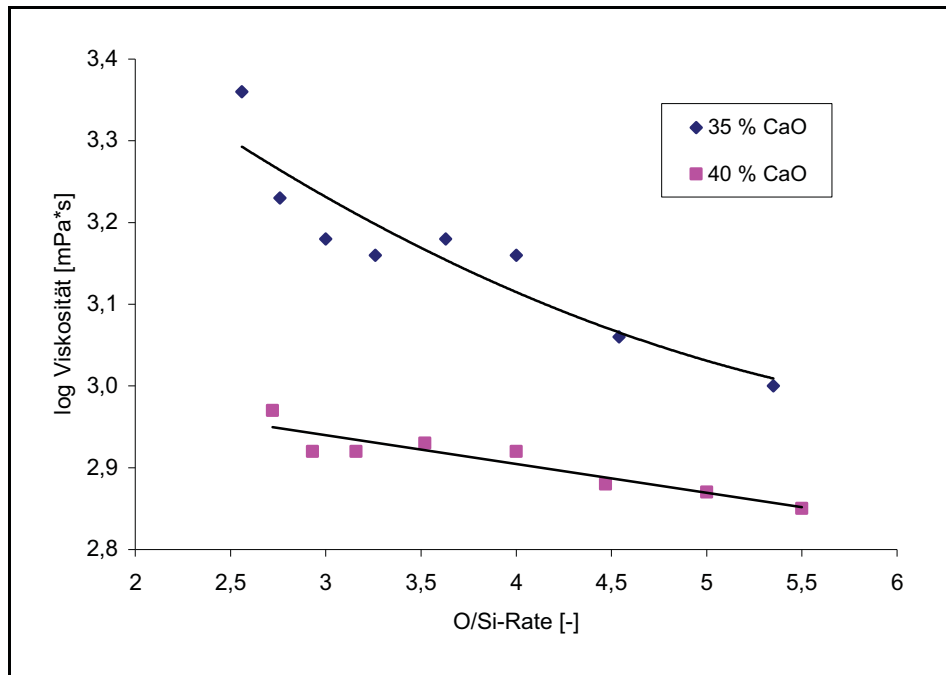


Abbildung 16: Viskositäten des CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Systems bei 1773 K [18]

Die Viskosität sinkt bei steigender O/Si-Rate. Bei höherem CaO-Gehalt verringert sich die Viskosität der Schlacke. Bei steigendem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt wird ein Abfall der Zähflüssigkeit beobachtet, was bedeutet, dass Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nicht als Netzwerkbildner in der Schlacke agiert. Diese Aussage wird auch durch die Tatsache unterstützt, dass bei steigendem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt die O/Si-Rate sinkt, denn ein Abfall dieser besagt, dass das Schlackennetzwerk aufbricht.

Aus dem System CaO-FeO-SiO<sub>2</sub> wurden die Viskositäten für unterschiedliche Schlacken bei drei verschiedenen Temperaturen berechnet. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 17.

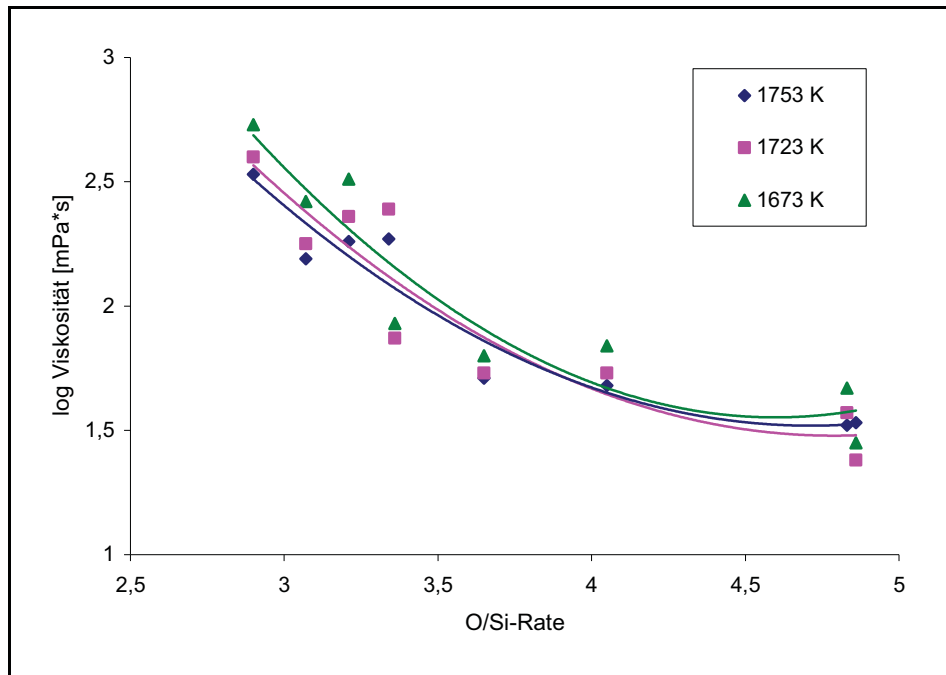


Abbildung 17: Viskositäten des Systems CaO-FeO-SiO<sub>2</sub> bei verschiedenen Temperaturen [18]

Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Viskosität unabhängig von der Temperatur mit steigender O/Si-Rate abnimmt. Anhand der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich die Viskosität der Schlackensysteme mit steigender Temperatur und steigender O/Si-Rate verringert [18].

## 2.5 Modellierung metallothermischer Reaktionen

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, ein Modell zu erstellen, welches in Abhängigkeit von den Einsatzstoffen eine optimale Möllermischung voraussagt. Im Folgenden wird eine Veröffentlichung beschrieben, die das selbe Thema behandelt.

Bei metallothermischen Prozessen können Temperatur und Zusammensetzung während der Reaktion schwer nachgestellt werden, da der gesamte Prozess von der Zusammensetzung der Einsatzmischung abhängig ist. Mit Hilfe eines Modells sollen die gewünschte Legierungszusammensetzung und die Prozesstemperatur aus der Zusammensetzung der Einsatzmischung berechnet werden.

Bisher wurde die Energiedichte der Möllermischung als einziges Kriterium herangezogen, um festzustellen, ob eine Mischung selbstgänglich und welche Überhitzung des Systems zu erwarten ist. Allerdings führen die unterschiedlichen Materialeigenschaften verschiedener



Legierungen zu abweichenden Reaktionsverhalten trotz konstanter Energiedichten. Somit kann der Einfluss von Zuschlägen nicht optimal berücksichtigt werden.

In einem neu entwickelten Ansatz wird die zu erreichende theoretische Prozesstemperatur als Kriterium für das Reaktionsverhalten herangezogen. Sie ist dann erreicht, wenn die bei der chemischen Umsetzung freigesetzte Energie vollständig zur Aufheizung der Systemkomponenten aufgewendet wird, wobei bei dieser Definition Energieverluste durch Wärmestrahlung oder -leitung vernachlässigt werden.

In dem entwickelten Modell kann die theoretische Prozesstemperatur iterativ durch Vergleich der Enthalpien der Edukte im Ungleichgewicht mit der Enthalpie der Produkte angenähert werden. Das Modell berücksichtigt auch Energie- und Abdampfverluste. Wenn die errechnete theoretische Prozesstemperatur von der gewünschten abweicht, ist die Zusammensetzung der Einsatzmischung so anzupassen, dass nur die Reaktionsenthalpie der Gesamtmischung, nicht aber die Zusammensetzung des Zielmetalls verändert wird. Es gibt mehrere Möglichkeiten dies durchzuführen, zum Beispiel durch Einsatz stärkerer/schwächerer Reduktionsmittel oder durch Chargierung von Schlackenbildnern oder Stabilisatoren. Auch die Zugabe von Schlackenkomponenten mit höherer Oxidationsstufe, die nicht vollständig reduziert werden, verändert die Reaktionsenthalpie der Gesamtmischung.

Damit die Veränderung der Energiedichte der Reaktionsmischung ohne Auswirkung auf die Zusammensetzung des Zielmetalls erfolgen kann, müssen die chemischen Haupt- und Nebenreaktionen genau bekannt sein. Die gesamte 3-Phasenreaktion (Metallphase, Schlackenphase, Gasphase) kann mithilfe des Modells durch vier voneinander unabhängige Parameter beschrieben werden. Einflüsse auf diese vier Größen können Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Elementen, Reduktionsmetallgehalt und zahlreiche kinetische Faktoren sein. Auf Basis der festgelegten Reaktionen ist es möglich die Einsatzmischung zu berechnen. Abbildung 18 zeigt eine Übersicht des Rechenmoduls.

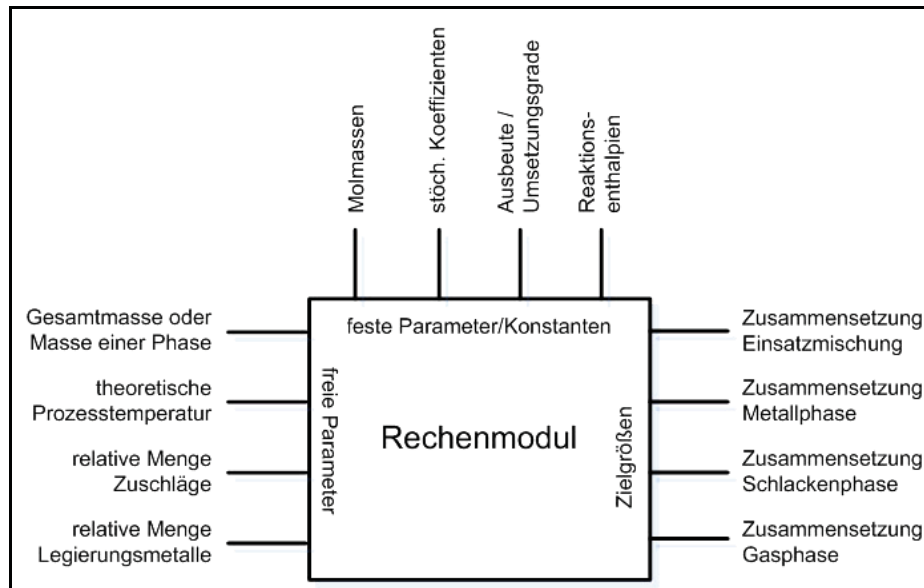


Abbildung 18: Parameter, Konstanten und Zielgrößen zur Berechnung der Einsatzmischung und der theoretischen Zusammensetzung von Metall und Schlacke [12]

Auch bei unbekanntem Mischungen können mit diesem Modell genauere Aussagen über die zu wählende Zusammensetzung der Einsatzmischung gemacht werden. Es ist auch möglich, die Ausbeuteparameter und stöchiometrische Koeffizienten durch Massenbilanzen mit thermochemischen Berechnungen zu ermitteln und damit die Reaktionen zu optimieren. Um auch wirklich aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden jedoch hochwertige Datenbanken mit thermochemischen Daten für die jeweiligen Systeme benötigt. Für viele Metalle liegen insbesondere Wechselwirkungsparameter nicht vor [12].

## 3 Praktische Untersuchungen

Im praktischen Teil dieser Arbeit soll der Ist-Zustand des gesamten Produktionsablaufes im Betrieb erfasst werden, um nicht optimale Vorgänge zu erkennen und diese zu verbessern. Zunächst erfolgte eine genaue Beobachtung und Dokumentation der Arbeitsschritte in der Möllermischanlage und an den Abbrandstellen. Nach einer ausführlichen Charakterisierung aller Rohstoffe in Bezug auf Zusammensetzung und Korngrößen wurden Versuche hinsichtlich der Homogenität des Möllers und des Absetzverhaltens der Metallpartikel in der Schlacke durchgeführt. Weiters erfolgte die Durchführung von zwei Versuchsabbränden im Maßstab 1:10 im Labor. Aufgrund deren Erkenntnisse wurden vier Betriebsversuche realisiert.

Weiters soll Vorarbeit für die Erstellung eines Möllerberechnungsmodells geleistet werden. Hierzu erfolgt die Beschreibung von wichtigen Rechenschritten, die für das Erlangen einer Basisdatenbank erforderlich sind. Ziel des Modells ist es, in Abhängigkeit von den Analysen der Einsatzmaterialien, die Mengen der Bestandteile des Möllers vorauszusagen, um einen optimalen Abbrand zu erreichen.

### 3.1 Beschreibung der Ferromolybdän Produktionseinheit

Die Produktionsstätte kann in fünf Teilgebiete aufgeteilt werden, die Möllermischanlage, die Abbrandstelle, die Filteranlage der Abbrandstelle, die Schlackenaufbereitung und die Ferromolybdän-Brecherstraße. Die folgenden Kapitel beschreiben diese Teilbereiche.

#### 3.1.1 Möllermischanlage

In der Möllermischanlage werden alle Rohstoffe für den Abbrand in einen so genannten Flow Bin, welcher als Transportbehälter dient, gefüllt. Ein Hubstapler transportiert diesen Behälter zur Abbrandstelle. In Abbildung 19 sind die Stoffflüsse der Möllermischanlage schematisch dargestellt.

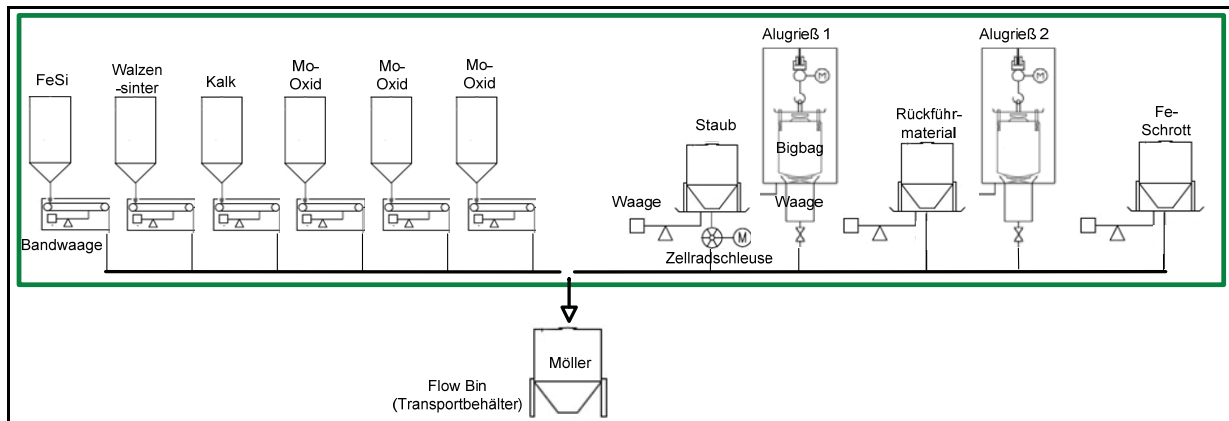


Abbildung 19: Fließschema der Möllermischanlage

Vor Beginn des Einwiegens muss eine Zusammensetzung für den Möller ausgewählt werden. Eine zentrale Steuereinheit regelt alle Waagen. Die Wiegung der Rohstoffe Ferrosilizium, Walzenzunder, Kalk und der Molybdänkonzentrate aus den Bunkern erfolgt mit Bandwaagen. Förderbänder transportieren die Rohstoffe in den Flow Bin. Alle entstehenden Stäube werden gesammelt und rückgeführt. Den Alugrieß, der in Bigbags gelagert ist und mit so genannten Sackwaagen verwogen wird, transportiert ein Förderrohr auf das Förderband. Der Transport von Staub, Rückführmaterial und Fe-Schrott aus den jeweiligen Behältern erfolgt ebenfalls über Förderrohre auf das Band. Ein Flow Bin umfasst den halben Möller einer Charge. Somit füllt man für einen Abbrand zwei Behälter mit derselben Mischung.

### 3.1.2 Abbrandstelle

An der Abbrandstelle findet der wichtigste Teilprozess der Ferromolybdänherstellung statt. Die Beschreibung der chemischen Vorgänge während des Abbrandes befindet sich in Kapitel 2.2.2.

Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, befördert ein Hubstapler die Transportbehälter von der Möllermischanlage zur Abbrandstelle. Abbildung 20 zeigt das Fließschema der beiden vorhandenen Abbrandstellen.

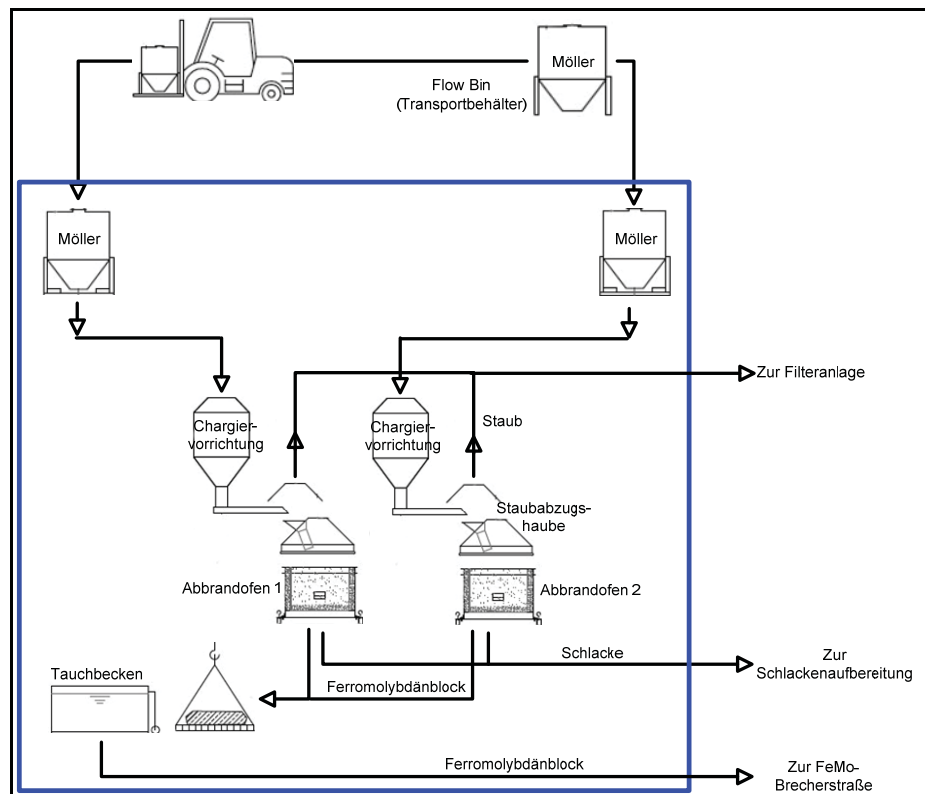


Abbildung 20: Fließschema der Abbrandstellen

Eine Fördereinrichtung transportiert den Möller in eine so genannte Chargiervorrichtung, von der aus die Rohstoffe über einen Trichter in das Ofengefäß fallen.

Das Ofengefäß, auch Thermitofen genannt, hat einen Innendurchmesser von etwa zwei Meter und eine Höhe von ca. einem Meter. Der Ofen besteht aus einem zylindrischen Unterteil aus Stahl. Auf dem Boden sitzt ein Stahlzylinder, auch Ofenwanne genannt. Der Zwischenraum zwischen Wand und Wanne wird mit aufbereiteter Schlacke gefüllt, die als Ofenausmauerung dient. Als Hitzeschutz der Ofenwände dient zusätzlich eine Wasserkühlung. Entsteht zu viel Wärme beim Prozess, kann es passieren, dass die Ofenauskleidung schmilzt und das flüssige Metall und die Schlacke austreten.

Das Chargieren des Möllers wird vom Ofenpersonal geregelt. Die Abzugshauben sorgen dafür, dass so viel Staub wie möglich in die Filteranlage abgeführt wird. Nach Ende des Abbrandes und nach Einhalten der Absetzzeit hebt der Hallenkran den Ofenbehälter von der Abbrandstelle und befördert ihn zur Schlackenabzugsstelle. Nach dem Abgießen der flüssigen Schlacke hebt der Kran den Ofen in die so genannte Abräumbox, wo die Ofenwanne abgehoben und der Metallblock somit freigelegt wird. Nun schiebt ein Hubstapler die noch am glühenden Ferromolybdänblock anhaftende Schlackenschicht ab. Diese Schlacke hat einen hohen Molybdängehalt und muss gesondert von den anderen Schlacken gelagert werden, um sie später wieder einzusetzen. Nach dem Abkühlen des

Ferromolybdänblockes im Tauchbecken mit Wasser, reinigt das Ofenpersonal die Blockoberfläche gründlich mit Besen und Handmeißel von Schlackenresten. Anschließend befördert der Hallenkran den gereinigten Block zur Waage, wo eine Beprobung des Metalls durchgeführt wird.

### 3.1.3 Schlackenaufbereitung

Der Großteil der anfallenden Schlacke wird an Ort und Stelle wiederverwertet, indem sie als Ofenausmauerung Verwendung findet. Zuerst gießt man die noch flüssige Schlacke zum Erstarren in ein Wasserbad. Ein Kratzförderer befördert das Schlackengranulat in Transportboxen. Die Trocknung des Granulates erfolgt mit Heißluft. Danach wird die Schlacke in einer Hammermühle gemahlen. Nun füllt ein Hubstapler die aufbereitete Schlacke aus einem Bunker in einen leeren Thermitofen, wo sie als Ofenausmauerung für den nächsten Abbrand dient.

Ist das Trocknen der Schlacke aufgrund eines technischen Defektes beispielsweise nicht möglich, wird die noch flüssige Schlacke in Pfannen gegossen, wo man sie erstarren lässt. Nach dem Brechen und der Mahlung wird die aufbereitete Schlacke, wie bereits oben erwähnt, als Ofenausmauerung verwendet.

Ist zuviel Schlacke vorhanden um die gesamte Menge wiederzuverwerten, muss ein Teil der Schlacke deponiert werden.

Abbildung 21 zeigt die Schlackenaufbereitung in der Übersicht.

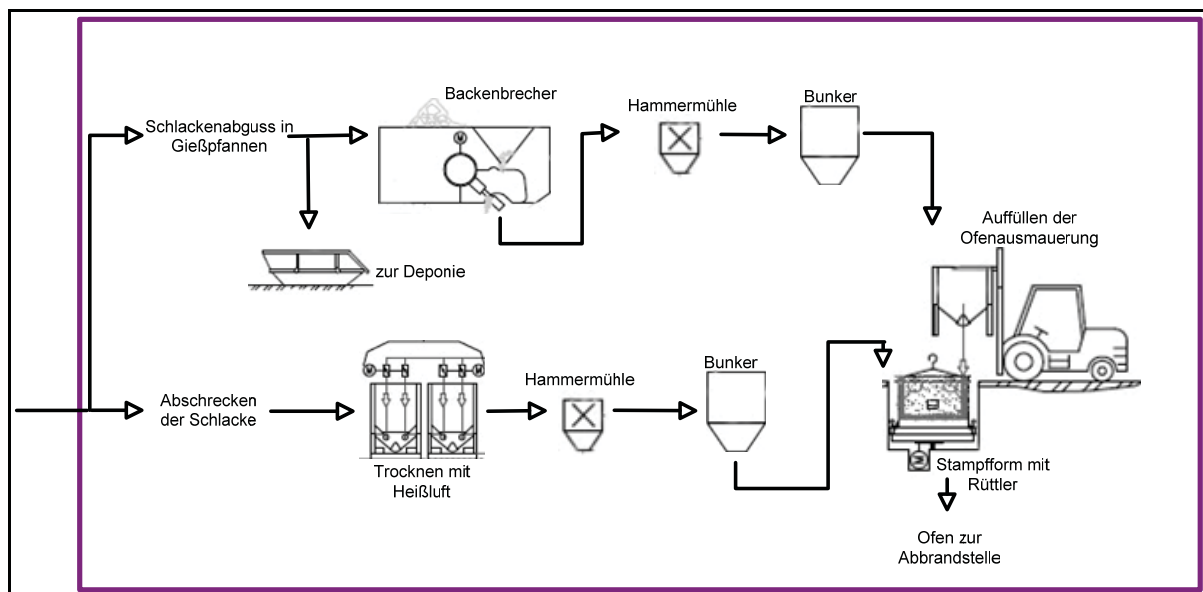


Abbildung 21: Fließschema der Schlackenaufbereitung

### 3.1.4 FeMo–Brecherstraße

Der Ferromolybdänblock muss nach dem Wiegen und Beprobieren die Brecherstraße durchlaufen. Nach einer groben Zerkleinerung mit einem Hydraulikhammer wird das Material über Förderrinnen zum ersten Backenbrecher transportiert. Über weitere Förderbänder gelangt das zerkleinerte Material in ein Schwingsieb, welches das Ferromolybdän in drei Fraktionen teilt. Der Überlauf, das ist jene Körnung, die größer als 50 mm ist, wird über einen weiteren Backenbrecher zerkleinert und dann wieder zum Sieb zurückgeführt. Das Material zwischen 10 und 50 mm ist die Hauptfraktion (etwa 80 Massen-% des Gesamtblockes), diese gelangt über Förderbänder in einen Transportbehälter. Den Feinanteil (< 10 mm) siebt man ein weiteres Mal und teilt es in drei Unterfraktionen ein. Je nach Kundenspezifikation werden die verschiedenen Fraktionen abgefüllt und verkauft. In Abbildung 22 ist die Ferromolybdän-Brecherstraße schematisch dargestellt.

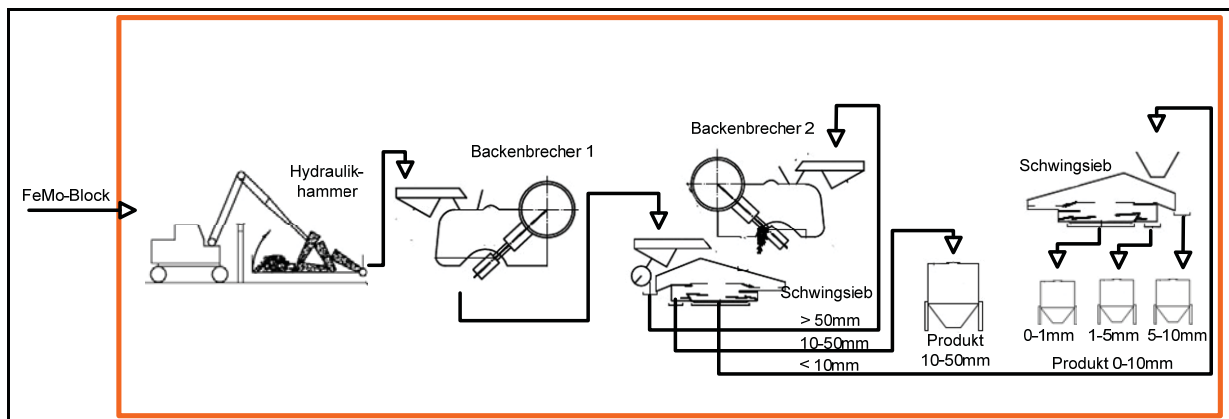


Abbildung 22: Fließschema der Brecherstraße

### 3.1.5 Filteranlagen

Im Zuge des Produktionsprozesses entstehen große Mengen an Stäube, welche in allen Produktionseinheiten gesammelt und über Filteranlagen abgetrennt werden. Die Beimengung dieser Filterstäube zum Möller erfolgt in der Mischanlage. In Abbildung 23 ist die Filteranlage der Abbrandstelle dargestellt.

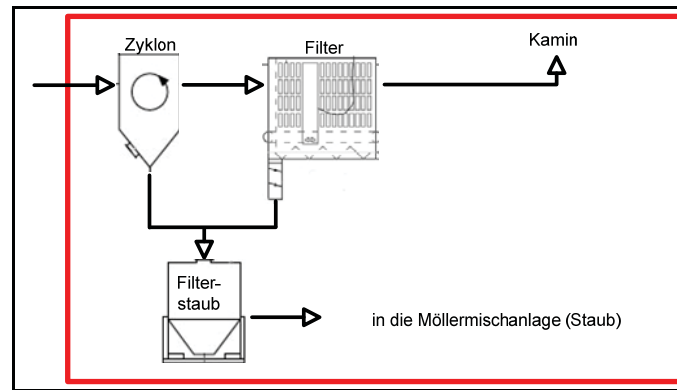


Abbildung 23: Fließschema der Filteranlage der Abbrandstelle

Die Stäube, die direkt über der Abbrandstelle anfallen, werden zuerst über einen Zyklon und dann über einen Filter geführt. Der abgetrennte Staub wird in einem Transportbehälter gesammelt und zur Möllermischanlage gebracht, um ihn dem Möller wieder unterzumischen. In Abbildung 24 ist das gesamte Verfahrensschema des Prozesses nochmals zusammengefasst.

Abbildung 24 zeigt das gesamte Verfahrensschema des Prozesses.



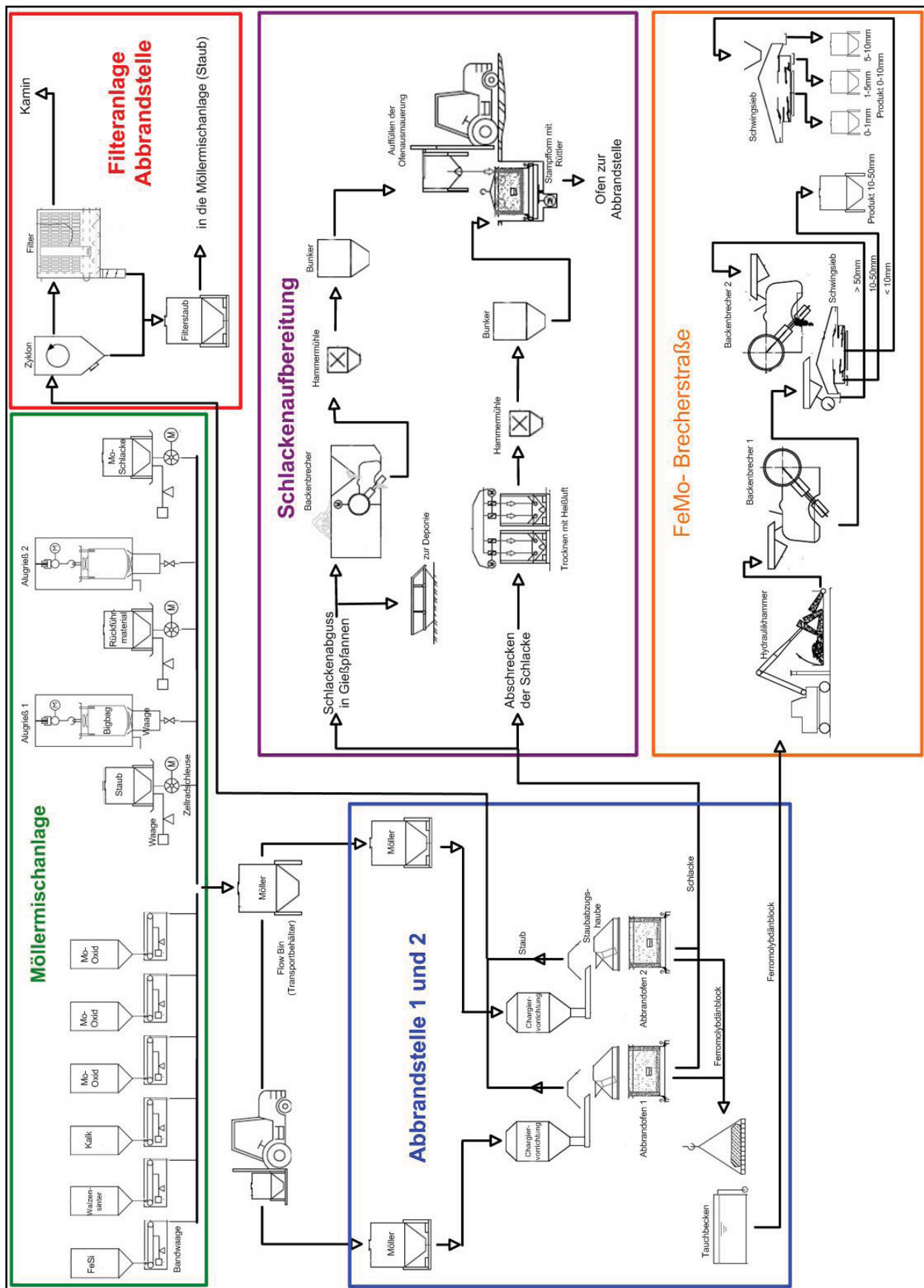


Abbildung 24: Gesamtes Verfahrenschema des Prozesses

## 3.2 Charakterisierung der Einsatzstoffe und Rohstoffe

Vorab erfolgte die Charakterisierung aller Einsatz- und Rohstoffe hinsichtlich Zusammensetzung und Korngröße. Die Maximal- und Minimalwerte der Zusammensetzungen haben wesentlichen Einfluss auf die Auslegung der neuen Möllerberechnungsmethode.

### 3.2.1 Molybdänkonzentrat

Der Rohstoff aus dem Molybdän gewonnen wird, ist das Roherz Molybdänit, welches etwa 0,2 % MoS<sub>2</sub> enthält. Dieses Roherz wird gebrochen, gemahlen, klassiert und vorsortiert, um ein Vorkonzentrat mit ca. 10 % Molybdänitgehalt zu erhalten. Die nächste Aufbereitungsstufe ist eine mehrstufige Flotation, nach der das Material etwa 90 % MoS<sub>2</sub> und 0,2 bis 2 % Kupfer enthält. Da der maximale Kupfergehalt für die Weiterverarbeitung aber bei 1,5 % Kupfer liegt, muss im Anschluss eine Laugung durchgeführt werden.

Im nächsten Schritt wird das Konzentrat geröstet. Der Röstvorgang dient der Umwandlung von MoS<sub>2</sub> in MoO<sub>3</sub> nach folgender Reaktion:



Das Rösten kann in Drehrohröfen, Wirbelbettreaktoren oder Etagenöfen erfolgen, wobei meist Etagenöfen verwendet werden. Diese Öfen besitzen vertikal angeordnete Herdböden, der obere Teil des Ofens wird zusätzlich mit Erdgas beheizt, um flüchtige Substanzen zu verbrennen und um Feuchtigkeit zu entfernen. Die Temperatur beim Röstprozess liegt zwischen 400 und 650 °C. Die Rösttemperatur darf nicht über 650 °C liegen, da das entstehende Molybdänoxid einen hohen Dampfdruck hat und bei Temperaturen über 650 °C zu sublimieren beginnt. Andererseits lässt sich der Schwefelgehalt bei hohen Temperaturen leicht senken. Es müssen also optimale Bedingungen eingestellt werden, bei denen das Oxid nicht sublimiert, aber trotzdem die Senkung des Schwefelgehaltes möglich ist [6] [9]. Abbildung 25 zeigt ein typisches Molybdänkonzentrat.



Abbildung 25: Molybdänkonzentrat

In Abbildung 26 ist eine charakteristische Korngrößenverteilung der Molybdänkonzentrate dargestellt. Weiters sind im Anhang (Abbildung 71) die Korngrößenverteilungen von Molybdänkonzentraten verschiedener Lieferanten gegenübergestellt.

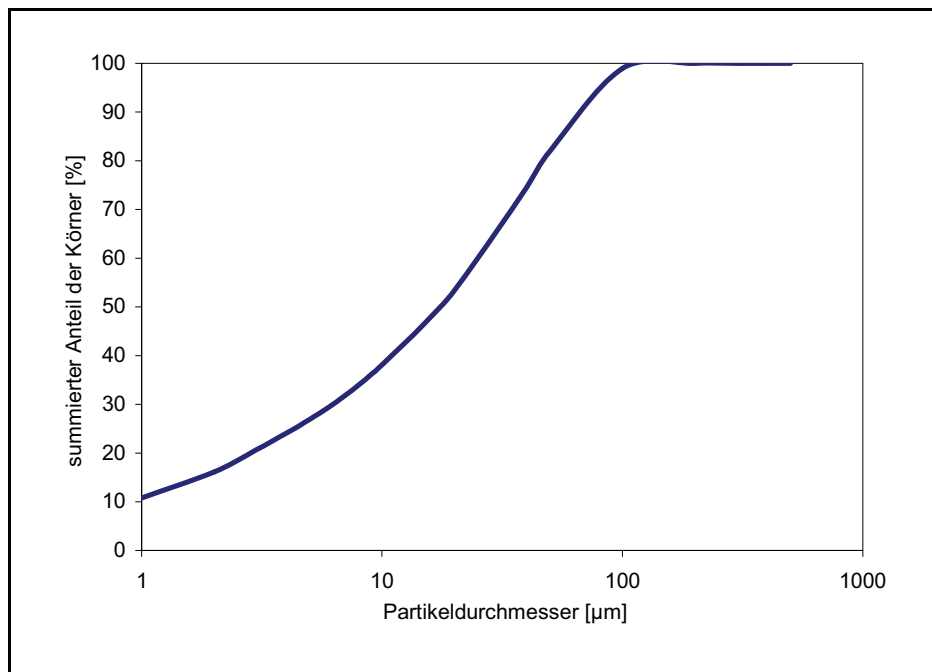


Abbildung 26: Korngrößenverteilung eines Molybdänkonzentrates

Die Korngrößen sind je nach Lieferant sehr unterschiedlich. Im oben gezeigten Beispiel sind alle Partikel kleiner als 100 µm, einige Lieferanten jedoch liefern Korngrößen bis zu 400 µm. Die durchschnittliche Zusammensetzung eines Molybdänkonzentrates zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Zusammensetzung von Molybdänkonzentraten

Elemente	Konzentration [%]
Mo	55 – 65
O	28 – 35
Fe	0,2 – 2,7
Si	0,1 – 3,5
Al	0,1 – 1,0
Ca	0,05 – 0,8
Cu	0,01 – 0,5

Im Idealfall bestehen die Molybdänkonzentrate zu 100 % aus  $\text{MoO}_3$ , meist sind aber bestimmte Mengen von nicht vollständig oxidierten Oxiden wie  $\text{MoO}_2$ ,  $\text{MoO}_{2,889}$ ,  $\text{MoO}_{2,75}$  und  $\text{MoO}_{2,875}$  vorhanden. Die Gangart der Mo-Konzentrate besteht hauptsächlich aus  $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Abbildung 72 bis Abbildung 78 im Anhang zeigen die Gegenüberstellung einiger Eigenschaften der Molybdänkonzentrate verschiedener Lieferanten.

### 3.2.2 Aluminiumgrieß

Aluminium dient als Reduktionsmittel bei der Ferromolybdänherstellung und wird in Form von Grieß eingesetzt. Tabelle 5 zeigt eine durchschnittliche Siebanalyse des Alugrieß.

Tabelle 5: Siebanalyse von Alugrieß

Korngröße [mm]	Anteil [%]
> 2	0
1,4 – 2,0	5 - 13
1,0 – 1,4	20 - 60
0,5 – 1,0	30 - 60
0 – 0,5	0 – 20

In Abbildung 27 sind die Korngrößenverteilungen zwei verschiedener Lieferanten dargestellt, woraus deutlich ersichtlich ist, dass die Korngrößen des Alugrieß sehr stark variieren.

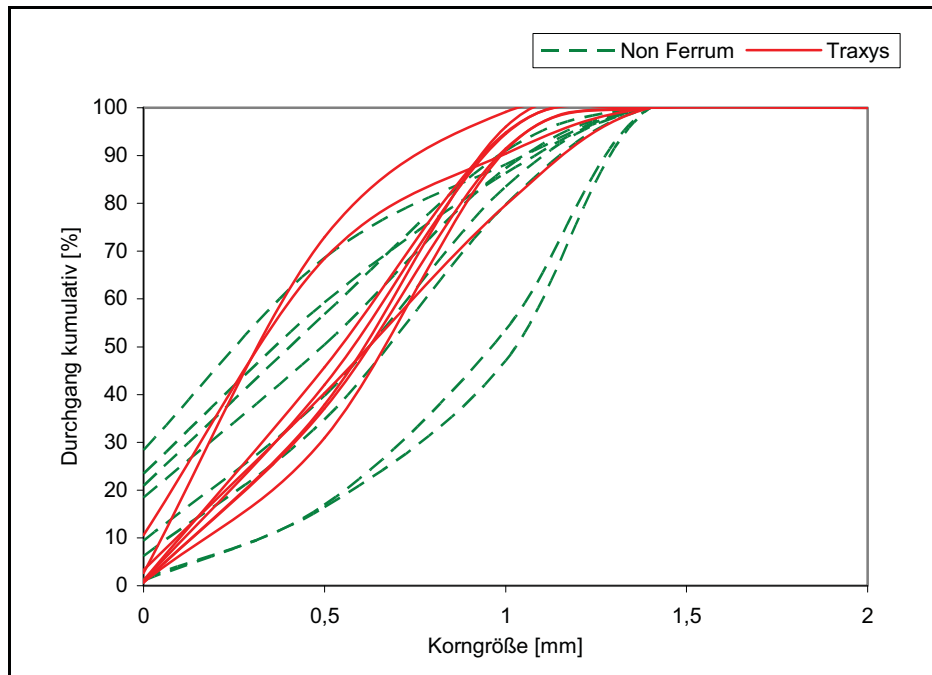


Abbildung 27: Korngrößenverteilungen Alugriß der beiden Lieferanten

Abbildung 28 zeigt einen typischen Alugriß.



Abbildung 28: Aluminiumgriß (FL 124)

Eine durchschnittliche Analyse von Alugriß zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6: Zusammensetzung von Alugrieß

Elemente	Konzentration [%]
Al	90 – 96
Fe	1 – 6
Ti, Si, Mn, Cu, Zn, Ca	gesamt 1 – 5

Der Alugrieß besteht zu über 90 % aus Aluminium, die größte Verunreinigung ist Eisen, welches bis zu 6 % enthalten sein kann. Kleinere Verunreinigungen können Ti, Si, Mn, Cu, Zn oder Ca sein.

Gegenüberstellungen verschiedener Eigenschaften der Alugrießsorten sind im Anhang Abbildung 79 bis Abbildung 85 enthalten.

### 3.2.3 Ferrosilizium

Das im Ferrosilizium enthaltene Silizium dient neben Aluminium als Reduktionsmittel. Der Einsatz dieses Elementes macht die Reaktion kontrollierbar, da bei alleiniger Verwendung von Aluminium die Reduktion zu schnell und explosionsartig verlaufen würde. Ein hohes Zugabeverhältnis Si/Al senkt die freiwerdende Energie und lässt die Reaktion somit langsamer ablaufen. Weiters wird Ferrosilizium aufgrund seines billigeren Preises im Gegensatz zu Aluminium sehr gerne als Reduktionsmittel verwendet. Abbildung 29 zeigt Ferrosilizium welches 75,5 % Si enthält.



Abbildung 29: Ferrosilizium

Das eingesetzte Ferrosilizium besitzt ein sehr breites Korngrößenspektrum. Das Material lässt sich in einen Feinanteil (0 – 0,1 mm), mittleren Anteil (0,1 – 0,315 mm) und einen Grobanteil gliedern, wobei der Feinanteil und der Grobanteil zusammen etwa 70 % der Menge ausmachen. Das bedeutet, dass ein großer Teil des Materials sehr fein oder sehr grob ist und verhältnismäßig wenig Material im mittleren Korngrößenbereich liegt. Die Zuordnung des Ferrosiliziums zu Lieferanten ist nicht möglich, da die Lagerung von sämtlichem angelieferten Material in einem gemeinsamen Bunker erfolgt. Erst im Anschluss wird die Bemusterung zur Analyse durchgeführt. In Abbildung 30 sind die typischen Korngrößenverteilungen einiger FeSi-Proben dargestellt.

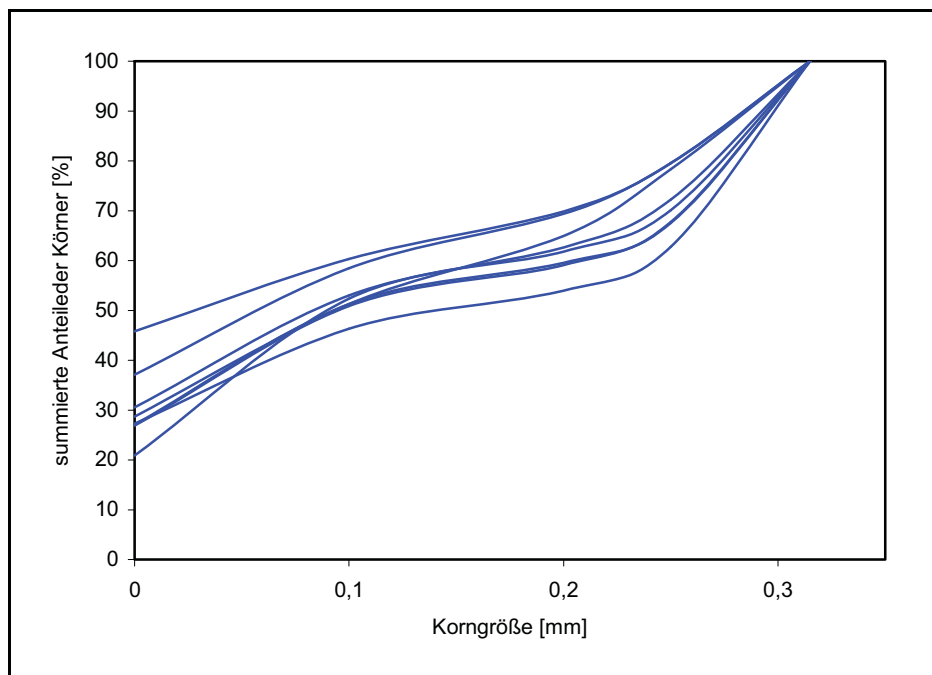


Abbildung 30: Korngrößenverteilung von Ferrosilizium

In Tabelle 7 ist die durchschnittliche Zusammensetzung von Ferrosilizium angegeben.

Tabelle 7: Zusammensetzung von Ferrosilizium

Elemente	Konzentration [%]
Si	70 – 80
Fe	15 – 28
Al, Mn, Ti, Ca	je < 1

Das verwendete Ferrosilizium enthält nur sehr wenige Verunreinigungen in Form von Al, Mn, Ti oder Ca. Im Anhang sind Vergleiche von mehreren Eigenschaften des Ferrosiliziums verschiedener Chargen enthalten (Abbildung 86 bis Abbildung 90).

### 3.2.4 Kalk

Um eine dünnflüssige Schlacke zu erhalten, in der sich das Ferromolybdän gut absetzen kann, wird Kalk als Flussmittel eingesetzt. Der gebrannte Kalk besteht zum Großteil aus CaO (> 98 %) mit kleinen Verunreinigungen wie SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 3.2.5 Filterstaub

Beim Abbrandprozess und auch bei anderen Produktionseinheiten, wie zum Beispiel in der Schlackenaufbereitungshalle oder in der Ferromolybdän-Brecherstraße, entstehen große Mengen an Stäuben, welche mittels Absaugvorrichtung gesammelt und anschließend wieder der Möllermischung zugeführt werden. Die mittlere Zusammensetzung der Filterstäube zeigt Tabelle 8.

Tabelle 8: Zusammensetzung von Filterstaub

Bestandteil	Konzentration [%]
MoO <sub>3</sub>	55 - 76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 - 15
SiO <sub>2</sub>	7 - 14
CaO	3 - 12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 13
CuO, MgO, K <sub>2</sub> O, ZnO, PbO	< 2

### 3.2.6 Walzenzunder

Walzenzunder ist ein Nebenprodukt, das bei der Stahlherstellung entsteht. Er besteht größtenteils aus oxidiertem Eisen in Form von Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> und stellt eine wichtige Eisenquelle im Prozess dar. In Abbildung 31 sind die Korngrößenverteilungen von acht verschiedenen Proben dargestellt.



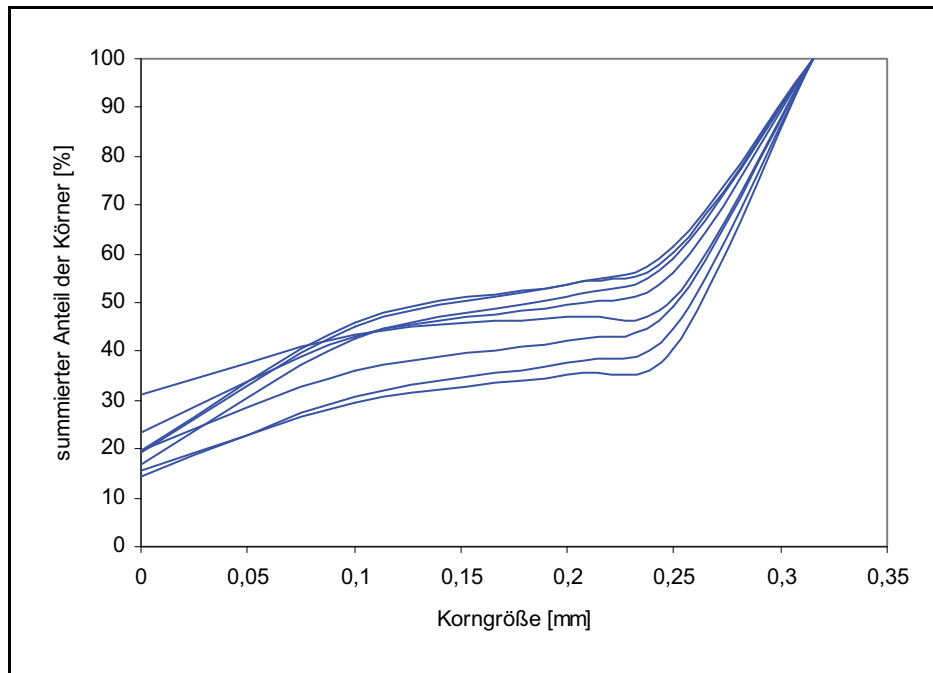


Abbildung 31: Korngrößenverteilung des Walzenzunders

Auch hier ist, wie bei Ferrosilizium, zu erkennen, dass der Großteil des Materials sehr fein oder sehr grob ist und nur ein kleiner Anteil im mittleren Korngrößenbereich von 0,1 bis 0,25 mm liegt. Im Anhang befinden sich Vergleiche von korngrößenspezifischen Eigenschaften mit dem Sauerstoffgehalt des Walzenzunders verschiedener Chargen (Abbildung 91 und Abbildung 92). Eine durchschnittliche Zusammensetzung von Walzenzunder ist Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Zusammensetzung von Walzenzunder ( $H_2$  reduziert)

Elemente	Konzentration [%]
Fe	93
Ca	5
Mn, Si, Cu, Cr	< 2

### 3.3 Charakterisierung der Produkte

Bei der Ferromolybdänherstellung entsteht das Produkt Ferromolybdän65 und Schlacke als Nebenprodukt. Bei einer Charge werden etwa 2,8 Tonnen Ferromolybdän und 3,2 Tonnen Schlacke produziert, pro Tonne FeMo fallen also etwa 1200 kg Schlacke an.

### 3.3.1 Ferromolybdän

Die Beprobung des Ferromolybdäns erfolgt nach der Abkühlung des Blockes. Dazu schlägt man mit einem Hammer Stücke von verschiedenen Stellen des erkalteten FeMo-Blockes heraus und pulvert diese Proben. In weiterer Folge wird die pulverförmige Probe in einer Hochfrequenz-Umschmelzanlage zu einer Perle verschmolzen, und anschließend am RFA-Analysengerät (siehe 3.4.3) sowie am Leco-Gerät (siehe 3.4.4) analysiert. Die durchschnittliche Zusammensetzung eines Blockes ist in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10: typische Zusammensetzung des erzeugten FeMo

Korngröße	Elemente	Konzentration [%]
10 - 50 mm	Mo	65 – 72
	Cu	0,3 – 0,4
	Si	0,8 – 2
	Fe	Rest
0 - 10 mm	Mo	60 – 65
	Cu	0,3 – 0,4
	Si	1,7 – 2,1
	Fe	Rest

Der Grobanteil des Produktes enthält mindestens 65 % Molybdän, kleine Verunreinigungen sind Kupfer und Silizium. Der Feinanteil hat einen niedrigeren Molybdängehalt von etwa 60 – 65 % und wird nochmals in drei Kornklassen unterteilt. In Tabelle 11 sind die Massenanteile der unterschiedlichen Kornklassen angeführt.

Tabelle 11: Massenanteile der verschiedenen Kornklassen

Kornklasse	Massenanteil [%]
0 – 1 mm	2,5 – 5
1 – 5 mm	6 – 11
5 – 10 mm	3 – 5
10 - 50 mm	80 – 87

### 3.3.2 Schlacke

Bei jedem Abbrand fallen, wie oben bereits erwähnt, etwa 3200 bis 3500 kg Schlacke an. Das Ofenpersonal nimmt während des Abgießens der Schlacke aus dem Thermitofen direkt aus dem Gussstrahl mit einem Schöpfer eine Probe und gießt diese vor Ort auf eine

Eisenplatte. Nach dem Erkalten der Probe wird diese gepulvert und ins Labor geschickt. Dort erfolgt die Anfertigung einer Tablette aus der pulverförmigen Probe, welche am RFA-Gerät (siehe 3.4.3) auf ihren Mo-Gehalt analysiert wird. Die Zusammensetzung der Schlacke hängt von den Einsatzstoffen ab. In Tabelle 12 sind die möglichen Zusammensetzungen angegeben.

Tabelle 12: typische Zusammensetzung der Schlacke

Bestandteil	Konzentration [%]
SiO <sub>2</sub>	35 – 60
FeO	6 – 30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 – 30
CaO	8 – 15
MoO <sub>3</sub>	0 – 2

## 3.4 Verwendete Analysengeräte

In diesem Kapitel werden alle Analysengeräte, die bei den nachfolgenden Versuchen sowie bei der Charakterisierung der Rohstoffe und der Produkte Anwendung finden, kurz erklärt.

### 3.4.1 ICP Analyse

Zur Molybdänbestimmung mittels ICP (induktiv gekoppeltes Plasma) wurde das OES-Gerät Optima 3000 DV von der Firma Perkin Elmer verwendet. Dieses Analysengerät ist ein simultanes Spektrometer für flüssige Proben, es kann mit diesem axial als auch radial gemessen werden.

Um ein Arbeiten im Bereich von 167 - 200 nm zu ermöglichen, wird das Spektrometer mit Stickstoff gespült.

Da die Probe bei der Analyse zerstäubt werden muss, können mit dem Spektrometer nur flüssige Proben analysiert werden. Um pulverförmige Proben in flüssige zu überführen, bedarf es eines Schmelzaufschlusses. Dieser wird mit dem mikroprozessorgesteuerten Aufschlussgerät H.R.T./Claisse Fluxy 10/30 durchgeführt. Dieses Verfahren eignet sich für pulverförmige Proben mit Elementgehalten von ca. 0,01 % bis 100 % in oxidischen und metallischen Materialien.

Das induktiv gekoppelte Plasma wird in einem Argonstrom in einer Quarz-Fackel bei Atmosphärendruck aufrechterhalten. Die Energiezufuhr zum Plasma erfolgt durch ein

oszillierendes elektromagnetisches Feld mit einer Hochfrequenz von 40 MHz. Die Erzeugung dieses Feldes erfolgt in einer Spule, welche die Fackel umgibt. Die flüssige Probe wird mit einer peristaltischen Pumpe in den Zerstäuber befördert und über das zentrale Fackelrohr ins Plasma eingeleitet. Die Zerlegung des Lichtes des Plasmas geschieht für jedes Element nach charakteristischen Spektrallinien in einer Eschelleoptik, die Messung erfolgt mit einem lichtempfindlichen Halbleiter-Detektor (SCD-Detektoren).

### **3.4.2 Korngrößenverteilung**

Zur Ermittlung von Korngrößenverteilungen wurde das Gerät PA X100 Particle Size Analyzer verwendet.

### **3.4.3 RFA-Analyse**

Das RFA-Gerät ist ein Röntgenspektrometer (Type 8480-S der Firma ARL) für die chemische Analyse von festen Stoffen und Flüssigkeiten. Durch Bestrahlung mit Elektronen-, Röntgen- oder Gammastrahlen werden die Atome bzw. Ionen in der zu untersuchenden Probe zur charakteristischen Röntgenstrahlung angeregt, die unter einem bestimmten Winkel von einem Detektorsystem auf ihre Intensität und spektrale Verteilung hin untersucht wird. Aufgrund des Zusammenhanges der chemischen Zusammensetzung der Probe und dem Spektrum der angeregten Fluoreszenzstrahlung kann diese Methode zur chemischen Analyse eingesetzt werden. Es ist die Durchführung qualitativer und quantitativer Bestimmungen möglich. Das Röntgenspektrometer eignet sich zur Ermittlung aller Elemente des Periodensystems von Uran bis Bor und kann Elementkonzentrationen von 100 % bis in den ppm-Bereich bestimmen. Die Genauigkeit der Analysen ist abhängig von der zu bestimmenden Konzentration des Elementes und der Matrix. Es können Proben in Form von Tabletten, umgeschmolzenen Perlen oder Ingots analysiert werden.

### **3.4.4 Leco-Gerät**

Das LECO CS 444 ist ein rechnergesteuertes, standardisiertes Analysengerät zur Messung von Kohlenstoff und Schwefel im Messbereich von 0,001 – 100 %. Es arbeitet nach dem Prinzip der Infrarot-Absorption, die Proben werden pulverförmig eingesetzt. Die Genauigkeit der Analyse liegt bei C-Messungen bei 0,5 % des ermittelten Wertes und bei S-Bestimmungen je nach Höhe des Ergebnisses zwischen 2 und 5 % des Messergebnisses.

---

### 3.4.5 Rasterelektronenmikroskop

Als Rasterelektronenmikroskop (REM) bezeichnet man ein Elektronenmikroskop, bei dem ein Elektronenstrahl in einem bestimmten Muster über das vergrößert abzubildende Objekt geführt wird und Wechselwirkungen der Elektronen mit dem Objekt zur Erzeugung eines Bildes des Objekts genutzt werden. Die mit einem Rasterelektronenmikroskop erzeugten Bilder sind Abbildungen der Objektoberflächen und weisen eine hohe Schärfentiefe auf. Der maximale theoretische Vergrößerungsfaktor liegt etwa bei ca. 1.000.000:1 [24].

Es wurde ein Gerät vom Typ Quanta 200 3D mit einer Wolframkathode mit automatischer Filamentsättigung verwendet. Die Analyse der Probe erfolgte anhand des EDX Analysengerätes INCA Energy 200, welches an das REM gekoppelt ist [25].

### 3.5 Vorversuche zur Bestimmung der Homogenität des Möllers und des Absetzverhaltens von Molybdän

Um den Ist-Zustand der Produktion zu erfassen, erfolgte die Durchführung von Vorversuchen. Zum einen sollten die Auswirkungen der unterschiedlichen Laufzeiten der Möllermischanlage auf den Abbrand charakterisiert und zum anderen das Absetzverhalten der Metallpartikel in der Schlacke untersucht werden. Weiters wurden die über einen gewissen Zeitraum verwendeten Einsatzstoffe analysiert, um Unterschiede in der Zusammensetzung und Korngröße zu erfassen.

#### 3.5.1 Möllermischanlage und Homogenität des Möllers

Die genauen Abläufe der Möllermischanlage sind in Kapitel 3.1.1 erklärt. Es sollte nun der Ablauf des Einfüllens in den Flow Bin in Abhängigkeit von der Zeit erfasst werden, um so die zeitlichen Unterschiede darzustellen (Abbildung 32).

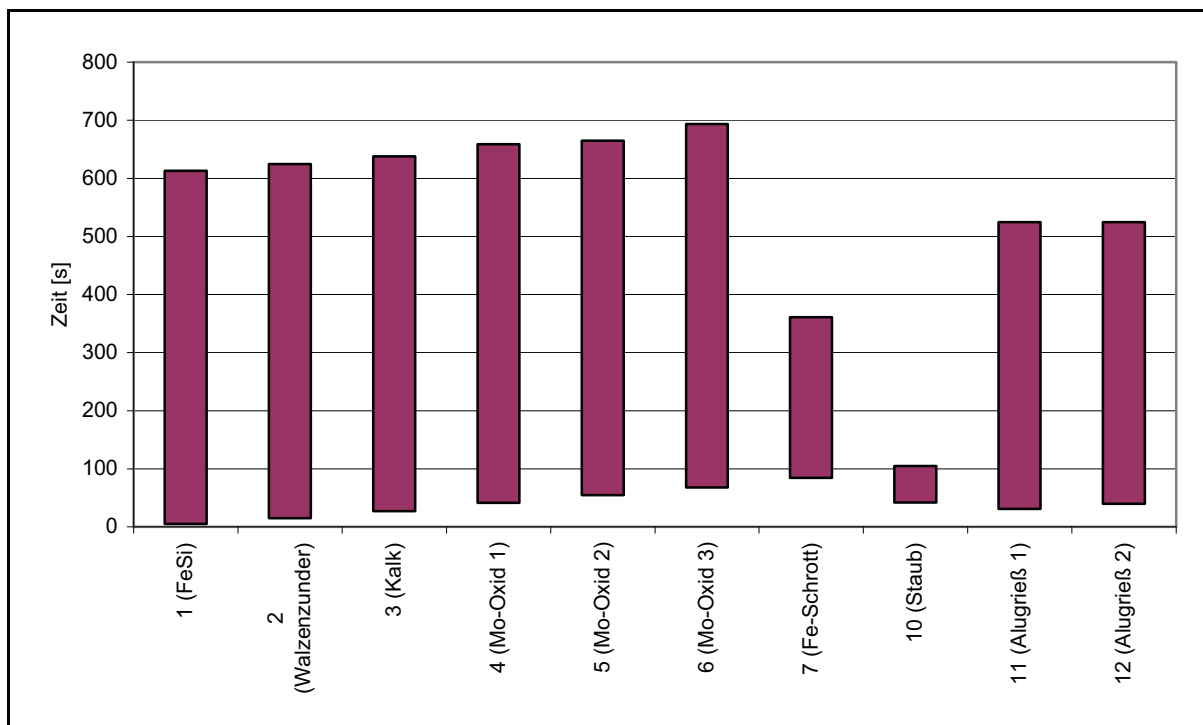


Abbildung 32: Durchschnittliche Laufzeiten der Möllermischanlage für die Chargen 143, 147, 151 und 155

Auf der horizontalen Achse der Abbildung 32 sind die unterschiedlichen Waagen angeführt (Ferrosilizium, Walzenzunder, Kalk, Molybdänoxid 1, 2 und 3, Eisenschrott, Staub, Alugrieß 1 und 2). Auf der vertikalen Achse ist die Zeit in Sekunden aufgetragen. Die Füllung eines Flow Bins (entspricht dem halben Möller eines Abbrandes) dauert fast 700 Sekunden (etwa

11,5 Minuten). Die Balken entsprechen der Zeit, in der die Waagen eingeschaltet sind, wobei deutlich zu erkennen ist, dass sie nicht gleichzeitig, sondern nacheinander in Betrieb gehen. Durch die stark variierenden Laufzeiten (vor allem bei Eisenschrott und Staub) ist zu erwarten, dass der Möller nicht homogen ist und somit auch kein gleichmäßiger Abbrand möglich ist. In Abbildung 32 sind Durchschnittswerte aufgetragen, die einzelnen Laufzeiten der vier betrachteten Chargen (Chg 143, Chg 147, Chg 151 und Chg 155) befinden sich im Anhang (Abbildung 93 bis Abbildung 100).

Um diese Vermutung zu überprüfen, erfolgte eine Untersuchung der vier oben genannten Chargen. Die Probennahme des Möllers geschah direkt beim Chargieren in den Ofen. Dazu wurde alle fünf Minuten während des Rohstoffeintrages eine Probe direkt über dem Abbrandofen genommen. Zusätzlich erfolgte auch eine Beprobung der Möllervorlage an der Oberfläche und im unteren Bereich (siehe Abbildung 33).

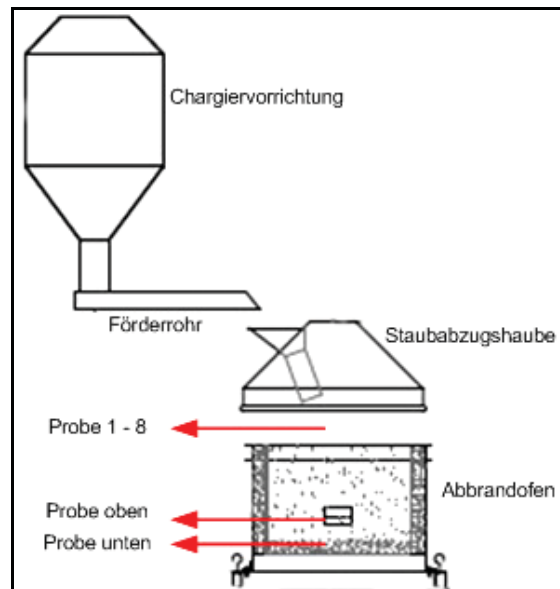


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Probennahme des Möllers beim Abbrand

Die unterschiedliche Dauer des Rohstoffchargierens ergab pro Abbrand zwischen sieben und zehn Proben. Um die Homogenität dieser Proben zu ermitteln, wurden Abbrandversuche mit den Proben der Charge 147 und Charge 155 mit anschließender Massenbilanzierung durchgeführt.

Für die Abbrandversuche war zuerst eine Homogenisierung der Proben erforderlich. Der Möller für die Versuche bestand aus 3 kg einer, in der Zusammensetzung genau definierten Standardmischung und 1 kg der Probe mit unbekannter Zusammensetzung. Als Zündmischung diente Vanadiumpentoxid  $V_2O_5$  und Aluminium im Verhältnis 2:1. Für die Ausmauerung des Versuchsofens wurde Magnesiumoxid  $MgO$  verwendet. Im Anhang

befinden sich Tabellen mit den genauen Inputströmen der Versuche (Tabelle 40 und Tabelle 42), wobei in diesen natürlich nur der bekannte Standardmüller angeführt ist. Die Proben (1 kg) sind nicht im Input angegeben, weil deren Zusammensetzung unbekannt ist. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 34 ersichtlich.



Abbildung 34: Versuchsaufbau der Abbrandversuche

Anhand eines Zünddrahtes erfolgte die Zündung der Mischung. Der Abbrand ist in Abbildung 35 und Abbildung 36 dargestellt und dauerte etwa 30 Sekunden.



Abbildung 35: Abbrand kurz nach der Zündung



Abbildung 36: Abbrand nach ca. 10 Sekunden

Nach dem Abbrand musste der Ofen einige Stunden abkühlen, bevor man die Schlacke und das Metall entnehmen konnte. Abbildung 37 zeigt den Schlacke-Metall-Block.





Abbildung 37: Schlacke-Metall-Block

Pro Versuch entstanden etwa 1,5 – 1,8 kg Ferromolybdän und 1,9 – 2,4 kg Schlacke. Abbildung 38 zeigt den Ferromolybdän-Block und Abbildung 39 die Schlacke der Abbrandversuche.



Abbildung 38: Das entstandenes Metall



Abbildung 39: Die entstandene Schlacke

Die Schlacke und das Metall wurden mittels RFA analysiert. Die Molybdängehalte im Metall lagen zwischen 61 % und 70 %, in der Schlacke konnten 4,0 – 7,5 % Molybdän gefunden werden (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Analysenergebnisse der Abbrandversuche

Probenbezeichnung		Ergebnisse			
		Metall		Schlacke	
		[kg]	Mo-Gehalt [%]	[kg]	Mo-Gehalt [%]
Charge 147	Probe unten	1,70	61,40	2,00	4,40
	Probe oben	1,70	63,25	2,05	5,15
	Probe 1	1,70	61,70	2,10	4,39
	Probe 2	1,70	63,80	2,05	6,00
	Probe 3	1,70	66,85	2,10	4,74
	Probe 4	1,55	69,45	2,26	5,77
	Probe 5	1,65	65,80	2,05	4,50
	Probe 6	1,65	66,65	2,10	5,50
Charge 155	Probe unten	1,75	61,90	1,90	3,95
	Probe oben	1,70	62,30	2,00	5,30
	Probe 1	1,60	64,75	2,22	6,80
	Probe 2	1,45	69,55	2,40	7,55
	Probe 3	1,55	66,30	2,20	6,60
	Probe 4	1,54	66,35	2,22	6,10
	Probe 5	1,52	68,00	2,18	6,70

Mit den, aus den Abbrandversuchen gewonnenen Daten sollte nun eine Massenbilanzierung durchgeführt werden. Abbildung 40 zeigt eine Übersicht über die Bilanz.

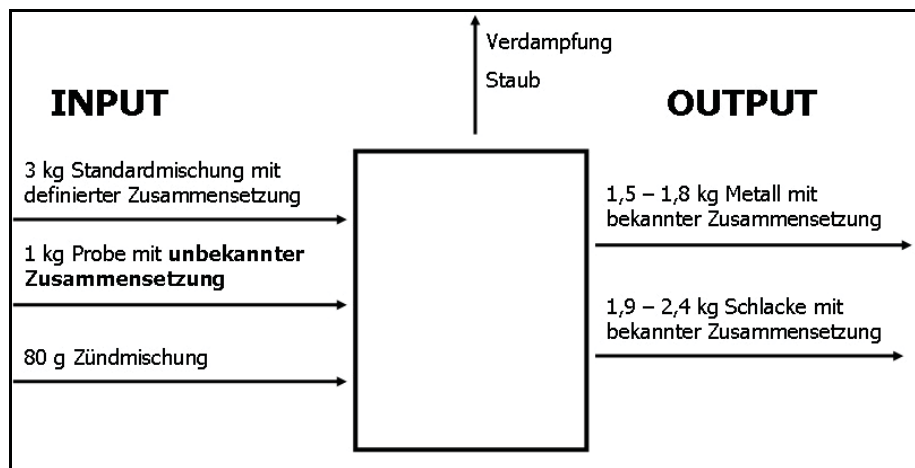


Abbildung 40: Massenbilanz beim Prozess zur Berechnung der Probenzusammensetzung

Die Inputströme umfassen die 3 kg Standardmischung (siehe Anhang Tabelle 42), deren chemische Analyse genau bekannt ist, 1 kg Probe, deren Zusammensetzung berechnet werden soll und 80 g Zündermischung, welche aus  $V_2O_5$  und Aluminium im Verhältnis 2:1 besteht. Die Produkte sind das Metall, dessen Zusammensetzung und Menge bekannt ist und die Schlacke mit bekannter chemischer Analyse und Menge. Die Verluste durch Staub und Verdampfung wurden vorab anhand von zwei Abbränden mit Standardmischungen

bestimmt (Möllerzusammensetzung siehe Anhang Tabelle 40, Analysenergebnisse siehe Anhang Tabelle 41) und bei jedem weiteren Versuch als konstant angenommen. Die Standardmischung setzte sich wie folgt zusammen (Tabelle 14).

Tabelle 14: Standardmischung (3 kg) der Abbrandversuche

Rohstoff	[kg]
Mo-Konzentrat FL 74 (63.5 % Mo)	1,517
Ferrosilizium (75.5 % Si)	0,486
Walzenzunder	0,526
Branntkalk	0,165
Fe-Schrott	0,157
Alugrieß	0,149

Das Aufstellen der Massenbilanz erfolgte im Programm HSC Chemistry 5.11. Es wurden alle bekannten Mengen der Input- und Outputströme eingegeben. Einzige Ausnahme bildete die Probe, da die Zusammensetzung unbekannt war. Die Massenbilanz konnte nie ausgeglichen sein, weil ein Kilogramm Input (= Probe) in der Bilanz fehlte. Die Analysenergebnisse der Schlacken- und Metallproben der Abbrandversuche befinden sich im Anhang in Tabelle 43 und Tabelle 44. Nach Durchführung einer so genannten Elementbilanzierung, bei der eine Gegenüberstellung der eingegebenen Elemente im Input- und Outputstrom erfolgte, konnte die fehlende Masse auf die Elemente umgerechnet werden. Als Ergebnis dieser Massenbilanzierung erhielt man die Elemente mit den dazugehörigen Massen, die in der Probe enthalten waren (siehe Anhang Tabelle 45 und Tabelle 46). Somit war es möglich die Zusammensetzung der Probe zu ermitteln. Durch die Probenbezeichnung konnte auf den Zeitpunkt der Probenahme während des Abbrandes geschlossen werden. Der Verlauf der einzelnen Elemente über die Zeit ist in Abbildung 41 dargestellt.

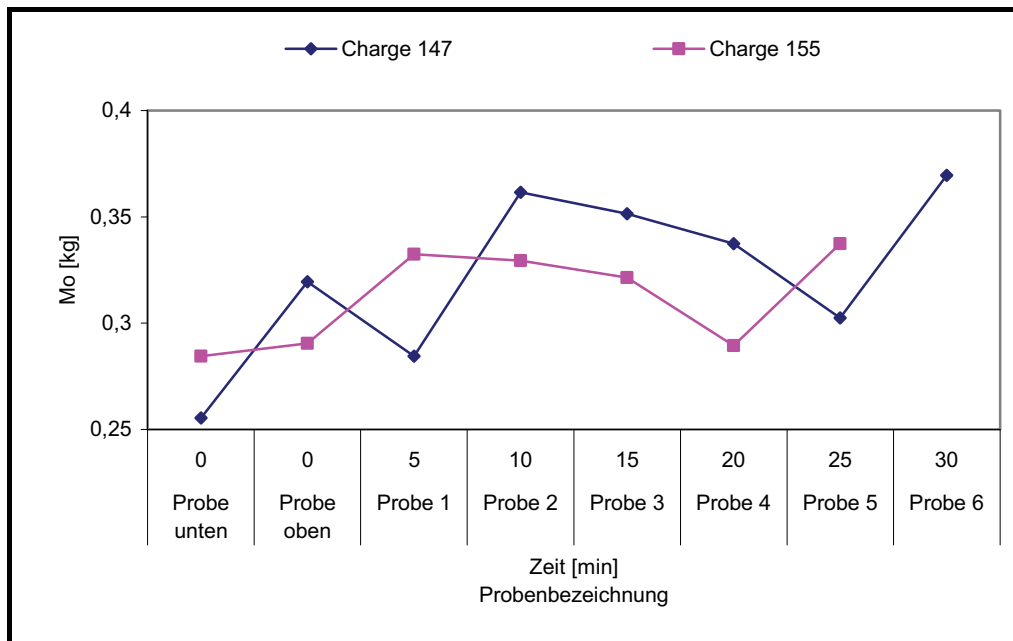


Abbildung 41: Molybdänverlauf über der Zeit bei den Abbrandversuchen

Die Darstellung zeigt die Menge an Molybdän, die in der Probe des Möllers enthalten ist. Auf der horizontalen Achse ist die Zeit der Probenahme bzw. die Probenbezeichnung aufgetragen. Es lässt sich gut erkennen, dass die Menge an Molybdän im Möller großen Schwankungen unterliegt. Am Anfang ist sehr wenig Molybdän enthalten, die Menge steigt langsam an und erreicht in der jeweils letzten Probe ihren Maximalwert. Dies konnte auch für die Elemente Eisen, Aluminium und Silizium (Abbildung 42, Abbildung 43 und Abbildung 44) dargestellt werden.

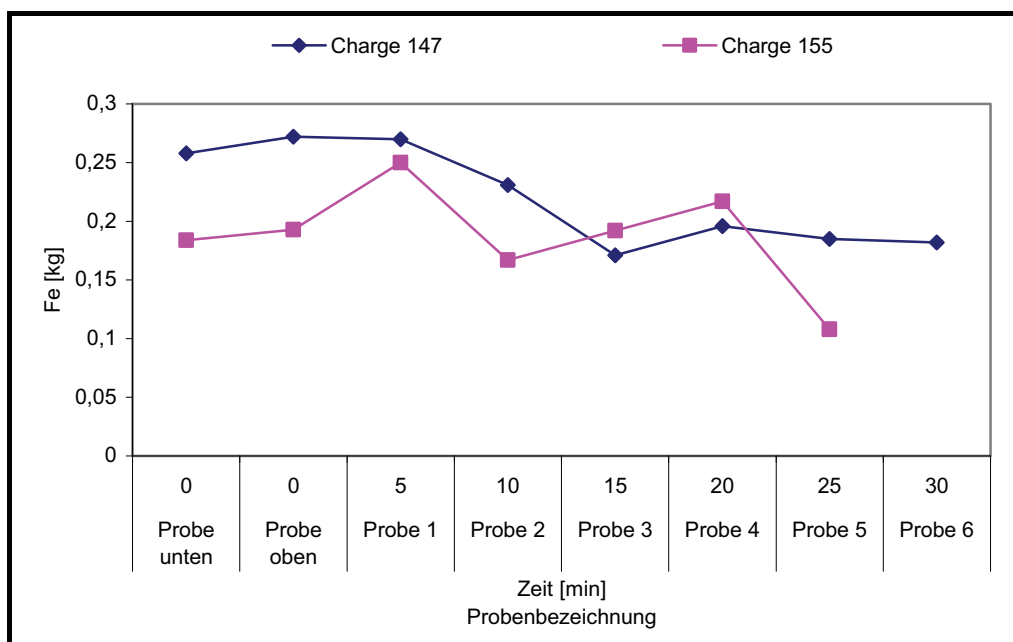


Abbildung 42: Eisenverlauf über die Zeit bei den Abbrandversuchen

Die Eisenmenge im Möller unterliegt nicht so großen Schwankungen wie die Molybdänmenge. Allerdings lässt sich erkennen, dass nach etwa 10 Minuten die Eisenmenge abnimmt und sich auf ein niedrigeres Niveau einpendelt. Die Erklärung hierfür liegt in der Eisenschrotteinwaage. Betrachtet man die durchschnittlichen Laufzeiten der Möllermischanlage (Abbildung 32), sieht man, dass die Eisenschrotteinwaage nach der halben Zeit bereits abgeschlossen ist, weswegen in der ersten Hälfte des Möllers der gesamte Eisenschrott enthalten ist, während sich praktisch kein Eisenschrott in der zweiten Hälfte des Möllers befindet.

Abbildung 43 stellt den Aluminiumverlauf über der Zeit dar.

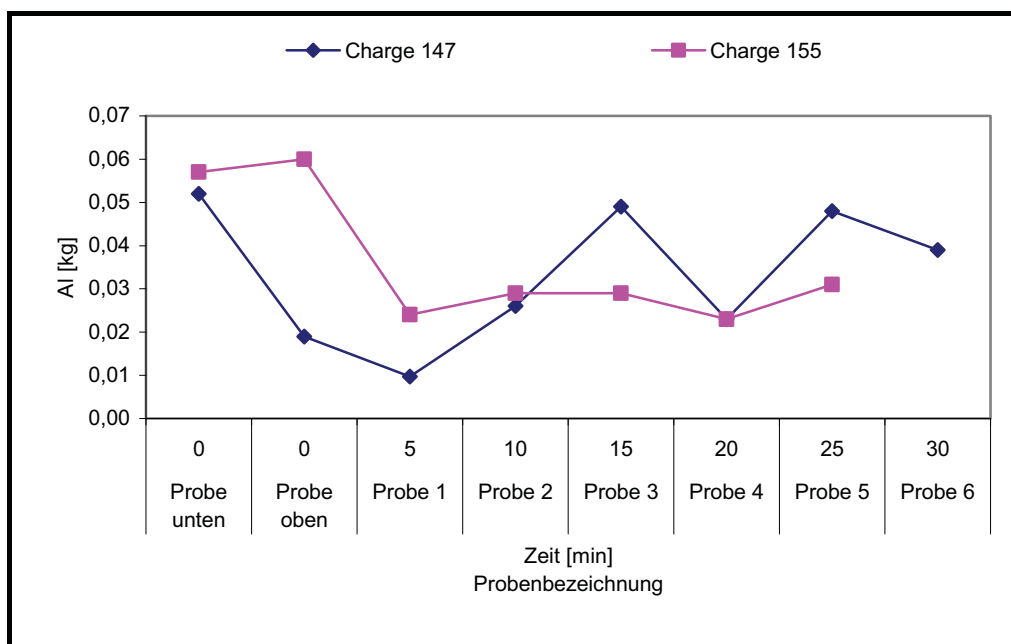


Abbildung 43: Aluminiumverlauf über die Zeit bei den Abbrandversuchen

Die Menge Aluminium im Möller ist in der ersten Probe bzw. bei Charge 155 auch in der zweiten Probe sehr hoch und fällt dann stark ab und schwankt schließlich um einen Mittelwert von etwa 0,03 kg.

In Abbildung 44 ist der aus den Abbrandversuchen ermittelte Siliziumverlauf über der Zeit ersichtlich.

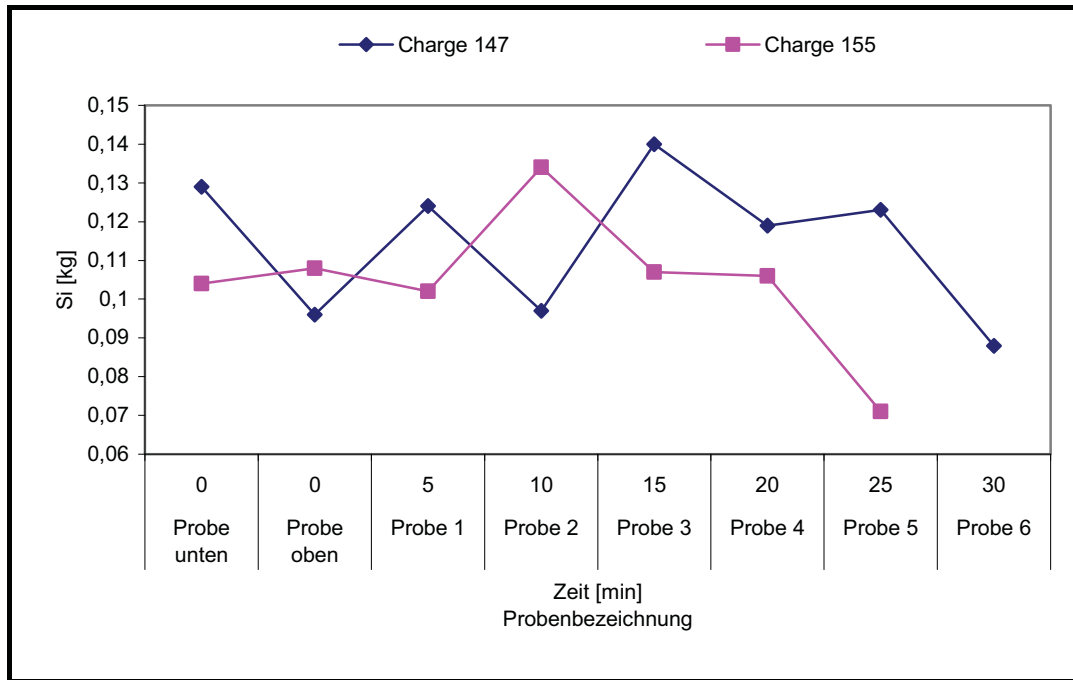


Abbildung 44: Siliziumverlauf über die Zeit bei den Abbrandversuchen

Die Abbildung zeigt, dass die Siliziummenge im Möller relativ konstant ist. Einzige Ausnahme bildet allerdings die letzte Probe, wobei sich dies wiederum mit Abbildung 32 erklären lässt. Die FeSi-Waage schaltet sich nach etwa 600 Sekunden aus, während die Waagen für die Mo-Konzentrate, Walzenzunder und Kalk noch in Betrieb sind, daher befindet sich im letzten Teil des Möllers viel weniger Silizium.

Die dazugehörigen Werte der vier Darstellungen befinden sich im Anhang (Tabelle 45 und Tabelle 46).

In Abbildung 45 sind die Minimalwerte, Mittelwerte und Maximalwerte der betrachteten Elemente für Charge 147 dargestellt.

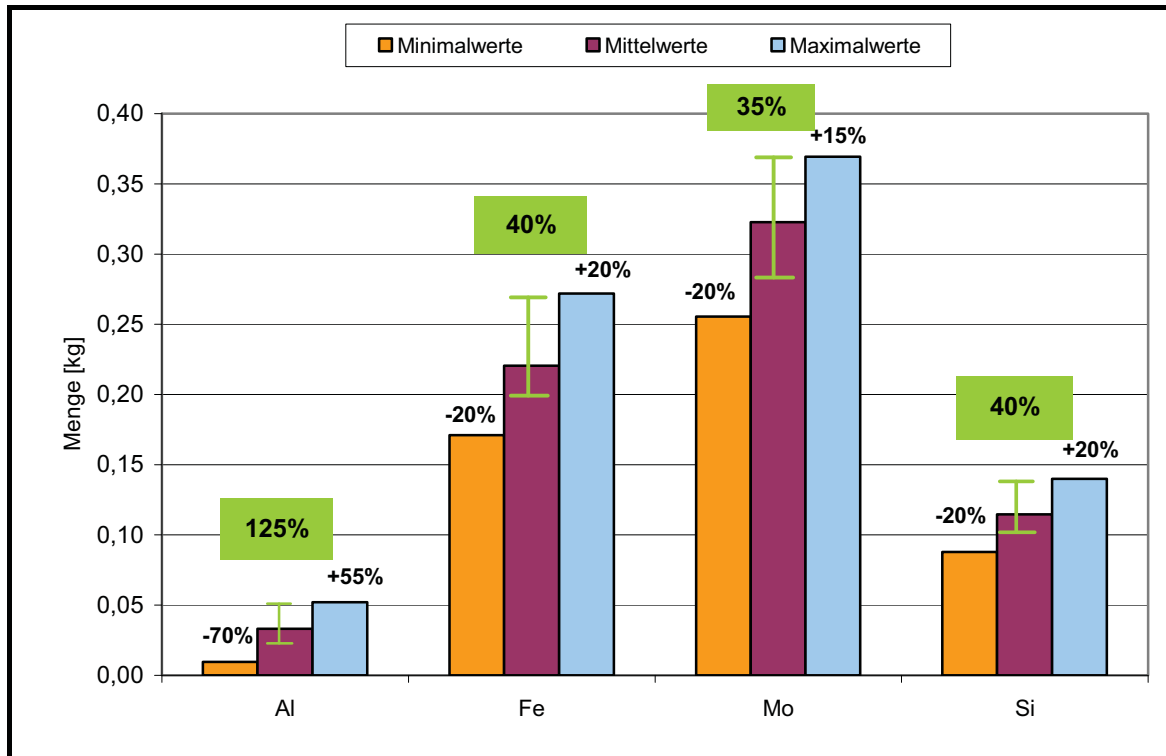


Abbildung 45: Prozentuelle Abweichungen der Elemente im Möller (Charge 147)

Der jeweils mittlere Balken stellt den Mittelwert des Elementes dar, links davon befindet sich der Minimalwert, rechts davon der Maximalwert. Die Berechnung der prozentuellen Abweichungen von Minimal- und Maximalwert vom Mittelwert ergibt Werte von bis zu 125 % beim Aluminium. Das bedeutet, dass die Menge des Aluminiums im Möller um diesen Wert schwanken kann. Bei Eisen, Molybdän und Silizium ist die Schwankungsbreite nicht so groß und liegt bei etwa 40 %. Auch für Charge 155 sieht die Darstellung ähnlich aus (siehe Abbildung 46).

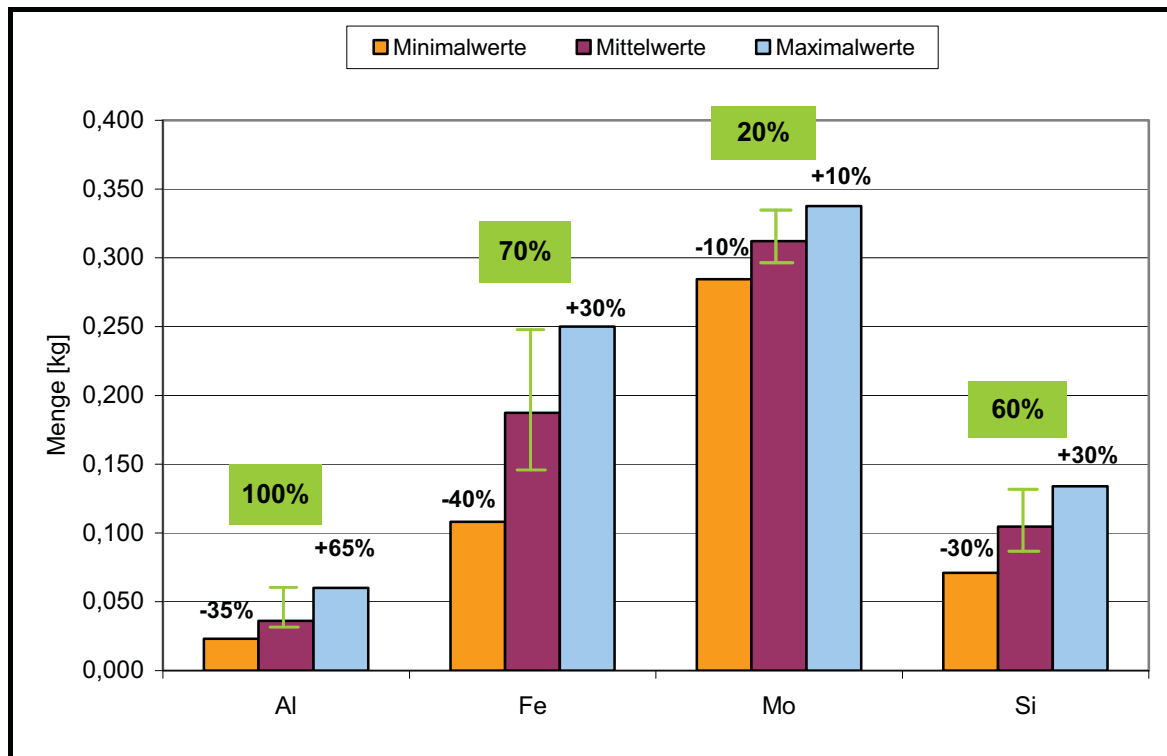


Abbildung 46: Prozentuelle Abweichungen der Elemente im Möller (Charge 155)

Diese Schwankungen sind zu einem großen Teil auf die Möllermischanlage und ihre unterschiedlichen Laufzeiten zurückzuführen, wobei die geringen Mengen der Abbrandversuche eine erhöhte Fehlerquelle darstellen. Einerseits kühlt das Metall und die Schlacke so schnell ab, dass die Absetzzeit sehr gering ist, was in den hohen Mo-Werten der Schlacke erkennbar ist, und andererseits kann sich eine möglicherweise fehlerhafte oder ungenaue Ein- bzw. Auswaage bei diesen geringen Mengen von nur wenigen Kilogramm sehr stark auswirken.

### 3.5.2 Die Untersuchung des Absetzverhaltens von Molybdän

Um eine optimale Molybdänausbeute zu garantieren, wird nach dem Abbrand eine Absetzzeit von 60 - 90 Minuten eingehalten. In dieser Zeit sollen sich alle Metallpartikel, die sich noch in der Schlacke befinden, ins Metall absetzen. Mit einer speziell für diese Aufgabe konstruierten Vorrichtung wurden während dieser Absetzzeit alle 15 Minuten Schlackenproben immer an der gleichen Stelle genommen, um den Verlauf des Molybdängehaltes in Abhängigkeit von der Zeit darstellen zu können. Die Probenahme erfolgte immer etwa 20 cm über der Grenzschicht Schlacke/Metall. Abbildung 47 zeigt eine Skizze der Probenahme.



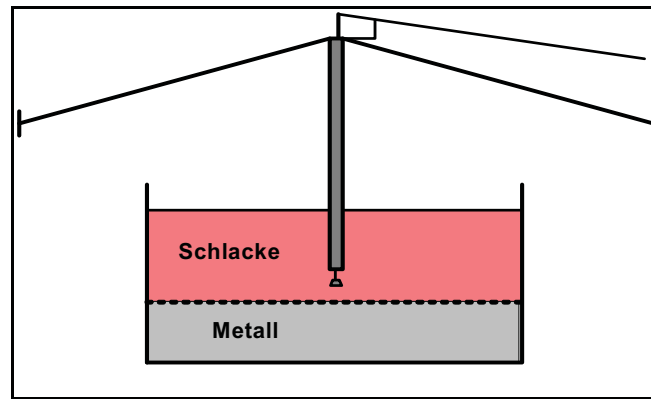


Abbildung 47: Skizze der Probenahme von Schlackenproben

Zusätzlich wurden Proben an der Schlackenoberfläche und beim Abguss der Schlacke am Anfang sowie etwa in der Mitte des Vorganges genommen. In Tabelle 15 sind die Analysenergebnisse gegenübergestellt, eine vollständige Übersicht aller Ergebnisse zeigt Tabelle 47 im Anhang.

Tabelle 15: Mo-Gehalte der entnommenen Schlackenproben

Mo-Gehalte [%]	Charge 143 RFA (ICP)	Charge 147 RFA (ICP)	Charge 151 RFA (ICP)	Charge 155 RFA (ICP)
Probe Oberfläche 1	1,60 (2,00)	2,27 (3,00)	0,82 (0,90)	2,66 (3,20)
Probe Oberfläche 2	-	-	-	2,17 (2,35)
Schlackenprobe 1 (nach 15 Min.)	0,98 (1,10)	1,73 (2,10)	3,62 (4,60)	1,91 (1,70)
Schlackenprobe 2 (nach 30 Min.)	1,13 (1,45)	0,89 (0,95)	2,55 (4,10)	1,88 (1,90)
Schlackenprobe 3 (nach 45 Min.)	2,62 (4,10)	1,07 (1,70)	1,69 (2,30)	1,56 (1,40)
Schlackenprobe 4 (nach 60 Min.)	-	0,87 (1,00)	4,70 (5,90)	1,46 (1,30)

Jede Schlackenprobe wurde zwei Mal analysiert. Der jeweils erste Wert in Tabelle 15 ist das Ergebnis der RFA-Analyse und die zweite in Klammer geschriebene Zahl ist das Ergebnis der ICP-Analyse. Anhand einiger Analysenergebnisse ist sehr deutlich erkennbar, dass sich die Probenahme als problematisch erwies. Der Mo-Gehalt der Schlackenprobe 1 und 4 der Charge 151 und der Schlackenprobe 3 der Charge 143 liegen weit über den anderen Analysenergebnissen. Diese Werte sind sehr unrealistisch und können nur durch zu tiefes Eintauchen der Probenahmevorrichtung, wodurch die Schlacke-Metall-Grenzschicht erreicht werden kann, entstanden sein.

Der Molybdängehalt in der Schlacke ist in Abbildung 48 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

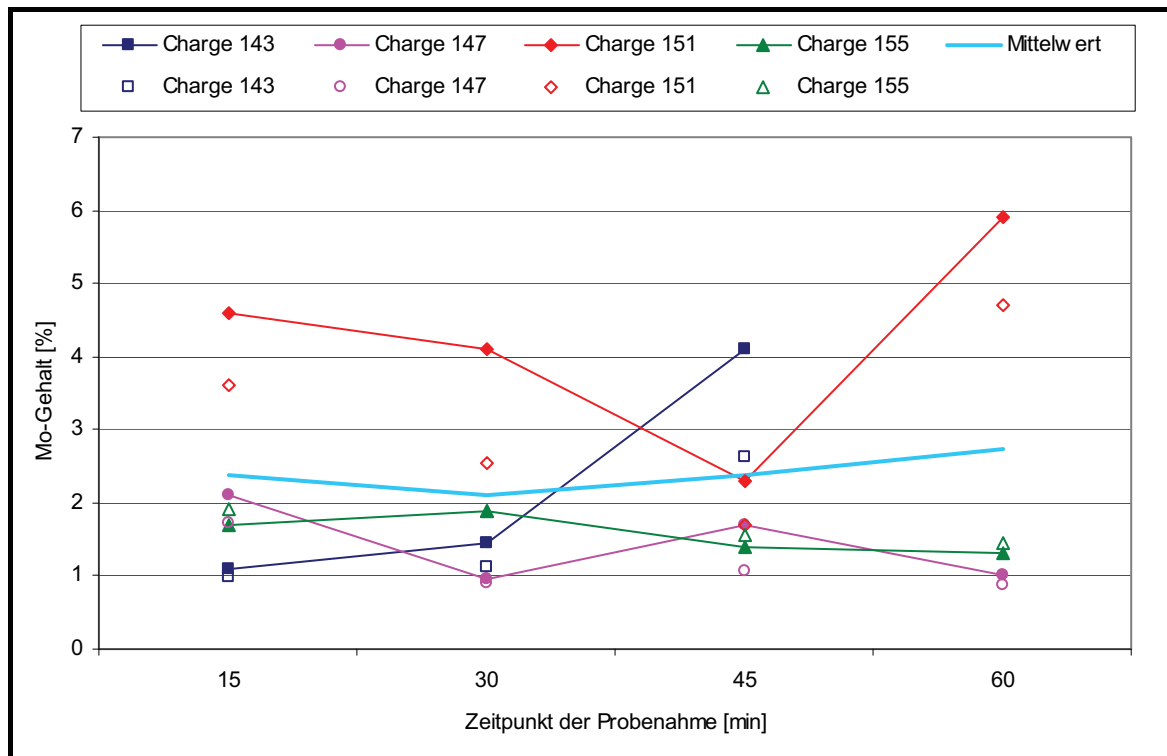


Abbildung 48: Absetzverhalten des Molybdäns in Abhängigkeit von der Zeit

Auf der horizontalen Achse ist die Zeit bzw. der Zeitpunkt der Probenahme aufgetragen, auf der vertikalen Achse der Molybdängehalt in der Schlacke. In der obigen Darstellung (Abbildung 48) sind die Ergebnisse der ICP-Analyse (mit Linien verbundenen Punkte) sowie die Ergebnisse der RFA-Analysen (nicht verbundene Punkte) dargestellt. Anhand Abbildung 48 ist kein eindeutiges Absetzverhalten ersichtlich. Wie bereits vorhin erwähnt, sind die extrem hohen Werte von Charge 151 und Charge 143 aufgrund der problematischen Probenahme sehr kritisch zu betrachten.

Zusätzlich zu den Molybdänanalysen der Schlackenproben mit RFA und ICP wurden von allen Proben Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop gemacht. Die Vorbereitung der Proben umfasst das Einbetten in eine leitende Einbettmasse und das anschließende Schleifen und Polieren.

In Abbildung 49 sieht man einen Molybdäneinschluss in der Schlacke bei einer Vergrößerung von 8500. Der Durchmesser des Kügelchens misst etwa 4  $\mu\text{m}$ . Abbildung 50 zeigt eine Aufnahme einer anderen Schlackenprobe bei 1000-facher Vergrößerung. Hier sind Einschlüsse von bis zu 80  $\mu\text{m}$  zu sehen.

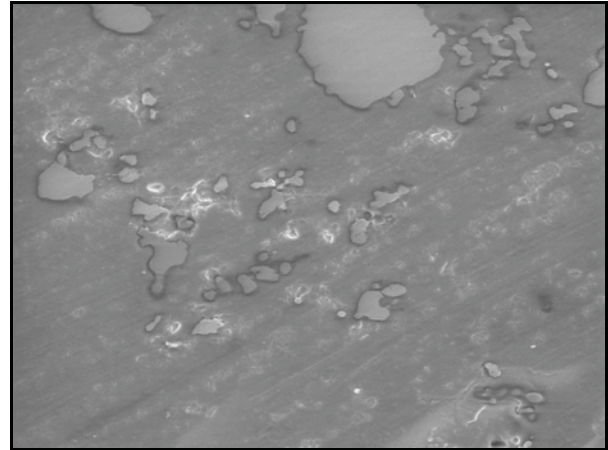
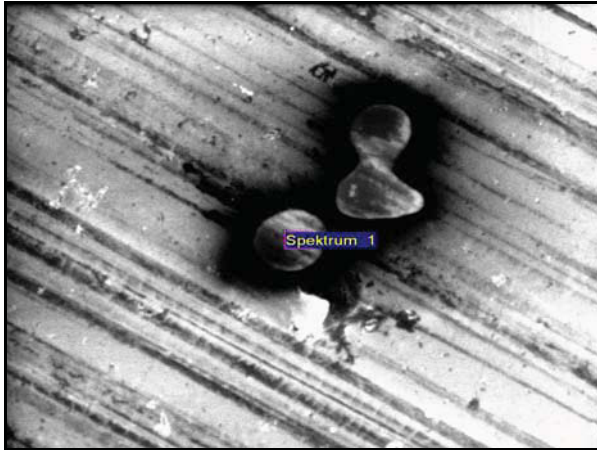


Abbildung 49: Mo-Einschluss bei 8500-facher Vergrößerung (Charge 143)

Abbildung 50: Mo-Einschluss bei 1000-facher Vergrößerung (Charge 151)

Im Anhang sind die Aufnahmen der Schlacken im Rasterelektronenmikroskop für die Chargen 143, 147, 151 und 155 dargestellt (Abbildung 101 bis Abbildung 119).

### **3.6 Einfluss der Homogenität des Möllers und der Abkühlgeschwindigkeit auf den FeMo-Abbrand im versuchstechnischen Maßstab**

Um verschiedene Einflüsse auf den FeMo-Abbrand zu untersuchen, wurde der Abbrand im Maßstab von etwa 1:10 im Labor der Forschung und Entwicklung der Fa. Treibacher nachgestellt. Ziel war es, Auswirkungen einer geringen Abkühlgeschwindigkeit der Schlacke und den Einfluss einer intensiven Mischung des Möllers auf den Abbrand zu untersuchen. Als Abbrandgefäß diente eine Schmelz-Lichtbogenofenwanne, deren Bodenzustellung aus Schamottziegeln aufgebaut war. Darüber wurde eine Schicht von ca. 12 cm FeMo-Schlacke aufgebracht. Die Seitenwände bestanden aus etwa 16 cm FeMo-Schlacke (siehe Abbildung 52).



Abbildung 51: Versuchsaufbau für den Großabbrand



Abbildung 52: Verwendetes Ofengefäß für den Großabbrand

Die Möllierzusammensetzung wurde nach der Standardberechnung des Betriebes Ferrolegerungen ermittelt. Da die Mischanlage für große Mengen ausgelegt ist, erfolgte die Zusammenstellung von ca. 3 Tonnen Möller für die Versuche (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Möllierzusammensetzung laut Mischanlage der FL

Rohstoff	Menge [kg]	Anteil [%]
Mo-Konzentrat (mit 60,9 % Mo)	1560,00	52,4
FeSi (75,5 % Si)	444,00	14,91
Walzenzunder	520,00	17,47
Branntkalk	163,00	5,48
Fe-Schrott fein	160,00	5,37
Alugrieß Nonferrum	100,00	3,36
Alugrieß Traxys	30,00	1,01
Summe	2977,00	100,00

Da, wie in Kapitel 3.5.1 bewiesen, der in der Mischanlage gemischte Möller nicht homogen vorliegt, muss vor dem Einsatz eine intensive Homogenisierung aller Komponenten erfolgen. Für die Versuche verwendete man für jeden Abbrand eine Möllermenge von 500 kg, wobei ca. 250 kg im Abbrandgefäß vorgelegt und die restliche Menge während des Abbrandes dazuschargiert wurde. Als Zündermischung dienten 100 g Vanadiumpentoxid und Alugrieß im Verhältnis 2:1. Es wurde derselbe Versuch zweimal unter denselben Bedingungen durchgeführt. Die Zusammensetzung der 500 kg Möllermischung für die Versuche ist in Tabelle 17 angeführt.

Tabelle 17: Möllermischung für den Pilotversuch in der Forschung und Entwicklung

Rohstoff	Menge [kg]
Mo-Konzentrat (mit 60,9 % Mo)	262,01
FeSi (75,5 % Si)	74,57
Walzenzunder	87,34
Brantkalk	27,38
Fe-Schrott fein	26,87
Alugrieß Nonferrum	16,80
Alugrieß Traxys	5,04
Summe	500,00

Der gesamte Abbrand dauerte etwa 25 Minuten, wobei mit dem Nachchargieren erst nach 10 Minuten begonnen wurde. Die Wärme- und Rauchentwicklung war mäßig, das Nachchargieren des Möllers musste durch intensives Klopfen am Behälter unterstützt werden, weil der Auslauf durch das pappige Molybdänkonzentrat verstopfte. Zusätzlich erfolgte eine Temperaturmessung in der seitlichen Ofenausmauerung, welche nach einigen Stunden die Maximaltemperatur von 800 °C erreichte. Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen den Abbrand beim Pilotversuch bzw. den Zustand nach dem Abbrand.



Abbildung 53: Abbrand beim Pilotversuch

Abbildung 54: Zustand nach dem Abbrand  
(mit einer Temperatursonde in  
der Seitenwand)

Im Betrieb wird aus wirtschaftlichen als auch aus Platzgründen der Ofen sofort nach Beendigung des Abbrandes abgossen. Bei den vorliegenden Versuchen war eine langsame Abkühlung der Schlacke im Ofen möglich, die etwa 24 Stunden betrug. Danach konnte das Material gebrochen und analysiert werden. Abbildung 55 zeigt den gesamten



Schlacke-Metall-Block nach dem Abkühlen, in Abbildung 56 ist der Querschnitt des Blockes zu sehen.



Abbildung 55: Schlacke-Metall-Block des Pilotversuches



Abbildung 56: Querschnitt Schlacke-Metall-Block

An den Seitenwänden und am Boden sind etwa 10 cm der Stampfung aufgeschmolzen. Dies ist in Abbildung 57 ersichtlich, welche eine Vergrößerung aus Abbildung 56 darstellt. Es ist zu erkennen, dass bei einer langsamen Abkühlung ca. 10 cm der Oberfläche der Schlacke glasig erstarrt und der Rest kristallin. In Abbildung 58 ist ein Bruchstück der Schlackenschicht abgebildet, wobei, der dunkle obere Teil die glasige und der hellere untere Teil die kristalline Schlacke darstellt.



Abbildung 57: Querschnitt der Schlacke (Rand)



Abbildung 58: Darstellung der erstarrten Schlacke (Mitte)

Der Metallblock ließ sich sehr gut vom übrigen Material trennen. Optisch sind keine Metalleinschlüsse in der Schlacke zu erkennen. Nach der Trennung des Metalls von der Schlacke konnte nur der Metallblock genau gewogen werden. Eine Wiegung der Schlacke

war nicht möglich, da ein Teil der Ofenausmauerung am Rand haftete (Abbildung 56 und Abbildung 57). Das Gewicht der Schlacke wurde durch die Differenz des Möllereintrages und des Metallblockes ermittelt, wobei der Gewichtsverlust des entstandenen Flugstaubes nicht berücksichtigt werden konnte. Da allerdings die Rauch- und Staubentwicklung sehr hoch war, trägt ein außer Acht lassen dieser Mengen zur Ungenauigkeit des Ergebnisses bei.

Aufgabe war es nun den Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit und der Homogenität auf die Effizienz des Abbrandes zu ermitteln. Dies soll einerseits mittels einer genauen Analyse der Schlacke erfolgen und andererseits durch eine Erstellung einer Mo-Bilanz und Berechnung der Mo-Ausbeute.

Wie oben bereits erwähnt, sind mit freiem Auge keine Molybdäneinschlüsse in der Schlacke zu erkennen. Dies bestätigten auch die RFA-Analysen der Schlackenproben. Diese ergaben erstaunliche niedrige Werte von nur 0,25 bzw. 0,26 % Molybdän. Die Schlacke eines großtechnischen Abbrandes beinhaltet ungefähr 0,4 – 0,8 % Molybdän. Das ungewöhnlich gute Ergebnis soll weiters mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops untersucht werden. Abbildung 59 zeigt die Oberfläche der Schlacke bei glasiger Erstarrung und in Abbildung 60 kann man die Vergrößerung der kristallin erstarrten Oberfläche erkennen. Ein Einschluss von Molybdän ist nicht zu sehen.

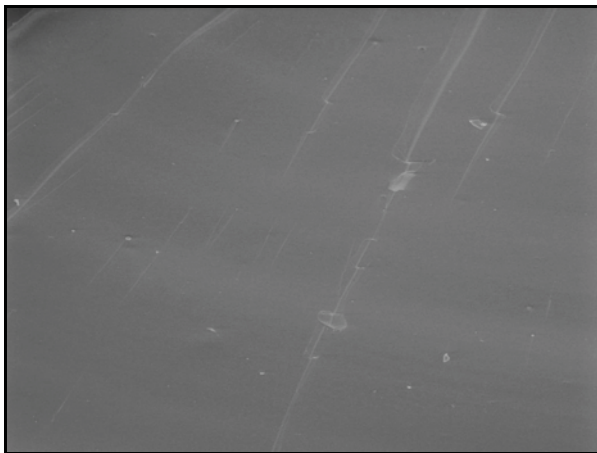


Abbildung 59: Schlackenprobe der glasig erstarrten Oberfläche (500-fache Vergrößerung)

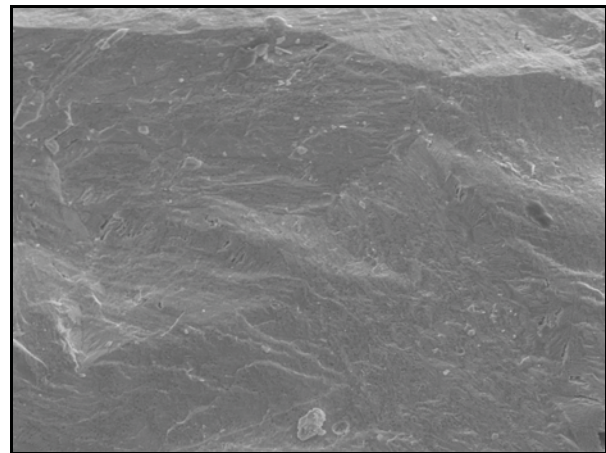


Abbildung 60: Schlackenprobe des kristallin erstarrten unteren Bereiches (500-fache Vergrößerung)

Eine quantitative Mo-Bestimmung mit dem Rasterelektronenmikroskop ergab im unteren Bereich der Schlacke einen Mo-Gehalt von 0,3 % und im glasig erstarrten oberen Bereich lag der Wert unter der Nachweisgrenze. Daraus lässt sich vermuten, dass eine geringe Abkühlgeschwindigkeit der Schlacke einen geringen Molybdängehalt und somit eine höhere

Ausbeute nach sich zieht. Die Schlacke des Abbrandes ist somit länger flüssig und eingeschlossene Molybdänkügelchen haben die Möglichkeit in das Metall abzusinken.

Im zweiten Schritt soll die Molybdänausbeute der Pilotversuche untersucht werden. Im Folgenden ist die Berechnungsformel dargestellt.

$$\text{Mo - Ausbeute [\%]} = \frac{\text{Mo im FeMo - Block [kg]}}{\text{Mo - Input [kg]}} \cdot 100 \quad (15)$$

Tabelle 18 zeigt die Molybdänbilanz der Pilotversuche und die berechnete Mo-Ausbeute.

Tabelle 18: Mo-Bilanz der Pilotversuche

	Versuch 1			Versuch 2		
	Menge [kg]	Mo [%]	Mo [kg]	Menge [kg]	Mo [%]	Mo [kg]
Mo-Konzentrat	262	60,90	159,6	262	60,90	159,6
Summe Input			159,6			159,6
FeMo	241,5	69,25	167,2	242,0	68,15	164,9
Schlacke	258,5	0,25	0,6	258,0	0,26	0,7
Summe Output			167,9			165,6
Mo-Ausbeute [%]			105			103

Wie aus der Tabelle ersichtlich, wurden in Versuch 1 und 2, je 262 kg Molybdänkonzentrat eingewogen. Bei einem Molybdängehalt von 60,9 % ist der Molybdäninput für beide Versuche 159,6 kg. Nach dem Abbrand hatte der Ferromolybdänblockes ein Gewicht von 241,5 kg mit 69,25 % Molybdäninhalt in Versuch 1 und 242,00 kg mit 68,15 % Molybdän in FeMo in Versuch 2. Umgerechnet auf das Molybdän sind das 167,2 kg und 164,9 kg. Mit der oben beschriebenen Formel ist es nun möglich die Ausbeute des Wertmetalls zu berechnen. In Versuch 1 zeigt sich ein Wert von 105 % und in Versuch 2 von 103 %. Eine Bilanzierung wurde auch für die Elemente Si, Al und Fe durchgeführt und befindet sich im Anhang Tabelle 48 bis Tabelle 50.

Ein Grund für die ungenauen Bilanzierungsergebnisse und Werte von über 100 % ist, dass der FeMo-Block und dessen Schlacke nicht homogen sind. So ändert sich der Mo-Gehalt des Blockes von der Mitte bis zum Rand um 2 %. Auch der Mo-Gehalt der Schlacke variiert von Rand bis Mitte des Blockes um ca. 0,07 % Mo. Bei den Berechnungen hat man stets mit den Analysen der Mitte gearbeitet. Auch die Probennahme kann zu einem ungenauen Ergebnis führen. So war es nicht möglich alle Proben an derselben Stelle des Blockes zu nehmen. Somit entstehen durch die Inhomogenität des Blockes und der Schlacke Fehler. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor sind die Analysen des Rohstoffes. Die Analysen vom Lieferanten und die des Betriebes FL variieren um fast 0,8 % Mo. Da der Møller für den



Abbrand in der Möllermischanlage der FL eingewogen wurde und wie im folgenden Kapitel beschrieben, die Genauigkeit dieser Waagen nicht gegeben ist, könnte auch dies ein Grund für eine Verfälschung des Ergebnisses sein. Auch das Gewicht des Möllers, des Metalls und der Schlacke, welche vor und nach dem Pilotversuchen gemessen wurden könnten fehlerhaft sein.

Die Ergebnisse dieser Versuche lassen vermuten, dass eine homogene Möllermischung und eine langsame Abkühlgeschwindigkeit die Effizienz des Abbrandes steigern kann. So wurden deutlich niedrigere Molybdänwerte in der Schlacke gefunden, als bei einem herkömmlichen Abbrand. Weiters ist die Schlacke aufgrund der niedrigen Abkühlgeschwindigkeit kristallin erstarrt. Dies hat zum Vorteil, dass diese günstige mechanische Eigenschaften in Bezug auf die Verwertung im Straßenbau aufweisen. Eine genaue Berechnung der Mo-Ausbeute und Bilanz war aufgrund der oben genannten Gründe nicht möglich. Weiters wurden die Versuche in kleinen Maßstab durchgeführt, wo geringe Ungenauigkeiten große Auswirkungen in der Berechnung der Ausbeute nach sich ziehen. Außerdem erfolgte eine Betrachtung von nur 2 Versuchen und auch das Einbeziehen des Flugstaubes war nicht möglich. Um den Einfluss von Homogenität des Möllers und Abkühlgeschwindigkeit zu quantifizieren, erfolgten Versuche im großtechnischen Rahmen, welche im folgenden Kapitel beschrieben werden.

### **3.7 Einfluss der Homogenität des Möllers und der Abkühlgeschwindigkeit auf den FeMo-Abbrand im großtechnischen Maßstab im Betrieb Ferrolegierungen**

Zur Bestätigung der Ergebnisse der Laborversuche wurden vier Versuchsabbrände mit den Chargennummern 1097, 1098, 1106 und 1107 im Produktionsbetrieb durchgeführt. Das Einwiegen und Mischen des Rohstoffes für die ersten beiden Versuche, mit den Losnummern 1097 und 1098 erfolgte wie üblich in der Möllermischanlage des Betriebes FL. Da die Homogenität dieser Möllermischungen nicht gegeben ist, werden diese im weiteren Verlauf des Kapitels als ungemischt bezeichnet. Die Schlacke des ersten Abbrandes sollte langsam abkühlen, die des zweiten Versuches wurde wie immer abgegossen und granuliert. Für die weiteren Versuchsabbrände erfolgte zur Gewährleistung einer optimalen Mischung das Einwiegen der Rohstoffe einzeln und hintereinander. Um bei diesen beiden Versuchen das Wiegen als Fehlerquelle auszuschließen, wurden die Rohstoffe mit einer weiteren Waage verwogen, bevor man sechs Flow Bins mit je 1/6 des Möllers befüllte (ca. 1.000 kg pro Flow Bin). Diese Referenzwiegungen zeigten, dass die Wiegung mit den Bandwaagen um einige Kilos schwankte. Mithilfe eines Gabelstaplers mit Drehwerk erfolgte eine intensive Mischung des Rohstoffes, wobei am Ende Chargen zu je 3 Tonnen in die Flow Bins gefüllt wurden. Diese Vorgehensweise gewährleistete eine optimale Durchmischung des

Rohstoffes. Nach dem Abbrand dieser beiden ließ man eines der Ofengefäße stehen, um eine langsame Abkühlgeschwindigkeit des Inhaltes zu erreichen. Die Schlacke des anderen Abbrandes wurde wie üblich abgegossen und granuliert. In Tabelle 19 ist eine Übersicht über die großtechnischen Versuche im Betrieb dargestellt.

Tabelle 19: Übersicht über die Betriebsversuche

	ungemischt	gemischt	abgießen	abkühlen
Charge 1097	X			X
Charge 1098	X		X	
Charge 1106		X		X
Charge 1107		X	X	

Die Molybdänkonzentrate für alle vier Versuchsabbrände stammen von demselben Lieferanten und beinhalten den gleichen Anteil an Wertmetall. Die Möllierzusammensetzung ist für alle Chargen gleich und ist in Tabelle 20 aufgelistet.

Tabelle 20: Inputmengen für eine Versuchscharge

Rohstoff	Menge [kg]
Mo-Konzentrat FL 176+177+178	1600
Mo-Konzentrat FL 179	602
Mo-Konzentrat FL 180	902
Ferrosilizium 75	990
Walzenzunder	1040
Brannkalk	326
Fe-Schrott	330
Alugieß Non Ferrum	260
Summe	6050

Der Abbrand von Charge 1097 und Charge 1106 erfolgte an der Abbrandstelle 1, Charge 1098 und 1107 an der Abbrandstelle 2. Es wurde beobachtet, dass das Chargieren an der Abbrandstelle 1 viel gleichmäßiger verlief, als an der zweiten Abbrandstelle, wo das Material schneller und ungleichmäßiger in den Ofen fiel. Aus diesem Grund sind immer wieder kleine Chargierpausen eingelegt worden, um eine vollständige Reaktion zu erhalten.

Nach dem Abbrand der beiden Versuchschargen mit anschließendem Schlackenabguss (Charge 1098 und 1107) erfolgte das Wiegen und das Analysieren des Metallblockes und der Schlacke.

Der Molybdängehalt der Schlackenanalysen beider Chargen ist in Tabelle 21 ersichtlich.

Tabelle 21: Analysenergebnisse der Schlackenproben von Charge 1097 und 1106

Probe	Mo-Gehalt [%]	
	Charge 1098	Charge 1107
Gussschlacke Anfang	0,34	0,68
Gussschlacke Mitte	0,33	0,62
Gussschlacke Ende	0,34	0,67
Schlackenschöpfprobe	0,49	1,41

Die Schlacke der Charge 1107 beinhaltet deutlich mehr Molybdän. Dies kann man besonders anhand der Schlackenschöpfprobe der Charge 1107 erkennen, bei der der Mo-Gehalt um fast ein Prozent höher ist, als bei Charge 1098.

Vor dem Brechen des Ferromolybdänblockes erfolgte eine Beprobung der Randzone bei beiden Chargen. Des Weiteren wurden nach dem Zerkleinerungsvorgang des Ferromolybdäns Durchschnittsproben genommen. Es ist zu erwähnen, dass das Metall nach dem Brechen in einen groben Anteil (10 – 50 mm) und in eine feine Fraktion (0 – 10 mm) eingeteilt wurde. Bei Charge 1107 konnten aus beiden Kornfraktionen Durchschnittsproben genommen werden, während bei Charge 1098 nur eine Gesamtdurchschnittsprobe angefertigt wurde (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22: Analysenergebnisse der Fraktionen von Charge 1098 und Charge 1107

Fraktion	Charge 1098 (ungemischt)						Charge 1107 (gemischt)					
	Mo [%]	Cu [%]	Si [%]	C [%]	S [%]	Fe [%]	Mo [%]	Cu [%]	Si [%]	C [%]	S [%]	Fe [%]
10 - 50 mm	71,10	0,35	1,16	0,02	0,03	27,34	67,20	0,38	1,32	0,02	0,03	31,06
0 - 10 mm							65,30	0,40	1,61	0,02	0,03	32,64
Randzone	71,65	0,31	1,24	0,02	0,03	26,75	58,25	0,46	0,66	0,03	0,03	40,57

Die Ergebnisse zeigen keinen bemerkenswerten Unterschied in der chemischen Analyse der Elemente Kupfer, Silizium, Kohlenstoff, Schwefel und Eisen. Eine Betrachtung des Molybdäns lässt allerdings große Unterschiede zwischen den beiden Chargen erkennen. Der Anteil des Molybdäns ist mit 71,1 % bei der ungemischten Charge 1098 um fast 4 % höher als der Mo-Gehalt der Grobfraktion der gemischten Charge 1107, der Feinanteil der Charge 1107 enthält sogar nur 65,3 % Mo. Auch ein Vergleich der Randprobe lässt große Unterschiede erkennen, während der Mo-Gehalt der Randzone bei Charge 1098 über dem Mo-Gehalt der Durchschnittsprobe liegt, befindet sich im Randbereich der Charge 1107 um bis zu 9 % weniger Mo als in der Grobfraktion. Dies beweist die große Inhomogenität des Blockes und macht die genaue Berechnung einer Molybdänbilanz nicht möglich.

Auch das Blockgewicht zeigt einen hohen Unterschied zwischen gemischten und ungemischtem Block, wie in Tabelle 23 zu sehen ist.

Tabelle 23: Blockgewichte und Fraktionsanteile der abgegossenen Chargen

Fraktion	Auswaagen Charge 1107		Auswaagen Charge 1098
	[kg]	[%]	[kg]
> 10 mm	2397,6	86,6	-
0 - 1 mm	79,1	2,9	-
1 - 5 mm	188,7	6,8	-
5 - 10 mm	104,6	3,8	-
Blockgewicht	2770,0	100,0	2960,0

In Tabelle 23 ist zu erkennen, dass die ungemischte Charge 1098 ein um fast 200 kg höheres Blockgewicht aufweist, als die gemischte Charge 1107. Die genaue Analyse der Schlacke und des Metalls sind im Anhang zu finden (Tabelle 54 bis Tabelle 56, Tabelle 60 bis Tabelle 62)

Betreffend der Versuche mit Charge 1097 und 1106 konnte nach einer Abkühlphase von vier Tagen der Block und die Schlacke analysiert und verwogen werden. Auffällig war, dass beim Versuch mit dem gemischtem Möller (Charge 1106) die Schlacke viel weiter abgesackt ist, als bei Charge 1097 und es sah so aus als wäre weniger Material vorhanden (siehe Abbildung 61 und Abbildung 62).



Abbildung 61: Charge 1097 nach dem Abbrand



Abbildung 62: Charge 1106 nach dem Abbrand

Die Ofenaußenwand hatte am vierten Tag noch eine Temperatur von etwa 100 °C. Zunächst wurde sie mit dem Kran abgehoben. Bereits beim Abheben der Wand war bei beiden Chargen eine sehr gute Metall-Schlacke-Trennung zu erkennen, da die gesamte Schlacke an der Ofenwand haftete. An der Metalloberfläche konnte noch eine Temperatur von 300 °C



detektiert werden. In Abbildung 63 ist das Abheben der Ofenwand zu sehen, Abbildung 64 zeigt den Metallblock der Charge 1097.



Abbildung 63: Abheben der Ofenwand



Abbildung 64: Metallblock der Charge 1097

Um die Schlacke von der Ofenwand abzulösen, wurde sie mit einem Pocher herausgehämmert. Die Oberfläche der Schlacke zeigte eine zum größten Teil kristalline Struktur (siehe Abbildung 65). Der Anteil der glasig erstarrten Schlacke ist im Gegensatz zu den Versuchen im Labor nur sehr gering ausgefallen. Grund hierfür mag die sehr langsame Abkühlgeschwindigkeit der beiden Chargen sein, die eine kristalline Ausbildung ermöglicht. Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen die erhaltene Schlacke und das Metall, in beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass die Schlacke im oberen Bereich sowie die Grenzschicht Metall-Schlacke sehr viele Poren beinhalten, welche ein Hinweis auf Gasbildung sein könnten



Abbildung 65: Querschnitt des oberen Bereiches der Schlacke



Abbildung 66: Metalloberfläche der langsam abgekühlten Charge

Die Beprobung der Schlacke erfolgte an verschiedenen Stellen (Oberfläche, oberer Bereich außen und Mitte, Unterseite außen und Mitte). Die Probenahme der erstarrten Schlacke erwies sich als problematisch, es war es nicht möglich, die Proben bei beiden Chargen an genau den gleichen Stellen zu nehmen. Der Grund hierfür war, dass wie oben bereits erwähnt die Schlacke an der Ofenwand stark haftete und durch das Herausschlagen dieser aus dem Ofengefäß es nicht möglich war den Rand- oder Mittelbereich zu unterscheiden. Es konnte nur optisch beurteilt werden, ob es sich bei den vorhandenen Stücken um Rand- oder Mittelproben, bzw. Proben aus oberen oder unteren Bereichen handelte. Andererseits war das Material so hart, dass es an manchen Stellen nicht gelang eine Probe mit dem Hammer herauszuschlagen. Tabelle 24 zeigt eine Übersicht der Analysenergebnisse der Charge 1097 und 1106.

Tabelle 24: Analysenergebnisse der Schlackenproben von Charge 1097 und Charge 1106

Probe	Mo-Gehalt [%]	
	Chg. 1097	Chg. 1106
Schlacke Oberfläche	10,07	-
Schlacke Mitte oben	-	0,53
Schlacke Mitte unten	1,10	1,21
Schlacke Ø Mitte	0,43	0,41
Schlacke Rand oben	0,39	0,44
Schlacke Rand unten 1	0,87	1,10
Schlacke Rand unten 2	1,38	0,52
Schöpfprobe nach Möllereintrag Ende	-	1,12

Ein Vergleich des Molybdängehalts der Schlacke der beiden Chargen zeigt, dass die Molybdän-Analysenergebnisse des Abbrandversuches mit der Losnummer 1097 größtenteils geringer sind als die der Charge 1106.

Wiederum erfolgte vor dem Brechen eine Probennahme an der Randzone des entstandenen Metalls. Die Analysenergebnisse von Molybdän sind in Tabelle 25 dargestellt, wobei wiederum eine Einteilung in eine grobe Fraktion (10 - 50 mm) und in eine feine Fraktion (0 – 10 mm) getroffen wurde. Die Tabelle 25 stellt die Analyse der Charge 1097 und 1106 gegenüber, wobei erstere als ungemischt zu bezeichnen ist und die zweite intensiv vermischt wurde.

Tabelle 25: Analysenergebnisse der Metallfraktionen von Charge 1097 und Charge 1106

	Charge 1097						Charge 1106					
	Mo [%]	Cu [%]	Si [%]	C [%]	S [%]	Fe [%]	Mo [%]	Cu [%]	Si [%]	C [%]	S [%]	Fe [%]
10 - 50 mm	65,95	0,38	1,56	0,03	0,04	32,05	67,05	0,41	1,32	0,02	0,03	31,17
0 - 10 mm	62,65	0,41	1,58	0,02	0,04	35,31	65,35	0,40	1,45	0,02	0,03	32,75
Randzone	59,60	0,44	1,54	0,01	0,03	38,38	59,00	0,51	1,55	0,01	0,04	38,89

Vergleicht man die Analysenergebnisse aus Tabelle 25, so ist erkennbar, dass die Elemente Kupfer, Silizium, Kohlenstoff, Schwefel und Eisen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Chargen aufweisen. Der Anteil des Molybdäns von Charge 1097 ist mit 65,95 % in der groben Fraktion und mit 62,65 % in der feinen Fraktion um knapp 2 % geringer als bei Charge 1106. Eine Gegenüberstellung der Analysenwerte der Randproben mit den Durchschnittsproben der Metallfraktionen ergibt, dass diese in Charge 1107 bis zu 8 % und in Charge 1097 bis zu 6 % differieren. Diese hohe Streuung beweist die Inhomogenität des Blockes und führt zu Ungenauigkeiten in der Massenbilanz.

Die Auswaagen der beiden Chargen sind in Tabelle 26 angeführt. Der Metallblock von Charge 1106 sah optisch viel kleiner und dünner aus, als der von Charge 1097 und wog auch um 120 kg weniger.

Tabelle 26: Blockgewichte und Fraktionsanteile der langsam gekühlten Chargen

Fraktion	Auswaagen Charge 1097		Auswaagen Charge 1106	
	[kg]	[%]	[kg]	[%]
> 10 mm	2314,0	80,1	2311,7	83,5
0 - 1 mm	129,1	4,5	99,6	3,6
1 - 5 mm	297,9	10,3	239,1	8,6
5 - 10 mm	149,0	5,2	119,6	4,3
Summe	2890,0	100,0	2770,0	100,0

Die genauen Analysenergebnisse aller Schlacken- und Metallproben der Chargen 1097 und 1106 befinden sich im Anhang in Tabelle 51 bis Tabelle 53 und Tabelle 57 bis Tabelle 59. Anhand der Analysenergebnisse der Fraktionen aus Tabelle 22 und Tabelle 25 und den prozentualen Auswaagen aus Tabelle 23 und Tabelle 26 wurde der durchschnittliche Molybdängehalt jedes Blockes errechnet, eine Übersicht der durchschnittlichen Analysenergebnisse aller Chargen befindet sich im Anhang Tabelle 63. Mit diesen durchschnittlich errechneten Werten war man in der Lage eine Molybdänbilanz zu erstellen, welche in Tabelle 27 angeführt ist.

Tabelle 27: Mo-Bilanz der Betriebsversuche

		Menge [kg]	Mo [%]	Mo [kg]
	Mo-Oxid 1	1600,0	59,3	949,1
	Mo-Oxid 2	602,0	63,7	383,4
	Mo-Oxid 3	902,0	62,9	567,2
	Summe Input			1899,7
Charge 1097 (ungemischt u. ausgekühlt)	FeMo	2890,0	65,3	1886,9
	Schlacke	3160,0	0,4	13,6
	Summe Output			1900,5
	Mo-Ausbeute [%]			99,3
Charge 1098 (ungemischt u. abgegossen)	FeMo	2960,0	71,2	2107,5
	Schlacke	3090,0	0,3	10,5
	Summe Output			2118,0
	Mo-Ausbeute [%]			110,9
Charge 1106 (gemischt u. ausgekühlt)	FeMo	2770,0	66,7	1847,6
	Schlacke	3280,0	0,4	13,4
	Summe Output			1861,0
	Mo-Ausbeute [%]			97,3
Charge 1107 (gemischt und abgegossen)	FeMo	2770,0	66,9	1853,1
	Schlacke	3280,0	0,7	21,6
	Summe Output			1874,8
	Mo-Ausbeute [%]			97,6

Entgegen den Erwartungen ergaben die Versuche kein eindeutiges Ergebnis. Aus Tabelle 27 ist zu entnehmen, dass die ungemischte Charge 1098 eine ungewöhnlich und unrealistisch hohe Molybdänausbeute von 110,9 % aufweist. Die Ausbeute der gemischten Chargen lag allerdings nur bei 97,3 % und 97,6 %. Dieser große Unterschied kam zustande weil das Gewicht des FeMo-Blockes der ungemischten Chargen um bis zu 200 kg größer war als bei den intensiv vermengten und präzise gewogenen Chargen. Betrachtet man Charge 1098, so ergab auch eine Analyse des Molybdängehaltes des Blockes einen deutlich höheren Anteil, was Auswirkungen auf die Ausbeute hat. Als Grund hierfür ist hauptsächlich die ungenaue Einwaage der Möllermischanlage zu nennen. Ein Indiz hierfür ist die Tatsache, dass die Chargen, die mit Hand verwogen und gemischt wurden, ein sehr ähnliches Ergebnis aufweisen. So ist zu erkennen, dass der Ferromolybdänblock sowohl bei den Chargen 1106 und 1107 dasselbe Gewicht aufweist. Dies deutet auf einen gleichen Verlauf der Versuche hin, da Input und Output jeweils gleich waren. Bei den ungemischten Chargen 1097 und 1098 sind große Unterschiede hinsichtlich der Ausgabemengen zu erkennen. So variiert das Gewicht des Blockes und der Schlacke um 70 kg. Auch der Molybdängehalt weist große Unterschiede bei den ungemischten Chargen auf. Das Metall der Charge 1097 beinhaltet 65,3 % Molybdän, wobei die Charge 1098 einen Gehalt von 71,2 % Mo aufwies. Ein weiterer Hinweis auf die Ungenauigkeit der Bandwaagen ist, dass diese temperaturabhängig sind und



so die Ergebnisse von Witterung beeinflusst werden. Ein Grund für die ungenauen Resultate mag auch in den Probenahmen liegen, da die Proben nicht immer eindeutig zuzuordnen waren und so Fehler passiert sein könnten. Auch Inhomogenität des Blockes könnte zu Ungenauigkeiten in der Analyse geführt haben. Aus den oben genannten Gründen ist es nicht sinnvoll die Bilanz der ungemischten Chargen mit der der genau abgewogenen Chargen zu vergleichen.

Aufgrund der ungenauen Einwaagen der ungemischten Versuche ist ein Vergleich dieser zwischen den abgegossenen und ausgekühlten Schlacken nicht sinnvoll. Aus diesem Grund ist es zweckmäßig, sich auf die Interpretation der Ergebnisse der Chargen 1106 und 1107 zu konzentrieren. Betrachtet man die Molybdänanalysen, so ist mit 0,4 % in der ausgekühlten Schlacke deutlich weniger Metall zu finden als in der abgegossenen Schlacke, in der 0,7 % gefunden wurde. Dies ist ein Hinweis, dass sich das in der flüssigen Schlacke eingeschlossene Molybdän bei der längeren Absetzzeit besser in das Metall absetzen konnte.

### 3.8 Berechnung der Basisdaten für das Möllerberechnungsmodell

Ein weiteres Ziel dieser Diplomarbeit ist es Vorarbeit und Vorversuche zu leisten, um ein Möllerberechnungsmodell zu erstellen. Ein solches Modell setzt die Eingabe von hunderten Basisdaten voraus. Die Schritte zur Berechnung dieser Daten werden in diesem Kapitel beschrieben.

Bisher wird die Möllerberechnung mit einem einfachen Modell durchgeführt, in dem die Mengen der Rohstoffe Walzenzunder, Kalk, Eisenschrott und Alugrieß immer konstant gehalten werden. Lediglich die Mengen der Molybdänkonzentrate und des Ferrosiliziums werden in Abhängigkeit der chemischen Analyse des Rohstoffes variiert. Dass diese Art der Möllerberechnung stark vereinfacht und ungenau ist, zeigen zahlreiche Ofendurchbrüche und Ungleichmäßigkeiten in der Produktion. Aus diesem Grund soll nun eine erweiterte Möllerberechnung entwickelt werden, in der alle Rohstoffe in Abhängigkeit von der Zusammensetzung variiert werden. Außerdem sollen noch weitere Parameter wie Viskosität, Schmelzpunkt, Zusammensetzung der Schlacke und frei werdende Wärme des Prozesses in das Modell miteinbezogen werden.

Der erste Schritt besteht darin, die genaue Zusammensetzung der Mo-Konzentrate zu bestimmen. Bei einer optimalen Röstung des Konzentrates bei 650 °C würde dieses zu 100 % aus  $\text{MoO}_3$  bestehen. Da der Röstvorgang selten unter völlig perfekten Bedingungen durchgeführt werden kann, beinhaltet das Konzentrat allerdings auch Oxide wie  $\text{MoO}_2$ ,  $\text{MoO}_{2,889}$ ,  $\text{MoO}_{2,75}$  und  $\text{MoO}_{2,875}$ . Diese genaue Zusammensetzung bestimmt das Programm HSC Chemistry 5.11. Die Berechnung der thermodynamischen Gleichgewichtszusammensetzung erfolgt bei 650 °C. Abbildung 67 zeigt die Zusammensetzung eines Mo-Konzentrates mit 56 % Molybdän wobei die Sauerstoffmenge auf der Abszisse aufgetragen ist.

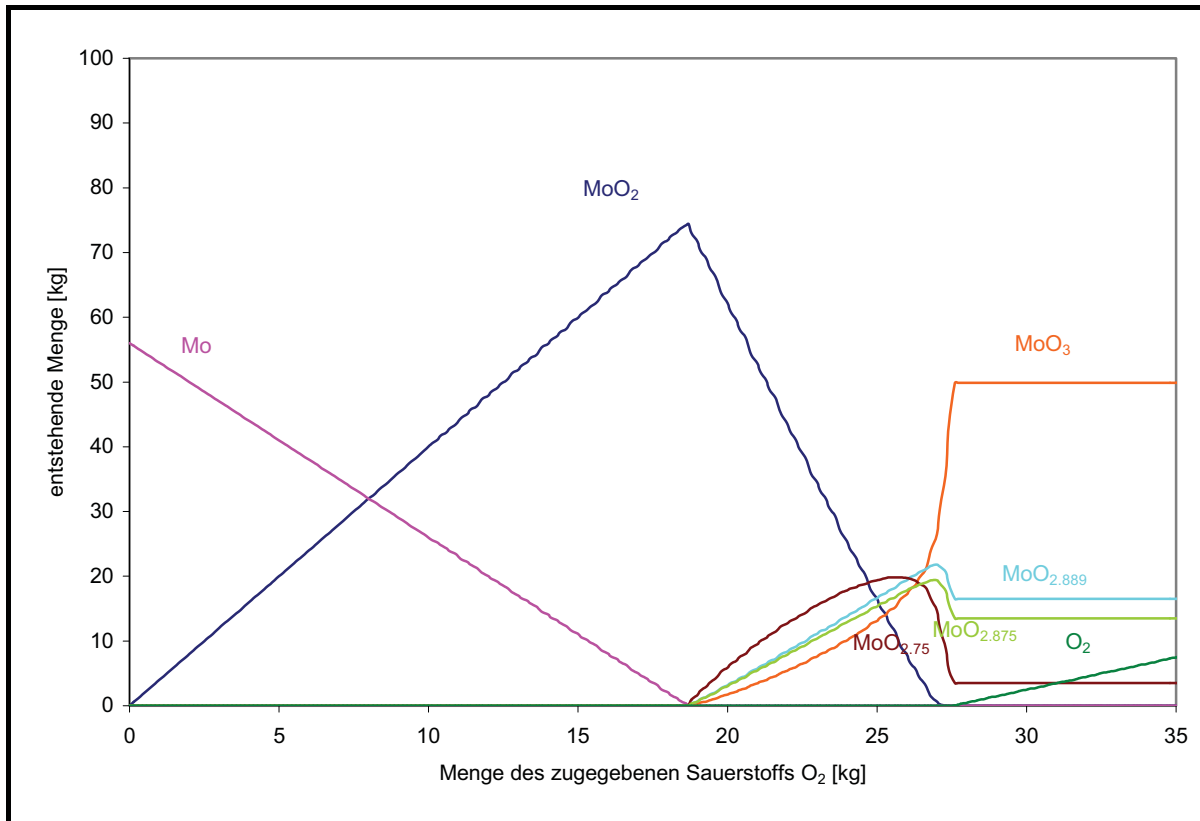


Abbildung 67: Verlauf der Reaktionsprodukte eines Mo-Konzentrates mit 56 % Mo bei einer kontinuierlichen Zugabe von Sauerstoff bei 650 °C

Anhand dieser Darstellung kann die maximale Sauerstoffmenge im Konzentrat bestimmt werden. Im obigen Beispiel liegt diese Menge bei 27,4 %. Diese Zahl markiert den Punkt, ab dem der Sauerstoff im Überschuss vorhanden ist, was anhand der waagrechten Linien von  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{MoO}_{2,889}$ ,  $\text{MoO}_{2,87}$  und  $\text{MoO}_{2,75}$  ersichtlich ist. Das bedeutet, dass ein Konzentrat mit 56 % Mo maximal 27,4 %  $\text{O}_2$  enthalten kann. Anhand dieser Vorgehensweise werden die genauen Zusammensetzungen aller möglichen Varianten an Molybdänkonzentraten berechnet und sind in Tabelle 28 angeführt.

Tabelle 28: Thermodynamisch berechnete Zusammensetzungen der Mo-Konzentrate von 56 % Mo bis 66 % Mo

Mo	O <sub>2</sub>	MoO <sub>2</sub>	Mo	MoO <sub>3</sub>	MoO <sub>2,889</sub>	MoO <sub>2,75</sub>	MoO <sub>2,875</sub>
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
56,00	27,40	0,00	0,00	43,30	18,80	5,61	15,70
57,00	28,00	0,00	0,00	48,60	17,60	4,20	14,50
58,00	28,00	0,54	0,00	28,30	22,50	14,60	20,00
58,00	28,40	0,00	0,00	46,00	19,10	5,41	15,90
59,00	28,00	3,50	0,00	22,00	22,10	19,40	20,00
59,00	29,00	0,00	0,00	51,30	17,90	4,05	14,70
60,00	28,00	7,29	0,00	19,10	21,20	21,00	19,40
60,00	29,00	0,43	0,00	30,10	23,30	14,50	20,60
60,00	29,40	0,00	0,00	48,60	19,40	5,22	16,10
61,00	28,00	11,30	0,00	17,20	20,20	21,60	18,60
61,00	29,00	3,24	0,00	23,20	23,00	19,80	20,80
61,00	30,00	0,00	0,00	54,10	18,10	3,91	14,90
62,00	28,00	15,50	0,00	15,70	19,30	21,80	17,80
62,00	29,00	6,99	0,00	20,10	22,10	21,60	20,20
62,00	30,00	0,34	0,00	32,10	24,00	14,40	21,20
62,00	30,40	0,00	0,00	51,30	19,70	5,05	16,30
63,00	28,00	19,70	0,00	14,40	18,30	21,70	17,00
63,00	29,00	11,00	0,00	18,10	21,10	22,30	19,40
63,00	30,00	3,00	0,00	24,40	23,90	20,10	21,60
63,00	30,80	0,00	0,00	48,70	21,10	6,31	17,70
64,00	28,00	23,90	0,00	13,20	17,40	21,40	16,10
64,00	29,00	15,10	0,00	16,50	20,20	22,60	18,60
64,00	30,00	6,69	0,00	21,20	23,00	22,10	21,00
64,00	31,00	0,27	0,00	34,10	24,70	14,20	21,70
64,00	31,40	0,00	0,00	54,00	20,00	4,89	16,50
65,00	28,00	28,20	0,00	12,10	16,40	20,90	15,30
65,00	29,00	19,30	0,00	15,20	19,20	22,50	17,80
65,00	30,00	10,70	0,00	19,10	22,00	23,00	20,20
65,00	31,00	2,76	0,00	25,70	24,70	20,50	22,30
65,00	31,80	0,00	0,00	51,40	21,40	6,11	17,90
66,00	28,00	32,50	0,00	11,20	15,50	20,40	14,40
66,00	29,00	23,60	0,00	14,00	18,30	22,20	16,90
66,00	30,00	14,80	0,00	17,40	21,10	23,30	19,40
66,00	31,00	6,40	0,00	22,20	23,90	22,70	21,80
66,00	32,40	0,00	0,00	56,70	20,20	4,73	16,70

Wird die Summe der enthaltenen Mengen von MoO<sub>2</sub>, Mo, MoO<sub>3</sub>, MoO<sub>2,889</sub>, MoO<sub>2,75</sub> und MoO<sub>2,875</sub> gebildet, erhält man nicht 100%, was die Anwesenheit einer Gangart annehmen lässt. Im nächsten Schritt werden die Berechnungen der Zusammensetzung der Konzentrate um die der Gangart erweitert. Dabei liegen je nach Mo-Gehalt der SiO<sub>2</sub>-Gehalt zwischen 0 % und 10 %, der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt zwischen 0 % und 2 % und der FeO-Gehalt zwischen 0 % und 3,5 %. Diese Zusammensetzungen dienen als Grundlage für das Berechnungsmodell.

Mit der Vorgabe, dass jeder produzierte Ferromolybdänblock 1900 kg Molybdän enthalten muss, wird die erforderliche Gesamtmenge an Konzentrat im Møller berechnet. Danach erfolgt eine Berechnung auf die einzelnen Bestandteile.

Tabelle 29 zeigt eine Übersicht der gewählten Variablen als auch der fixen Parameter der Möllierzusammensetzung, die für das Berechnungsmodell relevant sind.

Tabelle 29: Vorgaben und Variationen zum Berechnungsmodell

Variationen	Min	Max	
Menge des Sauerstoffs aus dem Mo-Oxid, die mit Si (aus FeSi) reduziert werden soll	85	95	%
Die restliche Menge auf 100 % bzw. 110 % Sauerstoff soll mit Al reduziert werden	100	110	%
Kalk	300	400	kg
Walzenzunder	900	950	kg
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> im Mo-Konzentrat	0	2	%
SiO <sub>2</sub> im Mo-Konzentrat	0	10	%
FeO im Mo-Konzentrat	0	3,5	%
Möllergesamtmenge	5700	6300	kg
Fixe Vorgaben			
Eisenschrott	320		kg
Mo im Metallblock	1900		kg
Fe im Metallblock	840		kg

Für die Reduktion des Sauerstoffes im Molybdänkonzentrat stehen Silizium und Aluminium zur Verfügung. Es wird angenommen, dass 85 % beziehungsweise 95 % des Sauerstoffs mit Si reduziert wird. Die Differenz zu 100 % bzw. 110 % wird mit Aluminium reduziert. Die Zugabe von Kalk beträgt mindestens 300 kg und maximal 400 kg und die Menge an Walzenzunder variiert zwischen 900 kg und 950 kg. Die Gesamtmenge des Möllers liegt zwischen 5700 kg und 6300 kg. Die Menge Eisenschrott bleibt konstant mit 320 kg, die theoretische Zusammensetzung des FeMo-Blockes soll bei 69,3 % Mo und 30,7 % Fe liegen, das entspricht einer Mo-Menge von 1900 kg und einer Fe-Menge von 840 kg im Block. Aus den festgelegten Variationen entstehen nun 64 Berechnungsvarianten für jedes der 35 verschiedenen Molybdänkonzentrate (2240 Möglichkeiten). Auf den folgenden Seiten wird der gesamte Berechnungsvorgang für ein Molybdänkonzentrat beispielhaft erläutert.

Die Berechnungen der thermodynamischen Gleichgewichte, der umgesetzten Energie, der Viskosität und der Schlackenschmelzpunkte für die 2240 Möllierzusammensetzungen lassen sich in drei Schritte einteilen, die Vorgehensweise wird in den folgenden Kapiteln kurz erklärt.

1. Berechnung des thermodynamischen Gleichgewichtes und der umgesetzten Energie anhand von HSC 5.11
2. Viskositätsberechnungen nach Urbain
3. Schlackenschmelzpunktberechnungen mit dem Softwarepaket FactSage 5.5

### **3.8.1 Berechnung des thermodynamischen Gleichgewichtes und der umgesetzten Energie anhand von HSC 5.11**

Der erste Schritt besteht darin, alle Mengen der Möllerkomponenten stöchiometrisch zu berechnen.

Anhand des Gleichgewichtsmoduls des Thermodynamikprogramms HSC 5.11 lässt sich ein Programm erstellen, das die zu erwartenden Verbindungen und Mengen bei einer Temperatur von 1800 °C berechnen kann.

Die berechneten Inputwerte für HSC sind für ein Molybdänkonzentrat (58 % und 28,4 % O) beispielhaft in Tabelle 30 zusammengefasst.

---



Der weitere Rechengang wird mithilfe der grau markierten Komponenten in Tabelle 30 mit der Identifikationsnummer 150 erläutert. Alle Komponenten der markierten Zeile aus Tabelle 30 werden als Inputstoffe eingegeben, und das Programm errechnet die daraus resultierenden Mengen der Outputkomponenten (Schlacke und Metall), die bei dieser Temperatur im Gleichgewicht stehen. In Tabelle 31 ist Input und Output eines Rechenganges angeführt.



Tabelle 31: Thermodynamisches Gleichgewicht des Möllers (Mo-Konzentrat mit 58 % Mo und 28,4 % O) bei einer Temperatur von 1800 °C

INPUT (bei 25 °C)			OUTPUT (bei 1.800 °C)		
MoO <sub>2</sub>	0,08	kg	12CaO·7Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	kg
Mo	0,00	kg	2CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	kg
MoO <sub>3</sub>	1506,90	kg	2CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>	28,50	kg
MoO <sub>2,889</sub>	625,69	kg	2CaO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	kg
MoO <sub>2,75</sub>	177,22	kg	2CaO·SiO <sub>2</sub>	7,01	kg
MoO <sub>2,875</sub>	520,86	kg	2FeO·SiO <sub>2</sub>	225,00	kg
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	161,86	kg	3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	15,50	kg
SiO <sub>2</sub>	0,00	kg	3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	kg
FeO	283,25	kg	3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3SiO <sub>2</sub>	0,01	kg
Si	693,68	kg	3CaO·SiO <sub>2</sub>	0,00	kg
Alu	385,43	kg	Al	0,00	kg
CaO	300,00	kg	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	248,00	kg
Fe	551,23	kg	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	0,10	kg
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	950,00	kg	Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	0,00	kg
			CaAl <sub>2</sub> SiO <sub>6</sub>	53,70	kg
			CaFe(SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	12,80	kg
			CaMoO <sub>3</sub>	0,10	kg
			CaO	0,81	kg
			CaO·2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,47	kg
			CaO·6Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	kg
			CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,62	kg
			CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	1180,00	kg
			CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·SiO <sub>2</sub>	101,00	kg
			CaO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	kg
			Fe	1030,00	kg
			Fe <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>	0,00	kg
			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	kg
			Fe <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	0,05	kg
			Fe <sub>3</sub> Mo <sub>2</sub>	0,00	kg
			Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,05	kg
			Fe <sub>5</sub> Si <sub>3</sub>	0,00	kg
			FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	187,00	kg
			FeMoO <sub>4</sub>	0,00	kg
			FeO	215,00	kg
			FeSi	0,00	kg
			FeSiO <sub>3</sub>	169,00	kg
			Mo	1900,00	kg
			MoO <sub>2</sub>	5,97	kg
			MoO <sub>2,75</sub>	0,01	kg
			MoO <sub>2,875</sub>	0,00	kg
			MoO <sub>2,889</sub>	0,00	kg
			MoO <sub>3</sub>	0,02	kg
			Si	0,00	kg
			SiO <sub>2</sub>	770,00	kg

Die thermodynamisch ermittelte Zusammensetzung des FeMo-Blockes liegt bei 64,85 % Mo. Eine vollständige Aufstellung der Outputströme aller Variationen aus Tabelle 30 befindet sich im Anhang (Tabelle 64). In den folgenden Darstellungen (Abbildung 68 und Abbildung 69) ist

der Verlauf der erzeugten Produktmengen grafisch dargestellt, wobei sich aus Übersichtsgründen in Abbildung 68 alle Verbindungen mit Mengen über 500 kg befinden und in Abbildung 69 diejenigen mit geringeren Mengen. Auf Verbindungen mit sehr kleinen Maximalwerten (unter 10 kg) wurde in der Darstellung verzichtet. Auf der horizontalen Achse ist die Temperatur aufgetragen, auf der vertikalen Achse befinden sich die Mengen der jeweiligen Verbindung.

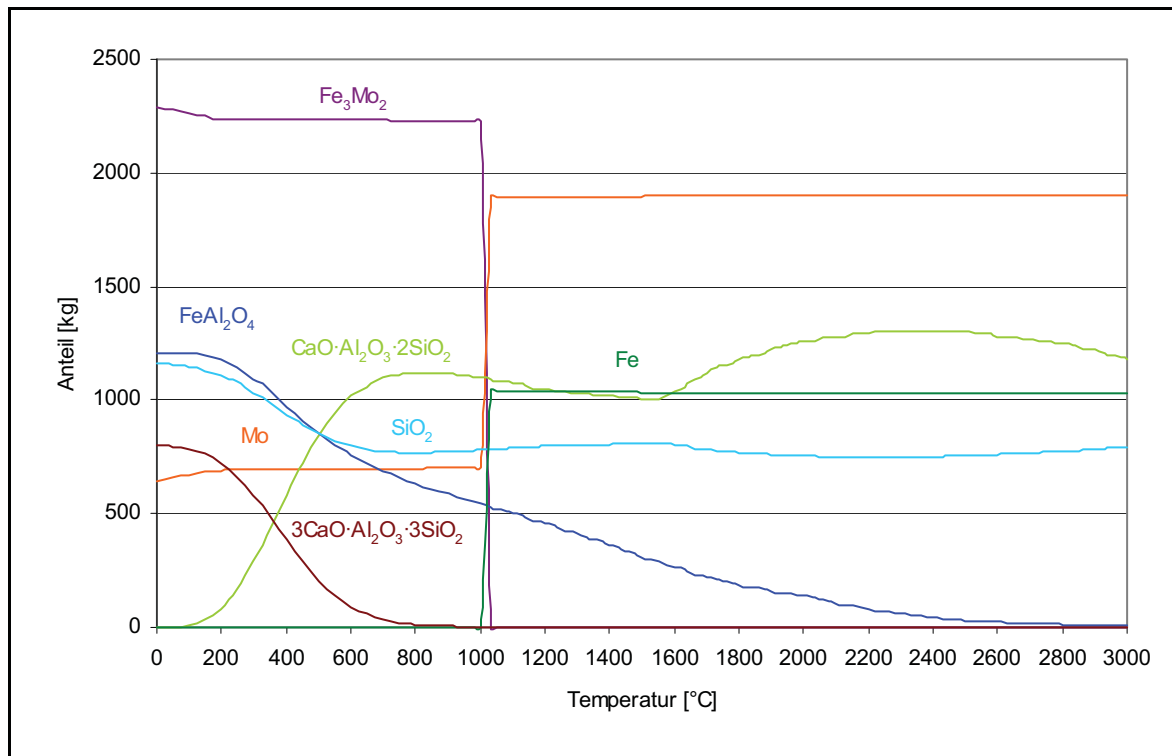


Abbildung 68: Grafische Darstellung der Outputmengen (Mengen über 500 kg)

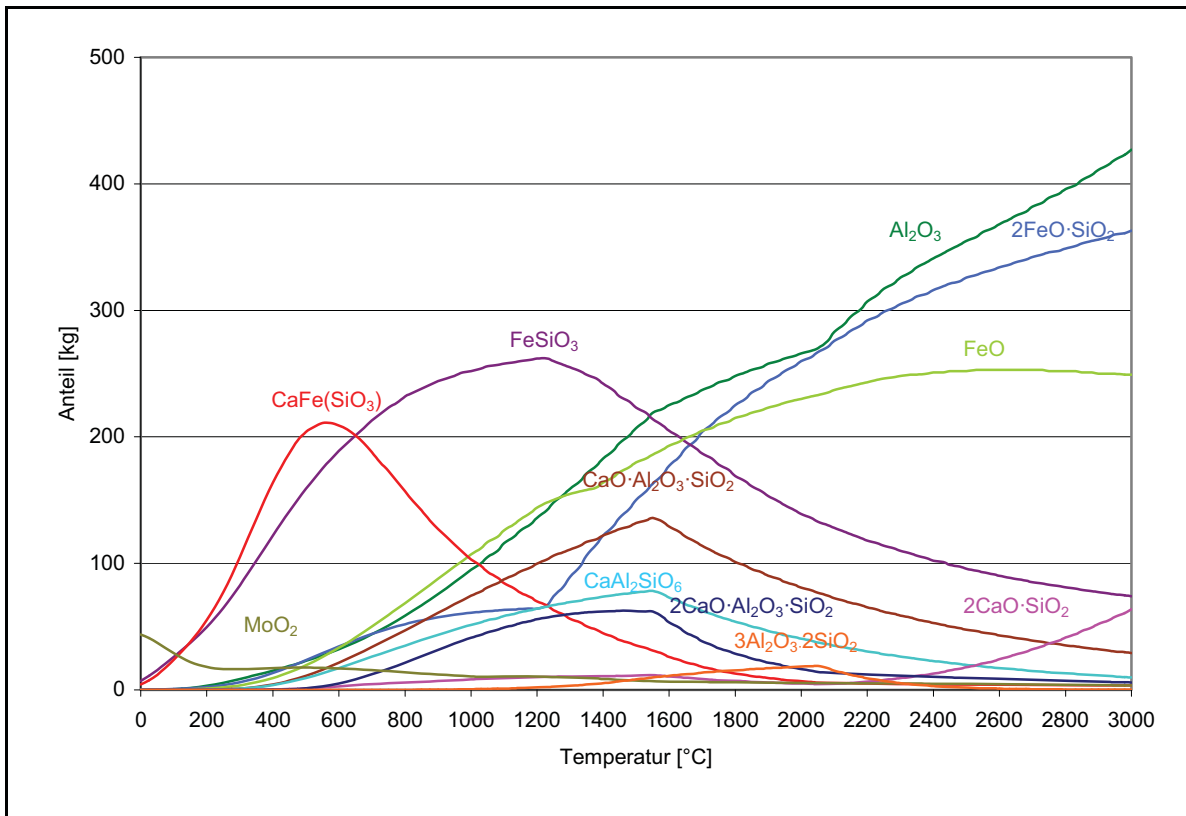


Abbildung 69: Grafische Darstellung der Outputmengen (Mengen unter 500 kg)

Eine weitere wichtige Funktion des Softwarepaketes HSC 5.11 ist die Möglichkeit, die umgesetzte Energie im System zu berechnen. In Abbildung 70 ist die Enthalpie für das oben angeführte System in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt.

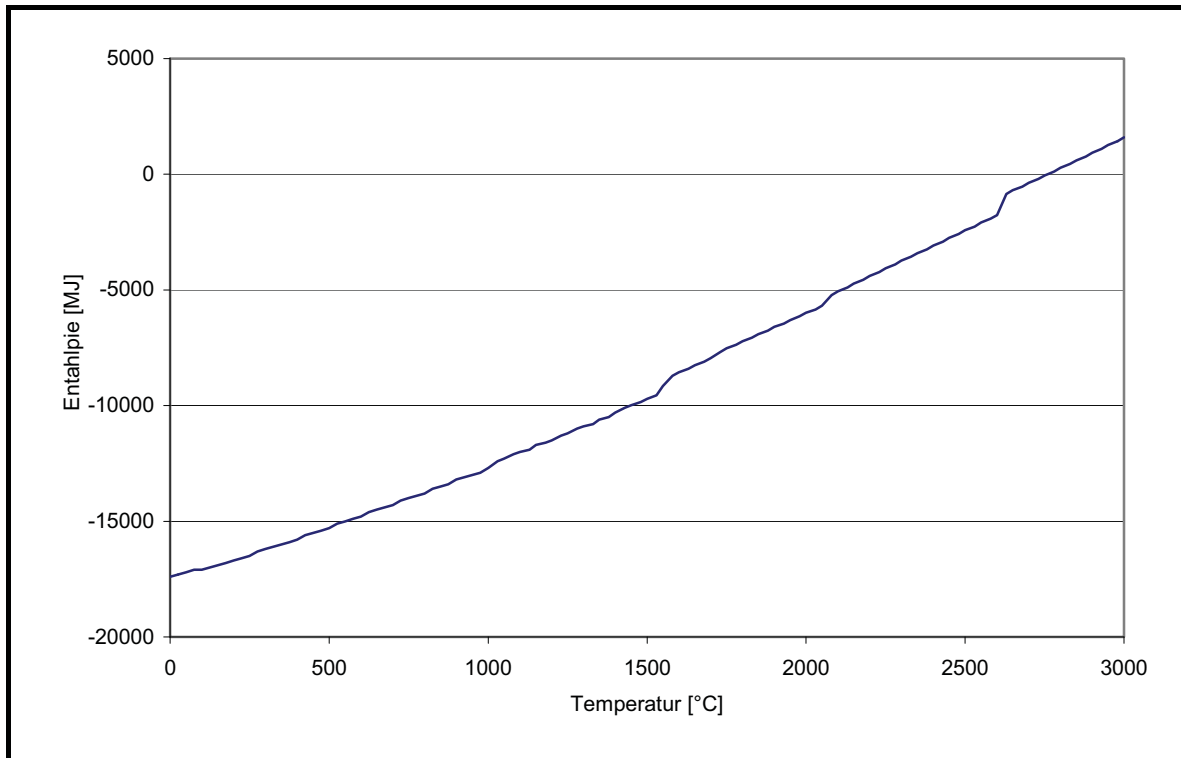


Abbildung 70: Reaktionsenthalpie des Prozesses

Wie aus Abbildung 70 ersichtlich ist, steigt die Enthalpie mit steigender Temperatur kontinuierlich an. Ab einer gewissen Temperatur (ca. 2700 °C) wird die Energie positiv und es muss Wärme zugeführt werden. Das bedeutet, dass dies die maximal erreichbare Temperatur ist und die gesamte Energie in latenter Wärme gespeichert ist. Bei einer Abkühlung auf 25 °C wird die Energie wieder frei und ist im Diagramm abzulesen. Diese Betrachtung gilt bei adiabatischen Zuständen.

### 3.8.2 Viskositätsberechnungen nach Urbain

Ein wichtiger Teil der Berechnung der Basisdaten für das Möllerberechnungsmodell sind die Viskositätsberechnungen nach Urbain. Die Hintergründe dieses Verfahrens sind in Kapitel 2.4.3 beschrieben. Hierzu müssen die Verbindungen des Outputstromes auf die vier Hauptoxide  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  und  $\text{CaO}$  umgerechnet werden, dies geschieht anhand der Molmassenverhältnisse. Die Schlackenzusammensetzung sieht für das Beispiel aus Tabelle 30 mit der Identifikationsnummer 150 nach der Umrechnung folgendermaßen aus.

Tabelle 32: Berechnete Schlackenzusammensetzung (in %)

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO
46,07	9,33	27,65	16,96

Anhand dieser Zusammensetzung und der Berechnungsmethode nach Urbain kann man nun den Schmelzpunkt der Schlacke und die Viskosität bei einer bestimmten Temperatur berechnen. Die Viskosität der Schlacke mit der Zusammensetzung aus Tabelle 32 beträgt bei 1800 °C 0,609 Pa·s.

### 3.8.3 Schlackenschmelzpunktberechnungen mit dem Softwarepaket FactSage 5.5<sup>®</sup>

Das Thermodynamikprogramm FactSage 5.5<sup>®</sup> ermöglicht das Berechnen des Schmelzpunktes der Schlacke. Dieses Programm erlaubt den Zugriff auf eine umfassende thermodynamische Datenbank und liefert zuverlässig den Schmelzpunkt einer Schlacke mit einer gewünschten Zusammensetzung. Die Temperatur, bei der die Zusammensetzung aus Tabelle 32 flüssig wird, beträgt laut dem Thermodynamikprogramm FactSage<sup>®</sup> 1136,97 °C.

Um das Möllerberechnungsmodell erstellen zu können, muss die in Kapitel 3.8.1, 3.8.2 und 3.8.3 erläuterte Rechenmethode für alle möglichen Variationen des Möllers durchgeführt werden. An dieser Stelle sind nur die grundlegenden Rechenschritte beschrieben, um die Basisdaten für das Modell zu erhalten. Anhand dieser Daten wird es möglich sein, mithilfe des Softwarepaketes NN-Tool (Neuronale Netzsoftware) ein Modell zu erstellen, welches in der Lage ist, die ideale Möllerzusammensetzung in Abhängigkeit vom Einsatzmaterial genau vorherzusagen. Weiters werden im Zuge der Berechnungen und Modellierung verifizierende Versuche durchgeführt, um etwaige Fehler zu verhindern.

## **4 Verwertungsmöglichkeiten von Schlacken aus der Ferromolybdänproduktion**

Im Zuge dieses Projektes soll neben der Vorarbeit für die Erstellung des Möllerberechnungsmodells, auch die Verwertungsmöglichkeiten von Schlacken aus der Ferromolybdänproduktion untersucht werden. Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Straßenbau. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte einer umfassenden Literaturrecherche beschrieben, wobei im Speziellen auf die Umweltverträglichkeit von Schlacken eingegangen wird.

Die Wiederverwendung von Hochofen- und Stahlwerksschlacken im Straßenbau wird seit vielen Jahren erfolgreich praktiziert. Um ein stoffliches Recycling von Schlacken zu gewährleisten, müssen zunächst eine Reihe von Prüfungen und Tests durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass diese Stoffe die bautechnischen Anforderungen erfüllen, sowie für die Umwelt unbedenklich sind.

### **4.1 Zusammenfassung der wichtigsten Normen**

Die ÖNORM EN 13242 (Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau) legt die Eigenschaften von Gesteinskörnungen fest, die durch Aufbereitung natürlicher, industriell hergestellter oder rezyklierter Materialien für hydraulisch gebundene und ungebundene Gemische für den Ingenieur- und Straßenbau gewonnen werden. Welche der erwähnten Eigenschaften im Einzelnen zu prüfen und anzugeben sind, ist abhängig von der Herkunft der Gesteinskörnung und dem jeweiligen Verwendungszweck. Neben geometrischen Anforderungen wie Korngrößenverteilung und Kornform sind auch physikalische und chemische Anforderungen (Widerstand gegen Zertrümmerung, Rohdichte, Wasseraufnahme, säurelösliches Sulfat, Gesamtschwefelgehalt) angeführt. Außerdem werden auch bestimmte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit, wie zum Beispiel Frost-Tau-Wechselbeständigkeit, erwähnt [26].

Die ÖNORM B 3132 (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13242) bezieht sich auf die oben genannte EN Norm und legt Regeln zu deren Umsetzung fest. Weiters enthält sie eine Tabelle mit anzuführenden gefährlichen Substanzen für Recyclingbaustoffe (siehe Tabelle 33) [27].

Tabelle 33: Anzuführende gefährliche Substanzen für Recyclingbaustoffe [27]

Parameter	Einheit	Anforderung	Gemäß
Eluat			ÖNORM S 2115
pH-Wert	-	ist anzugeben	ÖNORM EN 12176
elektrische Leitfähigkeit	mS/m	ist anzugeben	ÖNORM EN 27888
Chrom gesamt	mg/kg TS	ist anzugeben	ÖNORM EN ISO 11885
Kupfer	mg/kg TS	ist anzugeben	ÖNORM EN ISO 11885
Ammonium-N	mg/kg TS	ist anzugeben	ÖNORM ISO 7150-1
Nitrit-N	mg/kg TS	ist anzugeben	ÖNORM EN 26777
Sulfat-SO <sub>4</sub>	mg/kg TS	ist anzugeben	ÖNORM EN ISO 10304-1
KW-Index	mg/kg TS	ist anzugeben	ÖNORM EN ISO 9377-2
Gesamtgehalt			
∑ 16 PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe)	mg/kg TS	ist anzugeben	ÖNORM L 1200 Nach Trocknung der Probe bei 30 °C

TS...Trockensubstanz

Die DIN 4301 (Eisenhüttenschlacken und Metallhüttenschlacken im Bauwesen) beschreibt Eisenhüttenschlacken (Hochofenschlacke und Stahlwerksschlacke) und Metallhüttenschlacken (Schlacken, die beim Schmelzen von Kupfer, Zink, Blei oder Chrom entstehen) als Baustoff. Als allgemeine Anforderungen sind Raumbeständigkeit, Reinheit, Korngruppen/Körnungen zu untersuchen. Außerdem ist eine Tabelle mit besonderen Kennwerten wie Wasseraufnahme, Schüttdichte, Rohdichte, Widerstandsfähigkeit gegen Schlag und Druckfestigkeit enthalten [28].

Die Diplomarbeit „Untersuchung zur Verwertung von Eisenhüttenschlacken“ [29] beschäftigt sich unter anderem mit der Verwertung von Eisenhüttenschlacken im Straßen- und Wegebau. Bezüglich der Umweltverträglichkeit erfolgte die Herstellung von Eluate gemäß DIN 38 414. Da es in Österreich keine allgemein gültigen Grenzwerte für den Einbau von Schlacken in Straßen gibt, wurden die Ergebnisse mit den Grenzwerten aus der Trinkwasserverordnung (TVO) verglichen. Alle im Eluat ermittelten Werte lagen unter den Grenzwerten der TVO, weshalb eine Beeinträchtigung der Umwelt ausgeschlossen wurde.

Gemische aus Hochofenstückschlacken, Hüttensand, LD-Schlacken und Recyclingbaustoffen wurden auf das Erhärtungsverhalten überprüft. Es konnte bei allen Gemischen die Selbsterhärtung nachgewiesen werden. Es folgte der Einbau der Mineralstoffgemische in Erprobungsstrecken. Diese wiesen alle eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit auf. Eine bewusste Unterdimensionierung beim Bau der Erprobungsstrecken

wurde durch die Selbsterhärtung der Gemische aufgefangen. Es sind auch keine Risse an den Fahrbahnoberflächen aufgetreten [29].

Im Rahmen eines Arbeitsprogrammes führte das Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten eine Überprüfung der Bewährung österreichischer LD-Schlacke im bituminösen Straßenbau durch. Dabei erfolgten Untersuchungen des rezyklierten Materials auf Eigenschaften wie Korngrößenverteilung, Dichte, Porosität, Schlagzertrümmerung, Frostbeständigkeit, Abriebfestigkeit, Schlagabriebbeanspruchung und Polierbarkeit. Darauf folgte der Einbau in Erprobungsstrecken. Zur Feststellung der Bewährung der Versuchsmischgüter unter Verkehr wurden bestimmte Beobachtungen und Feldmessungen durchgeführt (Dicke und Dichte am Bohrkern, Deflektion, Dicke und Dichte zerstörungsfrei, Ebenheit längs und quer, Griffigkeit, Rauhtiefe, Risse und Textur). Die Ergebnisse zeigten, dass die Anwendung von LD-Schlackensplitt und LD-Schlackensand unter Beachtung bestimmter Eigenschaften bei der Herstellung von Asphaltdeckschichten grundsätzlich möglich ist. Die Qualität der LD-Schlacke ist mit jener von besten natürlichen Straßenbaugesteinen vergleichbar [30].

Die „Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau“ enthalten Anforderungen an Mineralstoffe natürlicher (Felsgestein, Kies, Sand) und künstlicher (Hochofenschlacke, Metallhüttenschlacke, sowie andere durch Schmelzen, Brennen oder Sintern hergestellte Mineralstoffe) Herkunft, die im Straßenbau eingesetzt werden. Dieses Regelwerk gilt für die Lieferung von Mineralstoffen für die Herstellung von Fahrbahndecken nach den ZTV Asphalt-StB (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt) sowie von Tragschichten nach den ZTVT-StB (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau). Im Folgenden werden die Anforderungen der technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau beschrieben.

Die Mineralstoffe sind so zu gewinnen und aufzubereiten, dass sie gleichbleibende Eigenschaften erhalten. Die Rohdichte ist nach DIN 52 102 zu bestimmen und die jeweilige Prüfkörnung ist anzugeben. Maßstab für die Porigkeit des zu untersuchenden Mineralstoffes ist die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und die Schüttdichte, welche bestimmte Grenzwerte erfüllen müssen. Weiters müssen Mineralstoffe raumbeständig und widerstandsfähig gegen Frosteinwirkung und Schlag sein. Die Druckfestigkeit muss nach DIN 52105 geprüft werden und vorgegebene Grenzwerte einhalten. Das untersuchte Material muss eine bestimmte Polierresistenz und Hitzebeständigkeit aufweisen. Sind die Lieferkörnungen größer als 2 mm und sollen diese in Verbindung mit Bitumen verarbeitet werden, ist die Haftung zwischen Mineralstoff und Bitumen anzugeben. Die Korngrößenverteilung und die Kornform müssen bestimmt werden. Der Anteil der Körner, bei

---



denen das Verhältnis von Länge zu Dicke größer als 3:1 ist, darf nur einen bestimmten Anteil haben. In den Lieferkörnungen ist es nicht erlaubt, dass der Anteil der abschlämmbaren Bestandteile die vorgegebenen Werte überschreitet. Außerdem muss das Material frei von organischen Stoffen wie Holz oder Pflanzenreste und Fremdstoffe wie Keramik, Metall, Kunststoffe in schädlichen Mengen sein. Wird der Mineralstoff als Füller eingesetzt, müssen noch weitere Eigenschaften überprüft werden [32].

Das Umweltbundesamt hat umfangreiche Untersuchungen bezüglich des Schadstoffpotenzials an Recyclingbaustoffen in Österreich durchgeführt. Dabei werden Recyclingbaustoffe betrachtet, die in Österreich gütegeschützt hergestellt werden (rezykliertes gebrochenes Asphaltgranulat, Betongranulat, Asphalt/Beton Mischgranulat und Mischgranulat aus Beton und/oder Asphalt und natürlichem Gestein). Derzeit ist in Österreich die Umweltverträglichkeit grundsätzlich anhand von Eluatgrenzwerten geregelt. Dabei haben Recyclingbaustoffe die Grenzwerte der Eluatklasse Ib gemäß ÖNORM S 2072 einzuhalten, welche in Tabelle 34 dargestellt sind.

Tabelle 34: Grenzwerte für Recyclingbaustoffe gemäß Richtlinie für Recyclingbaustoffe in Österreich [33]

Parameter	Eluatklasse		
	Ib	IIa	IIIb
pH-Wert	5,5 – 11	5,5 – 12	5,5 – 13
elektrische Leitfähigkeit	150 mS/m	300 mS/m	-
$\sum$ KW	200 µg/l	1.000 µg/l	100.000 µg/l
PAK	2 µg/l	3 µg/l	5 µg/l
Chlorid	begrenzt durch die Leitfähigkeit		
Sulfat	begrenzt durch die Leitfähigkeit		
Pb	100 µg/l	500 µg/l	10.000 µg/l
Cr gesamt	100 µg/l	1.000 µg/l	10.000 µg/l
Cu	1.000 µg/l	1.000 µg/l	10.000 µg/l

Die betrachteten Recyclingbaustoffe werden umfangreichen Analysen unterzogen. Es erfolgt die Bestimmung der Gesamtgehalte für Metalle, PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe), PCB (polychlorierte Biphenyle), BTEX (Benzol, Toluol, Ethylenbenzol, Xylol) sowie TOC (gesamter organischer Kohlenstoff) und  $\sum$ Kohlenwasserstoffe, die Eluate werden auf Metalle, PAK, PCB und diverse anorganische Parameter sowie TOC,  $\sum$ Kohlenwasserstoffe uvm. analysiert.

Es folgt ein Vergleich der Ergebnisse dieser Analysen mit verschiedenen österreichischen Regelungen, wie zum Beispiel Deponieverordnung, diversen relevanten ÖNORMen, Verwertungsgrundsatz Boden, Bodenkennwerte aus Umweltkontrollbericht, Grundwasserschwellenwertverordnung und der Trinkwasserverordnung. In Tabelle 35 Tabelle 36 sind die Grenzwerte der verschiedenen Regelwerte gegenübergestellt.

Tabelle 35: Parametervergleich für die Schadstoffgehalte im Eluat bei verschiedenen österreichischen Regelwerken [33]

Parameter	Einheit	Deponieverordnung		Verwertungsgrundsatz Boden
		Bodenaushubdeponie	Baurestmassendeponie	Klasse A2-G
pH-Wert		6,5 – 11	6 – 13	6,5 – 9,5
elektr. Leitfähigkeit	mS/m	150	300	50
Cr	mg/kg TS	1	2	0.3
Cu	mg/kg TS	2	10	0.6
Ammonium-N	mg/kg TS	8	40	1
Nitrit-N	mg/kg TS	2	10	0,5
Sulfat	mg/kg TS	-	5.000	1.500
ΣKW	mg/kg TS	5	50	1

Die Grenzwerte der Grundwasserschwellenwertverordnung und der Trinkwasserverordnung aus Tabelle 36 beziehen sich direkt auf die Konzentrationen im Trinkwasser bzw. Grundwasser und können nicht mit den Eluatwerten der Tabelle 35 verglichen werden, stellen aber ein Maß für die Größenordnung dar.

Tabelle 36: Grenzwerte der Grundwasserschwellenwertverordnung und der Trinkwasserverordnung für die betrachteten Parameter [33]

Parameter	Einheit	Grundwasserschwellenwertverordnung	Trinkwasserverordnung
pH-Wert		-	6,5 – 9,5
elektr. Leitfähigkeit	mS/m	-	250
Cr	mg/kg TS	0,03	0,05
Cu	mg/kg TS	0,06	2
Ammonium-N	mg/kg TS	0,23	0,39
Nitrit-N	mg/kg TS	0,02	0,03
Sulfat	mg/kg TS	-	250
ΣKW	mg/kg TS	0,06	-

In weiterer Folge werden die Recyclingbaustoffe in Qualitätsklassen mit unterschiedlichen Einsatzgebieten unterteilt (siehe Tabelle 37).

Tabelle 37: Erforderliche Qualitätsklassen in Abhängigkeit vom Einsatzbereich [33]

	hydrogeologisch weniger sensibles Gebiet	hydrogeologisch sensibles Gebiet
Einsatz in gebundener Form	Qualitätsklasse B	Qualitätsklasse A
Einsatz ungebunden mit Deckschicht	Qualitätsklasse B	Qualitätsklasse A
Einsatz ungebunden ohne Deckschicht	Qualitätsklasse A	Qualitätsklasse A <sup>+</sup>

Aufgrund aller ermittelten Daten können nun Grenzwertvorschläge für die verschiedenen Qualitätsklassen ausgearbeitet werden, welche im Folgenden angeführt sind (Tabelle 38).

Tabelle 38: Klassifizierung der Recyclingbaustoffe nach Qualitätsklassen – Grenzwertvorschlag [33]

Parameter	Einheit	Qualitätsklasse A+	Qualitätsklasse A	Qualitätsklasse B
Eluat				
pH-Wert		7,5 – 12,5	7,5 – 12,5	7,5 – 12,5
elektr. Leitfähigkeit	mS/m	150	150	150
Cr	mg/kg TS	0,3	0,5	0,5
Cu	mg/kg TS	0,5	1	2
Ammonium-N	mg/kg TS	1	4	8
Nitrit-N	mg/kg TS	0,5	1	2
Sulfat	mg/kg TS	1.500	2.500	3.500
∑KW	mg/kg TS	1	3	5
Gesamtgehalt				
∑ 16 PAK	mg/kg TS	4	7	10

Um möglichst viele Parameter zu erfassen, werden noch zusätzliche Anforderungen für die Recyclingbaustoffe vorgeschlagen, in denen Eluatgrenzwerte für Metalle, Chlorid, Fluorid, Sulfat, etc. und Gesamtgehalte für ausgewählte Metalle wie Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Quecksilber, Nickel, Kupfer und Zink festgelegt sind. In diesen zusätzlichen Anforderungen ist auch ein Grenzwert für Molybdän im Eluat enthalten, der in diesem Vorschlag bei 0,5 mg/kg TS liegt.

## 4.2 Abschließende Betrachtungen

Wie man aus der Fülle der oben erwähnten Normen und Merkblätter schließen kann, ist der Einbau von Metallhüttenschlacken in Straßen in Österreich durch keine einheitliche Regelung geklärt. Es liegen einige Normen und Merkblätter vor, die die bautechnischen Anforderungen darlegen (ÖNORM EN 13242, ÖNORM B 3132, DIN 4301, Merkblatt über die Verwendung von Metallhüttenschlacken im Straßenbau, Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau). Schlacken aus der Blei-, Ferrochrom-, Kupfer- und Zinkerzeugung (DIN 4301) werden allgemein als Metallhüttenschlacken bezeichnet. Im Zuge der Literaturrecherche konnte allerdings trotz umfangreicher Einsichtnahme in diese Thematik keine spezielle Erwähnung von Schlacken aus der Ferromolybdänherstellung gefunden werden. Der Grund hierfür mag die geringe Anzahl an Versuchen sein, die bis heute durchgeführt worden sind. Daraus ergibt sich, dass keine Grenzwerte für Molybdän vorliegen. Für die Verwendung von Metallhüttenschlacken für den Straßenbau müssen Vorschriften erfüllt werden, die die Grenzwerte für den pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, Chrom-, Kupfer-, Blei- und Zinkgehalt regeln. Weiters findet Molybdän in der Trinkwasserverordnung und in der Grundwasserschwellenwertverordnung keine Erwähnung. Ausnahme bildet der Endbericht für das Umweltbundesamt „Recyclingbaustoffe - Regelung der Umweltverträglichkeit“ [33] worin ein Eluatgrenzwert für Molybdän in Recyclingbaustoffen erwähnt wird.

Um zu bewerten, ob die vorliegende Ferromolybdänschlacke für einen Einsatz im Straßenbau geeignet ist, muss zuerst die Umweltverträglichkeit umfangreich geprüft werden. Es müssen Feststoffkonzentrationen und die Konzentrationen im Eluat ermittelt werden. Nach Durchführung dieser Untersuchungen könnten diese Ergebnisse mit anderen Schlacken, die bereits erfolgreich im Straßenbau verwendet werden, verglichen und auf Ähnlichkeiten untersucht werden. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den angeführten Grenzwerten der Trinkwasserverordnung und der Grundwasserschwellenwertverordnung wäre ebenfalls ein wichtiger Bestandteil dieser Untersuchungen.

Die zu erfüllenden bautechnischen Anforderungen sind in der ÖNORM EN 13242 und in den Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau ausführlich beschrieben.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die primären Ziele dieses Projektes waren Voruntersuchungen durchzuführen, um eine Optimierung der Möllerberechnungsmethode zu ermöglichen. In weiterer Folge soll der FeMo-Abbrand kontrollierbarer und wirtschaftlicher gemacht werden. Es wurden eine Reihe von Experimente betreffend Homogenität des Möllers, Absetzverhalten von Molybdän in der Schlacke und Einfluss von intensiver Möllermischung und Abkühlung der Schlacke auf den Abbrand durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

Der erste Schritt bestand darin, alle eingesetzten Rohstoffe hinsichtlich Zusammensetzung und Korngrößen genau zu charakterisieren. Dazu erfolgten chemische Analysen und Korngrößenbestimmungen von Rohstoffen verschiedener Lieferanten über einen bestimmten Zeitraum.

Die Einwaage der Rohstoffe, wie Molybdänkonzentrat, Aluminium, Eisenschrott, Walzenzunder, Ferrosilizium, Kalk und Filterstaub erfolgt in einer Möllermischanlage. Da die Homogenität des gemischten Möllers für den problemlosen Ablauf des Thermitabbrandes ein wichtiger Parameter ist, sollte diese in Zuge der Diplomarbeit untersucht werden.

Daher erfolgte eine Probenahme direkt beim Chargieren des Möllers bei zwei Chargen (Charge 147 und Charge 155). Dazu wurde alle fünf Minuten während der Rohstoffchargierung eine Probe von wenigen Kilogramm genommen und man erhielt pro Charge fünf bis acht Möllerproben (abhängig von der Dauer des Chargiervorganges). Mit diesen Proben mussten Abbrandversuche im kleinen Maßstab durchgeführt werden, um die Inhalte anhand einer Massenbilanz zu errechnen. Diese Untersuchungen zeigten, dass es große Unterschiede bezüglich der Elemente in den Proben gab. So konnten bei Charge 147 Unterschiede von 125 % Aluminium, 40 % Eisen, 35 % Molybdän und 40 % Silizium festgestellt werden. Charge 155 lieferte Homogenitätsunterschied von 100 % Aluminium, 70 % Eisen, 20 % Molybdän und 60 % Silizium. Bei einem Vergleich der Ergebnisse über der Zeitachse sowie bezüglich der Laufzeiten der Möllermischanlage, können Zusammenhänge der Inhomogenität des Möllers mit den unterschiedlichen Laufzeiten der Waagen festgestellt werden.

Um die optimale Absetzzeit des Molybdäns in der Schlacke zu ermitteln, erfolgten Probenahmen mit einer für diese Versuche konstruierten Probenahmeverrichtung. Diese Vorrichtung ermöglicht die Entnahme von Schlackenproben an einer genau definierten Stelle oberhalb der Schlacke-Metall-Grenzschicht zu unterschiedlichen Zeiten nach Ende des Abbrandvorganges. Die Analysen dieser Schlackenproben sollen Aufschluss über das Absetzverhalten des Molybdäns in Abhängigkeit von der Zeit geben. Die Betrachtung der

Analysenresultate der vier Chargen lieferten allerdings keine einheitlichen Ergebnisse wie dies in Abbildung 48 ersichtlich ist. Die Ursache hierfür könnte in einer fehlerhaften bzw. ungleichmäßigen Probennahme liegen. Auch eine hohe Viskosität der Schlacke erschwert das Absetzen von Molybdän.

Um den Einfluss einer intensiven Mischung des Möllers auf den Abbrand zu untersuchen, wurden zwei Experimente im Maßstab 1:10 durchgeführt. Dabei erfolgte die genaue Wiegung und Mischung des Möllers in kleinen Portionen, der Abbrand fand streng nach der üblichen Prozedur im Betrieb statt. Die Schlacke konnte allerdings nicht im flüssigen Zustand abgegossen werden, so wie dies in der Regel der Fall ist, sondern kühlte langsam ab. Die Trennung vom Metall erfolgte erst im erstarrten Zustand. Die Ergebnisse dieser beiden Versuche waren erstaunlich, die Mo-Gehalte in der Schlacke erwiesen sich als äußerst niedrig, und die Ausbeute an Molybdän war nahe 100 %. Allerdings konnte nach diesen Versuchen nicht klar verifiziert werden, ob die außergewöhnlich guten Ergebnisse aufgrund der Mischung des Möllers oder des Abkühlens der Schlacke erzielt wurden. Um diese Frage zu klären, erfolgte die Realisierung von Versuchen direkt im Betrieb. Alle vier Versuche wurden auf unterschiedliche Weise bezüglich Mischung des Möllers und Schlackenabguss bzw. Erstarren der Schlacke durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Experimente fielen nicht wie erwartet aus. Die Chargen mit gemischtem Möller erzielten nur eine Ausbeute von etwa 97 %, auch die Chargen, deren Schlacke langsam abkühlte zeigten keine bemerkenswerten Ergebnisse.

Die oben genannten Versuche dienten dem Zweck, die aktuelle Ist-Situation des Betriebes Ferrolegierungen zu charakterisieren. In weiterer Folge soll anhand von empirischen Daten ein Möllerberechnungsmodell entworfen werden. Die Berechnung der Basisdaten für die Modellierung wurde in Kapitel 3.8.1, Kapitel 3.8.2 und in Kapitel 3.8.3 kurz erläutert. Da die Berechnung dieses Datensatzes nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit war, wird es in naher Zukunft notwendig sein, diesen zu vervollständigen. Das Ziel soll ein Modell sein, welches in der Lage ist, die exakte Zusammensetzung des Möllers in Abhängigkeit von den Einsatzstoffen vorherzusagen. Durch eine genaue Zusammensetzung des Möllers soll der Abbrand kontrollierbarer und somit sicherer gemacht werden. Auch der wirtschaftliche Aspekt spielt hierbei eine wichtige Rolle. Eine genaue Vorhersage der Zugabemengen der Rohstoffe für den Abbrand verhindert einen Überschuss des teuren Reduktionsmittels. Auch wird erwartet, dass eine Steigerung der Molybdänausbeute möglich ist.

Die Recherchen bezüglich der Thematik Schlackenverwertung ergaben keine aussagekräftigen Ergebnisse. Schlacken aus der Ferromolybdänherstellung werden in keiner der relevanten Normen und Merkblättern erwähnt, wodurch auch kein Grenzwert für Molybdän in Schlacken vorgegeben ist.

---

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Literatur

- [1] Treibacher Industrie AG: Homepage des Betriebes, Online im Internet, URL: <http://www.treibacher.com>, Abfrage: 11. August 2007.
  - [2] Pucher P.: Stand der Technik in der Ferrolegierungsproduktion. Bakkalaureatsarbeit, Montanuniversität Leoben. (2005). 67 – 76.
  - [3] Mineralienatlas, Online im Internet, URL: [http:// www.mineralienatlas.de](http://www.mineralienatlas.de), Abfrage: 15. Juli 2005.
  - [4] Bartholomé E., Ullmann F.: Ullmann Enzyklopädie der technischen Chemie. Band 17, 4. Aufl. (1979). 23-49.
  - [5] Bartholomé E., Ullmann F.: Ullmann Enzyklopädie der technischen Chemie. Band 7, 4. Aufl.. (1974). 351-361.
  - [6] European Commission – Institute of Prospective Technological Studies: Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries (2000). 466-519.
  - [7] Ressel R.: Untersuchung des Oxidationsverhaltens von Vanadium, Phosphor und Molybdän bei der Ferrolegierungsherstellung. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben. (2005).
  - [8] Durrer R., Volkert G.: Metallurgie der Ferrolegierungen. 2. Aufl., Berlin, Springer Verlag (1972).
  - [9] Lutz W.: Umweltgerechte Produktion von Ferromolybdän, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben. (1997).
  - [10] Belitskus D.: Aluminothermic production of ferroalloys. Journal of Metals (1973), 39-44.
  - [11] FMJ International Publications Ltd (Hrsg.): Molybdenum Conversion from Mine to Ferro Alloy. Steel Times (1981), 219-223.
  - [12] Stoephasius J-C., Friedrich B.: Modellierung metallothermischer Reaktionen – Berechnung der Einsatzmischung unter Berücksichtigung energetischer Effekte. World of Metallurgy – Erzmetall 57 (2004) No. 4, 217-224.
-

- [13] Pawlek F.: Metallhüttenkunde. Berlin-New York: Walter de Gruyter Verlag. (1983).
- [14] Mudersbach D. et al.: Viscosity of slags. Steel Research 72 (2001) No. 3, 86-89.
- [15] Mudersbach D. et al.: Optimierung mathematischer Modelle zur Viskositätsberechnung von Schlacken. Forschungsgemeinschaft Eisenhütten Schlacken (Hrsg.): Report des Forschungsinstitutes. (1999) Nr. 2, Duisburg, 9-12.
- [16] Peimin G. et al.: Activity model and its application in CaO-FeO-SiO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub> quaternary system. Journal of University of Science and Technology. Vol.11 (2004) Nr. 5, 406-410.
- [17] Kor G.J.W.: Equilibria between Fe-Cu-Ni-Co-Mo Alloys and slags of varying basicities at 1450° C. United States Steel Corporation, Technical Center, Monroeville, 107-128.
- [18] Santhy K. et al.: Effect of Oxygen to Silicon Ratio on the Viscosity of Metallurgical Slags. ISIJ International, Vol. 45 (2005) No. 7, 1014-1018.
- [19] Sichen D., Seetharaman S.: Viscosity of slags – an important property in process simulations. The Brimacombe Memorial Symposium, 709-724.
- [20] Weiqing Chen et al.: Reduction kinetics of molybdenum oxide in slags. Steel Research 64 (1993) No. 10, 495-500.
- [21] Yasushi Ikeda et al.: Sublimation Behavior of Molybdenum Oxides. High Temperature Science 16 (1983), 1-22.
- [22] Dietz H., Klostermann W.: Verfahrenstechnische Untersuchungen bei der Sublimation von Molybdäntrioxid. TH für Chemie, Leuna-Merseburg, 221-230.
- [23] Langhammer H.J., Geck H.G.: Viskositätsmessungen an Schlacken. Archiv für das Eisenhüttenwesen, 38. Jahrgang (1967) Heft 9, 691-699.
- [24] Wikipedia – Die frei Enzyklopädie, Online im Internet, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Rasterelektronenmikroskop>, Abfrage: 27. Juli 2007.
- [25] Institutes für Metallurgie, Online im Internet, URL: <http://www.metallurgy.ac.at>, Abfrage: 27. Juli 2007.
- [26] ÖNORM EN 13242:2004. Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau.
-



- [27] ÖNORM B 3132:2006. Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13242.
- [28] DIN 4301:1981. Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen.
- [29] Hodnik, P.: Untersuchungen zur Verwertung von Eisenhüttenschlacken, Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben. (1997).
- [30] Hödl, F.: Bewährung österreichischer LD-Schlacke im bituminösen Straßenbau, Straßenforschungsauftrag Nr. 405 des Bundesministeriums für wirtschaftliche Angelegenheiten (1990).
- [31] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Merkblatt über die Verwendung von Metallhüttenschlacken im Straßenbau. FGSV Verlag, Köln. (1999).
- [32] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau. FGSV Verlag, Köln. (1994).
- [33] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.): Recyclingbaustoffe – Regelung der Umweltverträglichkeit. Wien. (2002).
-

## 6.2 Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 39: Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
µg	Mikrogramm
µm	Mikrometer
µΩ	Mikroohm
Al	Aluminium
BTEX	Abkürzung für die aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole
C	Kohlenstoff
cm	Zentimeter
CO	Kohlenmonoxid
FeMo	Ferromolybdän
g	Gramm
G	Gibbs-Energie [Joule]
h	Stunde
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
KW	Kohlenwasserstoffe
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
m	Meter
MHz	Megahertz
min	Minute
mm	Millimeter
Mo	Molybdän
mS	Mikrosiemens
N	Newton
nm	Nanometer
O	Sauerstoff
Pa	Pascal

PAK	polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoff
PCB	polychlorierte Biphenyle
ppm	part per million (ein Millionstel)
R	Gaskonstante ( $= 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
s	Sekunde
sec	Sekunde
Si	Silizium
t	Tonne
T	Temperatur
TOC	total organic carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)
TS	Trockensubstanz
V	Volt
z.B.	zum Beispiel

### 6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Molybdän [4].....	7
Tabelle 2: Verbrauchszahlen bei der karbothermischen Ferromolybdänherstellung [4].....	10
Tabelle 3: Zusammensetzung der Versuchschargen .....	11
Tabelle 4: Zusammensetzung von Molybdänkonzentraten .....	38
Tabelle 5: Siebanalyse von Alugrieß .....	38
Tabelle 6: Zusammensetzung von Alugrieß .....	40
Tabelle 7: Zusammensetzung von Ferrosilizium .....	41
Tabelle 8: Zusammensetzung von Filterstaub.....	42
Tabelle 9: Zusammensetzung von Walzenzunder (H <sub>2</sub> reduziert) .....	43
Tabelle 10: typische Zusammensetzung des erzeugten FeMo.....	44
Tabelle 11: Massenanteile der verschiedenen Kornklassen .....	44
Tabelle 12: typische Zusammensetzung der Schlacke .....	45
Tabelle 13: Analysenergebnisse der Abbrandversuche.....	52
Tabelle 14: Standardmischung (3 kg) der Abbrandversuche .....	53
Tabelle 15: Mo-Gehalte der entnommenen Schlackenproben.....	59
Tabelle 16: Möllierzusammensetzung laut Mischanlage der FL .....	62
Tabelle 17: Möllermischung für den Pilotversuch in der Forschung und Entwicklung .....	63
Tabelle 18: Mo-Bilanz der Pilotversuche.....	66
Tabelle 19: Übersicht über die Betriebsversuche.....	68
Tabelle 20: Inputmengen für eine Versuchscharge.....	68
Tabelle 21: Analysenergebnisse der Schlackenproben von Charge 1097 und 1106.....	69
Tabelle 22: Analysenergebnisse der Fraktionen von Charge 1098 und Charge 1107.....	69
Tabelle 23: Blockgewichte und Fraktionsanteile der abgegossenen Chargen.....	70
Tabelle 24: Analysenergebnisse der Schlackenproben von Charge 1097 und Charge 1106 .....	72
Tabelle 25: Analysenergebnisse der Metallfraktionen von Charge 1097 und Charge 1106 .....	73
Tabelle 26: Blockgewichte und Fraktionsanteile der langsam gekühlten Chargen .....	73

---

Tabelle 27: Mo-Bilanz der Betriebsversuche.....	74
Tabelle 28: Thermodynamisch berechnete Zusammensetzungen der Mo-Konzentrate von 56 % Mo bis 66 % Mo .....	78
Tabelle 29: Vorgaben und Variationen zum Berechnungsmodell .....	79
Tabelle 30: Berechnete Menge der Inputstoffe für alle Variationen für das Mo-Konzentrat mit 58 % Mo und 28,4 % O .....	81
Tabelle 31: Thermodynamisches Gleichgewicht des Möllers (Mo-Konzentrat mit 58 % Mo und 28,4 % O) bei einer Temperatur von 1800 °C .....	83
Tabelle 32: Berechnete Schlackenzusammensetzung (in %).....	87
Tabelle 33: Anzuführende gefährliche Substanzen für Recyclingbaustoffe [27] .....	89
Tabelle 34: Grenzwerte für Recyclingbaustoffe gemäß Richtlinie für Recyclingbaustoffe in Österreich [33].....	91
Tabelle 35: Parametervergleich für die Schadstoffgehalte im Eluat bei verschiedenen österreichischen Regelwerken [33].....	92
Tabelle 36: Grenzwerte der Grundwasserschwellenwertverordnung und der Trinkwasser-verordnung für die betrachteten Parameter [33] .....	92
Tabelle 37: Erforderliche Qualitätsklassen in Abhängigkeit vom Einsatzbereich [33].....	93
Tabelle 38: Klassifizierung der Recyclingbaustoffe nach Qualitätsklassen – Grenzwertvorschlag [33].....	93
Tabelle 39: Abkürzungsverzeichnis.....	100
Tabelle 40: Input der Standardabbrandversuche (4 kg Standardmöller) .....	125
Tabelle 41: Analysenergebnisse der Standardabbrandversuche.....	125
Tabelle 42: Input der Abbrandversuche Charge 147 und 155 (3 kg Standardmöller).....	125
Tabelle 43: Analysenergebnisse der Abbrandversuche Charge 147 .....	126
Tabelle 44: Analysenergebnisse der Abbrandversuche Charge 155 .....	126
Tabelle 45: Ergebnisse der Elementbilanz Charge 147 (Verluste bereits abgezogen).....	127
Tabelle 46: Ergebnisse der Elementbilanz Charge 155 (Verluste bereits abgezogen).....	127
Tabelle 47: Analysenübersicht Schlackenproben Absetzversuche .....	128
Tabelle 48: Si-Bilanz der Pilotversuche.....	134
Tabelle 49: Al-Bilanz der Pilotversuche.....	134

---

Tabelle 50: Fe-Bilanz der Pilotversuche.....	134
Tabelle 51: Analyse und Auswaagen des FeMo-Blockes Charge 1097 .....	135
Tabelle 52: Mo-Analyse der Schlacke Charge 1097 .....	135
Tabelle 53: Gesamtanalyse der Schlackenproben Charge 1097 (Oxide) .....	135
Tabelle 54: Analyse des FeMo-Blockes Charge 1098 .....	136
Tabelle 55: Mo-Analyse der Schlacke Charge 1098 .....	136
Tabelle 56: Gesamtanalyse der Schlackenproben Charge 1098 (Oxide) .....	136
Tabelle 57: Analyse und Auswaagen des FeMo-Blockes Charge 1106 .....	136
Tabelle 58: Mo-Analyse der Schlacke Charge 1106 .....	137
Tabelle 59: Gesamtanalyse der Schlackenproben Charge 1106 (Oxide) .....	137
Tabelle 60: Analyse und Auswaagen des FeMo-Blockes Charge 1107 .....	137
Tabelle 61: Mo-Analyse der Schlacke Charge 1107 .....	138
Tabelle 62: Gesamtanalyse der Schlackenproben Charge 1107 (Oxide) .....	138
Tabelle 63: Übersicht Analysenergebnisse der Betriebsversuche (Durchschnittswerte).....	138
Tabelle 64: Gesamter Output des Mo-Konzentrates mit 58 % Mo und 28,4 % O (Teil 1).....	139
Tabelle 65: Gesamter Output des Mo-Konzentrates mit 58 % Mo und 28,4 % O (Teil 2).....	140

## 6.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Molybdänit [3].....	6
Abbildung 2: Wulfenit [3] .....	6
Abbildung 3: Powellit [3].....	6
Abbildung 4: Freie Bildungsenthalpie in Abhängigkeit von der Temperatur [7] .....	8
Abbildung 5: Abhängigkeit der Molybdänausbeute vom mittleren Partikeldurchmesser (200g Charge) [10] .....	12
Abbildung 6: Temperatur-Zeit-Profil bei unterschiedlich eingesetzten Aluminiumpulvern [10].....	13

Abbildung 7: Einfluss der Aluminiumpartikelgröße und der Chargenmenge auf die Metallausbeute [10].....	14
Abbildung 8: Einfluss des CaO/Al-Verhältnisses auf die Metallausbeute (200 g Charge) [10] .....	15
Abbildung 9: Einfluss der Aluminiummenge auf die Metallausbeute (200 g Charge, Aluminiumpulver Nr. 120, CaO/Al ~ 1) [10] .....	16
Abbildung 10: Einfluss der Basizität auf die Aktivität von MoO <sub>3</sub> [16].....	17
Abbildung 11: Einfluss des MoO <sub>3</sub> -Gehaltes auf die Aktivität verschiedener Komponenten [16].....	18
Abbildung 12: Einfluss des Si-Gehaltes auf die Verteilungszahl von Molybdän [16] .....	19
Abbildung 13: Einfluss der Basizität auf die Verteilungszahl für Molybdän [16].....	19
Abbildung 14: Schlacke-Metall-Verteilung für Molybdän und Eisen bei 1450 °C [17].....	20
Abbildung 15: Viskositätsverlauf über der Temperatur von unterschiedlichen Schlacken [15].....	23
Abbildung 16: Viskositäten des CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> -Systems bei 1773 K [18] .....	25
Abbildung 17: Viskositäten des Systems CaO-FeO-SiO <sub>2</sub> bei verschiedenen Temperaturen [18].....	26
Abbildung 18: Parameter, Konstanten und Zielgrößen zur Berechnung der Einsatzmischung und der theoretischen Zusammensetzung von Metall und Schlacke [12].....	28
Abbildung 19: Fließschema der Möllermischanlage .....	30
Abbildung 20: Fließschema der Abbrandstellen .....	31
Abbildung 21: Fließschema der Schlackenaufbereitung .....	32
Abbildung 22: Fließschema der Brecherstraße.....	33
Abbildung 23: Fließschema der Filteranlage der Abbrandstelle.....	34
Abbildung 24: Gesamtes Verfahrenschema des Prozesses.....	35
Abbildung 25: Molybdänkonzentrat.....	37
Abbildung 26: Korngrößenverteilung eines Molybdänkonzentrates .....	37
Abbildung 27: Korngrößenverteilungen Alugrieß der beiden Lieferanten .....	39
Abbildung 28: Aluminiumgrieß (FL 124).....	39
Abbildung 29: Ferrosilizium.....	40

---

Abbildung 30: Korngrößenverteilung von Ferrosilizium .....	41
Abbildung 31: Korngrößenverteilung des Walzenzunders .....	43
Abbildung 32: Durchschnittliche Laufzeiten der Möllermischanlage für die Chargen 143, 147, 151 und 155 .....	48
Abbildung 33: Schematische Darstellung der Probennahme des Möllers beim Abbrand.....	49
Abbildung 34: Versuchsaufbau der Abbrandversuche .....	50
Abbildung 35: Abbrand kurz nach der Zündung .....	50
Abbildung 36: Abbrand nach ca. 10 Sekunden .....	50
Abbildung 37: Schlacke-Metall-Block.....	51
Abbildung 38: Das entstandenes Metall.....	51
Abbildung 39: Die entstandene Schlacke.....	51
Abbildung 40: Massenbilanz beim Prozess zur Berechnung der Probenzusammensetzung .....	52
Abbildung 41: Molybdänverlauf über der Zeit bei den Abbrandversuchen .....	54
Abbildung 42: Eisenverlauf über die Zeit bei den Abbrandversuchen .....	54
Abbildung 43: Aluminiumverlauf über die Zeit bei den Abbrandversuchen .....	55
Abbildung 44: Siliziumverlauf über die Zeit bei den Abbrandversuchen .....	56
Abbildung 45: Prozentuelle Abweichungen der Elemente im Möller (Charge 147).....	57
Abbildung 46: Prozentuelle Abweichungen der Elemente im Möller (Charge 155).....	58
Abbildung 47: Skizze der Probenahme von Schlackenproben .....	59
Abbildung 48: Absetzverhalten des Molybdäns in Abhängigkeit von der Zeit.....	60
Abbildung 49: Mo-Einschluss bei 8500-facher Vergrößerung (Charge 143).....	61
Abbildung 50: Mo-Einschluss bei 1000-facher Vergrößerung (Charge 151).....	61
Abbildung 51: Versuchsaufbau für den Großabbrand.....	62
Abbildung 52: Verwendetes Ofengefäß für den Großabbrand.....	62
Abbildung 53: Abbrand beim Pilotversuch .....	63
Abbildung 54: Zustand nach dem Abbrand (mit einer Temperatursonde in der Seitenwand) .....	63
Abbildung 55: Schlacke-Metall-Block des Pilotversuches.....	64

---



Abbildung 56: Querschnitt Schlacke-Metall-Block.....	64
Abbildung 57: Querschnitt der Schlacke (Rand) .....	64
Abbildung 58: Darstellung der erstarrten Schlacke (Mitte).....	64
Abbildung 59: Schlackenprobe der glasig erstarrten Oberfläche (500-fache Vergrößerung).....	65
Abbildung 60: Schlackenprobe des kristallin erstarrten unteren Bereiches (500- fache Vergrößerung).....	65
Abbildung 61: Charge 1097 nach dem Abbrand .....	70
Abbildung 62: Charge 1106 nach dem Abbrand .....	70
Abbildung 63: Abheben der Ofenwand .....	71
Abbildung 64: Metallblock der Charge 1097 .....	71
Abbildung 65: Querschnitt des oberen Bereiches der Schlacke .....	71
Abbildung 66: Metalloberfläche der langsam abgekühlten Charge.....	71
Abbildung 67: Verlauf der Reaktionsprodukte eines Mo-Konzentrates mit 56 % Mo bei einer kontinuierlichen Zugabe von Sauerstoff bei 650 °C .....	77
Abbildung 68: Grafische Darstellung der Outputmengen (Mengen über 500 kg) .....	84
Abbildung 69: Grafische Darstellung der Outputmengen (Mengen unter 500 kg) .....	85
Abbildung 70: Reaktionsenthalpie des Prozesses .....	86
Abbildung 71: Korngrößenverteilung der Molybdänkonzentrate .....	110
Abbildung 72: Vergleich Mo-Gehalt gegen O-Gehalt der Molybdänkonzentrate .....	110
Abbildung 73: Vergleich Mo-Gehalt gegen d10 der Molybdänkonzentrate .....	111
Abbildung 74: Vergleich Mo-Gehalt gegen d50 der Molybdänkonzentrate.....	111
Abbildung 75: Vergleich Mo-Gehalt gegen d90 der Molybdänkonzentrate .....	112
Abbildung 76: Vergleich O-Gehalt gegen d10 der Molybdänkonzentrate .....	112
Abbildung 77: Vergleich O-Gehalt gegen d50 der Molybdänkonzentrate .....	113
Abbildung 78: Vergleich O-Gehalt gegen d90 der Molybdänkonzentrate .....	113
Abbildung 79: Vergleich Al-Gehalt mit C-Gehalt der Alugrießsorten .....	114
Abbildung 80: Vergleich Al-Gehalt mit d10 der Alugrießsorten (Legende siehe Abbildung 79).....	114

---

Abbildung 81: Vergleich Al-Gehalt mit d50 der Alugrießsorten (Legende siehe Abbildung 79) .....	115
Abbildung 82: Vergleich Al-Gehalt mit d90 der Alugrießsorten (Legende siehe Abbildung 79) .....	115
Abbildung 83: Vergleich C-Gehalt mit d10 der Alugrießsorten (Legende siehe Abbildung 79) .....	116
Abbildung 84: Vergleich C-Gehalt mit d50 der Alugrießsorten (Legende siehe Abbildung 79) .....	116
Abbildung 85: Vergleich C-Gehalt mit d90 der Alugrießsorten (Legende siehe Abbildung 79) .....	117
Abbildung 86: Si-Gehalt gegen C-Gehalt des Ferrosiliziums der verschiedenen Chargen .....	117
Abbildung 87: Si-Gehalt gegen d50 des Ferrosiliziums verschiedener Chargen.....	118
Abbildung 88: Si-Gehalt gegen d90 des Ferrosiliziums verschiedener Chargen.....	118
Abbildung 89: C-Gehalt gegen d50 des Ferrosiliziums verschiedener Chargen .....	119
Abbildung 90: O-Gehalt gegen d50 des Ferrosiliziums verschiedener Chargen .....	119
Abbildung 91: O-Gehalt gegen d50 des Walzenzunders verschiedener Chargen.....	120
Abbildung 92: O-Gehalt gegen d90 des Walzenzunders verschiedener Chargen.....	120
Abbildung 93: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 143 I) .....	121
Abbildung 94: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 143 II) .....	121
Abbildung 95: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 147 I) .....	122
Abbildung 96: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 147 II) .....	122
Abbildung 97: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 151 I) .....	123
Abbildung 98: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 151 II) .....	123
Abbildung 99: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 155 I) .....	124
Abbildung 100: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 155 II) .....	124
Abbildung 101: Schlackenprobe 1 - Charge 143 (1000fache Vergrößerung) .....	129
Abbildung 102: Schlackenprobe 2 – Charge 143 (1000fache Vergrößerung) .....	129
Abbildung 103: Schlackenprobe 3 - Charge 143 (1000fache Vergrößerung) .....	129

---

Abbildung 104: Schlackenprobe Oberfläche - Charge 143 (1000fache Vergrößerung).....	129
Abbildung 105: Schlackenprobe 1 - Charge 147 (1000fache Vergrößerung) .....	130
Abbildung 106: Schlackenprobe 2 - Charge 147 (1000fache Vergrößerung) .....	130
Abbildung 107: Schlackenprobe 3 - Charge 147 (1000fache Vergrößerung) .....	130
Abbildung 108: Schlackenprobe 4 - Charge 147 (1000fache Vergrößerung) .....	130
Abbildung 109: Schlackenprobe 1 - Charge 151 (1000fache Vergrößerung) .....	131
Abbildung 110: Schlackenprobe 2 - Charge 151 (1000fache Vergrößerung) .....	131
Abbildung 111: Schlackenprobe 3 - Charge 151 (1000fache Vergrößerung) .....	131
Abbildung 112: Schlackenprobe 4 - Charge 151 (1000fache Vergrößerung) .....	131
Abbildung 113: Schlackenprobe Oberfläche - Charge 151 (1000fache Vergrößerung).....	132
Abbildung 114: Schlackenprobe 1 - Charge 155 (1000fache Vergrößerung) .....	132
Abbildung 115: Schlackenprobe 2 - Charge 155 (1000fache Vergrößerung) .....	132
Abbildung 116: Schlackenprobe 3 - Charge 155 (1000fache Vergrößerung) .....	132
Abbildung 117: Schlackenprobe 4 - Charge 155 (1000fache Vergrößerung) .....	133
Abbildung 118: Schlackenprobe Oberfläche1 - Charge 155 - (1000fache Vergrößerung .....	133
Abbildung 119: Schlackenprobe Oberfläche 2 - Charge 155 (1000fache Vergrößerung).....	133

---

# Anhang A

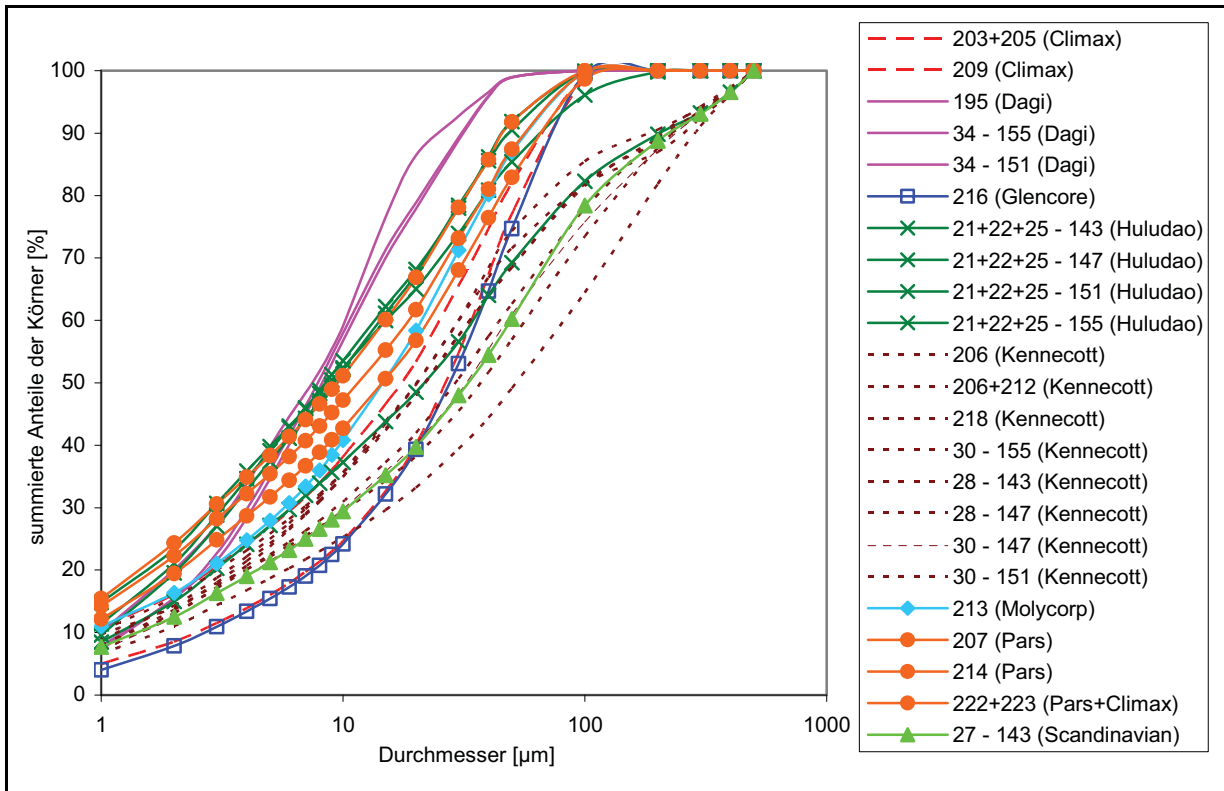


Abbildung 71: Korngrößenverteilung der Molybdänkonzentrate

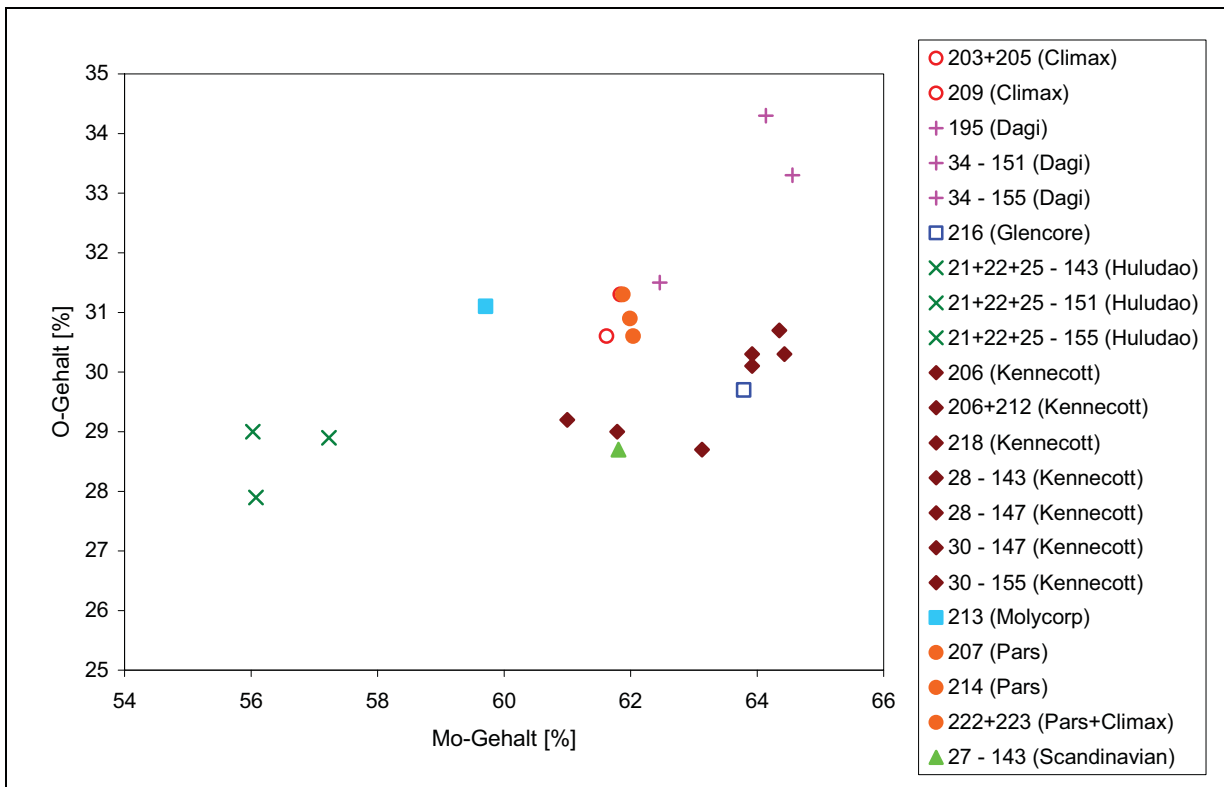


Abbildung 72: Vergleich Mo-Gehalt gegen O-Gehalt der Molybdänkonzentrate

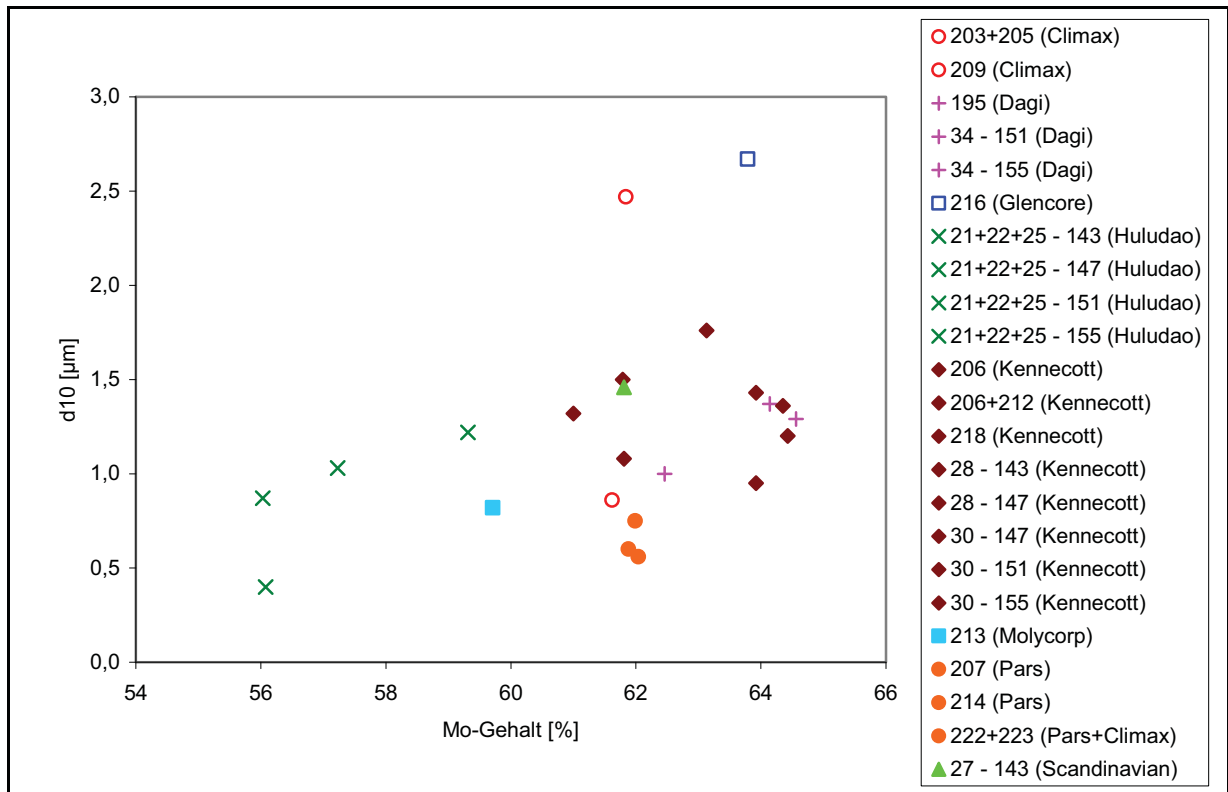


Abbildung 73: Vergleich Mo-Gehalt gegen d10 der Molybdänkonzentrate

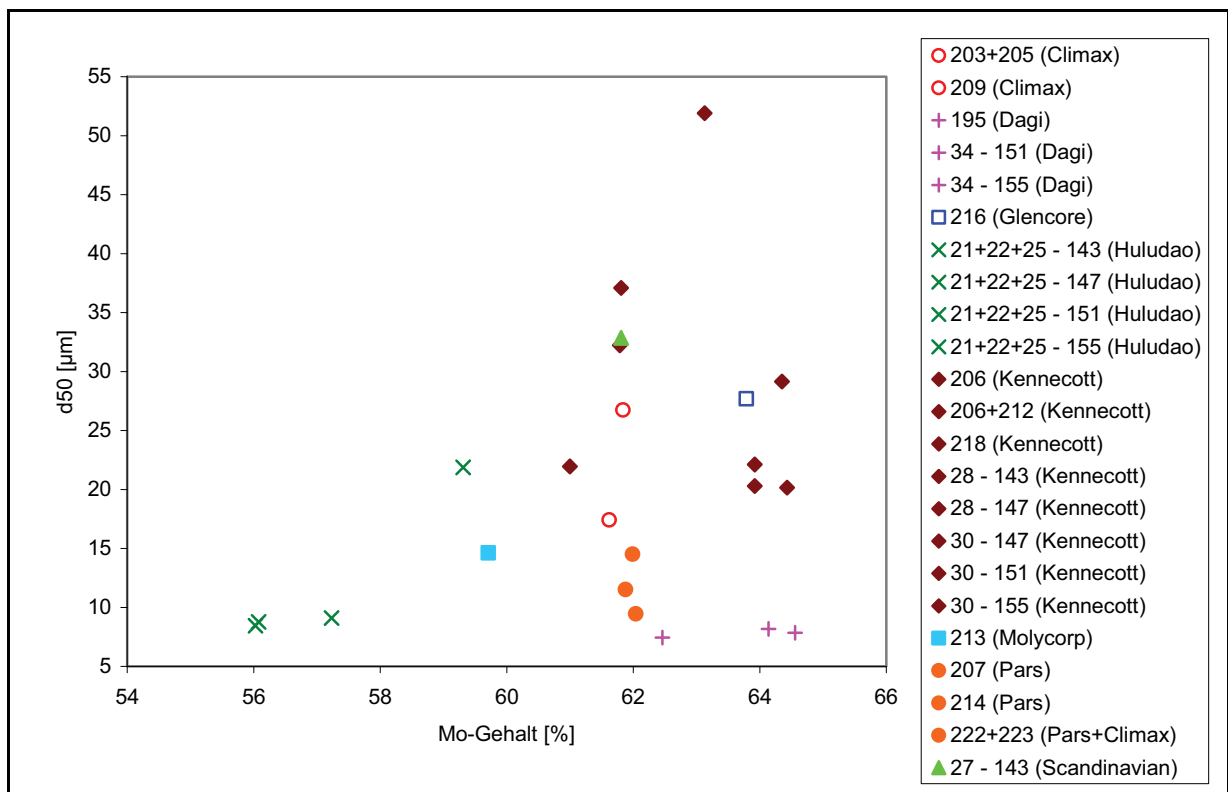


Abbildung 74: Vergleich Mo-Gehalt gegen d50 der Molybdänkonzentrate

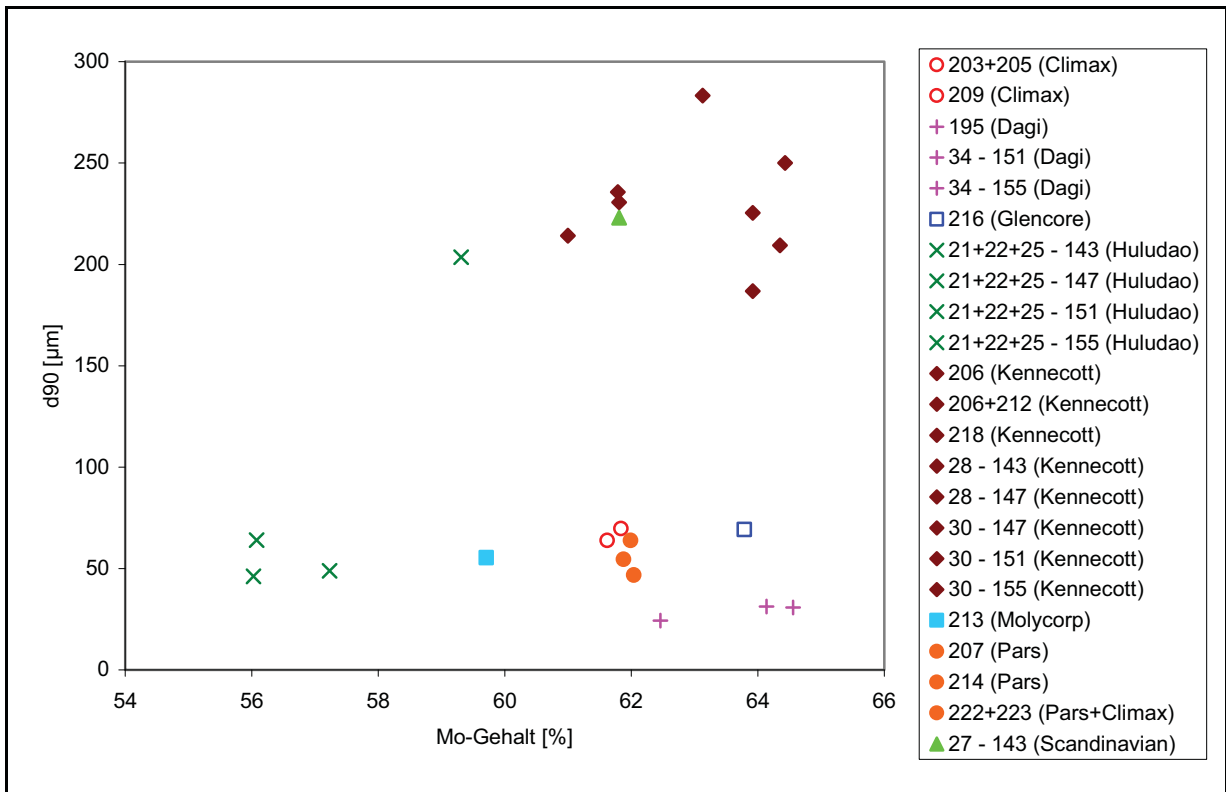


Abbildung 75: Vergleich Mo-Gehalt gegen d90 der Molybdänkonzentrate

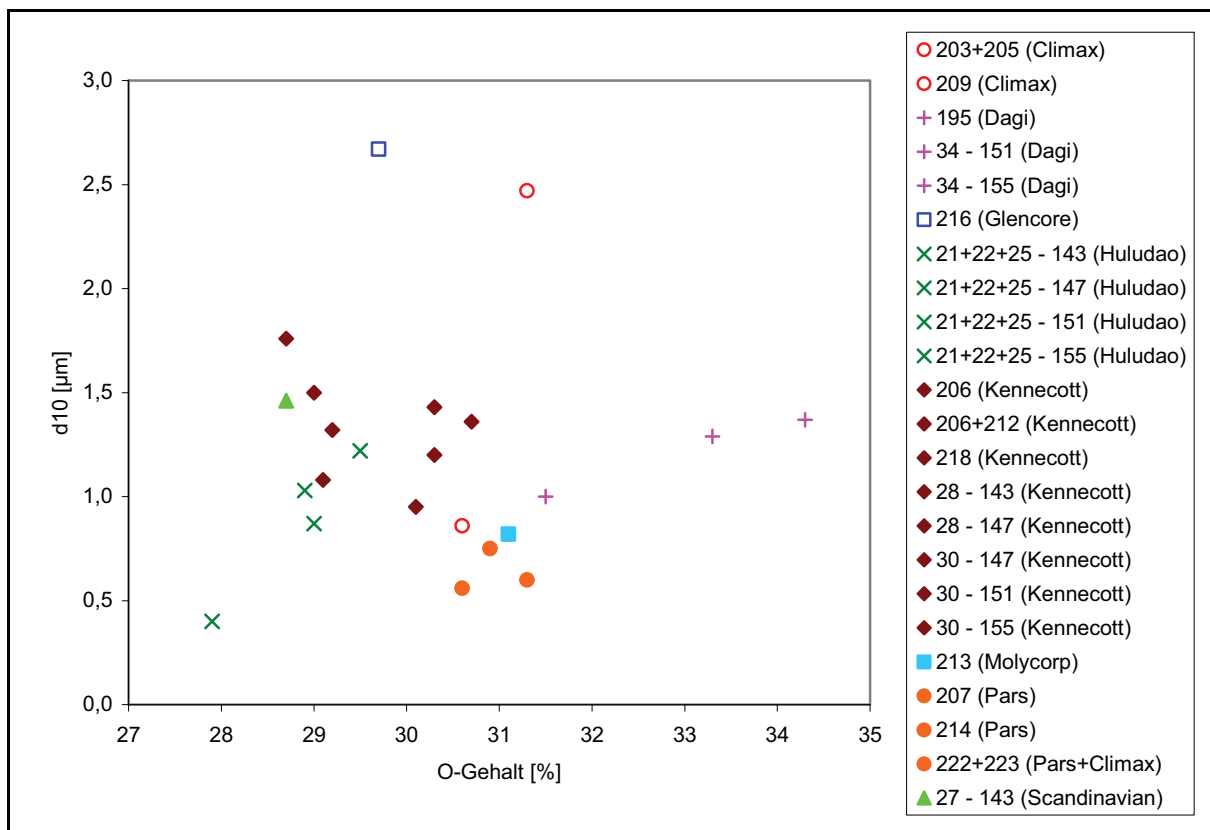


Abbildung 76: Vergleich O-Gehalt gegen d10 der Molybdänkonzentrate

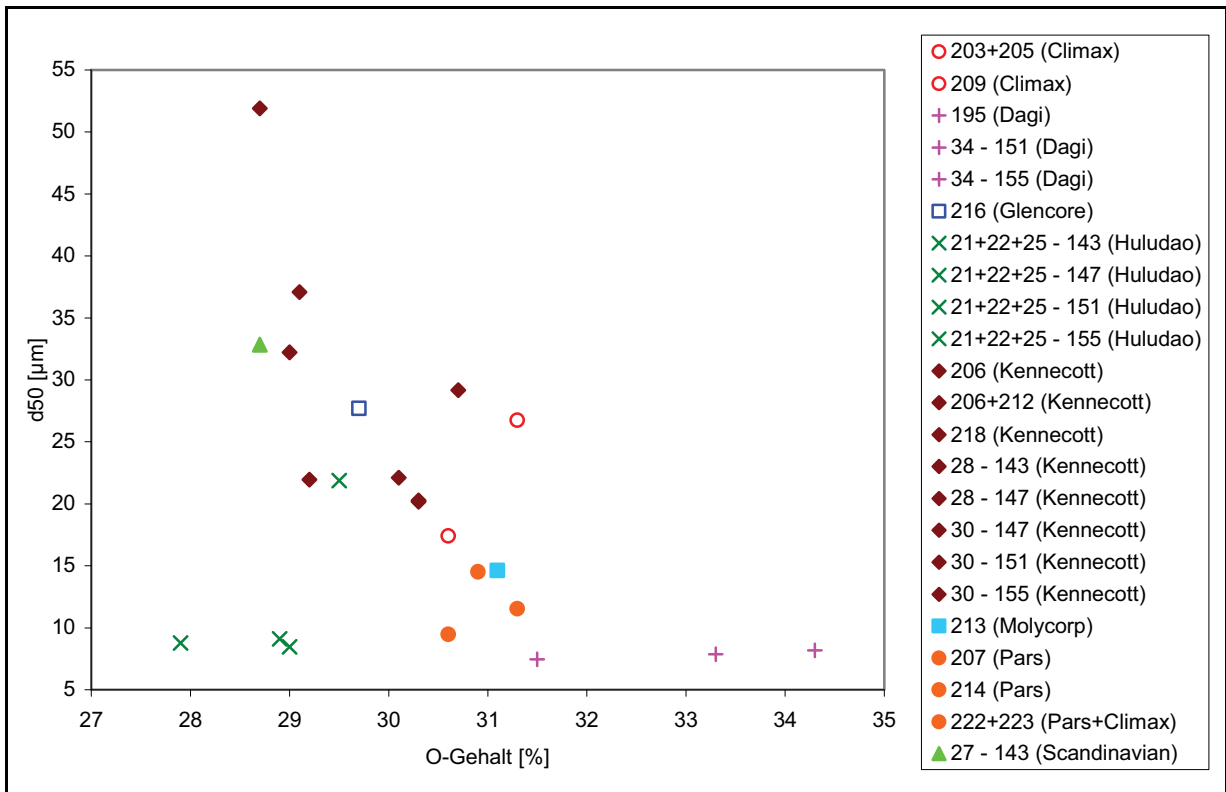


Abbildung 77: Vergleich O-Gehalt gegen d50 der Molybdänkonzentrate

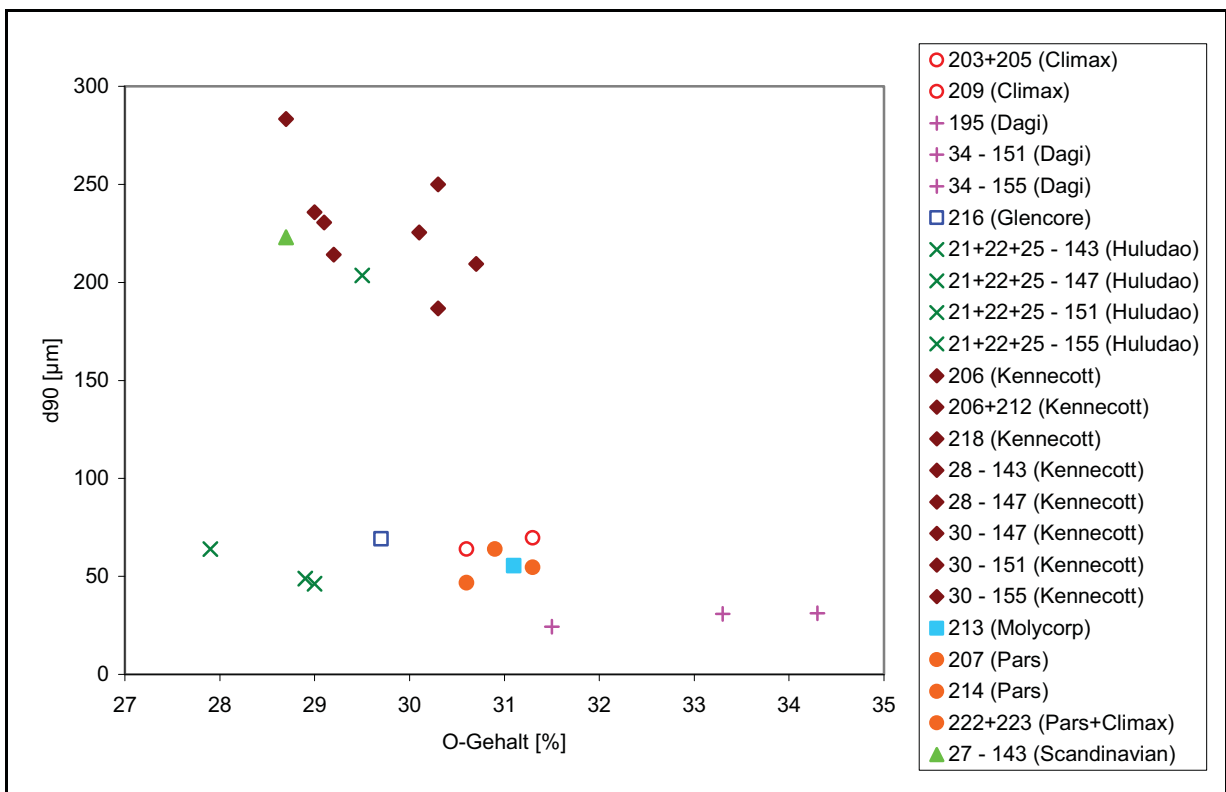


Abbildung 78: Vergleich O-Gehalt gegen d90 der Molybdänkonzentrate

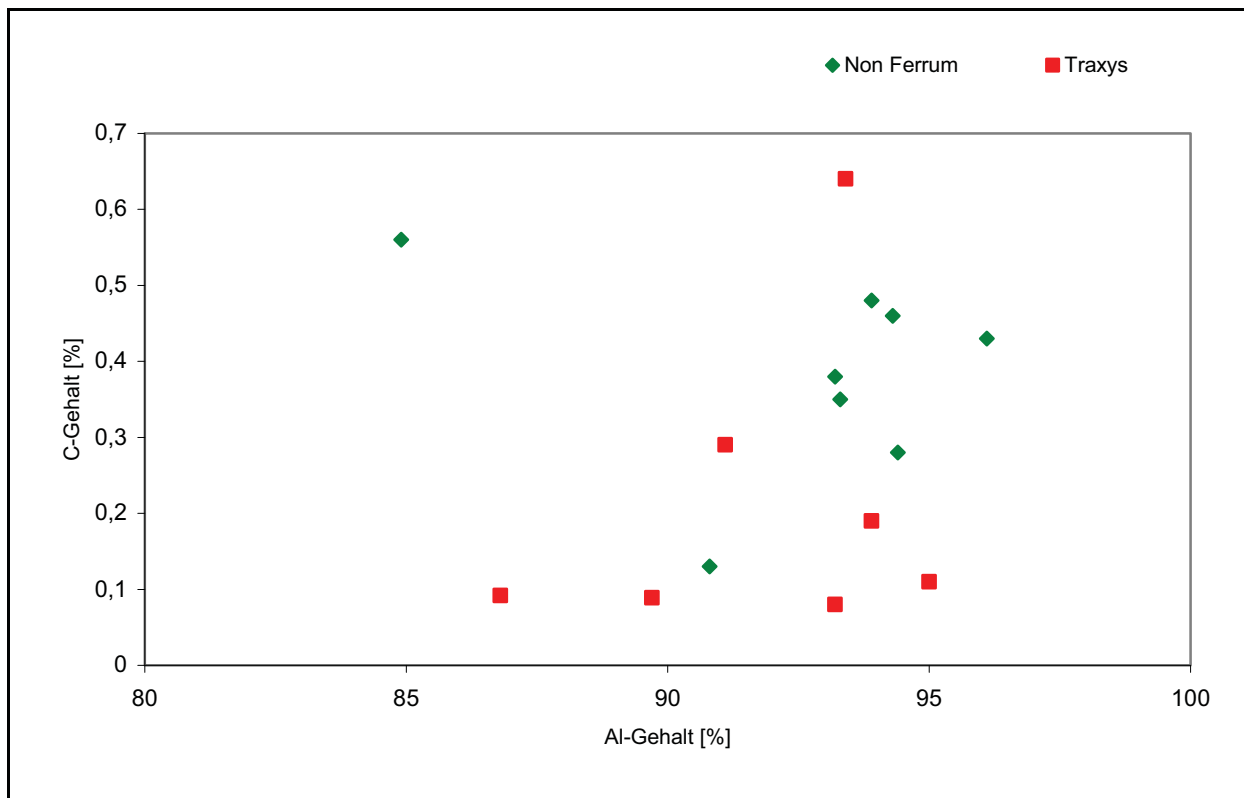


Abbildung 79: Vergleich Al-Gehalt mit C-Gehalt der Alugießsorten

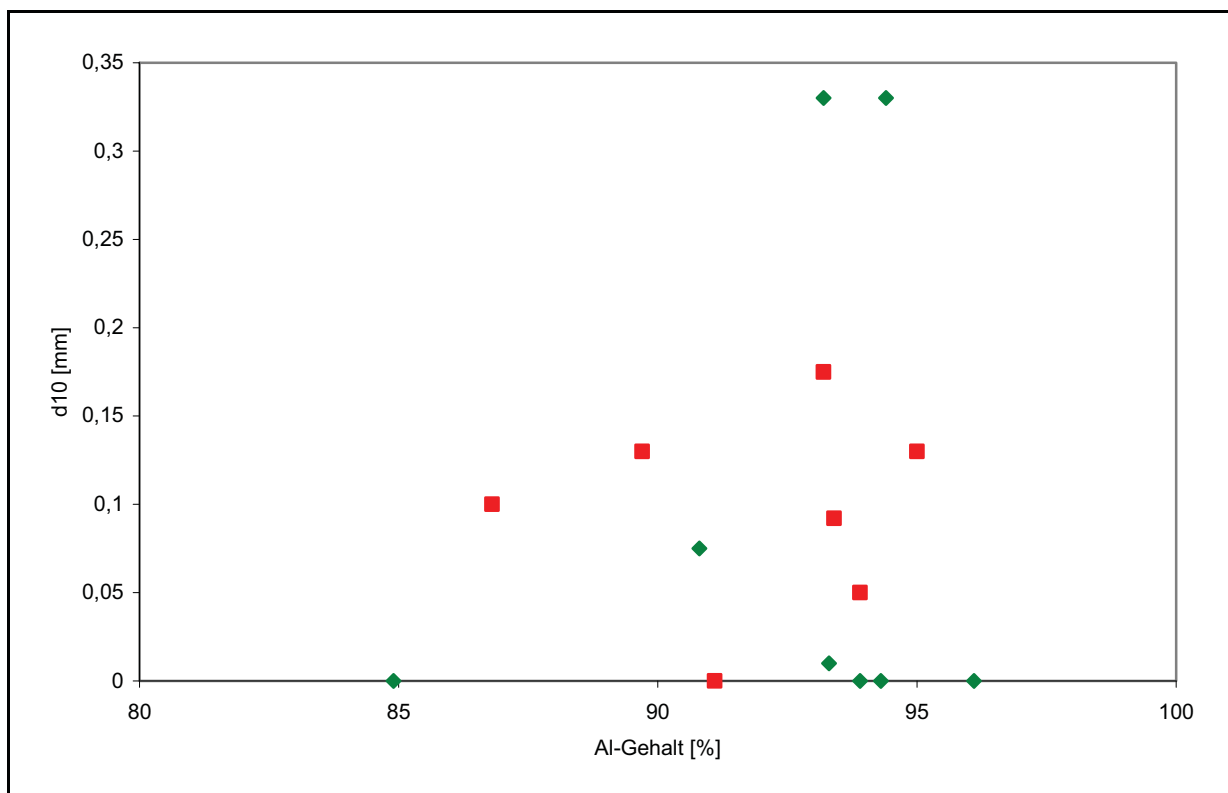


Abbildung 80: Vergleich Al-Gehalt mit d10 der Alugießsorten (Legende siehe Abbildung 79)



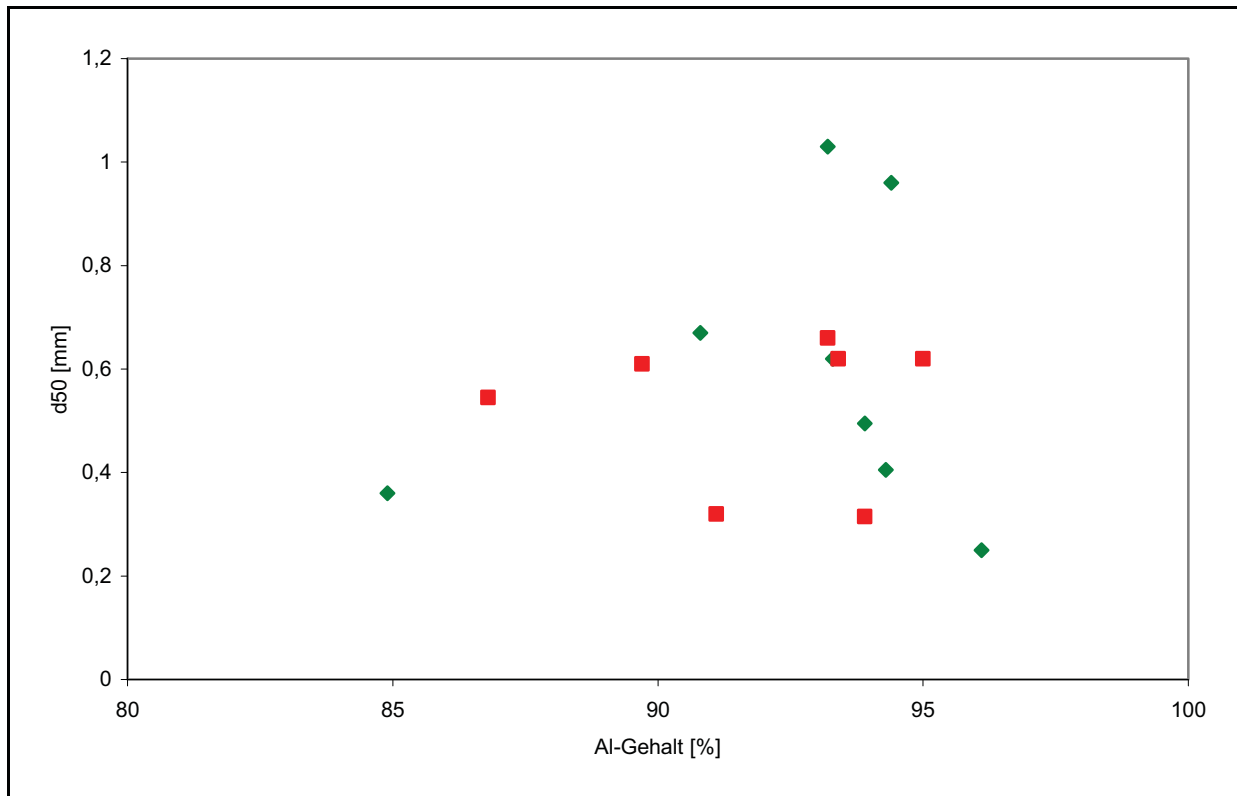


Abbildung 81: Vergleich Al-Gehalt mit d50 der Alugießsorten (Legende siehe Abbildung 79)

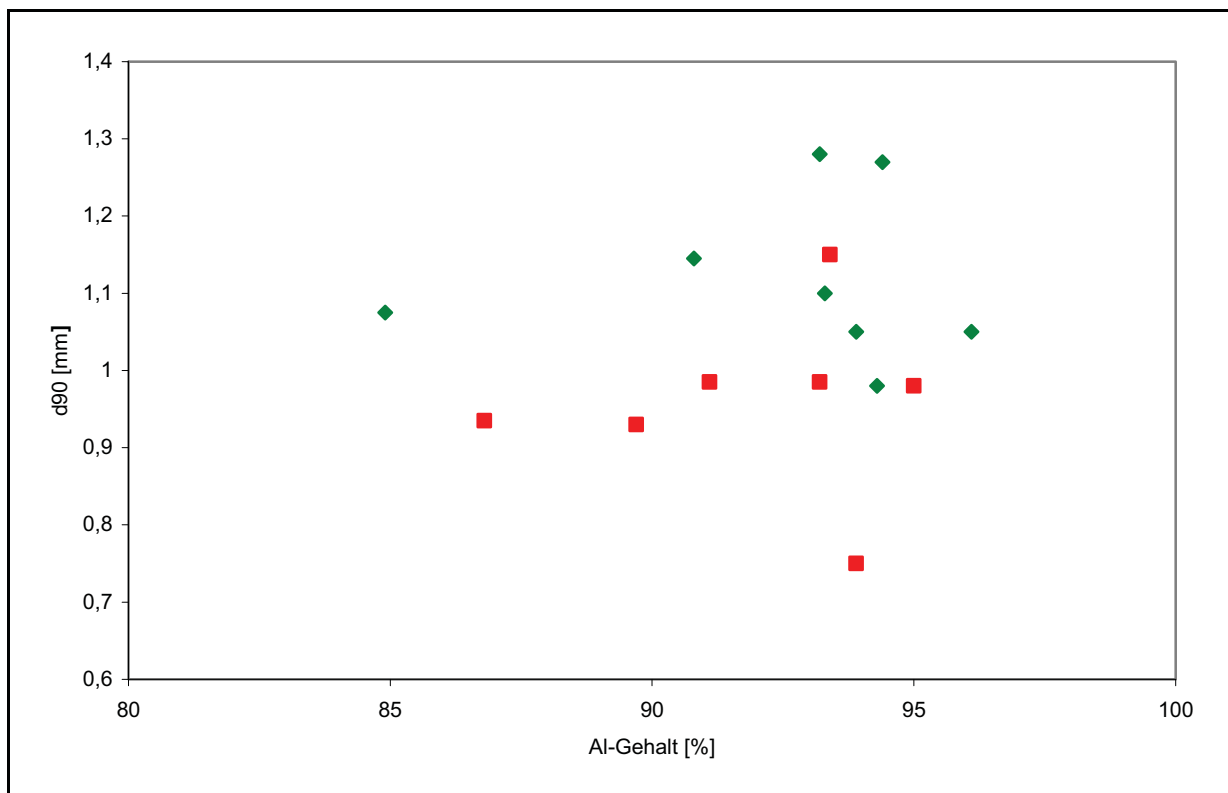


Abbildung 82: Vergleich Al-Gehalt mit d90 der Alugießsorten (Legende siehe Abbildung 79)

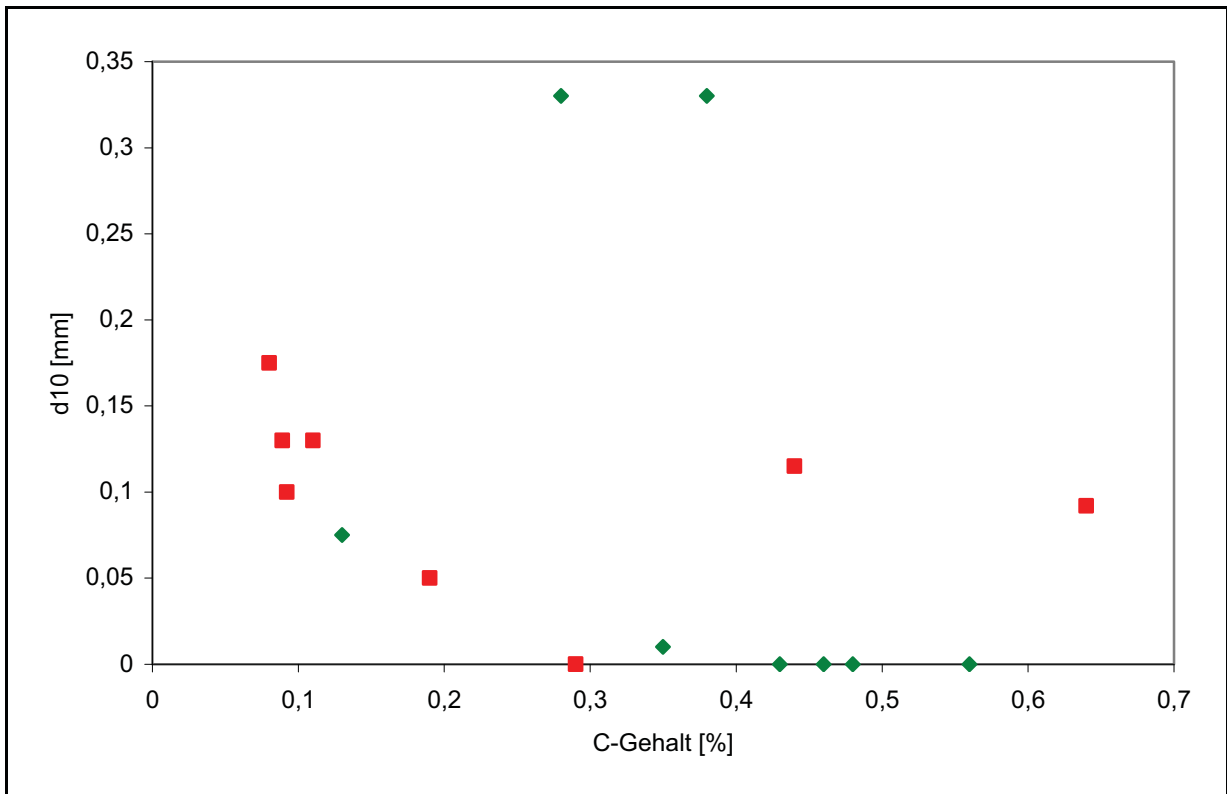


Abbildung 83: Vergleich C-Gehalt mit d10 der Alugießsorten (Legende siehe Abbildung 79)

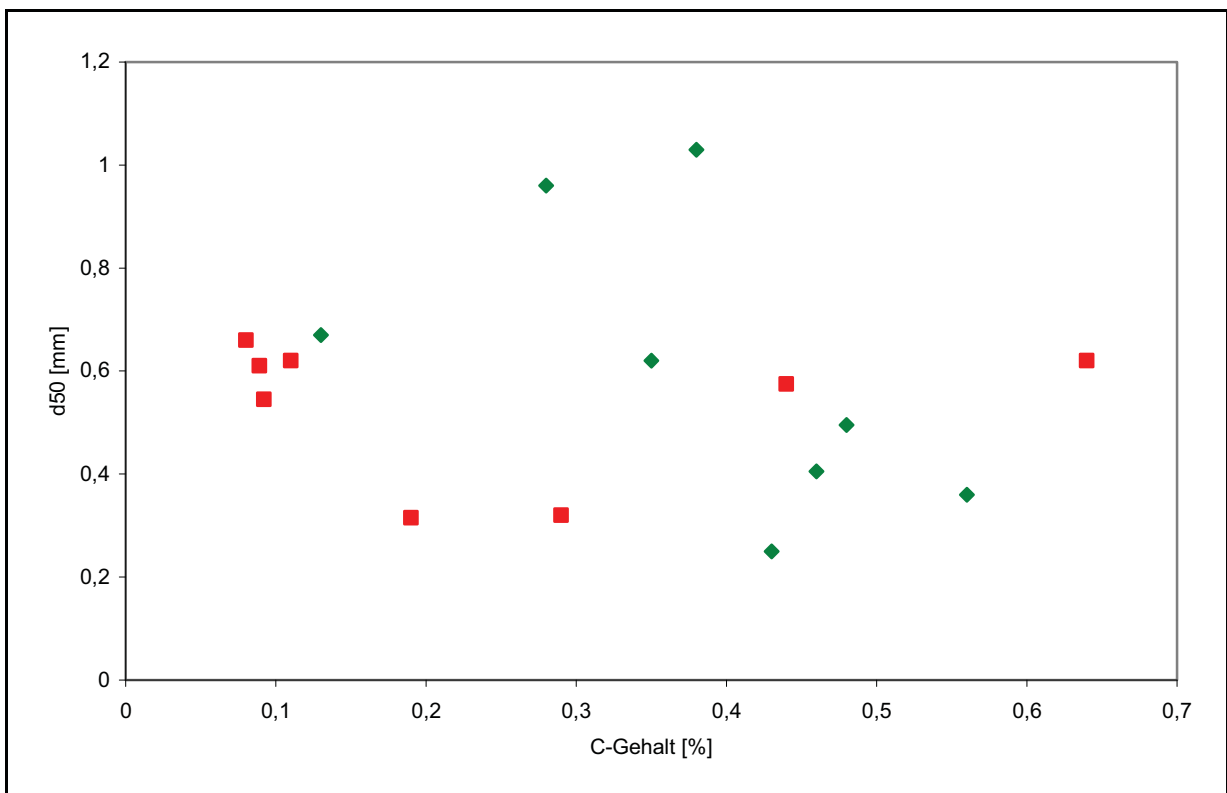


Abbildung 84: Vergleich C-Gehalt mit d50 der Alugießsorten (Legende siehe Abbildung 79)

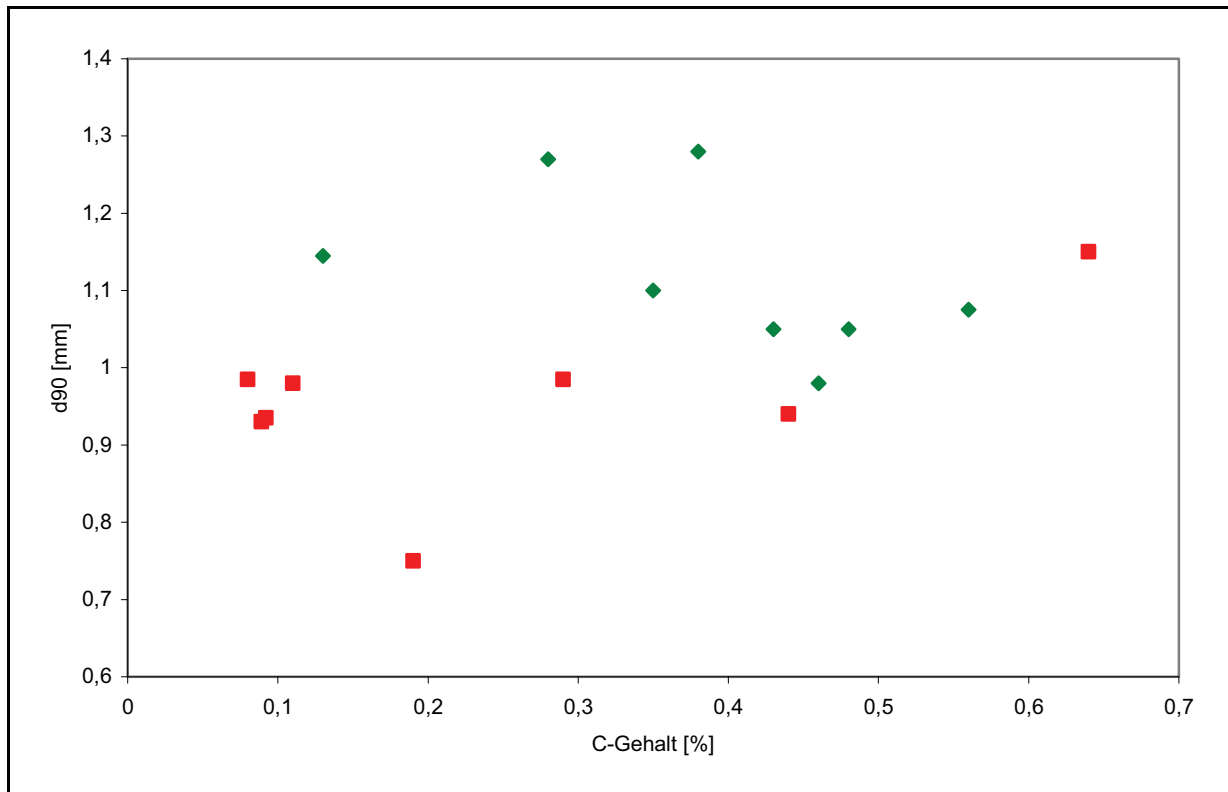


Abbildung 85: Vergleich C-Gehalt mit d90 der Alugießsorten (Legende siehe Abbildung 79)

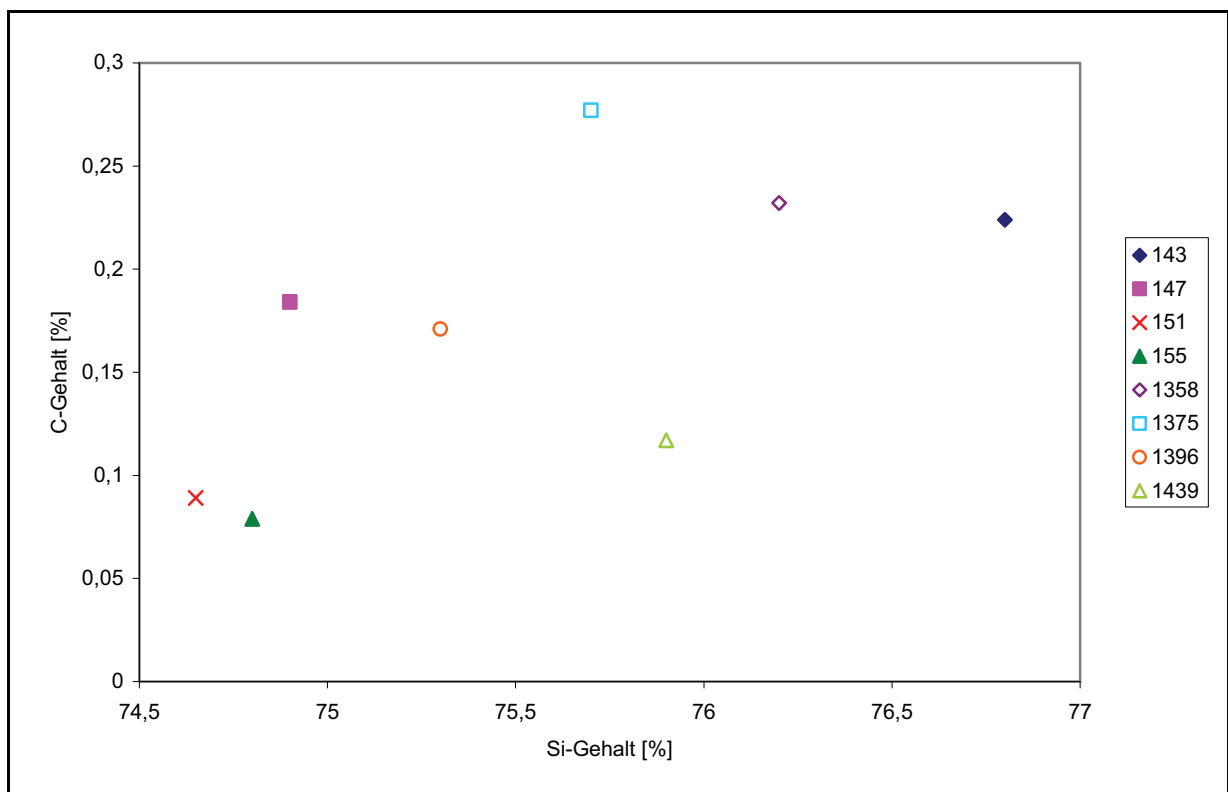


Abbildung 86: Si-Gehalt gegen C-Gehalt des Ferrosiliziums der verschiedenen Chargen

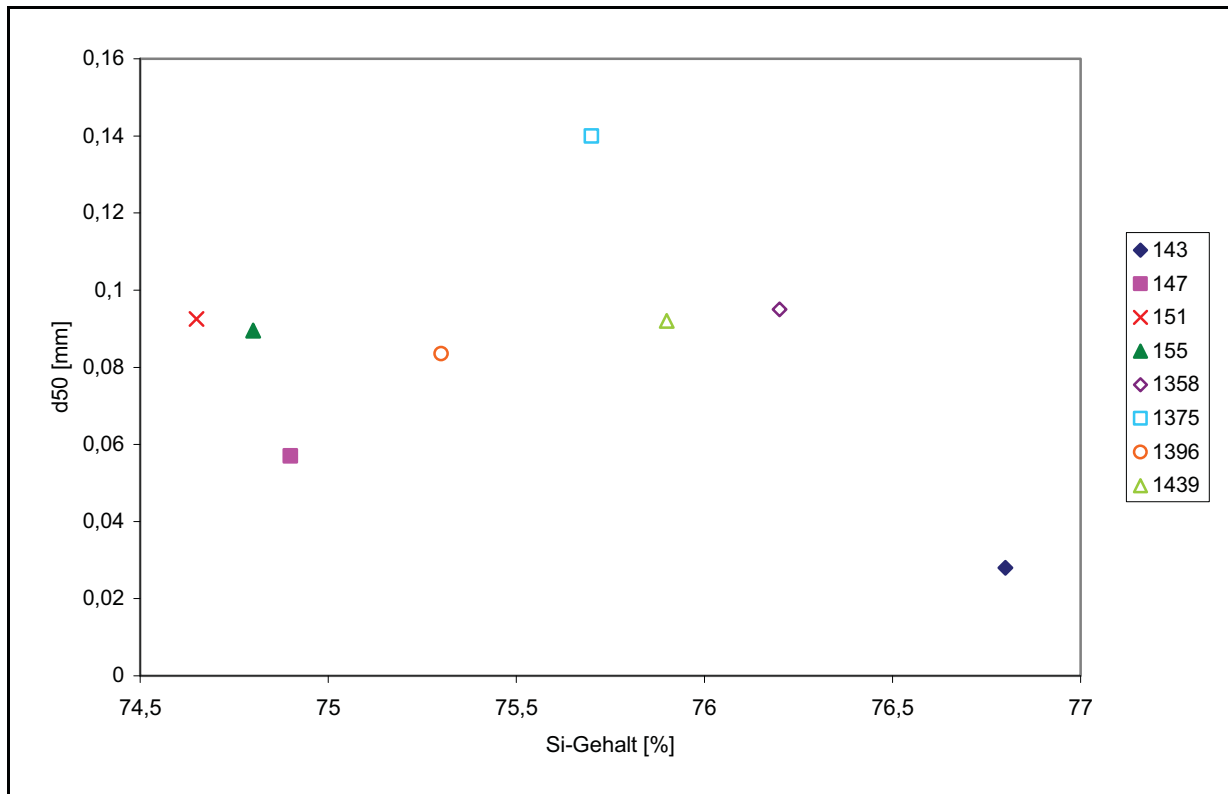


Abbildung 87: Si-Gehalt gegen d50 des Ferrosiliziums verschiedener Chargen

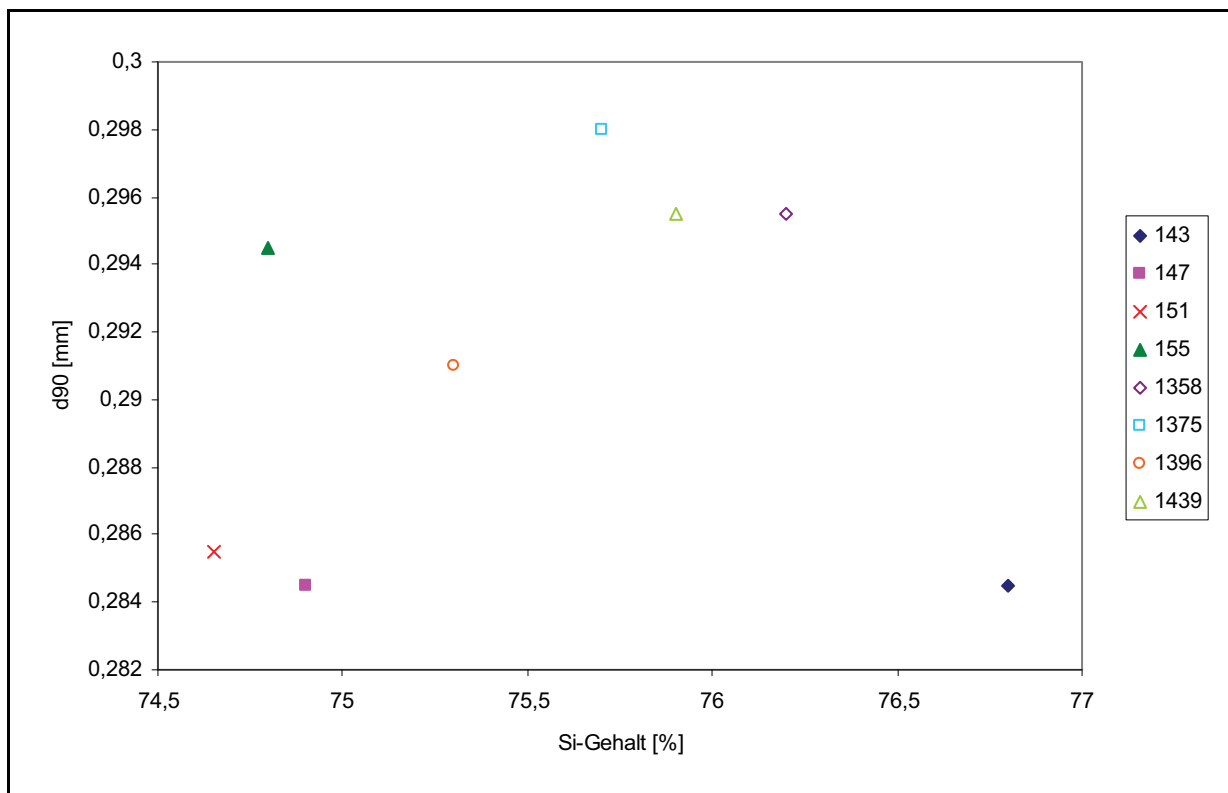


Abbildung 88: Si-Gehalt gegen d90 des Ferrosiliziums verschiedener Chargen

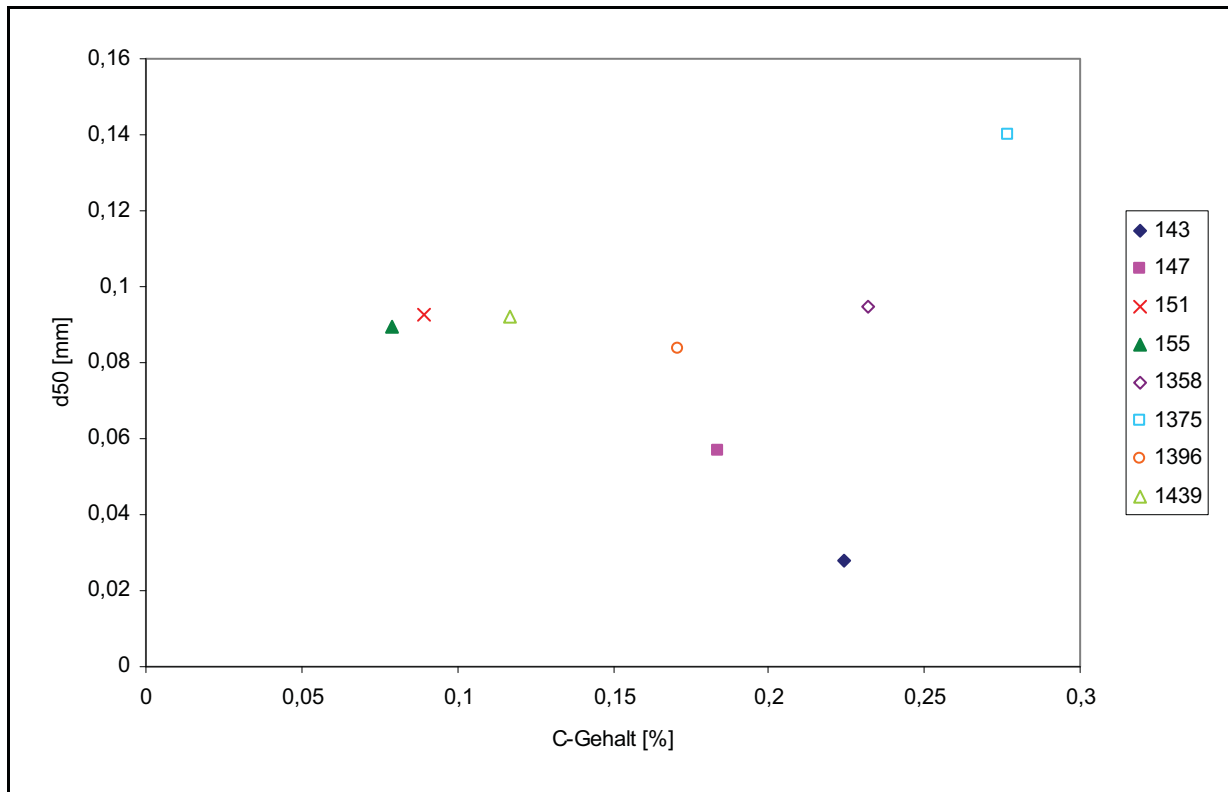


Abbildung 89: C-Gehalt gegen d50 des Ferrosiliziums verschiedener Chargen

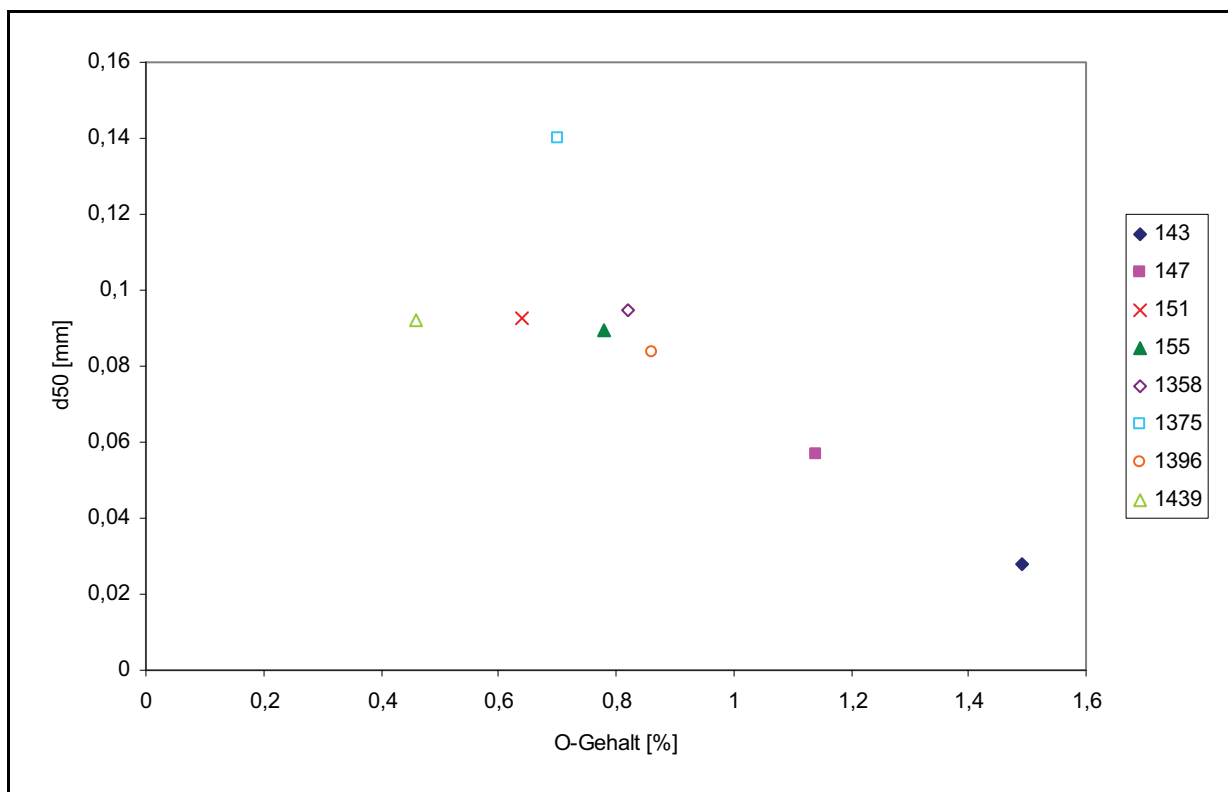


Abbildung 90: O-Gehalt gegen d50 des Ferrosiliziums verschiedener Chargen

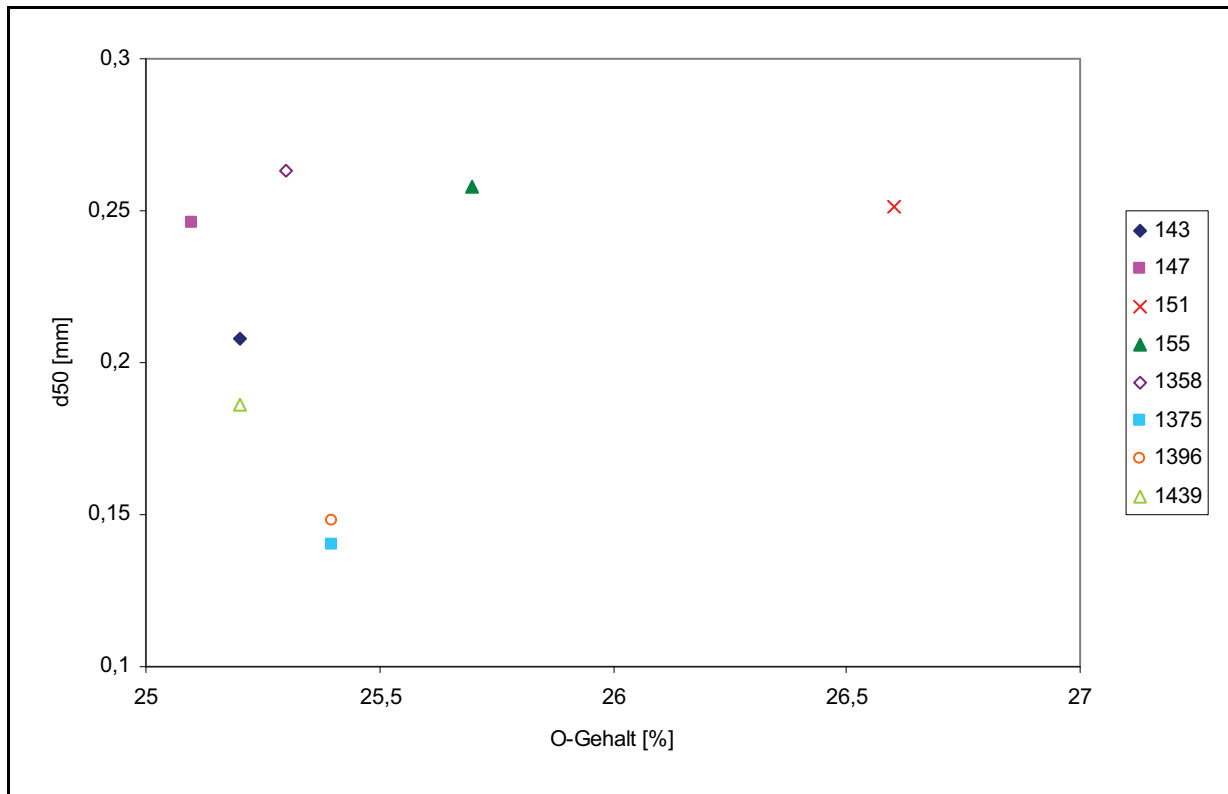


Abbildung 91: O-Gehalt gegen d50 des Walzenzunders verschiedener Chargen

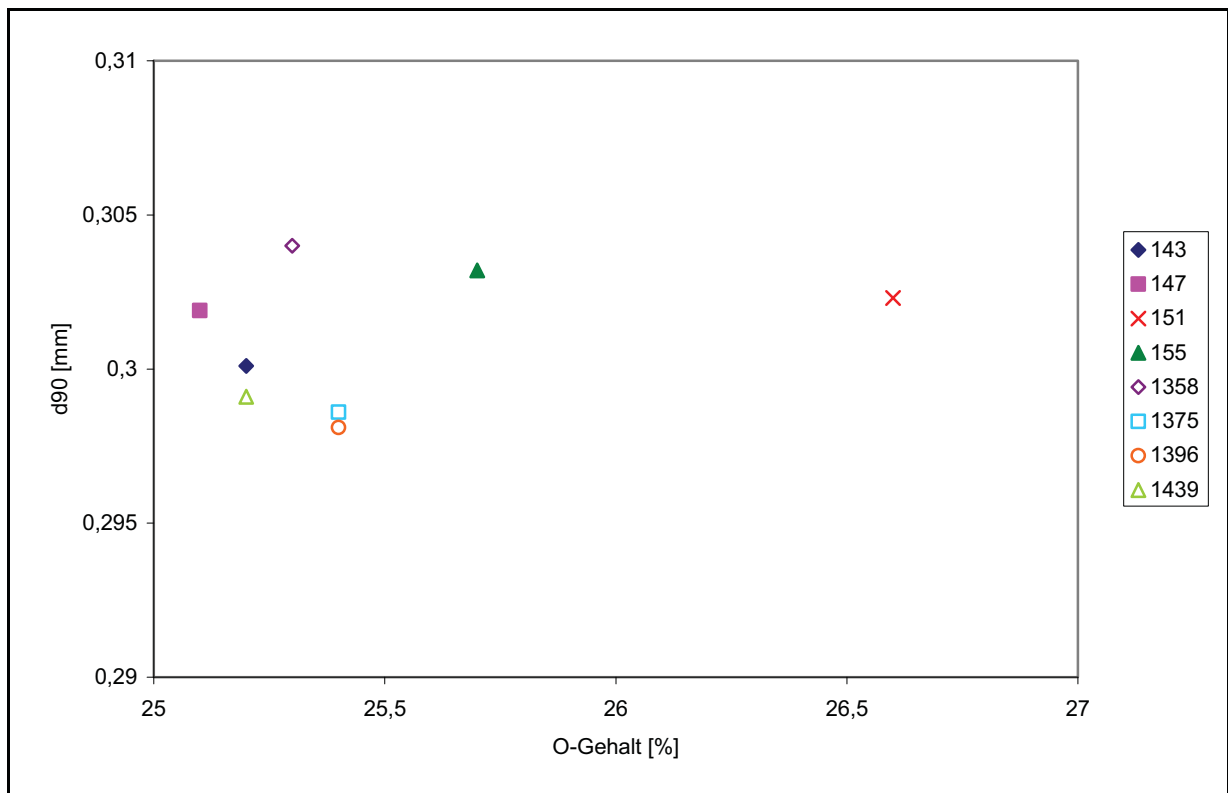


Abbildung 92: O-Gehalt gegen d90 des Walzenzunders verschiedener Chargen

## Anhang B

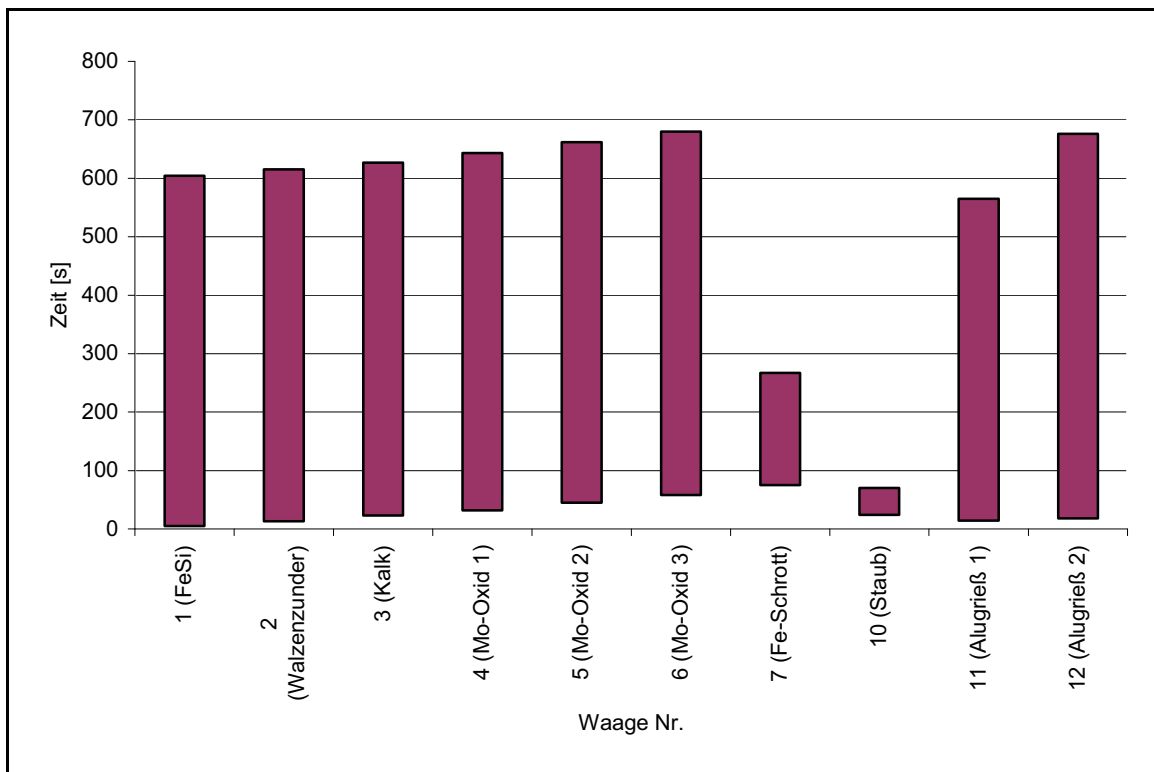


Abbildung 93: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 143 I)

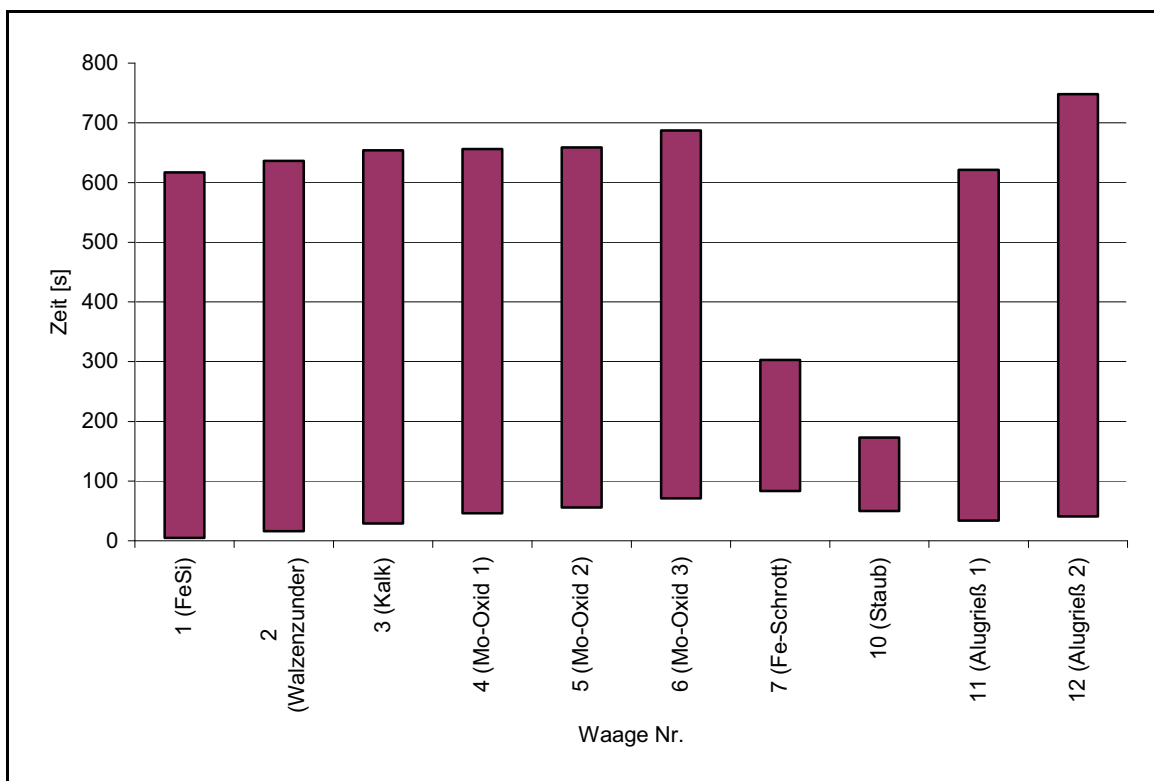


Abbildung 94: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 143 II)

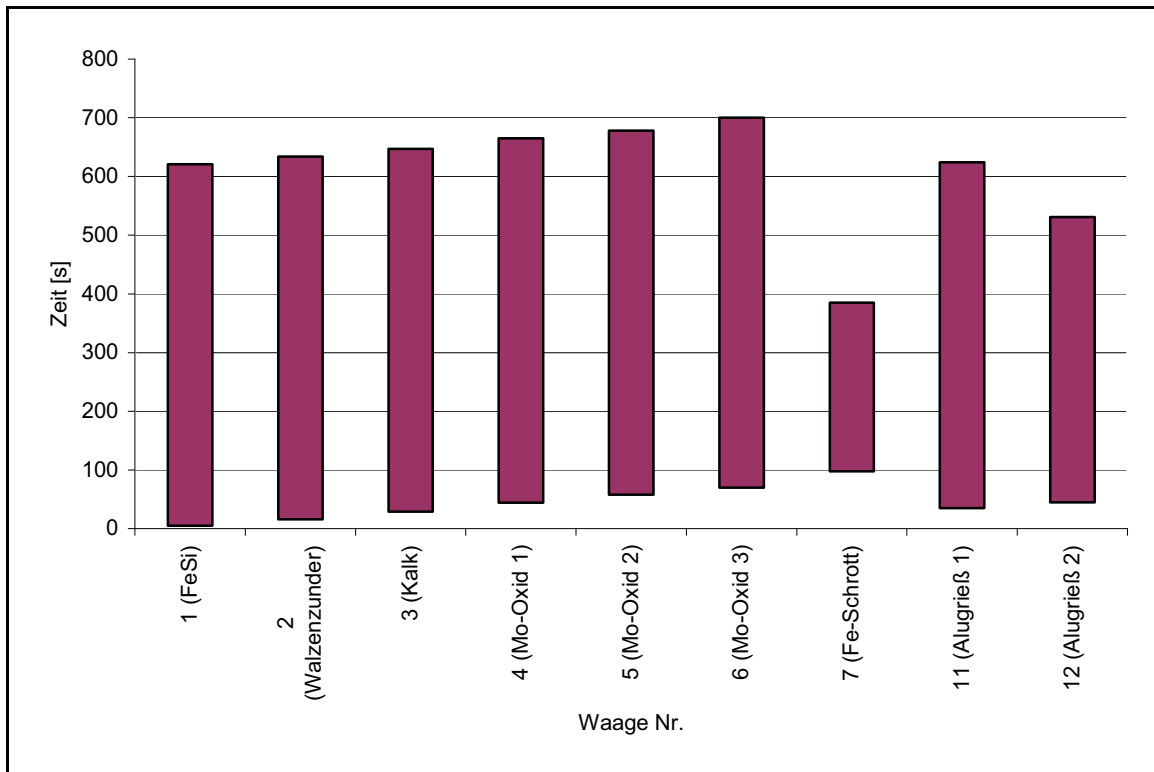


Abbildung 95: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 147 I)

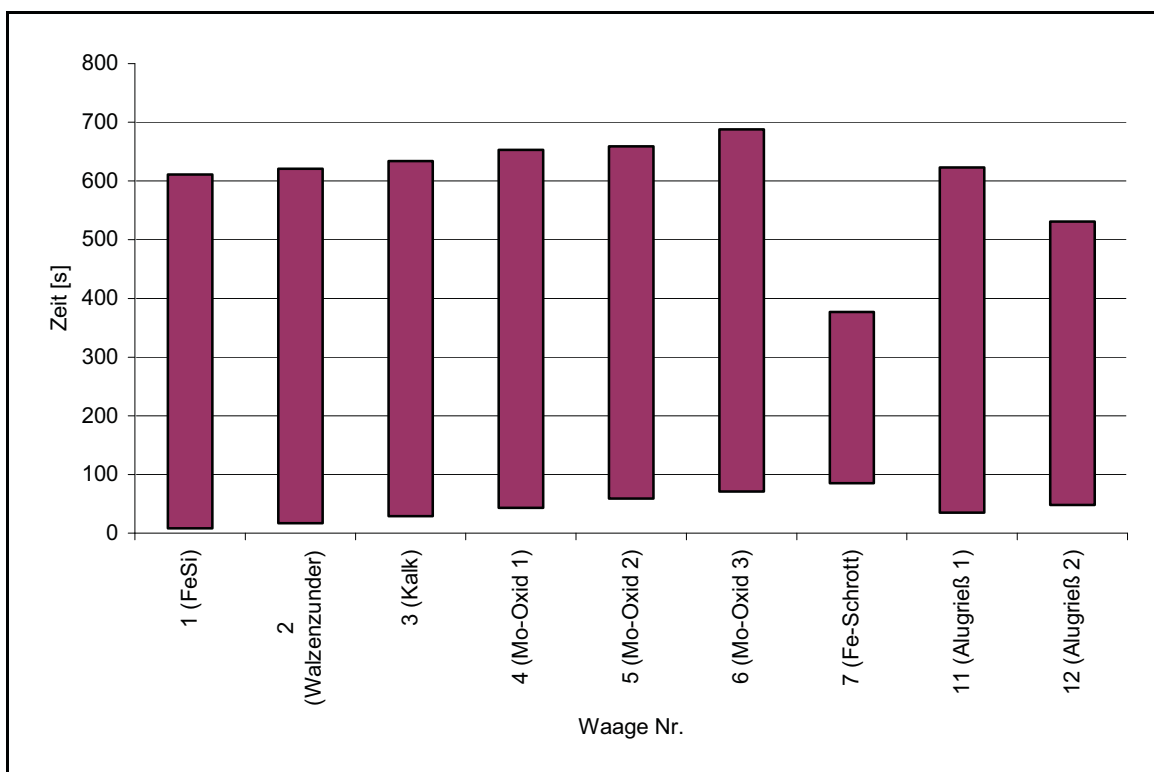


Abbildung 96: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 147 II)



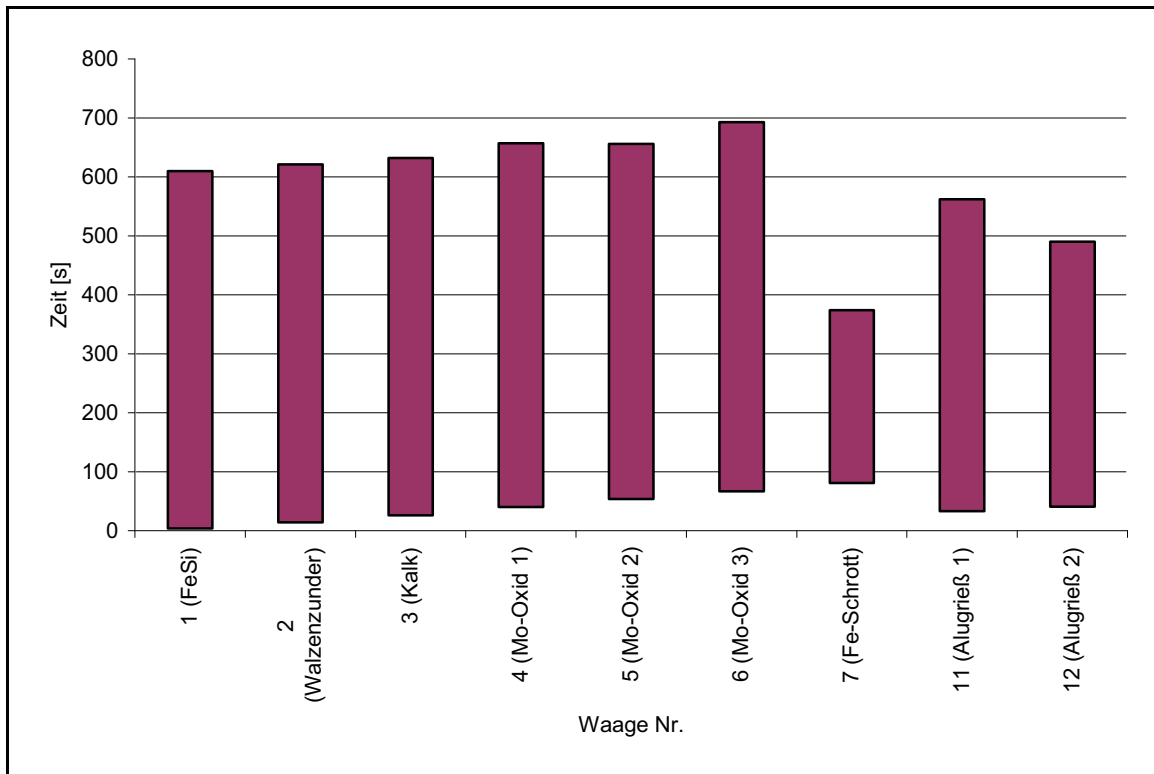


Abbildung 97: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 151 I)

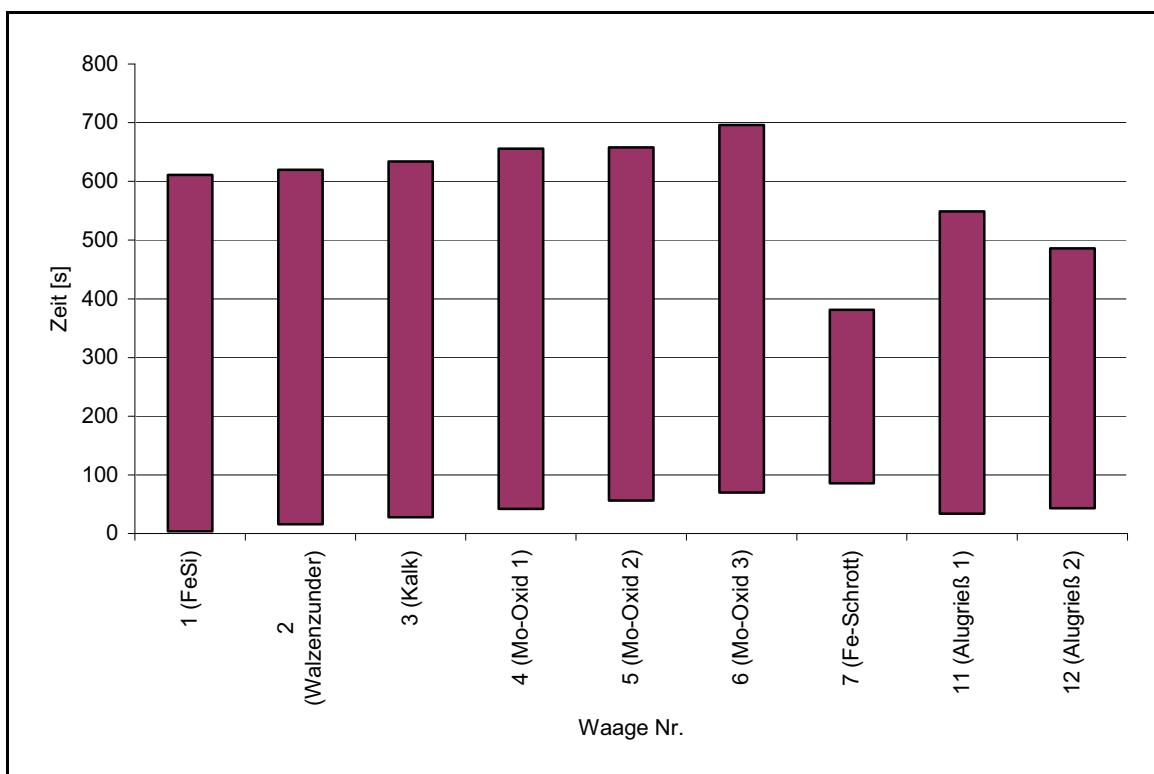


Abbildung 98: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 151 II)

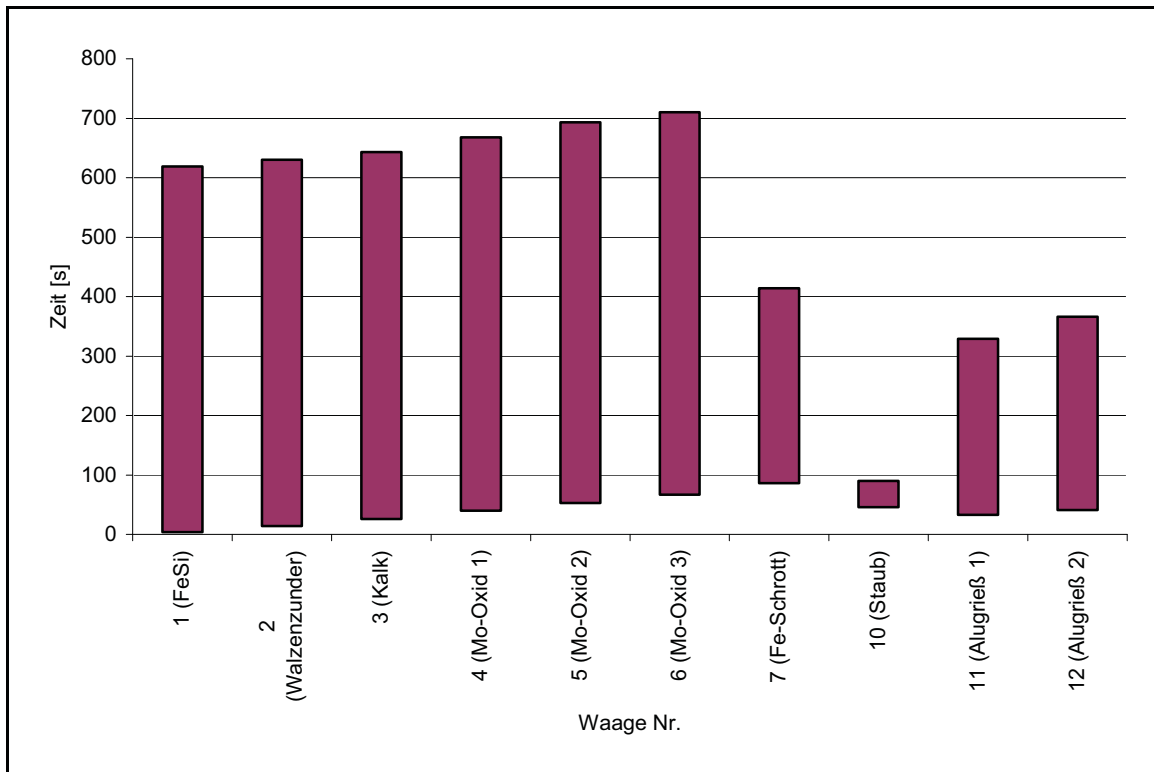


Abbildung 99: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 155 I)

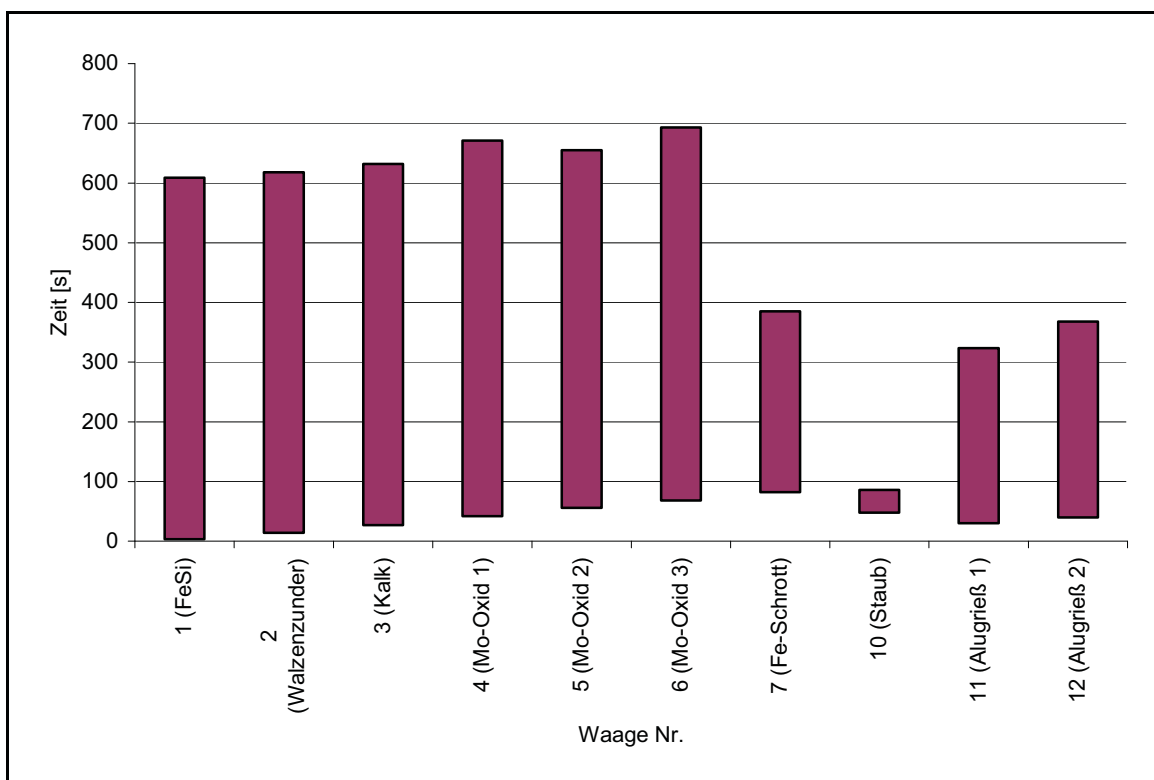


Abbildung 100: Laufzeiten der Möllermischanlage (Charge 155 II)

Tabelle 40: Input der Standardabbrandversuche (4 kg Standardmöller)

	[kg]	
Möller	Mo-Konzentrat FL 74	2,0227
	FeSi 75,5%ig	0,6476
	Walzenzunder	0,7017
	Branntkalk	0,2200
	Fe-Schrott fein	0,2092
	Alugrieß	0,1988
	Summe	4,0000
Zündmischung	Al	0,0267
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0533
	Summe	0,0800

Tabelle 41: Analysenergebnisse der Standardabbrandversuche

		Standard 1		Standard 2	
		[%]	[kg]	[%]	[kg]
Schlacke	Menge Schlacke		2,00		1,95
	Mo	2,59		4,00	
	SiO <sub>2</sub>	37,10	0,7505	34,00	0,6649
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,40	0,4329	19,30	0,3775
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,10	0,3864	22,10	0,4322
	CaO	11,10	0,2245	10,90	0,2132
	MoO <sub>3</sub>	4,31	0,0872	6,86	0,1342
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,10	0,0425	1,67	0,0327
	Na <sub>2</sub> O	1,83	0,0370	1,73	0,0338
	MgO	0,78	0,0157	2,48	0,0485
	WO <sub>3</sub>	0,67	0,0135	0,20	0,0040
	MnO	0,49	0,0099	0,47	0,0091
Metall	Menge Metall		1,80		1,72
	Mo	62,90	1,1322	64,45	1,1085
	Cu	0,10	0,0018	0,07	0,0012
	Si	1,26	0,0227	1,19	0,0205
	C	0,02	0,0004	0,02	0,0003
	S	0,04	0,0007	0,04	0,0007
	Fe	35,68	0,6422	34,23	0,5888

Tabelle 42: Input der Abbrandversuche Charge 147 und 155 (3 kg Standardmöller)

	[kg]	
Möller	Mo-Konzentrat FL 74	1,5170
	FeSi 75,5%ig	0,4857
	Walzenzunder	0,5263
	Branntkalk	0,1650
	Fe-Schrott fein	0,1569
	Alugrieß	0,1491
	Summe	3,0000
Zündmischung	Al	0,0267
	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0533
	Summe	0,0800



Tabelle 45: Ergebnisse der Elementbilanz Charge 147 (Verluste bereits abgezogen)

Charge 147								
[kg]	Probe unten	Probe oben	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6
Al	0,0520	0,0190	0,0097	0,0260	0,0490	0,0230	0,0480	0,0390
C	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Ca	0,0340	0,0280	0,0430	0,0420	0,0380	0,0400	0,0400	0,0530
Cu	0,0005	0,0005	0,0015	0,0005	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Fe	0,2580	0,2720	0,2700	0,2310	0,1710	0,1960	0,1850	0,1820
Mg	-0,0010	0,0320	0,0090	0,0140	0,0280	0,0320	0,0020	0,0150
Mn	0,0015	0,0025	0,0015	0,0025	0,0005	0,0005	0,0005	0,0015
Mo	0,2555	0,3195	0,2845	0,3615	0,3515	0,3375	0,3025	0,3695
Na	-0,0105	-0,0005	-0,0015	-0,0035	0,0025	0,0025	0,0015	-0,0015
O	0,2480	0,2440	0,2760	0,2440	0,2860	0,3210	0,2610	0,2600
Si	0,1290	0,0960	0,1240	0,0970	0,1400	0,1190	0,1230	0,0880
V	-0,0005	0,0025	0,0035	0,0015	-0,0025	0,0005	-0,0015	0,0035
W	-0,0020	-0,0020	0,0000	-0,0020	-0,0010	0,0010	-0,0010	0,0010

Tabelle 46: Ergebnisse der Elementbilanz Charge 155 (Verluste bereits abgezogen)

Charge 155							
[kg]	Probe unten	Probe oben	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Al	0,0570	0,0600	0,0240	0,0290	0,0290	0,0230	0,0310
C	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Ca	0,0640	0,0690	0,0590	0,0790	0,0740	0,0680	0,1190
Cu	0,0015	0,0015	0,0005	0,0005	0,0015	0,0005	0,0015
Fe	0,1840	0,1930	0,2500	0,1670	0,1920	0,2170	0,1080
Mg	0,0180	0,0020	0,0100	-0,0010	-0,0070	0,0170	0,0180
Mn	0,0005	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Mo	0,2845	0,2905	0,3325	0,3295	0,3215	0,2895	0,3375
Na	0,0005	0,0005	0,0035	0,0055	0,0025	0,0025	-0,0005
O	0,2050	0,2380	0,2980	0,3660	0,2920	0,2980	0,2740
Si	0,1040	0,1080	0,1020	0,1340	0,1070	0,1060	0,0710
V	-0,0035	0,0005	0,0015	0,0045	0,0005	0,0015	0,0025
W	-0,0020	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0010	0,0000	0,0000

Tabelle 47: Analysenübersicht Schlackenproben Absetzversuche

	Probe	RFA-Analyse [% Mo]	ICP-Analyse [% Mo]
Charge 143	Guss-Schlacke	0,64	
	Oberfläche 1	1,60	2,00
	Probe 1	0,98	1,10
	Probe 2	1,13	1,45
	Probe 3	2,62	4,10
	Gießschlacke Anfang		0,65
	Gießschlacke Mitte		0,65
Charge 147	Guss-Schlacke	0,49	
	Oberfläche 1	2,27	3,00
	Probe 1	1,71	2,10
	Probe 2	0,89	0,95
	Probe 3	1,07	1,70
	Probe 4	0,87	1,00
	Gießschlacke Anfang		0,60
	Gießschlacke Mitte		0,55
Charge 151	Guss-Schlacke	0,49	
	Oberfläche 1	0,82	0,90
	Probe 1	3,62	4,60
	Probe 2	2,55	4,10
	Probe 3	1,69	2,30
	Probe 4	4,70	5,90
	Gießschlacke Anfang		0,60
	Gießschlacke Mitte		0,60
Charge 155	Guss-Schlacke	1,40	
	Oberfläche 1	2,66	3,20
	Oberfläche 2	2,17	2,35
	Probe 1	1,91	1,70
	Probe 2	1,88	1,90
	Probe 3	1,56	1,40
	Probe 4	1,46	1,30
	Gießschlacke Anfang		1,30
	Gießschlacke Mitte		1,20

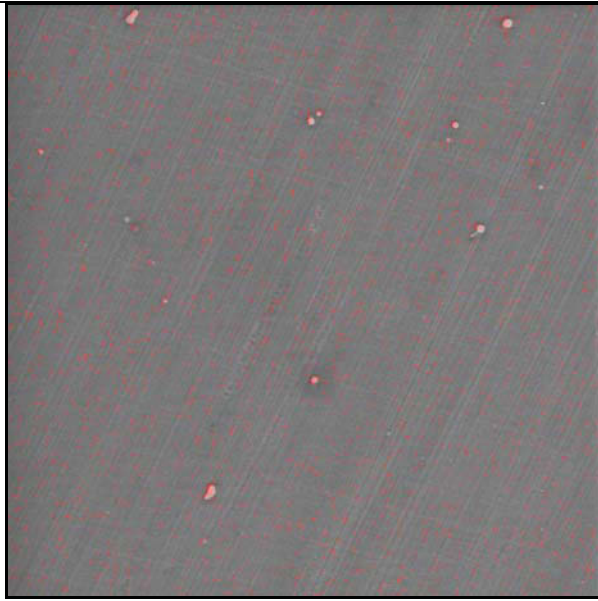


Abbildung 101: Schlackenprobe 1 - Charge 143  
(1000fache Vergrößerung)

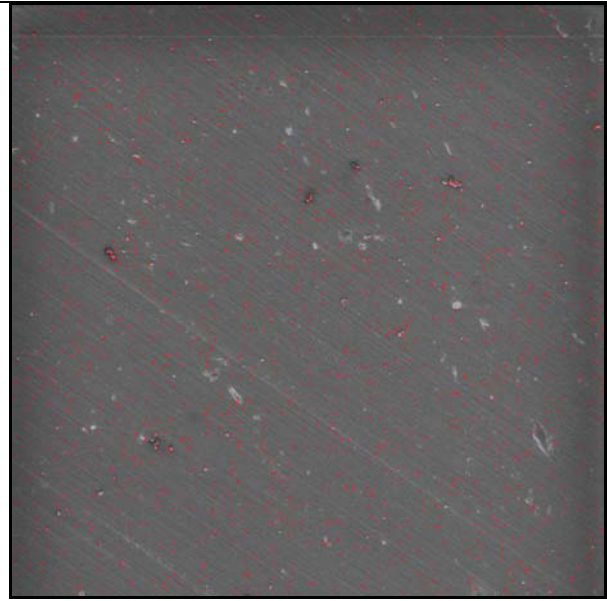


Abbildung 102: Schlackenprobe 2 – Charge 143  
(1000fache Vergrößerung)

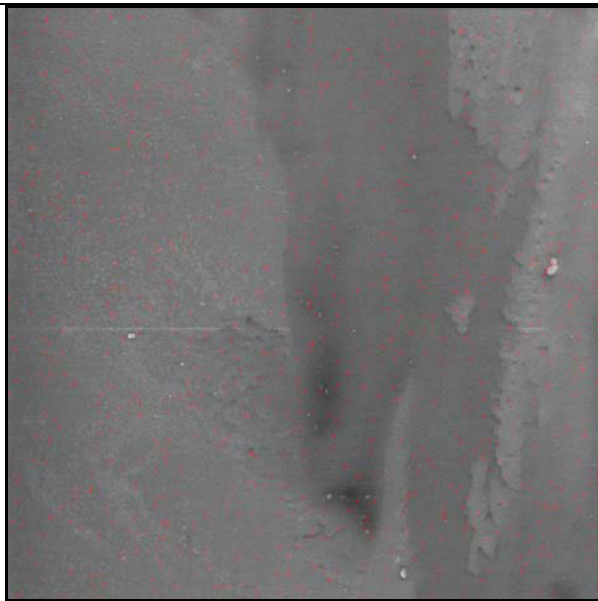


Abbildung 103: Schlackenprobe 3 - Charge 143  
(1000fache Vergrößerung)

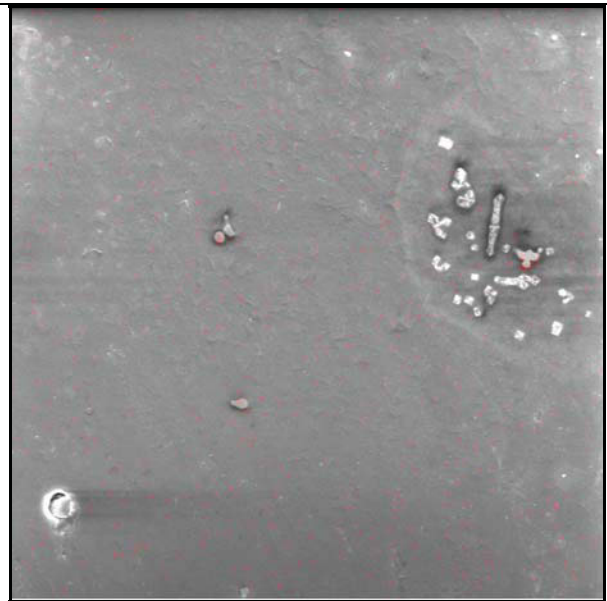


Abbildung 104: Schlackenprobe Oberfläche -  
Charge 143 (1000fache  
Vergrößerung)



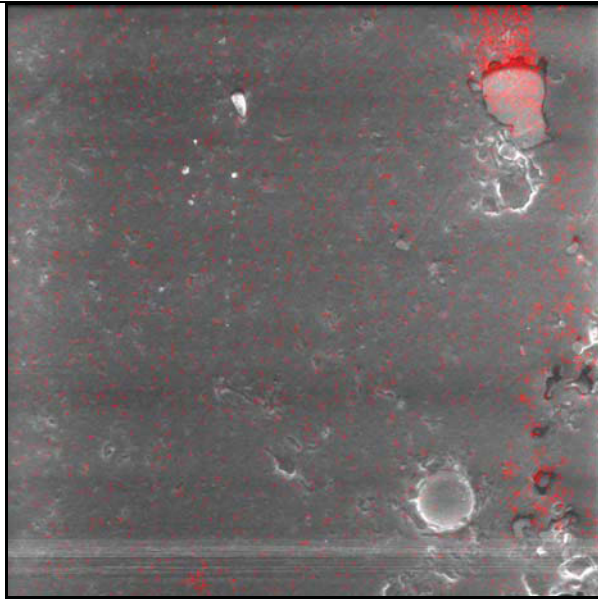


Abbildung 105: Schlackenprobe 1 - Charge 147  
(1000fache Vergrößerung)

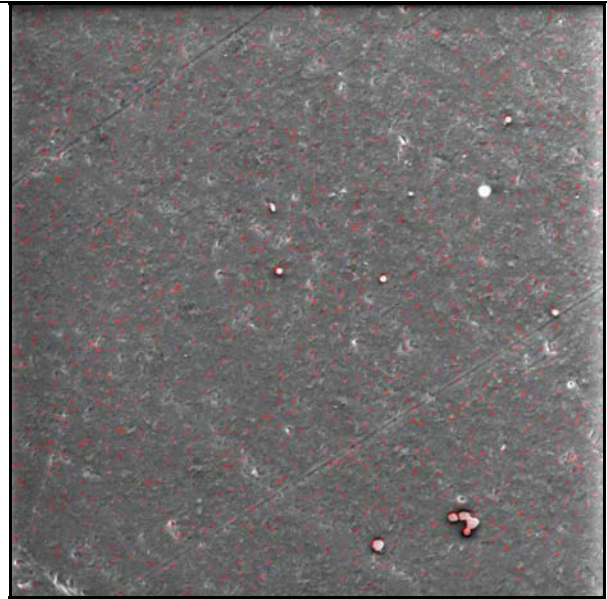


Abbildung 106: Schlackenprobe 2 - Charge 147  
(1000fache Vergrößerung)



Abbildung 107: Schlackenprobe 3 - Charge 147  
(1000fache Vergrößerung)



Abbildung 108: Schlackenprobe 4 - Charge 147  
(1000fache Vergrößerung)



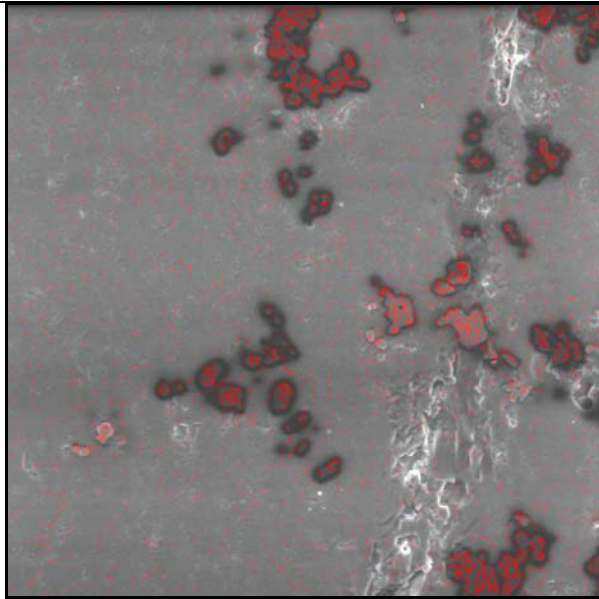


Abbildung 109: Schlackenprobe 1 - Charge 151  
(1000fache Vergrößerung)

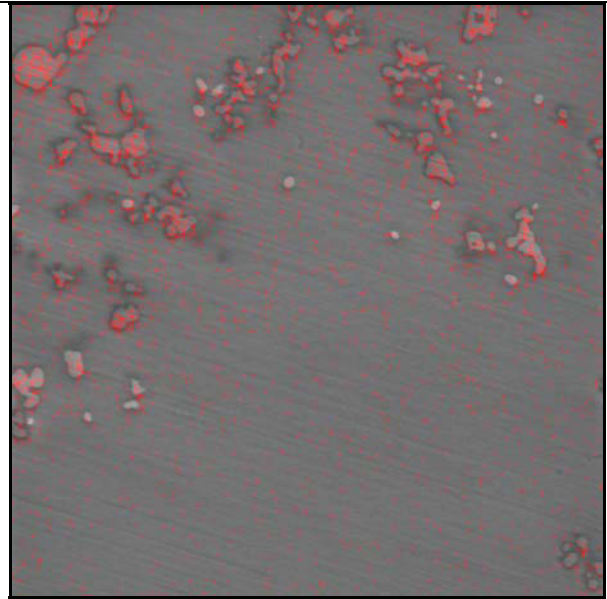


Abbildung 110: Schlackenprobe 2 - Charge 151  
(1000fache Vergrößerung)

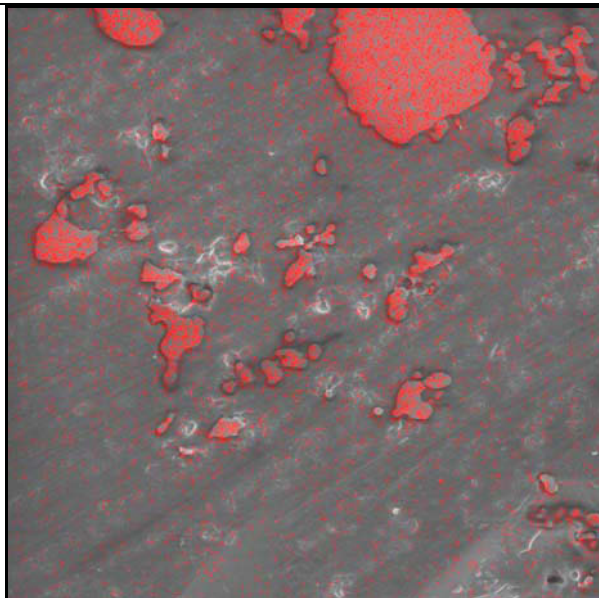


Abbildung 111: Schlackenprobe 3 - Charge 151  
(1000fache Vergrößerung)

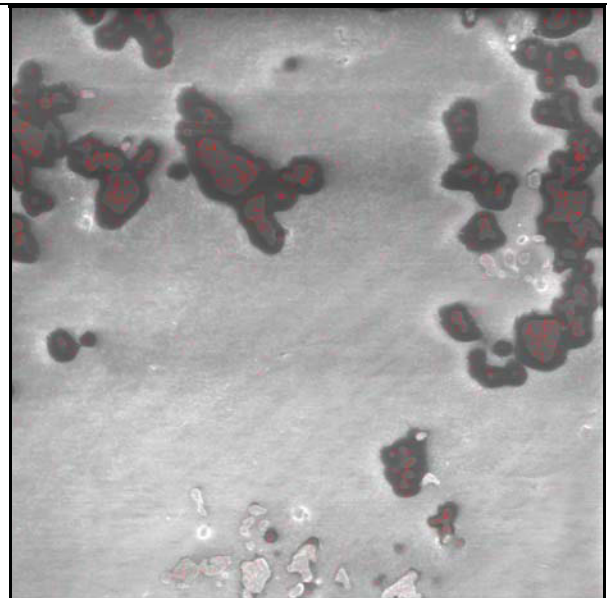


Abbildung 112: Schlackenprobe 4 - Charge 151  
(1000fache Vergrößerung)

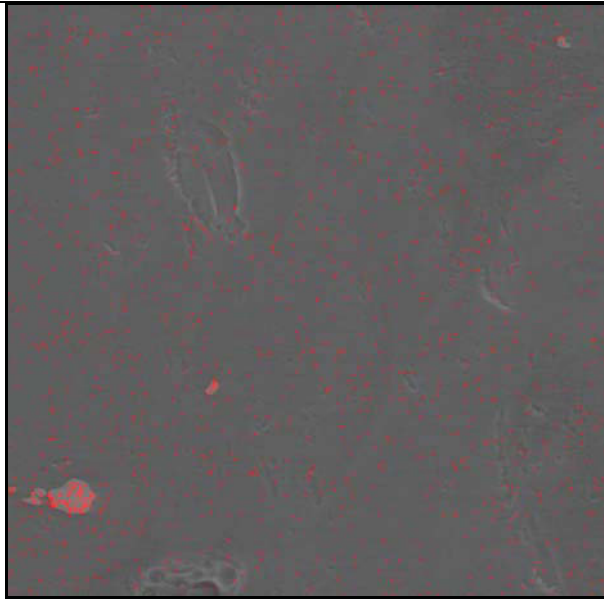


Abbildung 113: Schlackenprobe Oberfläche -  
Charge 151 (1000fache  
Vergrößerung)



Abbildung 114: Schlackenprobe 1 - Charge 155  
(1000fache Vergrößerung)

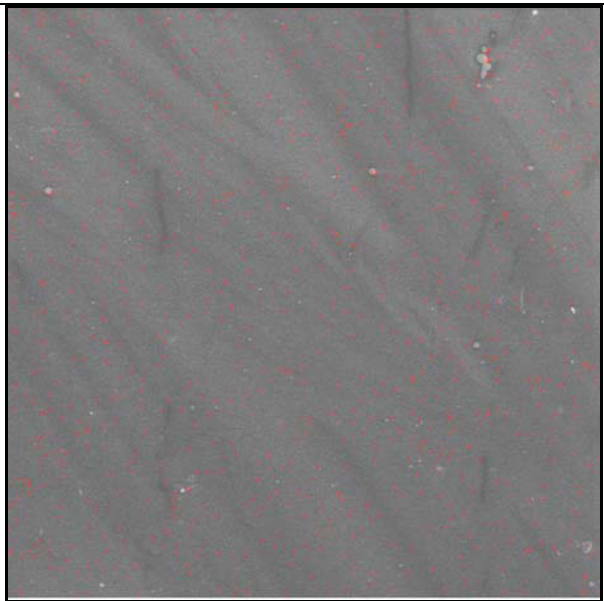


Abbildung 115: Schlackenprobe 2 - Charge 155  
(1000fache Vergrößerung)

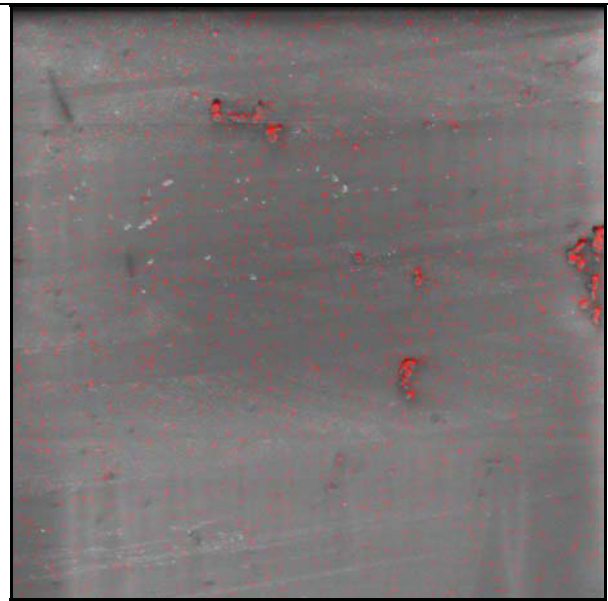


Abbildung 116: Schlackenprobe 3 - Charge 155  
(1000fache Vergrößerung)



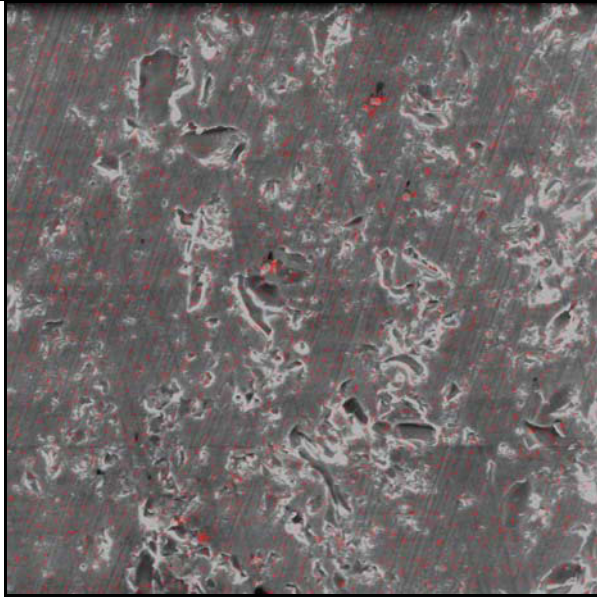


Abbildung 117: Schlackenprobe 4 - Charge 155  
(1000fache Vergrößerung)

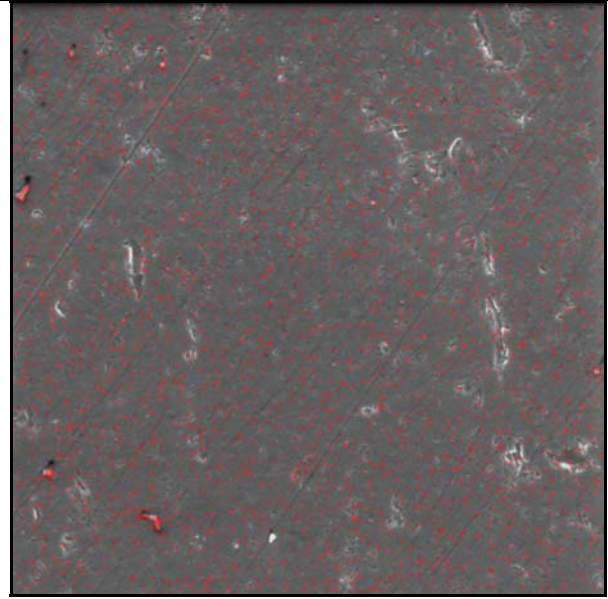


Abbildung 118: Schlackenprobe Oberfläche1 -  
Charge 155 - (1000fache  
Vergrößerung)

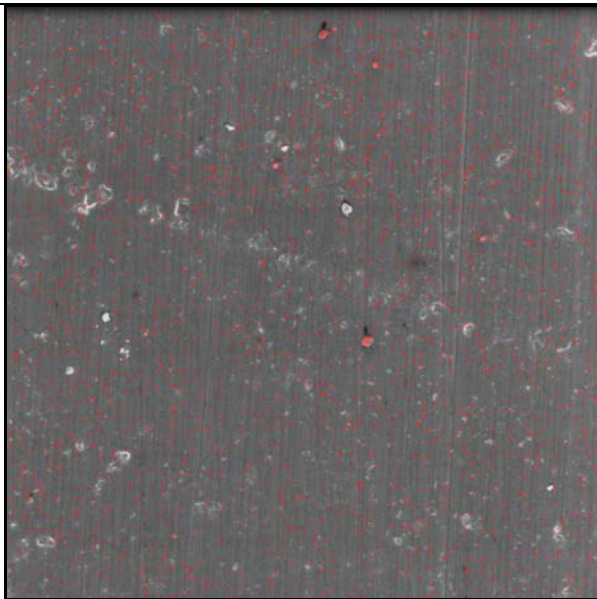


Abbildung 119: Schlackenprobe Oberfläche 2 -  
Charge 155 (1000fache  
Vergrößerung)

Tabelle 48: Si-Bilanz der Pilotversuche

	Versuch 1			Versuch 2		
	Menge [kg]	Si [%]	Si [kg]	Menge [kg]	Si [%]	Si [kg]
FeSi	74,57	75,5	56,3	74,57	75,5	56,3
Mo-Oxid	262,01	2,7	7,1	262,01	2,7	7,1
Summe Input			63,4			63,4
FeMo	241,45	1,6	3,9	241,45	1,2	2,9
Schlacke	258,55	18,6	48,1	258,55	18,8	48,6
Summe Output			52,0			51,5

Tabelle 49: Al-Bilanz der Pilotversuche

	Versuch 1			Versuch 2		
	Menge [kg]	Al [%]	Al [kg]	Menge [kg]	Al [%]	Al [kg]
Alugieß NonFerrum	16,8	100	16,8	16,8	100	16,8
Alugieß Traxys	5,04	100	5,0	5,04	100	5,0
Mo-Oxid	262,01	0,45	1,2	262,01	0,45	1,2
Summe Input			23,0			23,0
FeMo	241,45	0	0,0	242	0	0,0
Schlacke	258,55	11,4	29,5	258	11,1	28,6
Summe Output			29,5			28,6

Tabelle 50: Fe-Bilanz der Pilotversuche

	Versuch 1			Versuch 2		
	Menge [kg]	Fe [%]	Fe [kg]	Menge [kg]	Fe [%]	Fe [kg]
FeSi	74,57	24,5	18,3	74,57	24,5	18,3
Mo-Oxid	262,01	4	10,5	262,01	4	10,5
Walzenzunder	87,34	72,4	63,2	87,34	72,4	63,2
Fe-Schrott	26,87	100	26,9	26,87	100	26,9
Fe-Ring	5,00	100	5,0	5,00	100	5,0
Summe Input			123,9			123,9
FeMo	241,45	28,915	69,8	241,45	30,53	73,7
Schlacke	258,55	16,31	42,2	258,55	16,91	43,7
Summe Output			112,0			117,4

Tabelle 51: Analyse und Auswaagen des FeMo-Blockes Charge 1097

[%]	10 - 50 mm	0 - 10 mm	Randzone		
Mo	65,95	62,65	59,60		
Cu	0,38	0,41	0,44		
Si	1,56	1,58	1,54		
C	0,03	0,02	0,01		
S	0,04	0,04	0,03		
Fe	32,05	35,31	38,38		
Auswaagen	> 10 mm	0 - 1 mm	1 - 5 mm	5 - 10 mm	Summe
kg	2330	130	300	150	2910
%	80,07	4,47	10,31	5,15	100

Tabelle 52: Mo-Analyse der Schlacke Charge 1097

Probe	Mo-Gehalt [%]
Schlacke Oberfläche	10,07
Schlacke Mitte unten	1,10
Schlacke Ø Mitte	0,43
Schlacke Rand oben	0,39
Schlacke Rand unten 1	0,87
Schlacke Rand unten 2	1,38

Tabelle 53: Gesamtanalyse der Schlackenproben Charge 1097 (Oxide)

[%]	Schlacke Oberfläche	Schlacke Mitte unten	Schlacke Ø Mitte	Schlacke Rand oben	Schlacke Rand unten 1	Schlacke Rand unten 2
SiO <sub>2</sub>	32,2	38,2	40,0	38,3	40,6	39,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,6	27,8	24,1	28,3	23,5	24,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,9	15,3	18,7	15,9	18,6	18,4
CaO	11,8	14,2	14,7	14,6	14,1	13,9
MoO <sub>3</sub>	18,8	2,8	1,0	1,2	1,7	2,7

Tabelle 54: Analyse des FeMo-Blockes Charge 1098

[%]	10 - 50 mm	0 - 10 mm
Mo	71,10	71,65
Cu	0,35	0,31
Si	1,16	1,24
C	0,02	0,02
S	0,03	0,03
Fe	27,34	26,75

Tabelle 55: Mo-Analyse der Schlacke Charge 1098

Probe	Mo-Gehalt [%]
Gussschlacke Anfang	0,34
Gussschlacke Mitte	0,33
Gussschlacke Ende	0,34
Schlackenschöpfprobe	0,49

Tabelle 56: Gesamtanalyse der Schlackenproben Charge 1098 (Oxide)

[%]	Gussschlacke Anfang	Gussschlacke Mitte	Gussschlacke Ende	Schlackenschöpfprobe
SiO <sub>2</sub>	42,9	41,7	43,9	41,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,8	26,6	24,1	26,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,2	15,2	16,1	15,5
CaO	13,2	13,5	13,2	13,4
MoO <sub>3</sub>	0,7	0,8	0,6	1,1

Tabelle 57: Analyse und Auswaagen des FeMo-Blockes Charge 1106

[%]	10 - 50 mm	0 - 10 mm	Randzone
Mo	67,05	65,35	59,00
Cu	0,41	0,40	0,51
Si	1,32	1,45	1,55
C	0,02	0,02	0,01
S	0,03	0,03	0,04
Fe	31,17	32,75	38,89

Auswaagen	> 10 mm	0 - 1 mm	1 - 5 mm	5 - 10 mm	Summe
kg	2320	100	240	120	2780
%	83,45	3,60	8,63	4,32	100

Tabelle 58: Mo-Analyse der Schlacke Charge 1106

Probe	Mo-Gehalt [%]
Schlacke Mitte oben	0,53
Schlacke Mitte unten	1,21
Schlacke Ø Mitte	0,41
Schlacke Rand oben	0,44
Schlacke Rand unten 1	1,10
Schlacke Rand unten 2	0,52
Schöpfprobe nach Möllereintrag Ende	1,12

Tabelle 59: Gesamtanalyse der Schlackenproben Charge 1106 (Oxide)

[%]	Schlacke Mitte oben	Schlacke Mitte unten	Schlacke Ø Mitte	Schlacke Rand oben	Schlacke Rand unten 1	Schlacke Rand unten 2	Schöpfprobe nach Möllereintrag
SiO <sub>2</sub>	37,2	39,5	38,5	39,8	40,3	38,7	40,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,6	26,6	27,3	26,5	25,6	27,6	28,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,2	17,0	17,9	18,0	17,4	17,4	14,5
CaO	14,0	13,2	13,9	13,4	12,9	13,6	13,2
MoO <sub>3</sub>	1,4	2,3	1,0	0,9	1,9	1,2	2,1

Tabelle 60: Analyse und Auswaagen des FeMo-Blockes Charge 1107

[%]	10 - 50 mm	0 - 10 mm	Randzone		
Mo	67,20	65,30	58,25		
Cu	0,38	0,40	0,46		
Si	1,32	1,61	0,66		
C	0,02	0,02	0,03		
S	0,03	0,03	0,03		
Fe	31,06	32,64	40,57		
Auswaagen	> 10 mm	0 - 1 mm	1 - 5 mm	5 - 10 mm	Summe
kg	1880	62	148	82	2172
%	86,56	2,85	6,81	3,78	100

Tabelle 61: Mo-Analyse der Schlacke Charge 1107

Probe	Mo-Gehalt [%]
Gussschlacke Anfang	0,68
Gussschlacke Mitte	0,62
Gussschlacke Ende	0,67
Schlackenschöpfprobe	1,41

Tabelle 62: Gesamtanalyse der Schlackenproben Charge 1107 (Oxide)

[%]	Gussschlacke Anfang	Gussschlacke Mitte	Gussschlacke Ende	Schlackenschöpfprobe
SiO <sub>2</sub>	39,5	38,3	38,8	37,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,2	30,5	30,1	30,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,3	13,9	14,0	13,4
CaO	13,5	13,9	13,6	13,6
MoO <sub>3</sub>	1,6	1,7	1,7	3,3

Tabelle 63: Übersicht Analysenergebnisse der Betriebsversuche (Durchschnittswerte)

	Mo im Metallblock [%]	Mo in der Schlacke [%]
Charge 1097	65,3	0,43
Charge 1098	71,2	0,34
Charge 1106	66,7	0,41
Charge 1107	66,9	0,66





