



Montanuniversität Leoben - University of Leoben

Department Metallurgie - Department of Metallurgy

Nichteisenmetallurgie - Nonferrous Metallurgy



Diplomarbeit

Thema:

Einsatz von Neuronalen Netzen bei der Ferromolybdänproduktion



Ersteller:

Roland Seereiner

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Ressel

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

Leoben, Mai 12

Neuronale Netze in der Ferromolybdänproduktion

Im Rahmen der Diplomarbeit soll ein umfassendes Möllerberechnungsmodell für die Produktion von Ferromolybdän in den Betrieb eingeführt werden. Das Ziel ist eine Optimierung hinsichtlich der produzierten Molybdänmenge und eine Einsparung der Einsatzstoffe zu erreichen.

Die Grundlage dieser neuen Berechnungsmethode stellt eine ausgedehnte Datenbank, basierend auf thermodynamischen Daten dar. Mithilfe dieser ist es möglich, ein neuronales Netz zu erstellen, welches für die in Frage kommenden Molybdänkonzentrate eine optimierte Möllerszusammensetzung liefert.

Da viele Prozessparameter bislang nur empirisch ermittelt wurden, galt es, ein fundiertes Berechnungssystem aufzubauen, um mit dessen Hilfe auf die im Gehalt an Molybdän und Verunreinigungen schwankenden Rohstoffe schon vorzeitig berücksichtigen zu können und den Möllers so zu mischen, dass ein Maximum an Molybdänausbeute gewährleistet ist.

Mithilfe von mehreren Versuchskampagnen bei der Treibacher Industrie AG sollen die Werte der Gattierungsberechnung des Ferromolybdänbetriebes mit den Abbrandergebnissen des neuronalen Netzes gegenüber gestellt werden.

Da eine genaue Berechnung der Ausbeute nicht möglich ist, kommt als Kennzahl der Molybdängehalt der Schlacke zur Anwendung. Um eine grundsätzliche Korrektheit des Modells zu beweisen, erfolgt die Erstellung von Diagrammen, in denen wichtige Parameter gegenübergestellt werden.

Durch diese Maßnahmen wird eine Produktivitätssteigerung angestrebt, wobei gleichzeitig eine Einsparung an Zuschlagsstoffen erreicht werden soll.

Eidesstattliche Erklärung

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

Leoben, Mai 12

Roland Seereiner

Danksagung

Ich bedanke mich für die großartige Unterstützung bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit bei meinen Betreuern seitens der Nichteisenmetallurgie Herrn Univ.- Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Helmut Antrekowitsch und Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. 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, Herrn Felix Hornbanger sowie den Damen Frau Tupinger und Frau Salbrechter, mit deren Einsatz und Hilfsbereitschaft die Durchführung der Arbeit erst möglich wurde.

Auch meinen Eltern, Othmar und Irmgard Seereiner, möchte ich ganz herzlich für die lange und immerwährende Unterstützung danken.

Kurzfassung

Die Treibacher Industrie AG stellt Ferromolybdän nach dem metallothermischen Produktionsverfahren her. Ziel dieser Arbeit war es, ein umfangreiches Möllerberechnungssystem einzuführen, um mit dessen Hilfe eine auf das jeweilige Konzentrat abgestimmte Möllierzusammensetzung, zu erhalten. Basierend auf thermodynamische Daten konnte ein neuronales Netz erstellt werden, das die Möllierzusammensetzung liefert, welche die Mengen an Zuschlagsstoffen minimiert und die Ausbeute an Molybdän maximiert. Im Rahmen dieser Diplomarbeit erfolgte die Durchführung von Versuchskampagnen, welche die Gattierungsberechnung des Betriebs mit der neuen Berechnungsmethode vergleichen soll.

Das Ergebnis ist eine Optimierungsvariante, die eine höhere Molybdänausbeute bei gleichzeitiger Verringerung der eingesetzten Molybdänrohstoffe gewährleistet.

Abstract

The Treibacher Industrie AG produces ferromolybdenum according to a metallothermic production procedure. The primary intention of this work was to introduce an extensive new calculation model for the burden, to receive an optimised composition of the raw material for every possible concentrate. Based on thermo-dynamic calculated data a neural network has been provided, which should deliver the burden composition in order to gain the best possible yield of molybdenum. Different optimisation campaigns were carried out and examined on their effectiveness. In this work an optimisation variation could be found which leads to low molybdenum values in the slag and to less loss of molybdenum in the slag.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN	2
2.1	Eigenschaften und Anwendungen von Molybdän	3
2.2	Metallurgische Grundlagen bei der Produktion von Ferromolybdän	5
2.2.1	Karbothermisches Verfahren	7
2.2.2	Metallothermische Reduktion.....	8
2.3	Die künstlichen neuronalen Netze	11
2.3.1	Modellierung der Informationsverarbeitung.....	13
2.3.2	Funktionsmodellierung.....	14
2.3.3	Zeitmodellierung	16
2.3.4	Ausgabefunktionen.....	18
2.3.4.1	Binäre Ausgabe	19
2.3.4.2	Begrenzt lineare Ausgabefunktionen	20
2.3.4.3	Sigmoide Ausgabefunktion	22
2.3.5	Topologie künstlicher neuronaler Netzer.....	24
2.3.5.1	Feedforward Netze	25
2.3.5.2	Netze mit Rückkoppelung (rekurrente Netze)	26
2.3.5.3	Mehrschichtige Netze	28
2.3.5.4	Fuzzy-Systeme.....	29
2.3.6	Modellierung des Lernens.....	30
2.3.6.1	Hebb´sche Lernregel	30
2.3.6.2	Überwachtes Lernen.....	31
2.3.6.3	Bestärkendes Lernen.....	32
2.3.6.4	Unüberwachtes Lernen.....	32
2.3.7	Anwendungen von Neuronalen Netzen.....	32
2.3.8	Vorteile von neuronalen Netzen gegenüber statistischen Methoden.....	33
3	PRAKTISCHE UNTERSUCHUNGEN.....	35
3.1	Verfahrensbeschreibung.....	35
3.1.1	Möllermischanlage.....	35
3.1.2	Abbrandstelle.....	36
3.1.3	Schlackenaufbereitung	38
3.1.4	Ferromolybdän Brecherstraße	39
3.1.5	Filteranlage.....	40
3.2	Charakterisierung der Einsatz- und Rohstoffe.....	41
3.2.1	Molybdänkonzentrat	41
3.2.2	Aluminiumgrieß.....	43
3.2.3	Ferrosilizium	45
3.2.4	Kalk	46
3.2.5	Filterstaub.....	46
3.2.6	Walzenzunder.....	47
3.3	Charakterisierung der Produkte	48
3.3.1	Ferromolybdän	48
3.3.2	Schlacke.....	49

3.4	Verwendete Analysegeräte	49
3.4.1	ICP-Analyse.....	49
3.4.2	Korngrößenverteilung	50
3.4.3	RFA-Analyse	50
3.4.4	Leco-Gerät	50
3.5	Erstellung einer Datenbank zur Trendanalyse	51
3.5.1	Vorbereitende Arbeiten und Kontrollen	51
3.5.2	Trendanalyse zur Ermittlung der Betriebsparameter	55
3.6	Berechnung der optimierten Möllermischung	61
3.6.1	Versuchsbeschreibung	61
3.7	Optimierung der Möllerezusammensetzung hinsichtlich einer Viskositätsverminderung.....	61
3.7.1	Auswertung der Chargen aus Kampagne 1	62
3.7.1.1	Möllerezusammensetzung der Chargen aus Kampagne 1	63
3.7.1.2	Diskussion der Abbrandergebnisse	64
3.7.2	Auswertung der Chargen aus Kampagne 2	65
3.7.2.1	Möllerezusammensetzung der Chargen aus Kampagne 2.....	67
3.7.2.2	Diskussion der Abbrandergebnisse	68
3.7.3	Auswertung der Chargen aus Kampagne 3	70
3.7.3.1	Möllerezusammensetzung der Chargen aus Kampagne 3.....	70
3.7.3.2	Diskussion der Abbrandergebnisse	72
3.7.4	Auswertung der Chargen aus Kampagne 4	73
3.7.4.1	Möllerezusammensetzung der Chargen aus Kampagne 4.....	74
3.7.4.2	Diskussion der Abbrandergebnisse	75
3.7.5	Zusammenfassung der Möllermischung mit dem Ziel einer Viskositätsverringerng.....	77
3.8	Abbrandversuche mit Kalziumsilizium.....	78
3.8.1	Auswertung der Chargen aus Kampagne 5	78
3.8.1.1	Möllerezusammensetzung der Chargen aus Kampagne 5.....	79
3.8.1.2	Diskussion der Abbrandergebnisse	80
3.8.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Chargen mit Kalziumsilizium	83
3.9	Kalk- und Walzenzunderreduktion	84
3.9.1	Auswertung der Chargen aus Kampagne 11	84
3.9.1.1	Möllerezusammensetzung der Chargen aus Kampagne 11.....	85
3.9.1.2	Diskussion der Abbrandergebnisse	87
3.9.1.3	Wirtschaftliche Betrachtung der Kampagne 11	89
3.9.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Chargen mit Kalk und Walzenzunderreduktion	91
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	94
5	ZUSAMMENFASSUNG	99
6	AUSBLICK.....	101
7	LITERATUR.....	102
8	TABELLEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS	105

8.1	Abbildungsverzeichnis	105
8.2	Tabellenverzeichnis	107
9	ANHANG A.....	111

1 Einleitung

Dr. Carl Auer von Welsbach war einer der bedeutendsten Forscher seiner Zeit, der sich auf die Schwerpunkte Spektralanalyse und Seltene Erden konzentrierte. 1898 gründete er die damaligen Treibacher Chemischen Werke und legte damit den Grundstein für die Geschichte der heutigen Treibacher Industrie AG (TIAG).

Das heutige Unternehmen gehört zu den international führenden Firmen auf dem Sektor der Chemie und der Metallurgie, dessen Zentrale Althofen (Österreich) darstellt. Weitere Niederlassungen befinden sich in Kanada, Japan, China und Slowenien. Im gesamten Unternehmen sind etwa 600 Mitarbeiter beschäftigt.

Die vorliegende Arbeit entstand für den Geschäftsbereich „Stahl- und Gießereiindustrie“ (Betrieb Ferrolegierungen). Die Verkaufsprodukte dieses Bereiches sind Legierungen wie Ferrovandium und Ferromolybdän, die als Legierungsprodukte in der Stahlindustrie dienen.

Die Elemente Vanadium und Molybdän stellen wichtige Metalle dar, die in Bau- und Werkzeugstählen sowie rostfreien Stählen Verwendung finden.

Der Geschäftsbereich „Keramische Bauteile und Beschichtungen“ produziert Hochleistungsmaterialien wie Strukturkeramik.

Die Sparte „Funktionskeramik“ vertreibt Hochleistungswerkstoffe mit Einsatzgebieten in der Elektro- und Szintillatorkeramik, in keramisch ionenleitenden Membranen und in der Biokeramik.

Das Segment „Hartmetalle und Energiespeicher“ beschäftigt sich mit der Produktion und Vermarktung metallischer Hartstoffe (Carbide) in Pulverform zur Herstellung von Hartmetallwerkzeugen sowie der Wasserstoffspeicherlegierungen.

Die Produktion der Seltenen Erden findet in der Abteilung „Seltene Erden und Chemikalien“ statt und diese kommen bei der Herstellung von Elektronik, Spezialgläsern, Keramik, Katalysatoren, Batterien sowie Pharmazeutika zum Einsatz.

Auch im Bereich des Recyclings ist die Treibacher Industrie AG sehr aktiv. So konzentrieren sich derzeit Bemühungen darauf, metallhaltige Abfälle zu verwerten. Dazu zählen Katalysatoren und Rückstände, die Vanadium, Molybdän oder Nickel beinhalten. Weiters weist das Unternehmen eine Autorisierung zur Behandlung von gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen auf. Hauptentsorgungsstoffe sind dabei Altfarben und Lacke, Werkstättenabfall, Lösemittelgemische und Altöle [1].

Wie oben erwähnt, entstand die vorliegende Arbeit für den Betrieb Ferrolegierung (FL). Das vorrangige Ziel war es, mithilfe eines neuronalen Netzes eine Optimierung des Prozesses

zur Herstellung von Ferromolybdän zu erreichen. Dieses optimierte Möllerberechnungssystem soll Probleme im Produktionsbetrieb minimieren und das Ausbringen sowie die Sicherheit der Belegschaft maximieren. Es berücksichtigt neben Rohstoffspezifikationen auch Prozessparameter wie Viskosität und Schmelzpunkt der entstehenden Schlacke und entstehende Wärme des Prozesses.

2 Grundlagen

Der Name des Molybdäns stammt aus dem Griechischen und entstand aufgrund einer Verwechslung von Molybdänglanz (Abbildung 1) mit der chemischen Formel MoS_2 mit Bleiglanz (Abbildung 2). Das griechische Wort für Blei ist Molybdos aus dem die heutige Bezeichnung Molybdän abstammt.



Abbildung 1: Molybdänglanz [2]

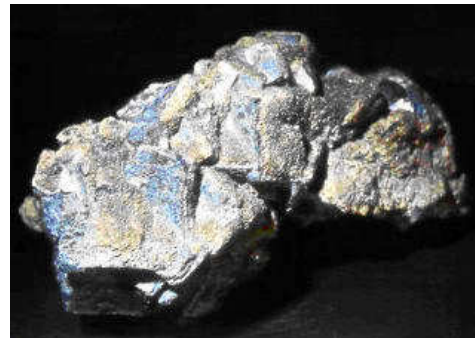


Abbildung 2: Bleiglanz [2]

Hjelm war der erste, der im Jahre 1782 durch Glühen von Molybdänglanz mit einer Vielzahl an Zusätzen ein neues Metall namens Molybdenum entdeckte [3].

Die erstmalige Molybdänproduktion erfolgte im Jahre 1900 bei der Firma Girod in Frankreich aus dem Erz Wulfenit.

Zu einem markanten Anstieg der Molybdänproduktion kam es nach der Prospektierung und Eröffnung der Lagerstätte Climax in Colorado. Grund dafür war der Molybdänglanzabbau in Colorado und dass die Industrie somit nicht mehr auf die Gewinnung von Wulfenit angewiesen war.

2010 betrug die Weltproduktion an Molybdänerzen etwa 242.000 t Molybdäninhalt im Erz. Die größten Lagerstätten sind in China, Chile und in den USA zu finden. Zusammen verfügen diese 3 Nationen über rund 85 % der weltweiten Molybdänreserven.

Die wichtigste Form des Molybdän ist der Molybdänit (MoS_2) auch Molybdänglanz (Abbildung 3) genannt. Weiters existieren noch Wulfenit (Abbildung 4) (PbMoO_4) und Powellit (Abbildung 5) (CaMoO_4).



Abbildung 3: Molybdänit [4]



Abbildung 4: Wulfenit [4]



Abbildung 5: Powellit [4]

2.1 Eigenschaften und Anwendungen von Molybdän

Molybdän ist ein graues Metall, dessen einzige Kristallmodifikation kubisch raumzentriert ist. Es ist gut beständig gegenüber zahlreichen Säuren wie z. B. Fluss- und Salzsäure unter praktisch allen Bedingungen (sofern oxidierende Einflüsse fehlen); Phosphorsäure, Essigsäure, Chromsäure und Schwefelsäure, besonders auch gegen die verdünnten Säuren bei hohen Temperaturen.

Weiters ist es gegen die meisten flüssigen Metalle, darunter Wismut bis zu 1.425 °C sowie Natrium und Natriumdämpfe bis zu 1.500 °C, ferner Silizium und Kupfer; sowie viele nichtmetallischen Schlacken und geschmolzenem Glas beständig. Molybdän wird jedoch von oxidierenden Säuren, z. B. von Salpetersäure und Königswasser angegriffen und oxidiert schnell an Luft oder in oxidierenden Atmosphären bei Temperaturen über 500 °C. Unter 550 °C bilden die niederen, nicht flüchtigen Oxide blaue Oberflächenschichten, welche festhaftend und schützend sind. Bei Temperaturen über 600 °C bildet sich schnell Molybdäntrioxid, das als weißer, ungiftiger Dampf verdunstet.

Diese niederen Oxide, die sich häufig auf warmgewalzten Molybdänprodukten bilden, können leicht mit einem Gemisch aus 90 % KOH und 10 % NaNO₂ bei Temperaturen nahe 500 °C entfernt werden.

Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt die physikalischen Eigenschaften von Molybdän.

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Molybdän [7]

Ordnungszahl	42
Atommasse	$9,595 \cdot 10^{-2}$ kg/mol
Schmelzpunkt	2620 °C
Spezifische Wärmekapazität bei 20 °C bei 1000 °C	251 J/kg·K 293 J/kg·K
Dichte bei 25 °C	10.220 kg/m ³
Zugfestigkeit geglüht kalt verformt	700 - 1000 MPa 1800 MPa
Elastizitätsmodul bei 25 °C bei 980 °C	330.000 MPa 280.000 MPa
Wärmeleitfähigkeit (0 – 100 °C)	137 W/(m·K)
Spez. elektrischer Widerstand bei 20 °C bei 1000 °C	$5,7 \cdot 10^{-4}$ Ω/m $27 \cdot 10^{-4}$ Ω/m

Westeuropa die USA und Japan sind die größten Molybdänverbraucher weltweit. Das vorrangige Anwendungsgebiet für Molybdän liegt im Bereich der Legierungsmetallurgie. 75 % der gesamt benötigten Menge finden im Bereich der Herstellung der hochlegierten Stähle, rostfreien Stähle, Werkzeugstähle und Superlegierungen Anwendung.

Hierbei kommt Molybdän vorrangig in Form von Molybdänoxid oder Ferromolybdän zum Einsatz. Die Stahlindustrie deckt fast 40 % des Molybdänbedarfs über Ferromolybdän ab. Durch diesen hohen Wert ist auch der hohe Preis, der mit dem Stahlboom einhergeht, erklärbar. So stieg der Molybdänpreis im Jahr 2005 auf bis dahin ungekannte Höhen. Ferromolybdän kostete im November 2011 in Europa zwischen 40,5 und 41 US\$/kg, der Weltmarktpreis für Molybdänoxid lag zwischen 35,3 und 35,7 US\$/kg (jeweils bezogen auf den Molybdängehalt). Im Vergleich dazu war das Preisniveau im Jänner 2003 bei 10,4 US\$/kg für FeMo, sowie 7,9 US\$/kg für Molybdänoxid.

Im November 2010 befand sich der Preis für Ferromolybdän immer noch jenseits der 32 US\$/kg Grenze [5], [6].

Wie bei Eisen, führt auch bei Molybdän die Einwirkung von feuchter Luft zur Oxidation. Die silbrig-bläulichen glänzenden Bruchflächen sind charakteristisch für Ferromolybdänlegierungen mit Mo-Gehalten unter 65 %, welche bei höheren Gehalten mattgrau erscheinen. Alternativ zu den beiden üblichen Ferromolybdänqualitäten FeMo65 und FeMo70 kommt auch MoO₃ gemeinsam mit Reduktionsmittelzusatz in Brikettform oder abgefüllt in Metallbüchsen zum Legieren von Stahl zum Einsatz.

Die normalen Verkaufskörnung von Ferromolybdän sind Fraktionen von 0 - 1 mm, 1 - 5 mm, 5 - 10 mm und der größte Teil 5 - 50 mm.

Die Zusammensetzung der Handelsformen ist in DIN 17561 genormt und in der nachfolgenden Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Zusammensetzung von Ferromolybdän nach DIN 17561 [8]

Kurzzeichen	Chemische Zusammensetzung in Gew. -%					
	Mo	Si	C	S _{max.}	P	Cu
FeMo70	60 – 75	1,0	0,10	0,10	0,10	0,50
FeMo65	58 – 65	2,0	0,5	0,10	0,10	1,0

FeMo70 und FeMo65 sind die genormten Handelsformen. Bei diesen ist auf den Gehalt der Elemente Schwefel und Phosphor besonders zu achten.

2.2 Metallurgische Grundlagen bei der Produktion von Ferromolybdän

Der chemische Prozess einer Reduktion beruht auf dem Prinzip der Aufnahme von Elektronen. Ein in oxidischer Form vorliegendes Metall (Metalloxid) nimmt bei einer Reduktion Elektronen auf und liegt dann in metallischer Form vor. Dabei dient Kohlenstoff vielfach als Elektronenquelle, da er vor allem in Form von Koks ein billiges Reduktionsmittel darstellt. Weiters existieren eine Vielzahl von anderen Elektronenquellen, die eine größere Affinität zum Sauerstoff haben als das zu reduzierende Metall wie z. B. Silizium oder Aluminium. Jener Teil der Reaktionspartner, der den Elektronendonator darstellt, bildet mit den nichtmetallischen Teilen der Verbindungen die Schlacke.

Das Gleichgewicht, welches zwischen dem Metall M und seinem Oxid herrscht ist durch die unten dargestellte Gleichung (1) beschrieben.



In der nachfolgenden Abbildung 6 ist die freie Bildungsenthalpie $\Delta_f G^0$ in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene Reduktionsmitteln und für die Molybdänoxide MoO₂ und MoO₃ dargestellt.

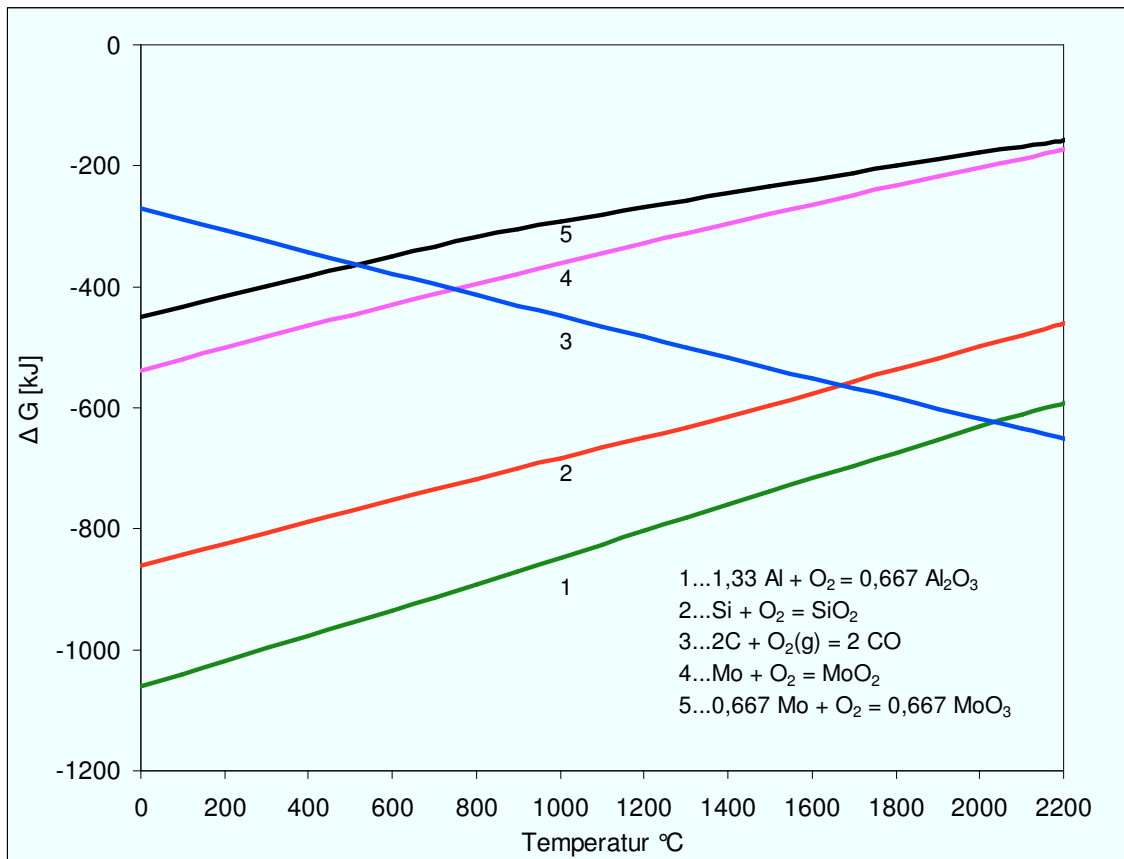


Abbildung 6: Freie Bildungsenthalpie in Abhängigkeit der Temperatur [10]

Aus Abbildung 6 ist zu erkennen, dass Aluminium ein stärkeres Reduktionsmittel ist als Silizium, da die freie Bildungsenthalpie deutlich niedriger liegt. Weiters ist zu erkennen, dass eine Reduktion mit Kohlenstoff erst ab knapp unterhalb von 800 °C stattfinden kann, weil bei niedrigeren Temperaturen die freie Bildungsenthalpie des Kohlenstoffs höher ist, als die der Molybdänoxide.

Die freie Bildungsenthalpie $\Delta_f G^0$, auch als Standard-Gibbs-Energie bezeichnet, ist durch die hier dargestellte Gleichung (2) definiert [7].

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

Durch die Tatsache, dass Molybdänverbindungen sehr leicht Elektronen aufnehmen bzw. abgeben können, erklärt sich auch ihre gute Eignung zum Einsatz als Katalysator in Oxidations- und Reduktionsreaktionen.

Die Herstellung von Ferromolybdän kann entweder durch karbo- oder metallothermische Reduktion von Molybdänoxid erfolgen. Die praktischen Vorteile wie eine geringere notwendige Anlageninfrastruktur, niedrigere Prozesskosten und die Tatsache, dass die

Metallothermie leichter beherrschbar ist, haben die karbothermischen Verfahren weitgehend verdrängt.

Ein weiterer großer Vorteil der Metallothermie ist, dass in nur einem Verfahrensschritt ein verkauffähiges Produkt und eine absetzbare Schlacke zu produzieren ist.

Basisrohstoffe der Produktion sind neben technischem Molybdäntrioxid auch Eisenoxid, häufig in Form von Walzenzunder, Eisenschrott sowie Kalk, Ferrosilizium und Aluminium. Selten kommt auch noch Koks und Flussspat zum Einsatz.

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die karbo- und metallothermischen Verfahrensrouten etwas näher.

2.2.1 Karbothermisches Verfahren

Wie der Name schon sagt, dient beim karbothermischen Verfahren Kohlenstoff als Reduktionsmittel. Untenstehenden Gleichungen (3) und (4) zeigen die Reaktionen, welche bei der Reduktion von Molybdänoxiden stattfinden.



Daneben findet auch eine Bildung von Molybdänkarbid nach der dargestellten Gleichung (5) statt.



Die karbothermische Reduktion geschieht meist in Drehstromlichtbogenöfen aber auch Gleichstromlichtbogenöfen kommen zum Einsatz, welche eine höhere Energiedichte aufweisen.

Der zylindrische Ofenwand ist feuerfest mit Magnesia Steinen ausgekleidet. Eingesetzte Rohstoffe sind Rösterz aus etwa 90 % MoO_3 , reine Eisenerze und Walzensinter. Weiters dienen Kalk und Flussspat als Flussmittel, sowie Holzkohle oder Torfkoks, die das Reduktionsmittel darstellen. Die Chargierung von Molybdäntrioxid und Reduktionsmittel (Holzkohle) erfolgt in brikettierter Form, um Sublimationsverluste durch MoO_3 zu vermeiden. Diese sind auch der Grund warum die Briketts zuerst in die Schlackenreste der vorherigen Charge zu tauchen sind. Das Molybdän(VI)oxid reduziert zu Molybdän(IV), wobei es durch die Flussmittel zu einer Bildung einer möglichst dünnflüssigen Schlacke kommt. Die

Viskosität ist entscheidend, damit sich der entstehende Ferromolybdänblock sauber absetzen kann.

Dieser Vorgang dauert zwischen 20 - 28 Stunden, wobei ein mit dieser Methode produzierter Molybdänblock zwischen 1,5 und 2 Tonne wiegt. Die entstehende Schlacke wird am Ende des Reaktionszyklus abgossen und der noch rot glühende Block anschließend mit Wasser abgekühlt und zerkleinert.

Ein entscheidender Nachteil dieses Prozesses ist, dass die resultierende Schlacke noch einen relativ hohen Mo-Gehalt von etwa 8 - 10 % aufweist. Daher kommt ein separater Prozess zum Einsatz, welcher eine hochkohlenstoffhaltige Zwischenlegierung erzeugt, um diese anschließend weiter zu verarbeiten. Hier entsteht ein Umarbeitungsprodukt, welches wiederum als zusätzliches Startmaterial im Hauptprozess Anwendung findet. Die Molybdänausbeute dieses Prozesses liegt zwischen 95 - 98 % [12].

Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt typische Verbrauchsmengen der unterschiedlichen Einsatzstoffe bei der karbothermischen Reduktion.

Tabelle 3: Verbrauchszahlen der karbothermischen Ferromolybdänerzeugung [7]

Einsatzstoff/Erhaltene Produkte	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]	4000	4450
Verkaufsmetall [kg]	1000	1000
Umschmelz [kg]	270	250
Staub [kg]	66	nicht angegeben

Der Dreiphasenofen benötigt zwar etwas mehr Energie, ist jedoch durch die höhere Energiedichte in der Lage, größere Mengen an Umschmelzschlacke zu verarbeiten. Allerdings ist auch der höhere Bedarf an Elektrodenmasse zu beachten.

2.2.2 Metallothermische Reduktion

Der Begriff metallothermische Reduktion beschreibt im Allgemeinen eine pyrometallurgische Gewinnung hochschmelzender Metalle. Dabei kommt es zu einer meist stark exothermen Reaktion zwischen dem Reduktionsmetall und einer weiteren Metallverbindung. In der Regel

setzt diese Reaktionen so viel Wärme frei, dass von außen keine mehr nötig ist. Metall wird aus dem Oxid reduziert und scheidet sich ab, während das oxidierte Reduktionsmetall in die Schlacke geht. Aufgrund der zuvor bereits erwähnten Vorteile wie der einfachen Prozessführung, die in nur einem Prozessschritt die Herstellung einer verkaufsfähigen Metalllegierung mit geringen Molybdänverlusten unter Verwendung einfacher Aggregate ermöglicht, stellt die metallothermische Route heute den vorherrschenden Produktionsweg für Ferromolybdän dar.

Allgemein lässt sich eine metallothermische Reduktion mithilfe der hier dargestellten Gleichung (6) erläutern. Dabei ist M das zu gewinnende Metall, und R das Reduktionsmetall.



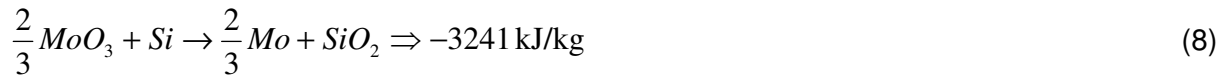
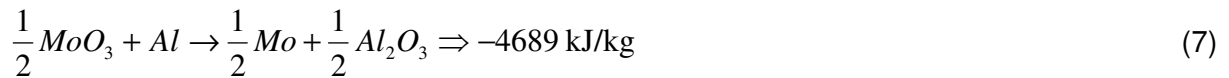
Die treibende Kraft für diese Reaktion besteht in der großen Affinität des Reduktionselementes zum Sauerstoff. Sie läuft umso besser ab, je größer der Unterschied der Sauerstoffaffinitäten zwischen den beiden Metallen ist. Als Beurteilungskennzahl für diese Kraft kommt die freie Bildungsenthalpie zum Einsatz, die in Gleichung (2) beschrieben ist. Die metallothermische Reduktion, welche beim Einsatz von Silizium den Namen Silikothermie und beim Einsatz von Aluminium, Aluminothermie trägt, findet entweder in nicht offenen feuerfest ausgemauerten Stahlzylindern oder in feuerfest ausgemauerten Tiegeln, die in Kammern gekapselt sind, statt. Die letztere Ausführung bietet den Vorteil einer besseren Abgaskontrolle [13]. Üblicherweise ist die Chargierung so gestaltet, dass zunächst ein kleiner Teil der Reaktionsmischung mittels einer Zündermischung aus Bariumperoxid, Walzenzunder und Aluminium zündet und nach Einsetzen der Reaktion eine kontinuierliche Zugabe der restlichen Möllermischung erfolgt.

Eine weitere Variante ist, die komplette Rohstoffmischung vorab in den Tiegel zu chargieren, wobei diese nach der Zündung von oben nach unten reagiert [14].

Dies bedeutet, dass eine kontrollierte Zugabe der Rohstoffmischung nicht erforderlich ist. Diesem Vorteil stehen jedoch größere Tiegelgefäße und der Nachteil, dass die Reaktionsgeschwindigkeit im Tiegel nicht über die Materialeintragungsgeschwindigkeit steuerbar ist gegenüber.

Bei der Metallothermie zur Gewinnung von Molybdän kommt zur Reduktion des Metalls ein Gemisch aus Aluminium und Silizium zum Einsatz, da eine rein aluminothermische Reduktion von MoO_3 zu stark exotherm verlief, was hohe MoO_3 -Verluste durch Verdampfung und die Gefahr einer Explosion zur Folge hätte.

Die beiden nachfolgenden Gleichungen (7) und (8) beschreiben die Reduktion von Molybdän durch Aluminium bzw. Silizium. [14]



Auch der niedrigere Preis des zugegebenen Ferrosiliziums gegenüber dem Aluminium spielt eine wichtige Rolle.

Eine rein silikothermische Umsetzung wäre aufgrund der zu geringen Reaktionswärme nicht möglich, was wie zuvor bereits erwähnt, zu einer Mischung der beiden Reduktionsmittel führt. Eine weitere Möglichkeit wäre, eine Zugabe von Kalzium als Ferrolegierung zum Silizium. Da dieses Element ebenfalls sehr sauerstoffaffin ist, wird bei der Oxidation von Kalzium viel Wärme frei.

Zu der Erhöhung der Reaktionswärme kann ein Teil des benötigten Eisens auch als Eisenoxid in Form von Walzenzunder oder Erzkonzentrat zugegeben werden, was den zusätzlichen Vorteil bringt, dass teilweise unreduziertes Eisenoxid in Form von FeO in der Schlacke bleibt und dort als Flussmittel wirkt.

Um ein hohes Ausbringen und eine dafür nötige gute Trennung zwischen Metall und Schlacke zu erreichen, erfolgt eine Chargierung von Kalk und/oder Flussspat.

Die Metallothermie benötigt trockenes Rohmaterial, das für eine effiziente Reduktion in genau definierten Korngrößenfraktionen vorliegen sollte [12].

Die Herstellung eines Ferromolybdänblockes mit einem Gewicht von 1 - 4 Tonnen benötigt in etwa eine Reaktionszeit von 30 - 60 Minuten. Anschließend erfolgt eine Absetzphase in der sich Schlacke und Molybdän trennen, welche weitere 30 - 60 Minuten dauert.

Danach kommt der Großteil der Schlacke zum Abguss und der Granulierung. Der noch rot glühende Ferromolybdänblock wird aus dem Abbrandgefäß entfernt, von restlicher Schlacke befreit, mit Wasser gequentscht und durch Backenbrecher in die gewünschten Kornfraktionen zerkleinert.

In der hier gezeigten Tabelle 4 sind die Mischungsverhältnisse und Einsatzstoffe einer typischen Reaktionsmischung bezogen auf 100 kg geröstetes Konzentrat angeführt.

Tabelle 4: Typische Abbrandparameter bei der FeMo-Metallothermie [15]

Einsatzstoff/Erhaltene Produkte	Menge [kg]
Blechabfall	51
Ferrosilizium (FeSi75)	38
Aluminiumpulver	5
Kalk	2,5
Flussspat (heute nicht mehr)	7,5
Prozessstaub	9,5
Umschmelzmaterial	5,5
FeMo	87
Umschmelzmaterial	5

Dabei beträgt die Molybdänausbeute zwischen 97 % und 99 %, anhängig davon, wie effizient die Rückführung von Stäuben und anderen anfallenden Prozessabfällen ist [16]. Das metallothemische Verfahren der Ferromolybdänproduktion ist vor allem für die Stahlindustrie zu Herstellung kohlenstoffarmer Stähle von Vorteil.

Um eine Optimierung der Möllerzusammensetzung zu erreichen, kam ein neuronales Netz zum Einsatz. Die Grundlagen dieser Modellierungsmethode liefern die nachfolgenden Kapitel.

2.3 Die künstlichen neuronalen Netze

Neuronale Netze bestehen in ihrer Grundeinheit aus Neuronen, die beim Zusammensetzen eines Netzes an Komplexität gewinnen. Sie besitzen demnach eine hohe Konnektivität untereinander, was bedeutet, dass ein Element mit sehr vielen anderen Teilen des Netzes verbunden ist. Die einzelnen Grundeinheiten realisieren grob vereinfachte Informationsverarbeitung, indem sie die Aktivierung der Vorgängerneuronen mit der Stärke der Verbindung gewichtet, aufsummieren und darauf eine Aktivierungsfunktion anwenden. Die Verbindungen zwischen Neuronen und Synapsen sind eindeutig gerichtet und in Modellen mit Gewichten dargestellt. Die Neuronen kommunizieren nur den Grad ihrer Aktivierung über die Verbindung, d.h. es gibt keine Kommunikation von Symbolen oder von komplexen Datenstrukturen über die Verbindungen zwischen den Elementen. Die Verbindungsgewichte sind allerdings modifizierbar (plastisch), sodass Gewichte durch Lernen verstärkend oder verringern wirken können [18].

Trotz bedeutender Entwicklungen sind viele Aggregate und Prozesse in der Metallurgie und der Aufbereitung nur als schwach definiert zu bezeichnen. Solche Problemstellungen sind im Allgemeinen als so genannte „ill-defind“ Vorkommnisse beschrieben. Diese beruhen darauf, dass sie noch nicht durch phänomenologische oder fundamentale Modelle beschreibbar sind.

Die Modellierung dieser schwach definierten Prozesse ist jedoch aus vielen Gründen erstrebenswert, da

- ein tieferes Verständnis der physikalischen und chemischen Abläufe möglich ist,
- diese Kenntnisse eine Optimierung der Produktivität und der Prozessabläufe erlaubt,
- Prozessmodelle zur optimalen Prozesssteuerung in Prozessleitsystemen integrierbar sind
- und eine optimale Steuerung wiederum die Umweltverträglichkeit des Prozesses sichert und so die Anlagensicherheit erheblich steigert.

Viele der bestehenden Gleichgewichtsmodelle sowie die kinetischen Modelle der Hydrometallurgie und der Aufbereitung können jedoch eine Vielzahl von Effekten wie beispielsweise die Erzmineralogie aufweisen. Diese sind nicht auf rein physikalischen oder chemischen Gesetzmäßigkeiten definiert. Ein gutes Beispiel dafür ist Turkdogan (1980) der zur Beschreibung der Verteilung der Elemente zwischen Schlacke und Metall eine Funktion von Basizität, Temperatur und weiteren Variablen erstellte.

Alleine aus den oben genannten Punkten ist ersichtlich, dass die Forschungsbestrebungen nach leistungsfähigen und zuverlässigen Vorhersagemethoden sehr groß waren [3].

Eine Möglichkeit diese Problemstellungen lösen zu können bieten die neuronalen Netzwerke. Die Literatur definiert ein solches mit den folgenden Worten:

„Ein neuronales Netz ist ein gerichteter Graph $G = (K, E)$ aus einer Menge von Knoten $K = \{v\}$, den neuronalen Einheiten und einer Menge von Kanten $E \subset K \times K$, den Verbindungen zwischen den Knoten [19].“

Bei künstlichen neuronalen Netzen handelt es sich um mathematische Modelle, deren Struktur und Arbeitsweisen sich an die biologischen Vorgaben anlehnen, die jedoch in vielen Punkten eine deutliche Vereinfachung darstellen.

Künstliche neuronale Netze bestehen, wie das Gehirn von Säugetieren, aus einer großen Anzahl Neuronen. Untereinander gerichtete Verbindungen aktivieren Neuronen und verarbeiten so Informationen. Dies geschieht im Prinzip analog zu den Vorgängen im Gehirn.

Ein solches Modell zeichnet sich durch seine Lernfähigkeit aus. Sie können eine Aufgabe anhand von Trainingsbeispielen erlernen, ohne sie dazu explizit zu programmieren. Weitere Vorteile sind die hohe Parallelität bei der Informationsverarbeitung und die hohe Fehlertoleranz [22].

2.3.1 Modellierung der Informationsverarbeitung

Im Unterschied zur Biologie bzw. Neurologie kommt zur Bildung eines Neuronen-Elements kein Modell zum Einsatz, das alle Aspekte eines Neurons exakt beschreibt, sondern nur ein Modell, das eine grobe Verallgemeinerung darstellt. Die sich ergebenden Netze sind auch keine Neuronen-Netze, sondern lediglich „neuronal“, also neuronale-ähnliche Netze. Trotz aller vereinfachenden Annahmen ist es trotzdem anzustreben, noch alle wesentlichen Funktionscharakteristiken zu übernehmen. [19]

Das Grundmodell eines Neurons stützt sich im Wesentlichen auf die Vereinfachung von McCulloch und Pitts aus dem Jahre 1943, die ein Neuron als eine Art Addierer mit Schwellwert betrachten. Die Verbindungen (Synapsen) eines Neurons nehmen Aktivierungen x_i mit bestimmten Stärken w_i von anderen Neuronen auf, summieren diese und lassen dann am Ausgang y (Axon) des Neurons die Aktivität entstehen, sofern die Summe vorher einen Schwellwert s überschritten hat. [19]

In der nachstehenden Abbildung 7 ist eine Gegenüberstellung eines biologischen Neurons und eines Modellneurons dargestellt.

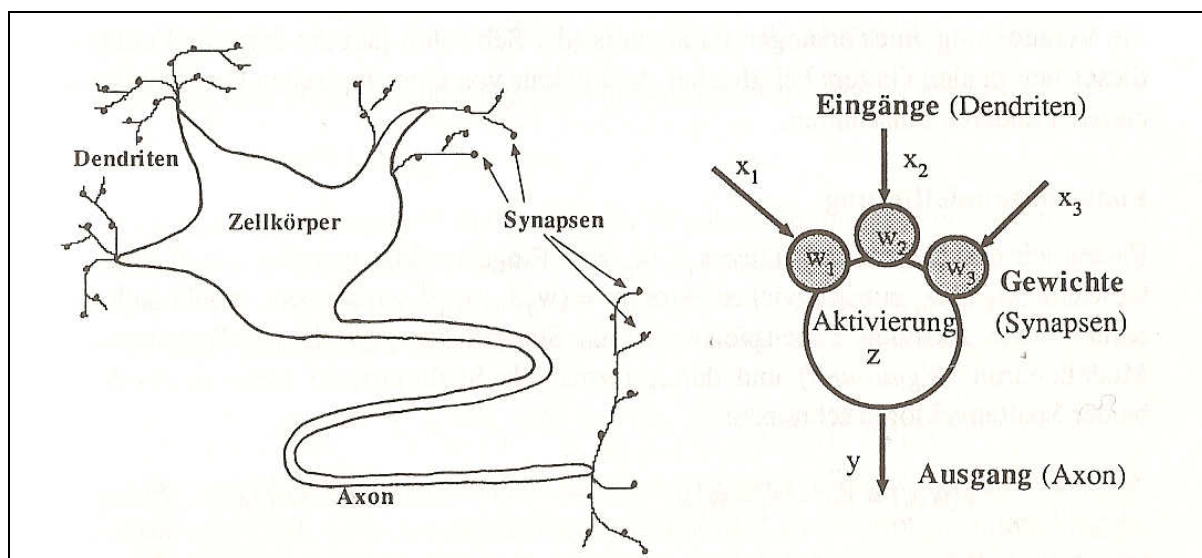


Abbildung 7: Biologisches Neuron und Modellneuron [19]

Diese Modellierung fasst die Wirkung von vielen hundert Synapsen zwischen den Axon-Verbindungen eines Neurons und dem Dendritenbaum des anderen Neurons zu einem einzigen Gewicht w_i zusammen. Auch die Weiterleitung der Erregung in den Dendriten und Axonen, die sich exakter mit Differenzialgleichungen modellieren lassen, wird intensitätsmäßig in die Gewichte projiziert. Die zeitlichen Aspekte sind hier zu vernachlässigen. Trotzdem ermöglicht diese einfache Modellierung einige interessante Netzfunktionen. [19]

McCulloch und Pitts nahmen noch alle Gewichte als gleich an. Eine einzige Inhibition (negative Gewichte) verhindert die gesamte Ausgabe, die in Übereinstimmung mit den damaligen Erkenntnissen als binär galt [19]. Sie zeigten in ihrer Arbeit, dass mit diesen einfachen Elementen jeder finite logische Ausdruck zu berechnen ist.

2.3.2 Funktionsmodellierung

Sind die Eingabeaktivitäten $x_1 \dots x_n$ zum Eingabevektor $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ und die Gewichte $w_1 \dots w_n$ zum Gewichtsvektor $w = (w_1, \dots, w_n)^T$ zusammengefasst, so lässt sich die resultierende Aktivität z beispielsweise als Summe der gewichteten Eingaben im Modellneuron (sigma-unit) und damit formal als Skalarprodukt (inneres Produkt) beider Spaltenvektoren schreiben. Diese Funktion bezeichnet die Literatur im Allgemeinen als Aktivitätsfunktion [19].

$$z(w, x) = \sum_j w_j x_j = w^T x \quad (9)$$

Die biologische Aktivitätsfunktion „sammelt“ die Ladungen der dendritischen Eingänge zu einem elektrischen Potenzial. Deshalb kommt auch manchmal die Bezeichnung als Potenzialfunktion vor. In manchen Modellierungen sind Eingänge mit gleichartigen Aktivitätsfunktionen zu Gruppen (sites) zusammenzufassen, wobei die oben genannte Aktivitätsfunktion als site-function bekannt ist. In diesem Fall ist z zur einfachen, ungewichteten Summe $\sum_i z_i$ aller „site-Aktivitäten“ z_i transformiert. [19]

Für theoretisch-analytische Zwecke ist die obige Definition auch auf Eingabe und Gewichte erweiterbar, die kontinuierlich in einem Intervall („entlang einer Strecke“) definiert sind. Hier ist die diskrete Summe das Integral:

$$z(w, x) = \int_{\xi_2}^{\xi_1} w(\xi) x(\xi) d\xi \quad (10)$$

Sehr oft muss die Aktivität erst eine Schwelle s überschreiten, bevor sie sich beim Ausgang auswirkt [19]. Dies lässt sich durch die Minderung der Aktivität um den Schwellenwert modellieren:

$$z(w, x) = w^T x - s \quad (11)$$

Die Aktivität y am Neuronenausgang ist durch die Ausgabefunktion S , abhängig von der internen Aktivität z , zu beschreiben.

$$y = S(z) \quad (12)$$

Die gesamte Reaktion des formalen Neurons ist auch als ein Ergebnis nur einer Funktion, der Transferfunktion aufzufassen. Diese lautet:

$$y = S(z(x, w)) = F(x, w) \quad (13)$$

Ein künstliches Neuron ist ein Tupel (X, Y, F, L) , wobei die Funktion durch $F: W \times X \rightarrow Y$ und L durch $L: W \times X \times Y \times Y \rightarrow W$ definiert ist. Für die Ausgabe F sowie die Zustandsüberführung L der Gewichte, im folgenden „Lernen“ genannt, erlaubt die obige Definition viele Modelle. Beispielsweise können Aktivitäten und Lernen eines Neurons bei reellen Gewichten mit $w \in \mathfrak{R}^n$ und $W = \mathfrak{R}^n$ nur von den eigenen Gewichten bestimmt sein. Ein Einfluss der Gewichte anderer Neuronen ist z. B. durch das kartesische Produkt $W = \mathfrak{R}^n \times \dots \times \mathfrak{R}^n$ modelliert [19]. Passend zur oberen Definition und zur eingangs erwähnten Definition ist ein neuronales Netz nun wie folgt zu beschreiben: [19]

„Ein neuronales Netz ist als gerichteter, gewichteter Graph anzusehen. Die Kanten stellen die Verbindungen zwischen den Neuronen dar. $w_{i,j}$ ist das Gewicht der Verbindung von Neuron i nach Neuron j , die Matrix W aller Verbindungen heißt Gewichtsmatrix [22].“

Eine bildliche Darstellung eines neuronalen Netzes zeigt die untenstehende Abbildung 8.

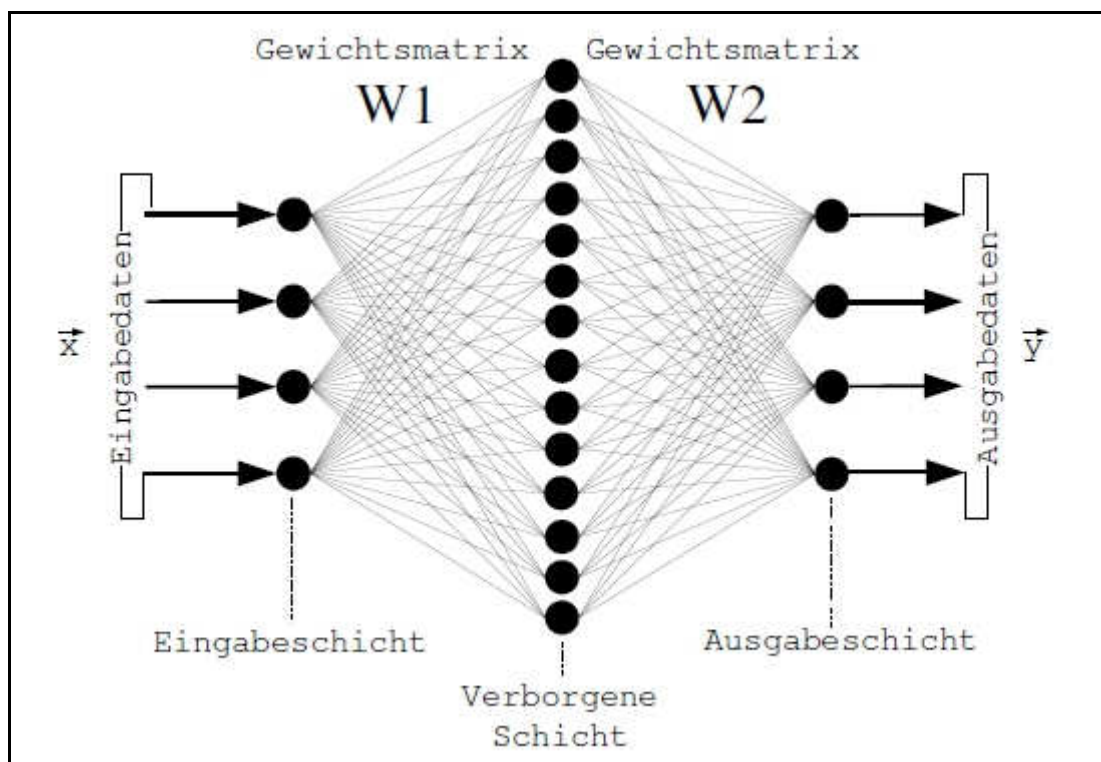


Abbildung 8: Darstellung eines neuronalen Netzes [18]

Da ein neuronales Netz meist nicht isoliert für sich existiert, sind noch Ein- und Ausgabeneuronen zu definieren. Die Eingabeneuronen sind Neuronen, die eine Eingabe von außerhalb des Netzes erlauben und somit nicht als echte formale Neuronen, sondern als Datenquelle anzusehen sind.

Die Ausgabeneuronen, stellen Knoten dar, deren Ausgänge Daten nach außerhalb des Netzes weiterleiten. Beispiele für Eingabeneuronen sind Sensoren (z. B. Fotozellen, Mikrofone etc.), Datenfiles oder einfach nur Anschlussstecker. Ausgabeneuronen sind formale Neuronen, die an Peripheriegeräte (Lampensteuerungen, Gelenkmotoren), Datenfiles oder ebenfalls nur Anschlussleitungen angeschlossen sind. Die Definition für Ein- und Ausgabeneuronen sind somit nicht symmetrisch. [19]

Bei den vorher genannten Definitionen ist zu beachten, dass die Gewichte zu den Neuronen gehören und damit das neuronale Netz nur als gerichteter, aber nicht als gewichteter oder bewerteter Graph definiert ist. Die Gewichtung einer Kante mit einer Zahl (einem Gewicht) ist nicht unproblematisch, da sich dadurch eine Festlegung auf eine Modellierung ergibt, anstatt dies in der Definition eines formalen Neurons zu kapseln. Durch Erweiterung der Definition beispielsweise mit der Einführung von höheren Synapsen, ergibt sich nicht nur ein Gewicht pro Graphkante, weshalb die Definition des gesamten Netzes zu ändern ist. [19]

Allerdings ist nicht zu vergessen, dass die anfangs erwähnte Definition des neuronalen Netzes unvollständig ist. Die Verbindung der Ein- und Ausgabe beschreibt zwar die formalen Neuronen in der „Funktionsphase“, sagt aber nichts darüber aus, wie in der Lernphase die Gewichte lernen. Um die wechselseitigen Einflüsse darzustellen, ist ein weiterer Graph, ein Lernnetz, von Nöten. Im Allgemeinen ist dies allerdings nicht extra dargestellt. Zu beachten ist jedoch, dass das Ändern der Gewichte und damit ihrer absoluten Größe in der Funktionsphase entscheidend für das Verhalten des Gesamtnetzwerks ist. [19]

2.3.3 Zeitmodellierung

Die Aktivitäten in neuronalen Netzen sind nicht konstant, sondern ändern sich mit der Zeit: $x = x(t)$, $z = z(t)$, $y = y(t)$. Diese sind somit [19]:

$$z(t) = w(t)^T x(t) = f(t) \quad (14)$$

Viele Modelle von neuronalen Netzen sind aber zeitkontinuierlich und somit mit Differenzialgleichungen beschreibbar, da die Aktivität zu einem Zeitpunkt meist aus der Aktivität zu früheren Zeitpunkten herzuleiten ist. Beispielsweise wird nach dem Zeitschritt $\Delta t = \tau$ die Differenz Δz der Aktivität. [19]

$$\tau \Delta z / \Delta t = \Delta z = z(t) - z(t - \Delta t) + f(t) \quad (15)$$

im Grenzwert $\Delta t \rightarrow 0$ entsteht aus dem Differenzenquotient eine Differenzialgleichung

$$\tau \partial z / \partial t = -z(t) + f(t) \quad (16)$$

Umgekehrt lässt sich aus der obigen Differenzialgleichung die Differenzengleichung für den Zeitschritt $\Delta t = 1$ aufschreiben

$$z(t) - z(t - 1) = -\tau^{-1} z(t - 1) + \tau^{-1} f(t) \quad (17)$$

oder

$$z(t) = (1 - \alpha) z(t - 1) + \alpha f(t) \quad \alpha := \tau^{-1} \quad (18)$$

Obwohl beide Arten im langfristigen Verhalten äquivalent zu einander sind, gibt es im kurzzeitigen Verhalten sehr wohl Unterschiede.

Die Differenzialgleichung

$$\tau \partial z / \partial t = -z(t) \quad (19)$$

hat die Lösung

$$z(t) = a e^{-(t-t_0)/\tau} \quad (20)$$

was einer „Abklingkurve“, beispielsweise der Entladung eines Kondensators, mit der Zeitkonstante τ entspricht. Betrachten wir $\partial z / \partial t$ dabei als einen Fluss (z. B. von Wasser oder von Ladung), so beschreibt die vollständige Differenzialgleichung $\partial z / \partial t = -\alpha z(t) + f(t)$ einen Abklingprozess, bei dem im Grenzwert ($t \gg \tau$) sich der pegelabhängige Abfluss $-\alpha z(t)$ und der Zufluss $+ f(t)$ bei der Änderung $\partial z / \partial t = 0$ auf den Wert $z(t) = f(t)$ stabilisieren. Die zeitdiskrete und zeitkontinuierlichen Formulierungen sind nur im großen Zeitmaßstab äquivalent; bei dynamischen Vorgängen im Kurzzeitbereich ($t < \tau$) ist bei der Computersimulation darauf zu achten, dass die Zeitschritte nicht zu groß gewählt werden. Der Sinn der Formulierung mit einer Zeitkonstante τ liegt dabei in einem gewissen Trägheitseffekt, der dem Modell damit verliehen wird. Im Unterschied zur zeitlosen, sofortigen Reaktion in Gleichung (9) lässt sich mit der trägheitsbehafteten Reaktion nach Gleichung (16) zeitverzögert modellieren, was besonders bei Zeitsequenzen wichtig ist.

Trotzdem ist der zeitdiskreten Formulierung, wenn möglich, größere Bedeutung zu zuschreiben, da die Darstellung mit einem diskreten Zeitschritt eher einer iterativen Anweisung in einem Computerprogramm ähnelt. Die allgemeine Umsetzung einer Differenzialgleichung in eine Differenzengleichung ist nicht trivial und Gegenstand der numerischen Lösung von Differenzialgleichungen. Der Erfolg lässt sich oft nur am konsistenten Verhalten beider Formen bei Randbedingungen nachprüfen. [23]

2.3.4 Ausgabefunktionen

Die Ausgangsfunktion des Neurons bestimmt, wie auf den Wert der Aktivierungsfunktion zu reagieren ist. Sie definiert, ob der Wert der Aktivierungsfunktion hoch genug war, um das Neuron zum "feuern" zu veranlassen. Generell gilt, dass alle Ausgabefunktionen monoton wachsend sind. Vier einfache Funktionen seien im Folgenden vorgestellt:

Lineare Ausgabefunktion:

Eine lineare Funktion (eine Nicht-Schwellenfunktion) mit einer bestimmten positiven Steigung, welche die X-Achse der Inputs und die Y-Achse der Outputs an definierten Stellen kreuzt. Bei ihr gibt es keinen Minimum- und Maximumwert. [19]

McCulloch-Pitt-Ausgabefunktion:

Diese Funktion ist die klassische Alles-Oder-Nichts-Schwellenfunktion. So sollen z. B. alle Inputs unter 1 und größer -1 zu keiner Reaktion führen. [19]

Fermi-Funktion:

Diese sigmoide Funktion gleicht einem schrägen S, welches durch den Nullpunkt des Input-Output-Kreuzes verläuft. Es existieren Minima und Maxima, diese Funktion lässt sich differenzieren. Besonders im Zusammenhang mit der analogen Standard-Aktivierungsfunktion sind fein dosierte "Feuerungen" möglich. [19]

Dirac- oder Deltafunktion:

Eine Bergkurve auf der X-Achse mit der Fläche eins. Diese Funktion ist allerdings noch nicht in natürlichen Systemen beobachtet worden.

Auf welche der Ausgabefunktion letztlich die Entscheidung fällt, hängt davon ab, welche Anwendungen mit dem neuronalen Netz wiederzugeben sind.

Die Wertebereiche der verwendeten Variablen sind, je nach Modellvariante und Anwendungsbereich sehr verschieden. [19]

2.3.4.1 Binäre Ausgabe

In weiteren Modellen von McCulloch und Pitts sind nur binäre (aktiv/nicht aktiv) Werte für Input x_i und Output y_i vorgesehen; die Gewichte w_i sind dabei reell. Es ergibt sich eine positive Aktivität erst nach dem Überschreiten eines Schwellwert s .

Dies lässt sich einfach durch Erweiterung der Gewichte um den Schwellwert nach Gleichung (11) modellieren.

Die Schwellwertfunktion lässt sich demnach wie folgt anschreiben [22].

$$f_0\left(\sum_{k=1}^n x_k w_k\right) = \begin{cases} 1: \text{falls } \sum_{k=1}^n x_k w_k \geq S \\ 0: \text{sonst} \end{cases} \quad (21)$$

Somit ist für $x_i, y \in \{0,1\}$ und $w_i \in \mathfrak{R}$, den reellen Zahlen, die binäre Ausgabefunktion

$$y = S_B(z) := \begin{cases} 1 & z > 0 \\ 0 & z \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

Dies zeigt auch die nachfolgende Abbildung 9.

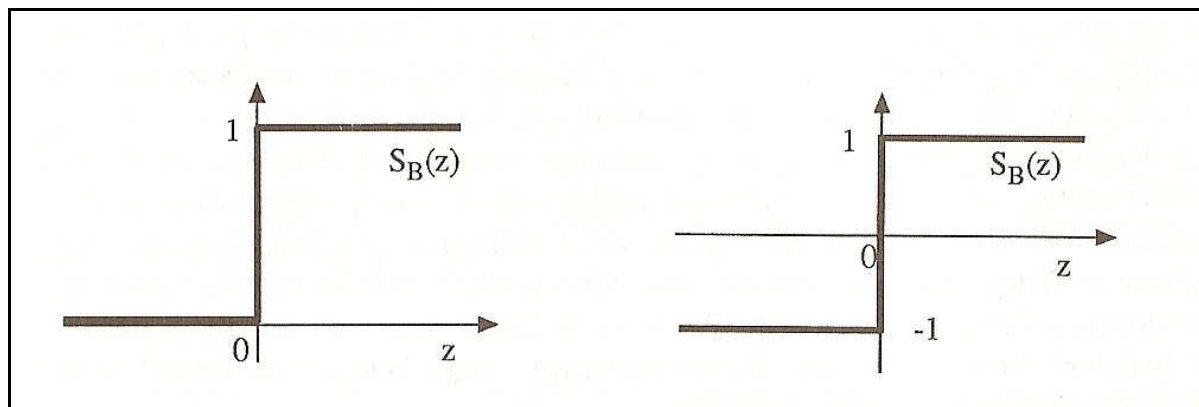


Abbildung 9: Binäre Ausgabefunktionen mit den Werten 0 und 1 bzw. -1 und +1 [19]

Diese Funktion trägt den Namen Heavyside-Funktion. Anstelle von 0 wird auch manchmal für „nicht aktiv“ der Wert -1 verwendet, so dass sich mit der Transformation $x_i \rightarrow (2x_i - 1)$ die Werte zu $\{+1, -1\}$ ergeben. [19]

Als Ausgabefunktion lässt sich dabei mit $y \in \{+1, -1\}$ die Vorzeichenfunktion $\text{sgn}(\cdot)$ verwenden [19], [22].

$$y = S_B(z) = \text{sgn}(z) = \begin{cases} +1 & z \geq 0 \\ -1 & z < 0 \end{cases} \quad (23)$$

Häufig ist dieses binäre Modell auch als Perzeptron bezeichnet und beschreibt neuronale Netze mit folgender Struktur:

Die Eingabezellen, welche für die visuelle Mustererkennung Zellen der Netzhaut eines künstlichen Auges darstellen, sind durch feste gewichtete Verbindungen mit einer Schicht von Neuronen verbunden. Diese können einfache Muster erkennen und haben gewichtete Verbindungen zu einem weiteren Neuron, das als Klassifikator wirkt und angibt, ob das anliegende Muster erkennbar ist. Die Verbindungen von der ersten Verarbeitungsschicht zum Ausgabeneuron sind trainierbar, also variabel. Weil es nur eine Ebene einstufiger Gewichte gibt, handelt es sich um ein einstufiges Netz. [22]

Die nachfolgende Abbildung 10 soll eine grafische Veranschaulichung eines Perzeptrons bieten [22].

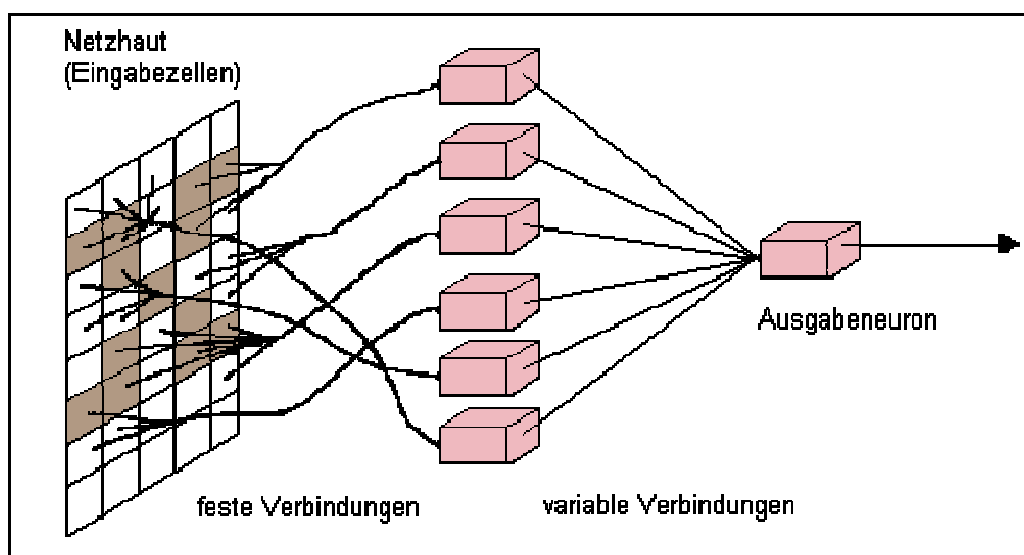


Abbildung 10: Darstellung eines Perzeptron [22]

Da diese Art der Ausgabefunktion nicht die Intensität der aufeinander folgenden Aktionspotenziale eines biologischen Neurons simuliert, finden lineare Ausgabefunktionen Verwendung. Der zeitliche Abstand, in dem die Aktionspotenziale die biologische Nervenzelle weiterreichen, ist nach unten eingeschränkt. Daher sollte auch im künstlichen Neuronenmodell eine beschränkte Ausgabefunktion Verwendung finden.

2.3.4.2 Begrenzt lineare Ausgabefunktionen

Nach heutigen Erkenntnissen kommt es zu einer Weitergabe der Information nicht nur über die absolute Größe des summierten Signals im Neuron durch die binäre Amplitude (spikes), sondern auch durch die Frequenz der binären Ausgangsimpulse (Frequenz-Modulation).

Bei Betrachtung der Aktivität als Impulsfrequenz lassen sich diese in bestimmten Grenzen mithilfe positiver, reeller Zahlen modellieren. Mittels Beifügung der inhibitorischen Aktivität durch negative reelle Zahlen entsteht ein Modell, bei dem Eingabe und Ausgabesignal reell sind; und die Ausgabe proportional der Eingabe ist:

$$y = S(z) = z \tag{24}$$

Für die Eingabeaktivität existieren zwei wichtige Werte, der untere Schwellenwert s_1 , den es zu erreichen gilt, um eine Ausgabe zu bekommen und den Wert s_2 , nach dessen Überschreiten keine weitere Änderung der Ausgabe erfolgt (Sättigung). Mit der linearen Transformation der Variablen $z \rightarrow z - z_0$ mit $z_0 = s_1 + (s_2 - s_1)/2$ erfolgt die Ausgabe $S(z)$ linear und symmetrisch um den Nullpunkt der y -Achse mit einer einheitlichen Schwelle $s = (s_2 - s_1)/2$ und den Sättigungswert z_{\max} als eine Rampenfunktion mit $x_i, y, w_i \in \mathfrak{R}$ [19].

$$y = S_L(z, s) = \begin{cases} z_{\max} & z > s \\ z_{\max} / 2 + kz & -s \leq z \leq s \\ 0 & z < -s \end{cases} \quad k = z_{\max}/2s \tag{25}$$

Ist eine symmetrische Ausgabe nötig, so ist mit der Transformation $y \rightarrow 2(y - y_0)$ und $y := z_{\max}/2$ die Ausgabefunktion auch symmetrisch um die z -Achse durch den Nullpunkt zu legen. Dabei kann y_0 beispielsweise der Mittelwert $\langle y \rangle$ der Ausgabe bedeuten.

$$y = S_L(z, s) = \begin{cases} z_{\max} & z > s \\ kz & -s \leq z \leq s \\ -z_{\max} & z < -s \end{cases} \quad k = z_{\max}/s \tag{26}$$

In der folgenden Abbildung 11 sind die beiden normierten Funktionen mit $z_{\max} := 1$ gezeigt. Die binären Stufenfunktionen lassen sich dabei als Spezialfall der Rampenfunktion betrachten, wenn die Geradensteigung k im Grenzwert gegen unendlich geht.

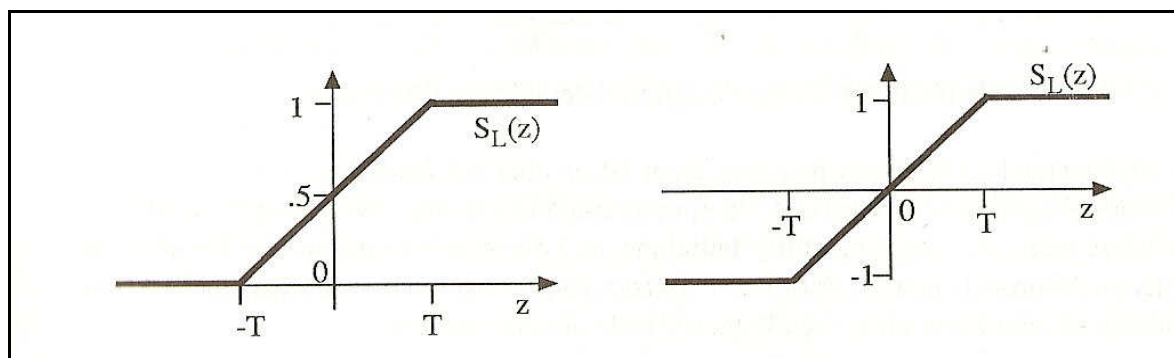


Abbildung 11: Darstellung einer binären Stufenfunktion [19]

Weiters sind die Ausgabefunktionen durch semilineare Ausgabefunktionen der Form von folgender Gleichung definierbar [19].

$$f_0\left(\sum_{k=1}^n x_k w_k\right) = \left\{ \begin{array}{l} 1: \text{falls } \sum_{k=1}^n x_k w_k \leq \frac{1+a}{s} \\ s\left(\sum_{k=1}^n x_k w_k\right) - a: \text{falls } \frac{a}{s} \leq \sum_{k=1}^n x_k w_k < \frac{1+a}{s} \\ 0: \text{sonst} \end{array} \right. \quad (27)$$

Die graphische Darstellung einer solchen Funktion ist in Abbildung 12 gezeigt.

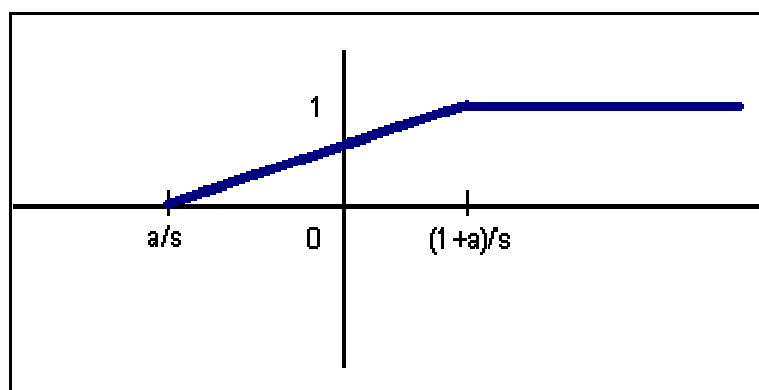


Abbildung 12: Graph einer semilineare Ausgabefunktion [22]

Sinnvoller ist es jedoch die Aktivierung beziehungsweise die Ausgabe durch glattere, also differenzierbare Funktionen zu beschreiben, um genauere Ergebnisse zu erhalten. Ein Beispiel für differenzierbare und beschränkte Funktionen sind die s-förmigen oder sigmoiden.

2.3.4.3 Sigmoide Ausgabefunktion

Bei der analytischen Verwendung der Ausgabefunktionen ist es manchmal nötig, nicht nur die Ausgabefunktion selbst, sondern auch die Ableitung der Funktion zu benutzen, die im Unterschied zu den Ableitungen der binären Stufenfunktion und der Rampenfunktion stetig sein sollte. Für diesen Zweck kommen auch andere nichtlineare Funktionen (Quetschfunktionen) zum Einsatz, die auch den bei großen Signalstärken beobachteten neurologischen Sättigungseffekte modellieren. Die als sigmoide Funktionen bekannten Ausgabefunktionen sind dabei praktischer als die obigen Stufenfunktionen, da diese hauptsächlich der Kategorisierung bei z. B. Ja/Nein-Entscheidungen dienen [24]. Das Verhalten der Netze hängt allerdings kaum von der genauen Form der Quetschfunktion ab. Beispiele dafür sind die in der Physik häufig verwendeten Fermi-Funktionen.

$$S_F(z) = (1 + \exp(-kz))^{-1} \quad (28)$$

Und ihr um den Nullpunkt symmetrisches Gegenstück der hyperbolische Tangens

$$S_T(z) = 2S_F(2z) - 1 = \tanh(kz) \quad (29)$$

Eine weitere Funktion die Verwendung findet, ist die Kosinus-Quetschfunktion (cosinus squasher)

$$S_C(z) = \begin{cases} 1 & z \geq \pi/2 \\ \frac{1}{2(1 + \cos(z - \pi/2))} & -\pi/2 < z < \pi/2 \\ 0 & z \leq -\pi/2 \end{cases} \quad (30)$$

In der folgenden Abbildung 13 sind die Fermi- und die Kosinus-Quetschfunktion zu sehen.

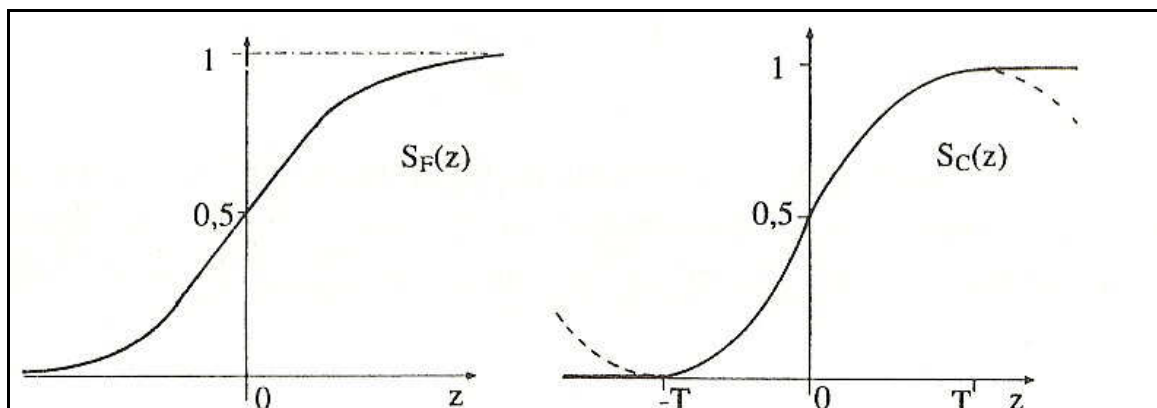


Abbildung 13: Darstellung der Fermi- und Cosinusfunktion [19]

Abbildung 14 zeigt einige weitere gebräuchliche Aktivierungs- bzw. Ausgabefunktionen, wobei die beiden letzteren am häufigsten Verwendung finden.

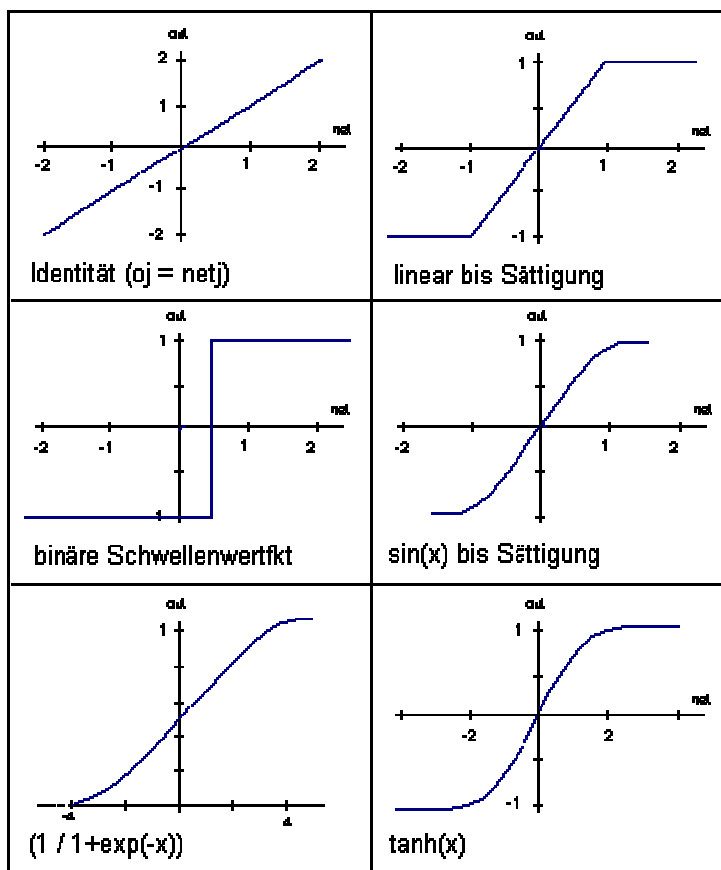


Abbildung 14: gebräuchliche Aktivierungsfunktionen [22]

2.3.5 Topologie künstlicher neuronaler Netzer

Neuronale Netze lassen sich gemäß der folgenden Topologien klassifizieren [25]:

1. Netze ohne Rückkopplung (feedforward-Netze)
2. Netze mit Rückkopplungen (rekurrente Netze)
3. Mehrschichtige Netze
4. Fuzzy Systeme

Die Netze ohne Rückkopplung stellen die einfachste Form dar. Bei dieser Art können die Neuronen nur in eine Richtung durch das Netz. Die Information eines Neurons wird weitergeleitet, ohne das Ergebnis des vorherigen Neurons zu berücksichtigen. Im Gegensatz dazu stehen die Netze mit Rückkopplung. Bei diesen ist das Ergebnis des vorhergehenden Neurons dem nachfolgenden bekannt. Diesen Arten ist es somit möglich, einen Schritt nach vor zu schauen, da sie das Ereignis des vorigen Neurons kennen und in ihrer Auswirkung mitberücksichtigen.

Die mehrschichtigen Netze bieten den großen Vorteil der Approximation, das heißt der Annäherung an bekannte Ereignisse. Ein typisches Beispiel wäre die Buchstabenerkennung auf digitalen Schreiboberflächen.

Die Fuzzysysteme nehmen eine Sonderstellung ein. Mit dieser Art von Netzen ist es möglich, auch Ergebnisse zu bewerten, die nicht den Zahlenwerten 0 oder 1 entsprechen, sondern eine Bewertung innerhalb eines Intervalls zu ermöglichen.

2.3.5.1 Feedforward Netze

Bei Netzen ohne Rückkopplungen existiert kein Pfad, der von einem Neuron direkt oder über zwischengeschaltete Neuronen wieder zurück zu diesem Neuron führt. Die Datenweiterleitung geschieht also nur in eine Richtung. Fast alle Modelle lassen sich unter einem gemeinsamen Aspekt betrachten. Sie erfüllen die gewünschte Funktion nicht exakt, sondern approximieren diese nur, allerdings mit geringem Aufwand. Dies ist für viele Anwendungen nicht nur ausreichend, sondern durchaus erwünscht. Mathematisch ist diese Topologie ein azyklischer Graph. In der Matrixdarstellung ist nur die obere Dreiecksmatrix mit Werten ungleich Null besetzt, da kein Neuron eine Verbindung zu einem dichter an der Eingabeschicht liegenden Neuron haben kann. Weiters sind ebenenweise verbundene und allgemeine feedforward-Netze zu unterscheiden [22].

Ebenenweise verbundene feedforward-Netze sind in mehrere Schichten eingeteilt, wobei es nur Verbindungen von einer Schicht zur nächsten gibt. Falls jedes Neuron der Schicht U_i mit jedem Neuron der darauf folgenden Schicht U_{i+1} verbindet, ist von vollständig verbundenen Netzen zu sprechen [22].

Typische Feedforward-Netze sind die sogenannten ADALINE, MADALINE, Radial-Basis-Function-Network und die Multi-Layer-Perzeptoren [26].

Abbildung 15 zeigt ein ebenenweise verbundenes Feedforward-Netz.

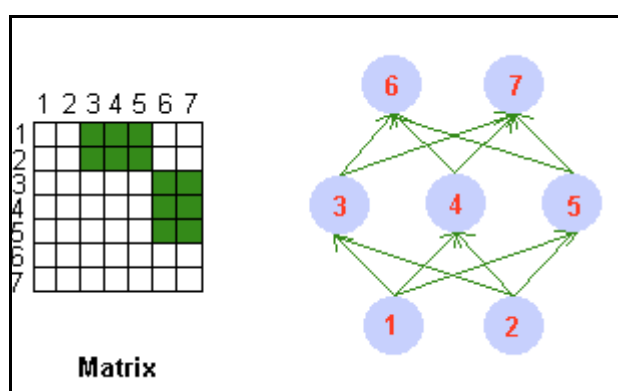


Abbildung 15: Darstellung eines ebenenweise verbundenen feedforward-Netzes [22]

Allgemeine Feedforward-Netze besitzen dagegen auch so genannte „shortcut connections“, also Verbindungen zwischen Neuronen, die Ebenen überspringen. Abbildung 16 stellt ein allgemeines Feedforward Netz dar.

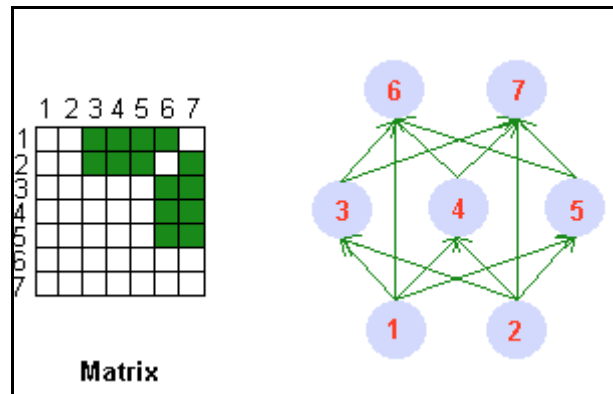


Abbildung 16: Allgemeines Feedforward Netz mit shortcut connections [22]

2.3.5.2 Netze mit Rückkoppelung (rekurrente Netze)

Der Vorteil einer Rückkoppelung liegt darin, dass die Information des vorhergegangenen Neurons im Ergebnis des nächsten eintreffenden Neurons bereits mitberücksichtigt ist.

Da es eine Vielzahl unterschiedlicher Rückkoppelungsarten gibt, sind weitere Unterteilungen zu treffen.

Netze mit direkten Rückkopplungen (direct feedback)

Bei dieser Art von Netzen haben die Neuronen eine Verbindung von ihrer Ausgabe zurück zur Eingabe und können dadurch ihre eigene Aktivierung verstärken oder abschwächen. Diese Verbindungen bewirken oft, dass Neuronen die Grenzzustände ihrer Aktivierungen annehmen, weil sie sich selbst verstärken oder hemmen [22].

Eine grafische Darstellung dieses Netztyps zeigt die nachfolgende Abbildung 17.

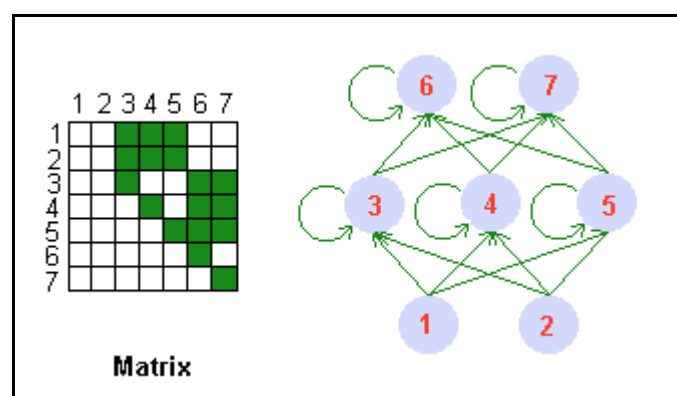


Abbildung 17: Angabe eines direct Feedback-Netz [22]

Netze mit indirekten Rückkopplungen (indirect feedback)

Bei diesen Netzen handelt es sich um Rückkopplungen von Neuronen höherer zu Neuronen niedriger Ebenen. Dadurch ist eine Aufmerksamkeitssteuerung auf bestimmte Bereiche von

Eingabeneuronen oder auf definierte Eingabemerkmale durch das Netz zu erreichen. Abbildung 18 erläutert die Art der Rückkoppelung grafisch.

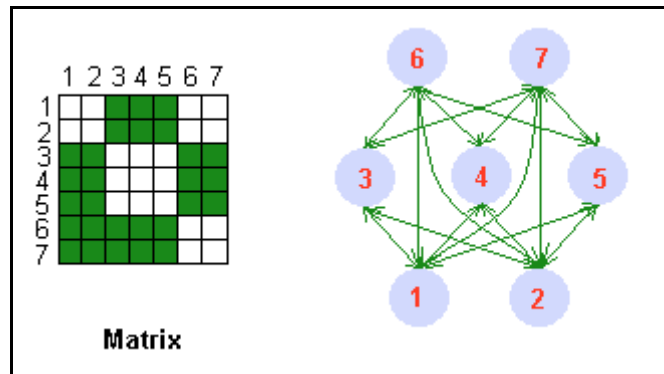


Abbildung 18: Netz mit indirekter Rückkoppelung [22]

Netze mit Rückkoppelungen innerhalb einer Schicht

Solche Netze mit Rückkopplungen innerhalb einer selben Schicht sind nützlich für Aufgaben, bei denen nur ein Neuron einer Gruppe aktiv sein soll. Jedes Neuron hat dann hemmende Verbindungen zu den anderen Neuronen und oft noch eine aktivierende direkte Rückkopplung zu sich selbst. Das Neuron mit der stärksten Aktivierung, der Gewinner, hemmt dann die anderen Neuronen. Daher heißt eine solche Topologie auch „winner-takes-all“-Netzwerk. Bildlich ist dies in Abbildung 19 dargestellt.

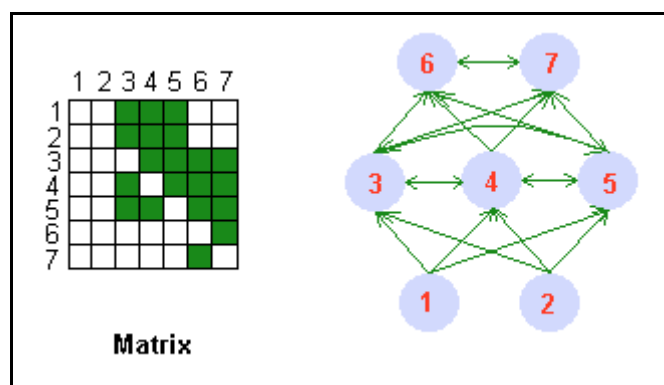


Abbildung 19: Darstellung eines Winner-Takes-All-Netzwerkes [22]

Vollständig verbundenen Netze

Vollständig verbundene Netze haben Verbindungen zwischen allen Neuronen. Sie sind insbesondere als Hopfield-Netze bekannt. Bei diesen muss allerdings auch die Verbindungsmatrix symmetrisch sein und die Diagonale darf nur Nullen enthalten. Die Struktur ist in Abbildung 20 angeführt.

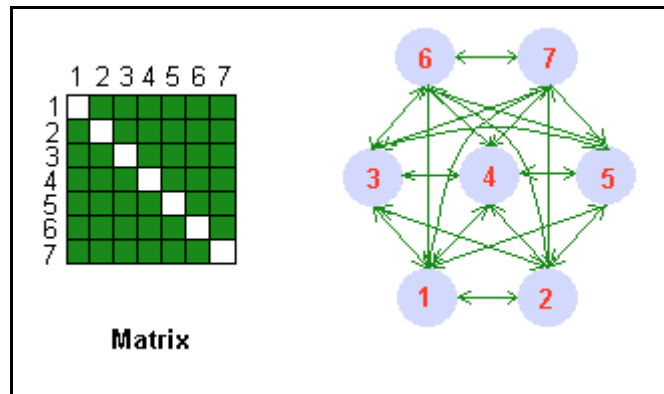


Abbildung 20: Darstellung eines Hopfield- Netz [22]

2.3.5.3 Mehrschichtige Netze

Durch die Kombination mehrerer Schichten sind Eigenschaften des Gesamtnetzes gewährleistet, die ein Modell mit einer Schicht nicht bietet. Diese lassen sich mit dem Begriff der Approximation kennzeichnen. Die Art der neuronalen Annäherung kann sehr unterschiedlich sein, von einer einfachen Überlagerung von Funktionen, bis hin zu einer stückweise Approximation in Intervallen durch Standardkurvenzüge ist vieles denkbar. Als einfache Erläuterung der Funktion solcher Systeme dienen Netze, welche sich generell durch nicht lineare Schichten darstellen, die von einem Neuron pro Ausgabevariable $y = F(x)$ abgeschlossen werden [19]. Abbildung 21 zeigt die einfachste Form eines mehrschichtigen Netzes.

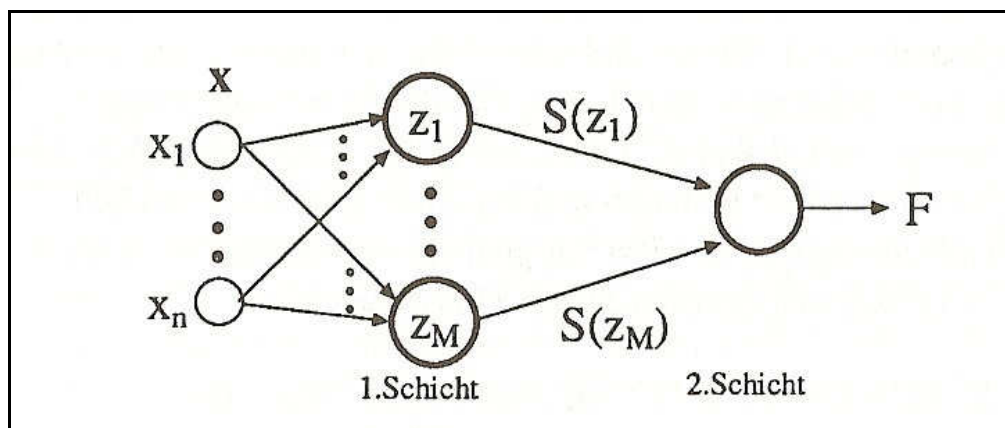


Abbildung 21: Ein zweischichtiges Netz [19]

Da die Ausgabe S_j der Neuronen der ersten Schicht nicht direkt sichtbar sind, ist der Name der versteckten Einheiten (hidden units) erklärbar [19].

Der berühmteste Vertreter dieser mehrschichtigen Netze ist das „backpropagation“-Netzwerk. Der Vorschlag eines „backpropagation“-Verfahren kam in den 70iger Jahren von mehreren Autoren, unter anderem von Paul Werbos 1974. Allerdings geriet diese für über 10

Jahre in Vergessenheit. Das „backpropagation“-Verfahren ist eine iterative Methode. Es ermittelt eine Konfiguration der Gewichte im Netz, bei der die Fehlersumme über alle Trainingsmuster minimal ist. Künstliche neuronale Netze auf der Basis von „backpropagation“ kommen zum jetzigen Zeitpunkt für praktische Anwendungen am häufigsten zum Einsatz. Ihre Bezeichnung ist oft „multilayer-perceptron“ (MLP). Die Basis für „backpropagation-Netze“ bilden mehrschichtige „feedforward“-Modelle. Meistens werden total verbundene Topologien benutzt, aber auch Topologien mit „shortcuts“ kommen in Betracht [19]. Die nachfolgende Abbildung 22 zeigt eine grafische Darstellung eines „backpropagation“-Netzwerks.

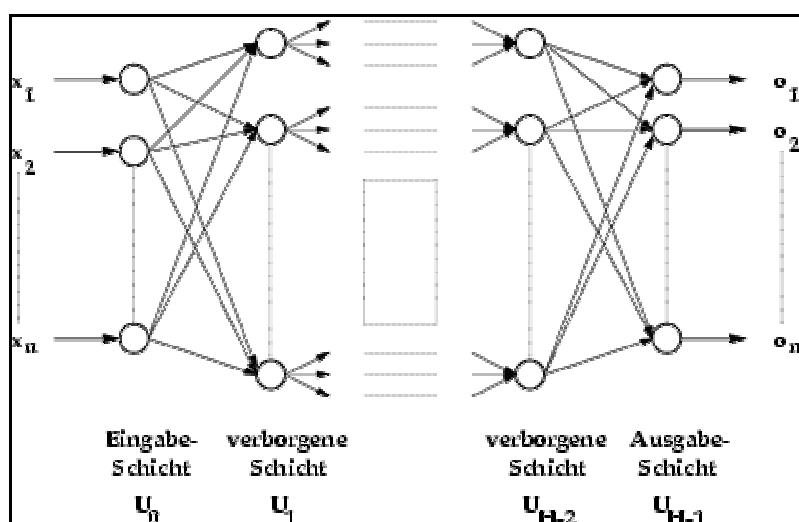


Abbildung 22: Aufbau eines „backpropagation“-Netzwerks [19]

2.3.5.4 Fuzzy-Systeme

Die Fuzzy-Systeme nehmen eine Art Sonderstellung in der Einteilung der neuronalen Netze ein. Die klassischen, symbolischen Systeme (binäre Systeme), bei denen der Ausgabewert 0 oder 1 ist, weisen einen großen Nachteil auf. Sie versuchen alle, die Realität mit nur zwei Zuständen zu beschreiben. Dies ist die Ursache für viele klassische Paradoxa. Das zweiwertige Logiksystem ergibt damit oft Widersprüche. Wird die Zahl der möglichen Logikwerte, beispielsweise alle reellen Zahlen aus dem Intervall $[0;1]$ ausgeweitet, so sind auch Ausgabewerte von z. B. 2 oder 0,5 möglich. Der Aussagewert liegt in der Mitte der beiden Extrema 0 und 1 und ist somit „unscharf“. Diese Form von Logik ist deshalb als „unscharfe Logik“, oder Fuzzy-Logik bekannt. Die Probleme der binären Logik lassen sich beseitigen, indem anstelle der scharfen Zuordnung reeller Variablen (Zustände) zu logischen Variablen als „unscharfe“ Zuordnung eine kontinuierliche Zugehörigkeitsfunktion eines logischen Attributs A einzuführen ist. Diese Funktion $m_A(x)$ ist also nicht auf die Menge beschränkt. Sie ist so definiert, dass sie mit zunehmendem Abstand der Variablen x vom

Wert x_A geringer erscheint [19]. In nachfolgender Abbildung 23 ist eine solche Funktion dargestellt.

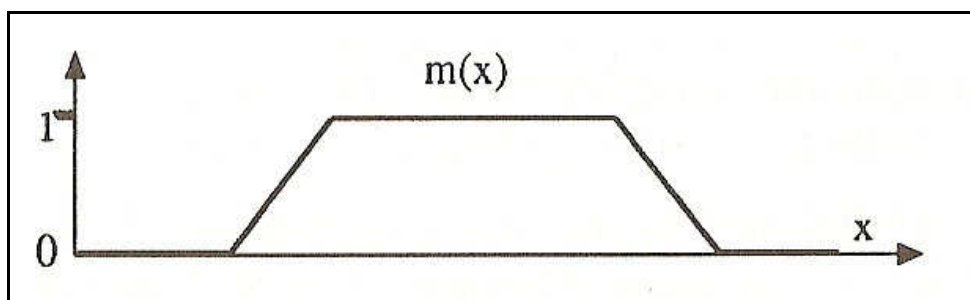


Abbildung 23: Zugehörigkeitsfunktion für die Variable x [19]

Üblicherweise haben die Zugehörigkeitsfunktionen meist eine Dreiecks- oder Trapezform, da eine einfache numerische Auswertung möglich ist.

Im Allgemeinen definieren solche Funktionen den Begriff der Glockenfunktionen.

2.3.6 Modellierung des Lernens

Wie schon eingangs erwähnt, haben neuronale Netze den großen Vorteil, dass sie „lernfähig“ sind. Die unterschiedlichen Lernregeln, die bei dem neuronalen Modellieren zur Anwendung kommen sind in den folgenden Kapiteln angeführt.

2.3.6.1 Hebb'sche Lernregel

Die erste Lernregel formulierte der Psychologe Donald Hebb. Im Jahre 1949 veröffentlichte er einen Algorithmus, mit dem er die Lernfähigkeit des Gehirns zu erklären versuchte. Aus seinen Forschungen war die untenstehende Gleichung, die Hebb'schen Lernregel formulierbar. Diese lässt sich wie folgt definieren [19].

$$\Delta w_{ij} = \eta \cdot o_i \cdot a_j \text{ und } w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij} \quad (31)$$

Δw_{ij} ist die Änderung des Gewichte w_{ij} , η eine Konstante (Lernrate), o_i die Ausgabe der Vorgängerzelle i , und a_j die Aktivität der Nachfolgerzelle j .

Die Gewichtsänderung einer Verbindung zweier Neuronen ist somit bei der Hebb'sche Lernregel abhängig von der konstanten Lernrate, der Ausgabe des Vorgängerneurons und dem aktuellen Wert der Aktivitätsfunktion des Nachfolgerneurons. Viele der in den folgenden Jahren entwickelten Lernregeln basieren auf der von Hebb [19].

Ein neuronales Netz "lernt", indem es sich gemäß einer fest vorgegebenen Vorschrift, der Lernregel, selbst modifiziert. Prinzipiell kann der Lernprozess bestehen aus:

- Entwicklung neuer Verbindungen
- Löschen existierender Verbindungen
- Modifikation der Verbindungsstärke (Veränderung der Gewichte)
- Modifikation des Schwellenwertes
- Modifikation der Aktivierungs- bzw. Ausgabefunktion
- Entwicklung neuer Zellen
- Löschen bestehender Zellen

Von diesen Möglichkeiten findet die dritte, also das Lernen durch Veränderung der Gewichte, am häufigsten Verwendung. Erst in letzter Zeit haben Verfahren, die auch eine Veränderung der Topologie beinhalten an Bedeutung gewonnen [19].

Bei der Art, nach jener ein neuronales Netz „lernt“ ist unter folgenden drei Arten zu unterscheiden:

- überwachtes Lernen
- bestärkendes Lernen
- unüberwachtes Lernen

2.3.6.2 Überwachtes Lernen

Beim überwachten Lernen gibt ein externer Lehrer dem Netz zu jeder Eingabe die korrekte Ausgabe oder den Unterschied der tatsächlichen zur korrekten Ausgabe an. Anhand dieser Differenz ist dann das Netz über die Lernregel modifizierbar [19].

Diese Technik setzt allerdings voraus, dass Trainingsdaten existieren, die aus Paaren von Ein- und Ausgabedaten bestehen. Ein typisches überwachtes Lernverfahren wie z.B. „backpropagation“ durchläuft für alle Paare von Ein- und Ausgabemustern folgende Schritte:

1. Durch entsprechende Aktivierung präsentiert das Eingabeneuron dem Netz das Eingabemuster.
2. Die angelegte Eingabe läuft vorwärts durch das Netz. Dadurch kommt es zur Erzeugung eines Ausgabemusters für die aktuelle Eingabe.
3. Tatsächliche und korrekte Ausgabe werden verglichen und die Differenz berechnet.
4. Die Fehler laufen rückwärts von der Ausgabe- zur Eingabeschicht. Hier verändern sich die Verbindungsgewichte und führen so zu einer Fehlerrückführung.

Die Gewichte aller Neuronen erfahren die Veränderung, um die vorher berechneten Werte [19].

2.3.6.3 Bestärkendes Lernen

Im Gegensatz zum überwachten Lernen erfährt das Netz beim bestärkenden Lernen lediglich, ob seine Ausgabe korrekt oder inkorrekt war. Das Netz erhält nicht den exakten Wert des Unterschiedes [19].

2.3.6.4 Unüberwachtes Lernen

Beim unüberwachten Lernen gibt es überhaupt keinen externen Lehrer, daher heißt dieses Lernparadigma auch „self-organised learning“. Das Netz versucht ohne Beeinflussung von außen die präsentierten Daten in Ähnlichkeitsklassen aufzuteilen.

Diese Vielzahl an Definitionen lässt erahnen, wie komplex aber auch flexibel und praktisch neuronale Netze sind. In welchen unterschiedlichen Anwendungsgebieten Neuronale Netze heute bereits Verwendung finden, soll das nächste Kapitel erläutern.

2.3.7 Anwendungen von Neuronalen Netzen

Neuronale Netze haben schon seit langem Einzug in die Forschung der künstlichen Intelligenz, Robotik, Sprach- und Bildverarbeitung gehalten. Zusätzlich zu diesen klassischen Anwendungsfeldern finden in letzter Zeit immer mehr neuronale Ansätze ihren Einsatz in Gebieten, die bisher mit analytischen oder regelbasierten Methoden zu lösen waren.

Diese häufig sehr unterschiedlichen Aufgabenstellungen haben alle gemeinsam, dass sie analytisch schwer beschreibbar oder aufgrund ihrer Komplexität mit herkömmlichen Verfahren nur unzureichend zu lösen sind.

Wie reich das Spektrum des Anwendungsgebietes von neuronalen Netzen ist, lässt die nachstehende Tabelle 5 erkennen.

Tabelle 5: Auflistung der Anwendungen von neuronalen Netzen [20]

Bereiche	Anwendungsgebiete		
Industrie	Qualitätskontrolle Sortierung Steuerungskontrolle	Kapazitätsplanung Robotersteuerung Mitgliederauswahl	Optimierung Materialsynthese Bildanalyse
Finanzen	Bonitätsvorhersage Buchstabenerkennung	Wertpapierbewertung Unterschriftenerkennung	Kursprognose Schätzungen
Tele- kommunikation	Datenkompression Optimierung des Signalverkehrs	Routinestrategien	Adaptive Filter Netzoptimierung
Medizin	Atemanalyse Diagnose	Blutdruckanalyse Bakterienidentifikation	Klinikmanagement Gewebeanalyse
Marketing	Erkennung von Mustern	Zielgruppenbestimmung	Konsumanalyse
Künstliche Intelligenz	Datenmanagement Spracherkennung	Wissensgewinnung Implizierte Regeln	Vorstrukturierung
Öffentlicher Dienst	Formularverarbeitung Automatisierung/Optimierung des Postverkehrs	Dienstplanoptimierung	Handschriftlesen
Verkehr	Hinderniserkennung Routenplanung für autonome Fahrzeuge	Fahrplanoptimierung	Ampelschaltung

Diese oben gezeigte Zusammenstellung der möglichen Anwendungen verdeutlicht die Vielschichtigkeit der Einsatzmöglichkeiten von künstlichen neuronalen Netzen. Bei konsequenter Umsetzung finden sich in Zukunft sicher noch viele weitere Bereiche für die Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen [20].

Die zukünftige Verwendung von neuronalen Netzen in weiteren Bereichen ist durch die Vorteile gegenüber statistischen Methoden begründet, welche das nachfolgende Kapitel beschreibt.

2.3.8 Vorteile von neuronalen Netzen gegenüber statistischen Methoden

Neuronale Netze bieten gegenüber statistischen Methoden eine Vielzahl von Vorteilen. Der erste ist, dass stark nichtlineare komplexe Aufgabenstellungen durch genaue Betrachtung jedes Messpunktes besser approximierbar sind. Statistische Methoden verwenden oft Regressionsverfahren, welche durch „Ausreißer“ stark beeinflussbar sind, da die Regressionsgerade alle Messpunkte beinhaltet.

Durch diesen Aspekt sind neuronale Netze auch bei „verrauschten“ Signalen den statistischen Methoden überlegen. So sind diese künstlichen Neuronen unempfindlicher auf nicht genau reproduzierbare Werte, wie sie in der Technik oft auftreten. Neuronale Netze sind in der Lage, Tendenzen zu erkennen.

Weiters ist es bei der Untersuchung eines technischen Prozesses oft notwendig, redundante Signale in die zu analysierenden Parameter mit aufzunehmen. Dies sind Prozessparameter die nicht unmittelbar mit dem Prozess zusammenhängen wie beispielsweise Umwelteinflüsse oder Lufttemperaturschwankungen usw. Diese redundanten Signale können einfach bei der Gewichtung der Neuronen auf einen sehr geringen Wert gesetzt und somit in die Prozessanalyse mit berücksichtigt werden, um etwaige Trends oder Beeinflussungen zu erkennen.

Statistische Methoden können nur unmittelbar den Prozess betreffenden Werte mitbehandeln, da diese redundanten Ereignisse das Ergebnis verzerren.

Einen weiteren Vorteil stellt die Möglichkeit dar, dass diskrete Attribute in Prozessuntersuchungen zu berücksichtigen sind. Gerade in der Technik stellt sich immer wieder das Problem, dass Ereignisse das Ergebnis beeinflussen, die nicht zählbar sind wie z. B. Schlackenspritzer usw. Solche Ereignisse können neuronale Netze sehr gut behandeln und gewichten. Statistische Methoden dagegen bieten oft nur eine Entscheidung zwischen 0 oder 1, das heißt es treten Schlackenspritzer auf oder nicht. Eine Quantifizierung ist aber nur kaum oder sehr kompliziert möglich [23].

3 Praktische Untersuchungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgte eine Optimierung der Möllerabbrände unter Anwendung eines neuronalen Netzes. Die dazu notwendige Basisdatenbank aller relevanten Rechenschritte ergab sich aus umfangreichen thermodynamischen Berechnungen mithilfe der Software HSC.

Aufgrund dieser Basisdatenbank waren alle Daten für die rechnerische Untersuchung der metallothermischen Ferromolybdänproduktion der Treibacher Industrie AG bekannt.

Der erste Schritt war eine Nachrechnung aller Abbrände des ersten Halbjahres von 2008. Aus diesen Daten sollte es möglich sein, einen Zusammenhang von unterschiedlichen Prozessparametern bzw. günstige Prozessbedingungen zu finden. Anschließend werden durch eine Optimierung der Möllierzusammensetzung diese günstigen Prozessparameter bei den nachfolgenden Chargen wieder eingehalten. Durch die Anwendung eines dafür entwickelten neuronalen Netzes ist es möglich, die Ferromolybdänproduktion hinsichtlich der Menge an Einsatzstoffen, sowie des Molybdängehaltes der Schlacke zu optimieren. Auf diesem Weg werden nicht nur Einsparungen hinsichtlich der Einsatzstoffe erzielt, sondern auch eine Optimierung bezüglich der Molybdänausbeute zu erreichen sein.

Im Rahmen der Dissertation [11] entstand eine Diplomarbeit [9] deren Aufgaben unter anderem eine genaue Verfahrensbeschreibung der Ferromolybdänproduktion, sowie eine Analyse der eingesetzten Rohstoffe war.

3.1 Verfahrensbeschreibung

Die Ferromolybdänproduktion ist in fünf Teilgebiete aufzuteilen. Diese sind die Möllermischanlage, die Abbrandstellen, die Filteranlage, die Schlackenaufbereitung und die Ferromolybdän-Brecherstraße. Die folgenden Kapitel beschreiben die einzelnen Teilgebiete näher.

3.1.1 Möllermischanlage

Alle Roh- und Zuschlagsstoffe kommen in ein Gefäß, dem so genannten Flow Bin, welches den Transport- und Mischbehälter darstellt. Ein Gabelstapler transportiert anschließend diesen zur Abbrandstelle. In der unten dargestellten Abbildung 24 ist der gesamte Stofffluss der Möllermischanlage dargestellt.

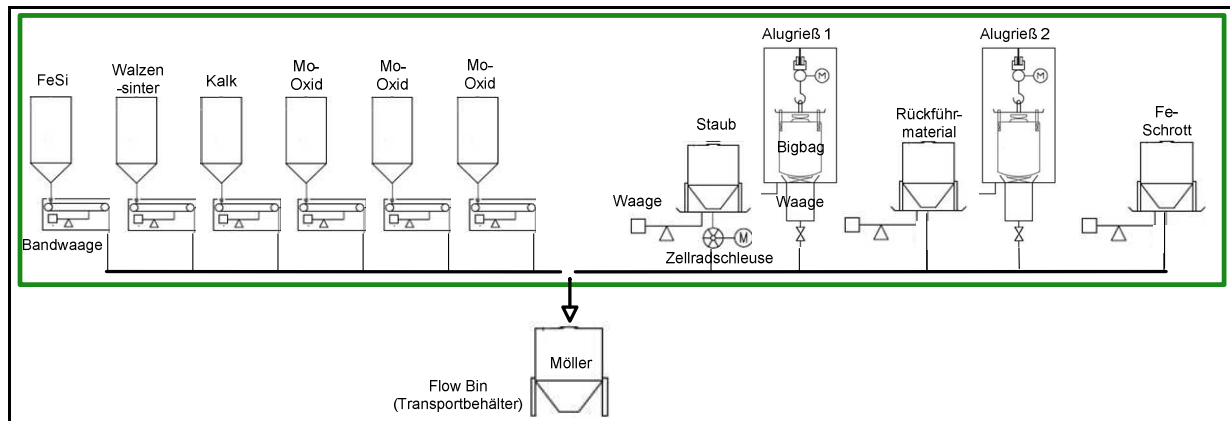


Abbildung 24: Stofffluss der Möllermischanlage [9]

Eine zentrale Steuereinheit regelt alle Waagen, welche die Möllermischung, die vor Beginn des Mischvorganges festzulegen ist, genau dosiert. Die Wiegung der Einsatzstoffe Ferrosilizium, Walzenzunder, Kalk und der Molybdänkonzentrate aus den Bunkern erfolgt mittels Bandwaagen. Förderbänder transportieren die Rohstoffe in den Flow Bin. Dabei entsteht Staub, welcher gesammelt als Rückmaterial dient. Die Anlieferung und Lagerung von Alugieß erfolgt in Big Bags. Dieser wird über eine Sackwaage verwogen. Auch Staub, Rückführmaterial und Fe-Schrott aus den jeweiligen Behältern erfahren eine Chargierung mittels Förderrohr auf das Förderband. Ein Flow Bin beinhaltet den halben Möller eines Abbrandes. Deshalb ergeben zwei davon, die mit demselben Möller gefüllt sind, einen Abbrand an der Produktionsstelle.

3.1.2 Abbrandstelle

Hier findet die eigentliche Ferromolybdänherstellung statt. Die Beschreibung der chemischen Prozesse und der Reaktionsvorgänge erläutert Kapitel 2.2.2.

Die Abbildung 25 zeigt das Fließschema der beiden vorhandenen Abbrandstellen.

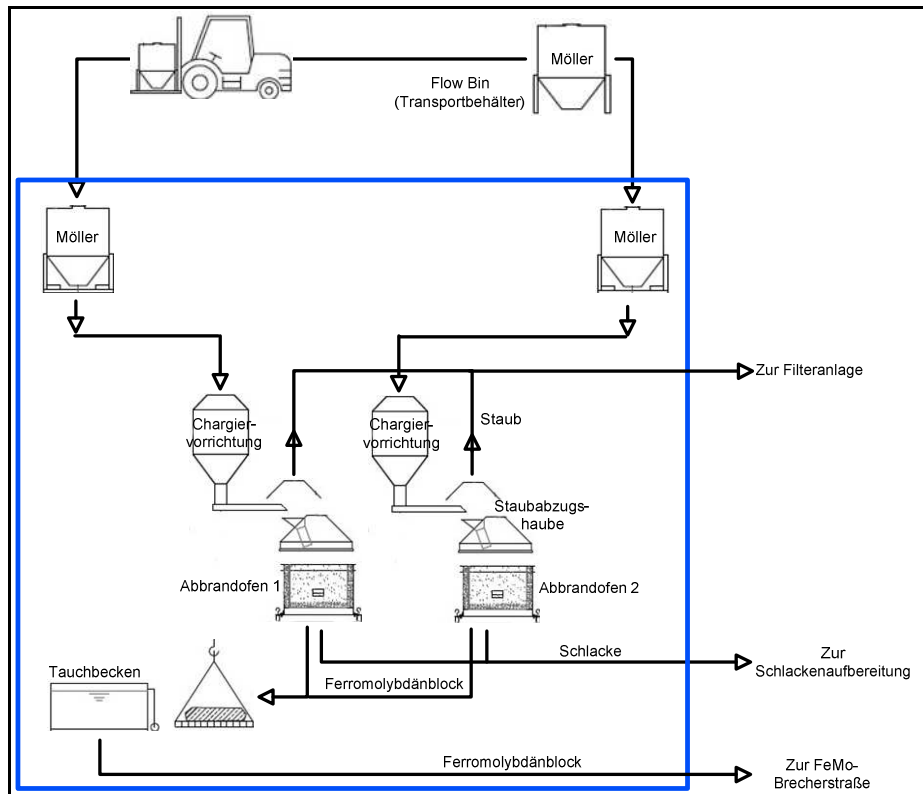


Abbildung 25: Fließbild der Abbrandstellen [9]

Eine Fördereinrichtung transportiert den gemischten Möller aus den Flow Bins in die Chargiervorrichtung, die über der Abbrandstelle platziert sind, von der aus der Möller über einen Trichter in den Ofen fällt [9].

Das Ofengefäß, Thermitofen genannt, weist einen Innendurchmesser von etwa zwei Meter, und eine Höhe von ca. einem Meter auf. Die Ofenwand besteht ebenfalls aus einem Stahlzylinder der eine Wasserberieselungskühlung aufweist. Als feuerfeste Auskleidung dient die im Prozess entstandene Schlacke. Ein zylinderförmiges Stahlblech stellt den so genannten Blechschuss dar. Dieser „Schuss“ wird in den Ofen eingesetzt und der Zwischenraum zwischen Ofenwand und Blechschuss mit Schlacke gefüllt und verdichtet. Auf diese Weise ergibt sich eine günstige feuerfeste Auskleidung für das Reaktionsgefäß. Dabei ist darauf zu achten, dass im Prozess keine zu hohen Temperaturen entstehen, da ansonsten das flüssige Ferromolybdän mit der Ofenwand in Berührung kommen kann, was den Stahlzylinder aufschmelzen würde. Dies kann zu einem Ofendurchbruch führen. Die Geschwindigkeit der Chargierung regelt das Ofenpersonal. Abzugshauben sorgen dafür, dass der größte Anteil des anfallenden Staubes in die Filteranlage gelangt. Nach Beendigung des Abbrandes erfolgt eine Absetzzeit von etwa 30 Minuten. Danach hebt der Hallenkran den Thermitofen auf die Schlackenabzugsstelle. Nach Abguss der gesamten Schlacke hebt der Kran das Ofengefäß mit dem entstandenen Ferromolybdänblock in die Abräumbox, das Ofenpersonal entfernt die Ofenwand, wodurch der Molybdänblock freigelegt

wird. Anschließend säubert ein Hubstapler den FeMo-Block von der, noch auf dem Block haftenden, hoch molybdänhaltigen Schlacke, mittels eines Schiebers. Diese lagert gesondert von der molybdänarmen Schlacken, um sie später wieder einsetzen zu können.

Nach dem Abkühlen des Ferromolybdänblockes im Wassertauchbecken reinigt das Ofenpersonal die Blockoberfläche gründlich von Schlackenresten mittels Handmeißel und Besen. Anschließend wiegt das Ofenpersonal den Block und es erfolgt eine Beprobung des Metalls [9].

3.1.3 Schlackenaufbereitung

Den größten Anteil der entstehenden Schlacke kann die Treibacher Industrie AG vor Ort wiederverwerten, indem sie zur Hinterfüllung der Ofenausmauerung dient. Dazu granuliert ein Wasserbad an der Abgussstelle die flüssige Schlacke. Dieses Granulat transportiert ein Kratzförderer in Transportboxen. Anschließend trocknet dieses mittels Heißluft um es danach in Hammermühlen zu mahlen. Dieser fein gemahlene Rückstand lagert in einem Bunker und dient als Füllmaterial für den nächsten Abbrand. Auch das Abgießen und Erstarren der Schlacke in Pfannen ist möglich. Auch hier ist ein Trocknen und Mahlen notwendig, um sie als Füllmaterial verwenden zu können. Schlacke die nicht als Hinterfüllung benötigt wird, ist zu deponieren [9].

In der nachfolgenden Abbildung 26 ist die Schlackenaufbereitung als Übersicht dargestellt.

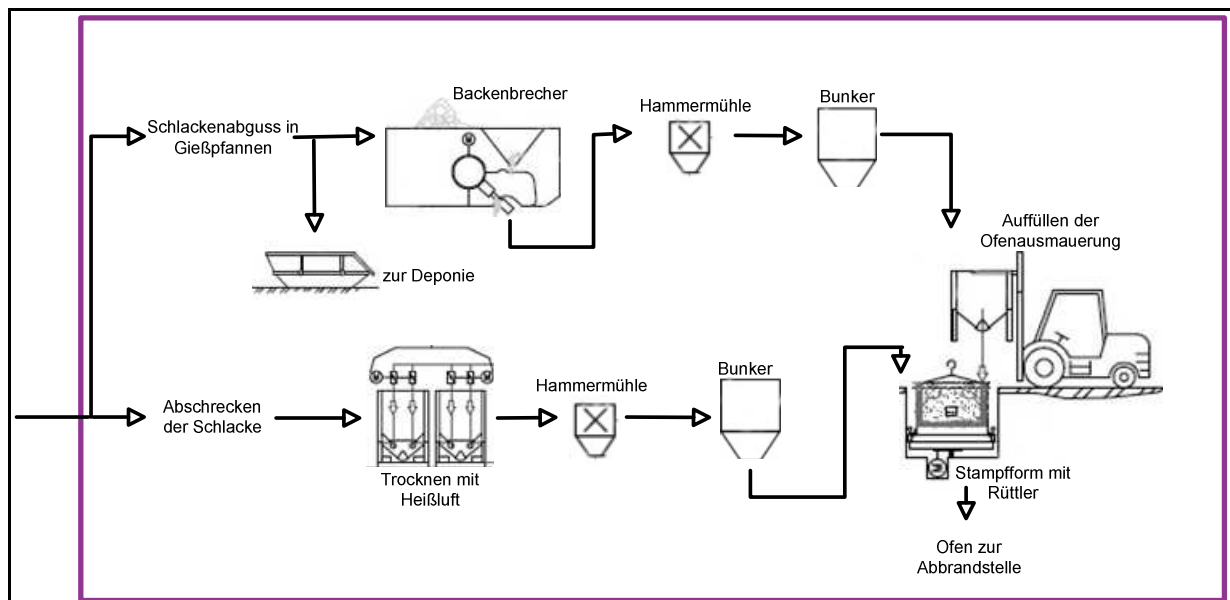


Abbildung 26: Übersicht der Schlackenaufbereitung [9]

3.1.4 Ferromolybdän Brecherstraße

Nach dem Wiegen und der Beprobung durchläuft der produzierte Ferromolybdänblock die Brecherstraße, um die gewünschten Kornfraktionen zu erreichen.

Anschließend an die grobe Vorzerkleinerung mittels eines Hydraulikhammers kommt das Material über eine Förderrinne in den ersten Backenbrecher. Über weitere Förderbänder gelangt das Ferromolybdän in ein Schwingsieb, welches drei Kornfraktionen herstellt. Der Überlauf, der Körner über 50 mm beinhaltet, erfährt mittels zusätzlichen Backenbrechers eine weitere Zerkleinerung und wird anschließend nochmals dem Sieb zugeführt. Etwa 80 Massenprozent des gesamten Blockes stellen die Hauptfraktion dar. Dies sind Körnungen in einem Bereich zwischen 10 mm und 50 mm. Diese gelangen über Förderbänder in einen Transportbehälter. Der Feinanteil, das heißt Körnungen < 10 mm gehen ein weiteres Mal in ein Sieb und werden in drei Unterfraktionen geteilt. Anschließend erfolgt das Abfüllen und der Verkauf nach Kundenspezifikationen. [9]

Die hier dargestellte Abbildung 27 zeigt die Ferromolybdän-Brecherstraße schematisch.

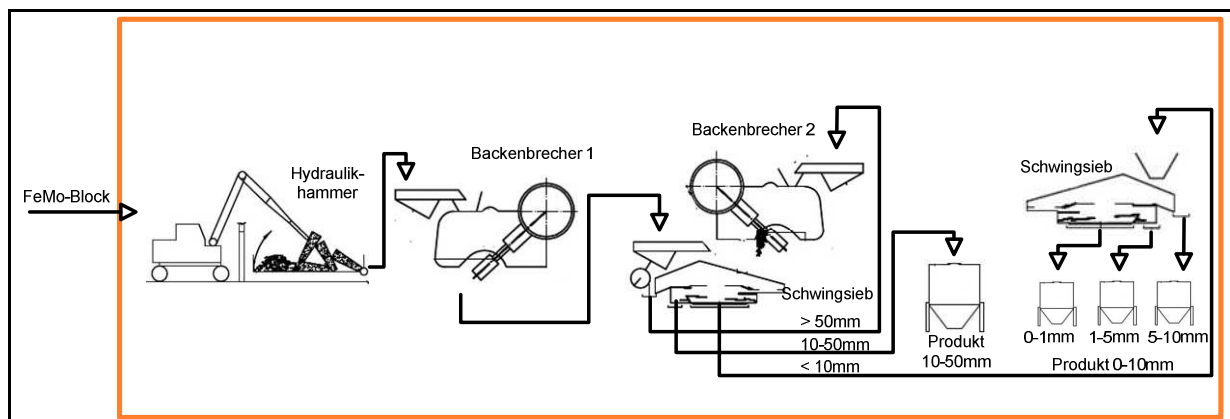


Abbildung 27: Fließschema der Brecherstraße [9]

3.1.5 Filteranlage

Im Zuge der Ferromolybdänherstellung entsteht eine erhebliche Menge an Stäuben. Filteranlagen sammeln diesen in allen Produktionseinheiten. Die Rückführung dieser Filterstäube zum Möller erfolgt in der Mischanlage. Die nachstehend angeführte Abbildung 28 zeigt eine Darstellung der Filteranlage.

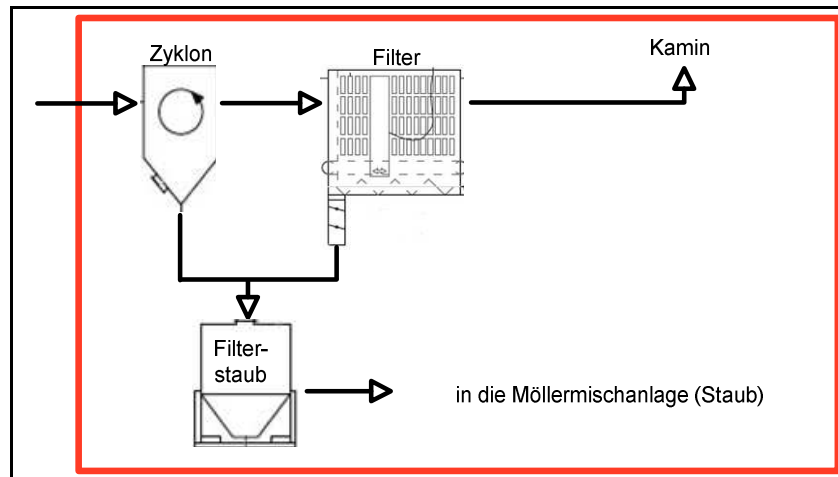


Abbildung 28: Fließschema der Filteranlage [9]

Stäube, die direkt über der Abbrandstelle entstehen, trennt ein Zyclon ab, der sie dann in einen Filter führt. Abgetrennter Staub wird in einem Transportbehälter gesammelt und zur Mischanlage gebracht und dort wieder dem Möller beigemischt.

3.2 Charakterisierung der Einsatz- und Rohstoffe

In diesem Kapitel erfolgt eine detaillierte Beschreibung aller Einsatz- und Rohstoffe hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Korngrößen.

3.2.1 Molybdänkonzentrat

Das Roherz Molybdänit, welches etwa 0,2 % MoS_2 enthält, stellt den Rohstoff für die Molybdängewinnung dar. Dieses Roherz wird gebrochen, gemahlen, klassiert und vorsortiert, um ein Vorkonzentrat mit ca. 10 % Molybdänitgehalt zu erhalten. Die nächste Stufe der Aufbereitung stellt eine mehrstufige Flotation dar, nach der das Material etwa 90 % MoS_2 und 0,2 bis 2 % Kupfer enthält. Da die maximale Kupferkonzentration für die Weiterverarbeitung aber mit 1,5 % limitiert ist, muss im Anschluss eine Laugung erfolgen.

Anschließend erfährt das Konzentrat eine Röstung, wodurch MoS_2 in MoO_3 nach folgender Gleichung reagiert.



Dieses Rösten geschieht in Drehrohröfen, Wirbelbettreaktoren oder Etagenöfen, wobei letzt genannte am häufigsten zum Einsatz kommen. Diese Aggregate weisen vertikal angeordnete Herdböden auf, bei denen der obere Teil zusätzlich mit Erdgas beheizt ist, um flüchtige Substanzen zu verbrennen und Feuchtigkeit auszutreiben. Der Röstprozess findet bei Temperaturen zwischen 400 und 650 °C statt. Temperaturen über 650 °C gilt es zu vermeiden, da das entstehende Molybdänoxid einen hohen Dampfdruck aufweist und somit bei höheren Temperaturen sublimieren würde. Dieser Sublimation steht die Tatsache gegenüber, dass sich bei hohen Temperaturen der Schwefelgehalt leichter senken lässt. Eine exakte Steuerung der Prozessparameter ist somit entscheidend [12], [27].

Die nachfolgende Abbildung 29 zeigt ein typisches Molybdänkonzentrat.



Abbildung 29: Molybdänkonzentrat [9]

In der unten gezeigten Abbildung 30 ist eine charakteristische Korngrößenverteilung der Molybdänkonzentrate dargestellt.

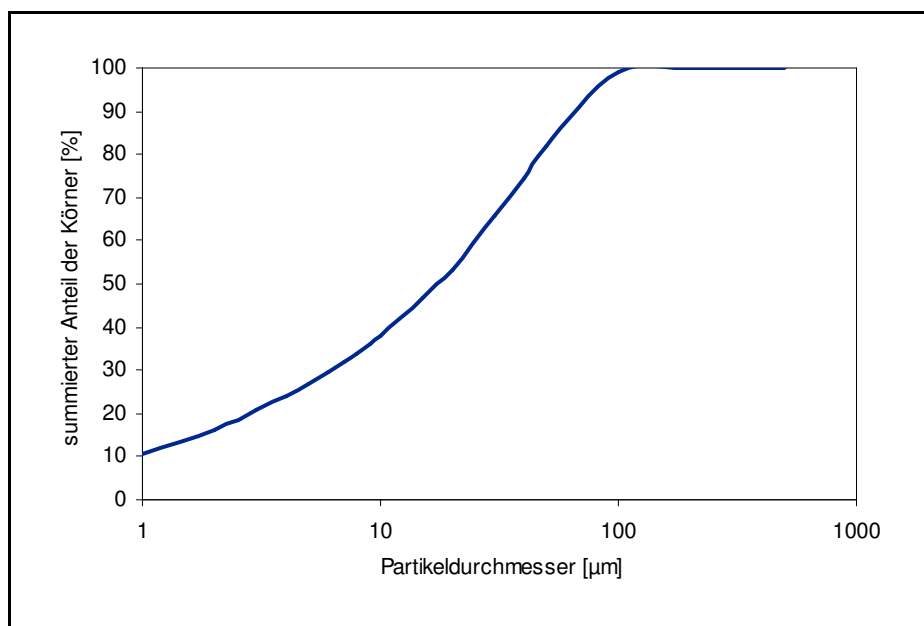


Abbildung 30: Korngrößenverteilung eines Molybdänkonzentrates [9]

Die Korngrößen der Molybdänkonzentrate können je Lieferant sehr unterschiedlich sein. In Abbildung 30 sind alle Partikel kleiner als 100 µm, einige Lieferanten liefern jedoch Korngrößen bis zu 400 µm. Die durchschnittliche Zusammensetzung eines Molybdänkonzentrates zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6: Zusammensetzung von Molybdänkonzentraten

Element	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

Die Molybdänkonzentrate bestehen neben MoO_3 auch aus Anteilen von nicht vollständig oxidierten Oxiden wie MoO_2 , $\text{MoO}_{2,889}$, $\text{MoO}_{2,75}$ und $\text{MoO}_{2,875}$. Die Gangart der Mo-Konzentrate ist hauptsächlich aus FeO , SiO_2 und Al_2O_3 zusammengesetzt.

3.2.2 Aluminiumgrieß

Aluminium dient im Prozess als Reduktionsmittel und wird in Form von Grieß eingesetzt. Eine durchschnittliche Siebanalyse stellt die nachfolgende Tabelle 7 dar.

Tabelle 7: Siebanalyse von Aluminiumgrieß

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

Die Korngrößenverteilung ist bei Aluminiumgrieß durch die verschiedenen Lieferanten einer großen Streuung unterworfen. Dies zeigt auch die unten gezeigte Abbildung 31.

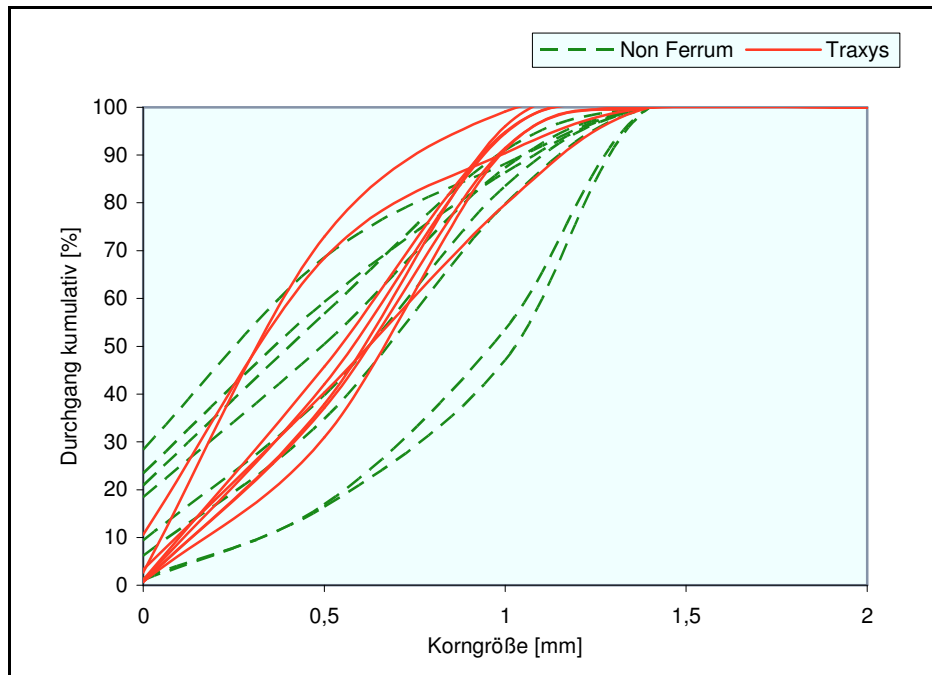


Abbildung 31: Korngrößenverteilung Aluminiumgrieß unterschiedlicher Lieferanten [9]

In der Abbildung 32 ist eine Aufnahme eines typischen Aluminiumgrieß dargestellt.



Abbildung 32: Aluminiumgrieß [9]

Aluminiumgrieß besteht zu über 90 % aus Aluminium. Die größte Verunreinigung ist Eisen, welches bis zu 6 % enthalten sein kann. Kleinere Mengen an Titan, Silizium, Mangan, Kupfer Zink oder Kalzium sind ebenfalls vorhanden. Der Gesamtgehalt dieser Verunreinigungen liegt zwischen 1 – 5 %.

3.2.3 Ferrosilizium

Das in Form von Ferrosilizium chargierte Silizium dient neben dem Aluminium als Reduktionsmittel. Durch Einsatz dieses Elementes gestaltet sich der Thermitabbrand kontrollierbarer. Würde ausschließlich Aluminium als Reduktionsmittel zur Anwendung kommen, wäre der Ablauf der Reduktion zu schnell und explosionsartig. Bei der Verwendung von Silizium reagiert die Mischung zu langsam, da zu wenig Energie freigesetzt und so die notwendige Temperatur nicht erreicht wird. Aus diesem Grunde findet eine Mischung dieser beiden Elemente Anwendung. Ein weiterer positiver Aspekt ist der niedrigere Preis im Vergleich zu Aluminium [9].

Die unten angeführte Abbildung 33 zeigt Ferrosilizium, welches 75,5 % Si enthält.



Abbildung 33: Ferrosilizium mit 75,5 % Silizium [9]

Das eingesetzte Ferrosilizium besitzt ein sehr großes Korngrößenspektrum. Das angelieferte FeSi ist grob in drei Anteile zu unterteilen, dem Fein- (0 - 0,1mm) dem mittleren (0,1 - 0,35) und einem Grobanteil. Die Fein- und Grobanteile betragen gemeinsam etwa 70 % der gesamt betrachteten Menge, was bedeutet, dass nur ein geringer Bereich in einer mittleren Korngröße vorliegt. Eine lieferantenspezifische Zuordnung des Ferrosiliums ist nicht möglich, da die Lagerung sämtlicher angelieferten Lose in einem gemeinsamen Bunker erfolgt. Die Abbildung 34 zeigt die Korngrößenverteilungen einiger FeSi-Proben.

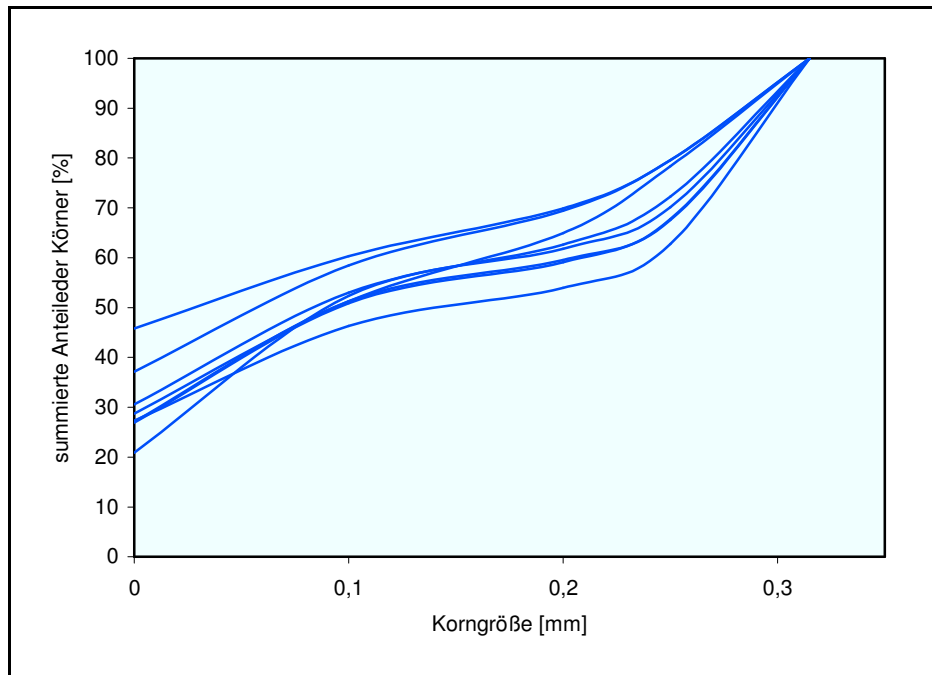


Abbildung 34: Korngrößenverteilung von Ferrosilizium [9]

Die durchschnittliche Zusammensetzung einer angelieferten Ferrosiliziumcharge ist in der nachfolgenden Tabelle 8 dargestellt [9].

Tabelle 8: Zusammensetzung von Ferrosilizium

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

3.2.4 Kalk

Um die Schlacke in der gewünschten Viskosität zu erhalten, in welcher sich das Ferromolybdän rasch absetzen kann, findet eine Chargierung von Kalk als Flussmittel statt. Den Hauptanteil dieses gebrannten Kalkes bildet CaO (< 98 %). Kleine Verunreinigungen stellen SiO₂, Al₂O₃, MgO und Fe₂O₃ dar [9].

3.2.5 Filterstaub

Bei den Produktionsschritten wie Abbrandprozess, Schlackenaufbereitung oder FeMo-Brecherstrasse entstehen große Mengen an Staub. Eine Absaugvorrichtung sammelt diese und führt sie zur Möllermischanlage zurück, wo dieser Staub wieder als Einsatz dient.

Eine mittlere Zusammensetzung der Filterstäube ist der unten angeführten Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Zusammensetzung von Filterstaub

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

3.2.6 Walzenzunder

Walzenzunder, der als Nebenprodukt bei der Stahlerzeugung anfällt besteht größtenteils aus oxidiertem Eisen in Form von Fe₃O₄. Er stellt eine wichtige Eisen- und Wärmequelle im Prozess dar. Die nachfolgende Abbildung 35 zeigt die Korngrößenverteilungen von verschiedenen Proben.

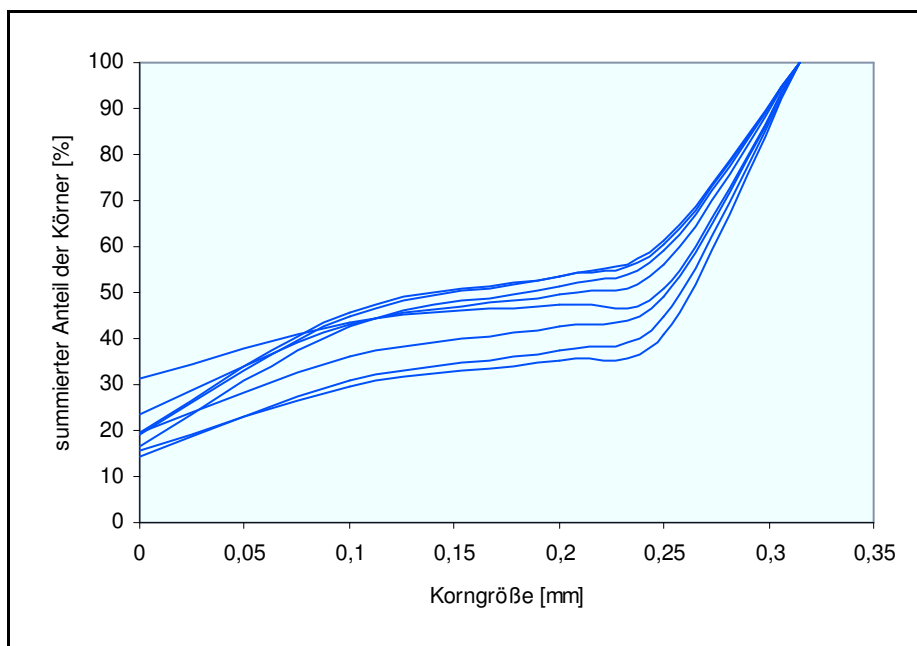


Abbildung 35: Korngrößenverteilung des Walzenzunders [9]

Auch hier liegt wie bei Ferrosilizium nur ein kleiner Teil in einem mittleren Korngrößenbereich von 0,1 bis 0,25 mm. Die durchschnittliche chemische Zusammensetzung ist in der Tabelle 10 aufgelistet.

Tabelle 10: Zusammensetzung von Walzenzunder

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

3.3 Charakterisierung der Produkte

Im behandelten Prozess entsteht das Produkt FeMo65 und Schlacke als Nebenprodukt. Eine Charge ergibt etwa 2900 kg Ferromolybdän und 3200 kg Schlacke.

3.3.1 Ferromolybdän

Die Beprobung des Ferromolybdäns erfolgt nach der Abkühlung des Blockes. Hierzu sind Stücke von verschiedenen Stellen des FeMo-Blockes abzutrennen und diese Proben zu pulvern. Dabei schmilzt eine Hochfrequenz-Umschmelzanlage diese pulverförmige Probe zu einer Perle, um sie anschließend mittels RFA (siehe 3.4.3) sowie Leco-Gerät (siehe 3.4.4) zu analysieren. Die durchschnittliche Zusammensetzung eines Blockes ist der Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Zusammensetzung des erzeugten Ferromolybdäns

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

Wie aus der Tabelle zu entnehmen ist, enthält der Grobanteil des Produktes mindestens 65 % Molybdän. Kleine Verunreinigungen sind Kupfer und Silizium. Der Feinanteil hat einen niedrigeren Molybdängehalt von etwa 60 - 65 % und erfährt nochmals eine Unterteilung in drei Kornklassen. Die nachfolgend dargestellte Tabelle 12 zeigt die Massenanteile der unterschiedlichen Kornklassen.

Tabelle 12: Massenanteil der verschiedenen Kornklassen

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

Den größten Bereich stellt dabei die Fraktion zwischen 10 und 50 mm dar.

3.3.2 Schlacke

Wie im vorigen Kapitel bereits erwähnt, fallen bei jedem Abbrand zwischen 3200 kg und 3500 kg Schlacke an. Während des Abgießens der Schlacke zieht das Ofenpersonal direkt aus dem Gussstrahl eine Schlackenprobe, die vor Ort auf einer Eisenplatte erstarrt. Diese Probe wird ebenfalls gepulvert und im Labor mittels RFA auf den Mo-Gehalt analysiert. Die chemische Zusammensetzung ist von den Einsatzstoffen abhängig. Die Tabelle 13 zeigt mögliche Zusammensetzungen.

Tabelle 13: Typische Zusammensetzung der Schlacke

Bestandteil	Konzentration [%]
SiO ₂	35 - 60
FeO	6 - 30
Al ₂ O ₃	8 - 30
CaO	8 - 15
MoO ₃	0 - 2

3.4 Verwendete Analysegeräte

Im nachfolgenden Kapitel findet eine kurze Erläuterung der Analysegeräte, die bei den Versuchen verwendet wurden sowie zur Charakterisierung der Rohstoffe dienen, statt.

3.4.1 ICP-Analyse

Zur Molybdänbestimmung mittels ICP (induktiv gekoppeltes Plasma) verwendet die Treibacher Industrie AG das OES-Gerät Optima 3000 DV der Firma Perkin Elmer. Dieses simultane Spektrometer kann flüssige Proben axial und radial messen.

Eine Stickstoffspülung ermöglicht einen Arbeitsbereich von 167 - 200 nm. Die Probe ist dabei zu zerstäuben, da das Gerät nur flüssige Stoffe analysiert. Diese Verflüssigung der pulverförmigen Proben ist durch einen Schmelzaufschluss zu erreichen. Ein Mikroprozessor gesteuertes Aufschlussgerät H.R.T./Claisse Fluxy 10/30 vollzieht diesen. Dieses Verfahren eignet sich für Analysen von pulverförmigen Proben mit Elementgehalten von ca. 0,01 - 100 % in oxidischen und metallischen Materialien.

Ein Argonstrom und eine Quarzfackel halten das induktiv gekoppelte Plasma aufrecht. Ein oszillierendes elektromagnetisches Feld mit einer Hochfrequenz von 40 MHz speist dieses Plasma. Die Erzeugung des Feldes erfolgt in einer Spule, welche die Fackel umgibt. Eine peristaltische Pumpe fördert die flüssige Probe in den Zerstäuber, welche über das zentrale

Fackelrohr ins Plasma eingeleitet wird. Die Zerlegung des Lichtes des Plasmas funktioniert für jedes Element nach charakteristischen Spektrallinien in einer Eschelleoptik. Die Messung erfolgt mittels lichtempfindlichem Halbleiter-Detektor (SCD-Detektoren).

3.4.2 Korngrößenverteilung

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgte mit dem Gerät PA X100 Particle Size Analyser.

3.4.3 RFA-Analyse

Ein Röntgenspektrometer (Type 8480-S) stellt das RFA-Gerät dar, mit dessen Hilfe chemische Analysen von festen Stoffen und Flüssigkeiten möglich werden. Die Bestrahlung mit Elektronen-, Röntgen- oder Gammastrahlen regt die Atome bzw. Ionen in der zu untersuchenden Probe zur charakteristischen Röntgenstrahlung an. Ein unter einem bestimmten Winkel angeordnetes Detektorsystem untersucht diese charakteristische Strahlung auf Intensität und spektrale Verteilung. Die chemische Analyse ergibt sich über den Zusammenhang von Zusammensetzung der Probe und dem Spektrum der angeregten Fluoreszenzstrahlung. Enthaltene Elemente sind so quantitativ und qualitativ bestimmbar. Dieses Röntgenspektrometer eignet sich zur Ermittlung aller Elemente des Periodensystems von Uran bis Bor und kann Elementkonzentrationen vom ppm-Bereich bis zu 100 % detektieren. Die Qualität der Messungen ist dabei von der zu bestimmenden Konzentration des Elementes und der Matrix abhängig. Diese RFA kann Tabletten, umgeschmolzene Perlen oder Ingots analysieren.

3.4.4 Leco-Gerät

Zur Messung von Kohlenstoff und Schwefel im Messbereich von 0,001 - 100 % kommt das rechnergesteuerte, standardisierte Analysegerät LECO CS 444 zum Einsatz. Die Messung erfolgt nach dem Prinzip der Infrarot Absorption der pulverförmigen Proben. Die Genauigkeit der Analysen liegt bei C-Messungen bei 0,5 % des mittleren Wertes und bei Schwefel-Bestimmungen je nach Höhe des Ergebnisses zwischen 2 und 5 % des Messergebnisses.

Die nachfolgenden Teile dieser Arbeit beschreiben die wesentlichen Punkte, welche die Erstellung und Implementierung des neuronalen Netzes erforderte.

3.5 Erstellung einer Datenbank zur Trendanalyse

3.5.1 Vorbereitende Arbeiten und Kontrollen

Dem neuronalen Netzes mit welchem eine Optimierung der Möllerabbrände durchgeführt worden ist, ging eine Erstellung einer Datenbank die alle thermodynamisch relevanten Werten enthält, voraus.

Diese Datenbank beinhaltet unter anderem die Anteile der auftretenden Oxidphasen von Molybdän, sowie alle anderen auftretenden Phasen hinsichtlich der Zuschlags- und Hilfsstoffe. Weiters enthält sie die Schmelzpunkte der sich bildenden Schlacke und die im Prozess frei werdende Energie.

Diese Datenbank stellte die Grundlage des neuronalen Netzes, welches für eine Optimierung der Abbrände zur Anwendung kam, dar.

Das Modell bot folgende variable Eingabefelder, die in nachstehender Tabelle 14 gezeigt sind.

Tabelle 14: Variable Eingabeparameter des neuronalen Netzes

MoO ₂
MoO ₃
MoO _{2,889}
MoO _{2,75}
MoO _{2,875}
Al ₂ O ₃ aus Gangart
SiO ₂ aus Gangart
FeO aus Gangart
Zugabemenge an Reduktionssilizium
Zugabemenge an Reduktionsaluminium
Gesamtmenge an Kalk im Möller
Gesamtmenge an Eisen im Möller
Walzenzunder

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, ermöglicht das neuronale Netz die Eingabe der unterschiedlichen Molybdänoxide, die Mengen der Hilfsstoffe, die der Reduktion und der Schlackenbildung dienen, sowie die Anteile an Zuschlagsstoffe, welche zur metallothermischen Ferromolybdänproduktion benötigt werden.

Die Ausgabeparameter des Modells sind in Tabelle 15 angeführt.

Tabelle 15: Ausgabewerte des neuronalen Netzes

Enthalpie des Abbrandes
Molybdängehalt in FeMo
Schmelzpunkt der Schlacke
Viskosität der Schlacke bei 1800 °C
Molybdänmenge in der Schlacke

Durch diese prozesstechnisch relevanten Werte war es mithilfe des neuronalen Netzes möglich, die optimalen Prozessparameter zu finden und anhand der Software NN-Tools, die wichtigsten Kennwerte vergangener Chargen zu berechnen. Diese konnten anschließend mit den bereits vorhandenen Analyseergebnissen verglichen und Diagramme erstellt werden.

Dabei war zu beachten, dass die nachgerechnete Mischung dem tatsächlichen Abbrand entspricht. Das heißt, dass die Zugabemengen an Ferrosilizium, Walzenzunder, Kalk und Aluminium bei jedem Abbrand übereinstimmten.

Weitere Informationen zur Erstellung der Datenbank und des neuronalen Netzes sind in einer Dissertation die am Christian Doppler Labor für Sekundärmetallurgie der Nichteisenmetalle durchgeführt worden ist, zu entnehmen [11].

Etwa 75 mischungsgleiche Chargen erfuhren eine Nachrechnung, wobei etwa 15 Chargen wieder aus der Tabelle, die als Grundlage für die Trendanalyse in Betracht kam, zu entfernen waren. Grund dafür waren zu geringe Werte der hinzugefügten Menge an Eisenschrott, da das erstellte neuronale Netzwerk nur in einem Wertebereich von 520 kg - 590 kg Eisen gültig ist. Tatsächlich traten aber immer wieder Chargen auf, deren gesamt zugegebene Eisenmenge lediglich 490 kg oder weniger betrug. Dies führte aufgrund der fehlenden Berechnungswerte des neuronalen Netzes zu Ergebnissen, die nicht der Realität entsprachen und es wurden Viskositäten von unter 0,1 Pa·s ausgegeben. Dieser Umstand machte eine spätere Erweiterung der Rohstoffdatenbank für das neuronale Netz nötig, um auch diese Werte zur Erstellung der Trendanalyse verwenden zu können.

Auch Chargen, deren zugegebenen Mengen an Walzenzunder nicht mehr in den Modellgrenzen lagen, traten auf. Eine Erweiterung des Modells auf 1100 kg Walzenzunder als Obergrenze war notwendig.

Bei der Nachrechnung ergab sich immer wieder das Problem, dass Einträge der erstellten Datenbank bei den Molybdän- und Sauerstoffgehalten nicht mit den Analyseergebnissen des Betriebes korrelierten. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Analysenwerte zum Zeitpunkt der Chargierung nicht immer vorliegen. Die Produktionsleitung ist somit gezwungen, Molybdän- und Sauerstoffgehalte anhand von bereits früher eingesetzten, ähnlichen Konzentraten zu schätzen.

Dies lässt vermuten, dass das Ergebnis der Trendanalyse verfälscht ist. Um den Einfluss einer „Fehlschätzung“ zu beurteilen, erfuhr eine Charge aus den Rohstoffen mit den FL-Nummern 126, 128 und einer Mischung der Nummern 121 und 127 eine rechnerische Kontrolle. Dazu wurde zunächst eine Charge einer reguläre Mischung mithilfe des neuronalen Netzes berechnet und anschließend mit Versuchschargen, die einen veränderten Gehalt an Molybdän, Sauerstoff und Reduktionsmitteln aufweisen, verglichen. Jedoch zeigte diese Gegenüberstellung von Mischungsgleichen Chargen mit unterschiedlichen Gehalten an Sauerstoff und Molybdän, dass der Einfluss eines falsch geschätzten Sauerstoff- oder Molybdänwertes tolerierbar ist (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Auswirkung von Gehaltsänderungen von Sauerstoff und Molybdän am Beispiel von Charge 767 [11]

Möllermischung:	Fl-Nummer	Protokoll Nummern	Menge	Mo-Gehalte	
	126	813/08	500	62,20 %	
	128	823/08	450	61,14 %	
	121+127	805/08+821/08	677	Ø 59,56 %	
Errechnete Werte NN	Enthalpie [MJ]	Mo Gehalt Block [%]	Schmelzpkt [°C]	Viskosität [Pa·s]	Mo in der Schlacke [kg]
reguläre Mischung	-15.539	69,36	1043,642	0,449	7,01
+10 kg Sauerstoff	-15.650	69,37	1043,796	0,452	7,01
+2 kg Mo	-15.531	69,31	1043,604	0,452	6,94
-10 kg FeSi +4,8 kg Al	-15.704	69,39	1044,146	0,451	7,06

NN....neuronales Netz

Das Ergebnis dieser Versuchsrechnung war die Erkenntnis, dass die Schwankungsbreite bei ungenauen Sauerstoffgehalten vertretbar ist. Da $\pm 0,2 \%$ Mo und $\pm 2 \%$ O₂ (± 2 kg Mo und ± 10 kg Sauerstoff auf die gesamte Möllermenge) auf einen kompletten Abbrand einen sehr geringen Einfluss haben. Weder Enthalpie noch Viskosität erfuhren eine deutliche Veränderung durch die Gehaltsvariierung.

Die Berechnung einer Substitution von 10 kg weniger FeSi bei trotzdem gleichen Reduktionspotenzial durch eine Erhöhung des Aluminiums hatte ebenfalls sehr geringe Auswirkungen. Die einzig auffällige Änderung ergab sich in der frei werdenden Reaktionsenthalpie. Jedoch ist auch diese als eher gering einzustufen.

Um die Genauigkeit der Blockgewichte überprüfen zu können, wurde eine Waagenanalyse durchgeführt. Dies war notwendig, da das gemessene Blockgewicht später zur Beurteilung der Qualität der Optimierung heranzuziehen ist. Für eine Überprüfung der Genauigkeit der Waagen, erfolgte die Verwiegung eines leeren Flow Bins auf der Blockwaage. Eine genaue Aufstellung und Protokollierung der Referenzwägung zeigt die Tabelle 17.

Tabelle 17: Kontrolle der Waagen am Beispiel der Charge 735/2

	Menge [kg]
Anzeige der Bodenwaage	3174,0
Gewicht laut Bandwaagen	3168,1
Differenz der Mischanlage	5,9
Leergewicht Flow Bin	558,0
Errechnetes Gewicht Flow Bin + Möller	3732,0
Blockwaagengewicht Flow Bin + Möller	3728,0
Differenz Blockwaage zu Bodenwaage	4,0

Die Bandwaage ist jene Waage, welche die Möllermischung aus den Bunkern chargiert. Die Blockwaage kommt bei der Wiegung des reduzierten Molybdänblocks zum Einsatz. Um die Differenz zwischen der programmierten Möllermenge und der tatsächlich chargierten festzustellen, kam die Bodenwaage zum Einsatz. Die „Ungenauigkeit“ der Möllermischanlage ist mit 5,9 kg auf eine Menge von über 3 Tonnen als vernachlässigbar anzusehen.

Da der Unterschied zwischen Bodenwaage und Blockwaage mit lediglich 4 kg sehr gering ausfiel, ist es aber durchaus zulässig, das erhaltene Gewicht als Beurteilungskriterium der optimierten Chargen zu verwenden.

Um die Aussagekräftigkeit der gemessenen Schlackenwerte überprüfen zu können, wurde die Probenahme mehrmals beobachtet. Grobe Unterschiede oder zeitliche Differenzen in der Durchführung waren nicht feststellbar. Die Probenahme erfolgt mit Hilfe eines Schöpfers, mit dem das flüssige Metall auf ein zuvor gereinigtes Blech geleert wird. Der Zeitpunkt der Probenahme kann aber mitentscheidend sein, da diese nicht immer bei exakt gleichem Füllstand des Abbrandtiegels erfolgt. Es ist darauf zu achten, dass nur ein sauber gereinigtes Schöpfgefäß bei der Probenahme Verwendung findet. Eine sorgfältige Reinigung ist somit vor der Durchführung wichtig.

Da nun die einzelnen Daten kontrolliert und eine Prüfung auf deren Richtigkeit erfolgte, konnte eine Trendanalyse erfolgen und der Zusammenhang von Betriebsparameter und Molybdän in der Schlacke berechnet werden.

3.5.2 Trendanalyse zur Ermittlung der Betriebsparameter

Die Gegenüberstellung der einzelnen errechneten mit den gemessenen Betriebsparametern liefert eine Reihe von Zusammenhängen. Mithilfe dieser Daten wurden Diagramme gezeichnet mit deren Hilfe eine Kombination aus günstigen Prozessparametern gepaart mit einer Einsparung hinsichtlich der Menge an Zuschlagsstoffen zu finden sein sollte.

Diese Trends werden im nachfolgenden Kapitel genau beschrieben und die Erkenntnisse daraus erläutert.

Die Gegenüberstellung des gemessenen Molybdäns in der Schlacke mit der errechneten Viskosität ist in untenstehender Abbildung 36 dargestellt.

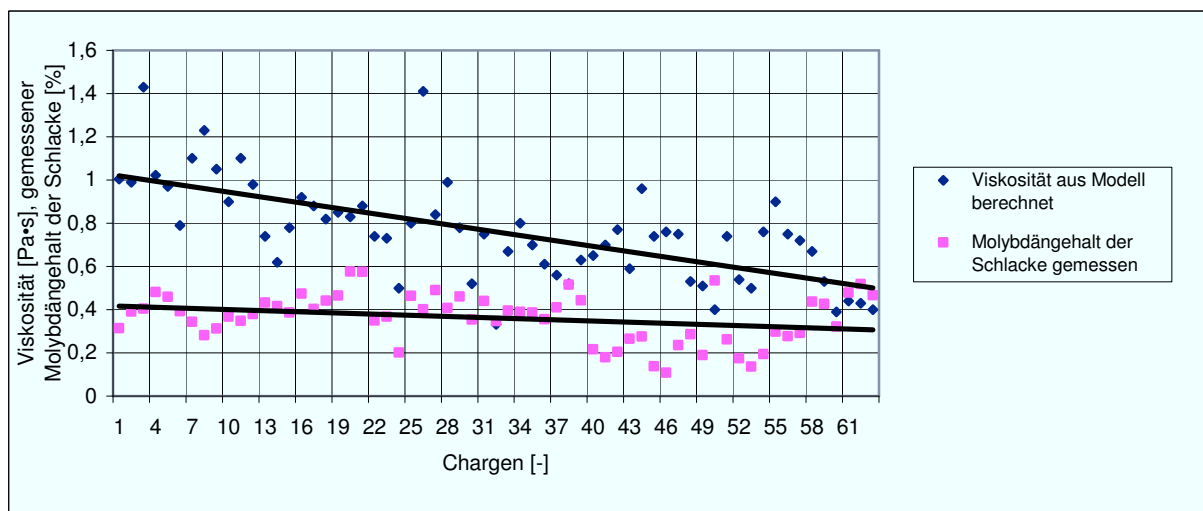


Abbildung 36: Verlauf der Viskosität und gemessenes Molybdän in Schlacke [11]

Die oben angeführte Gegenüberstellung zeigt die berechnete Viskosität und die gemessenen Molybdängehalte in der Schlacke. Die Berechnung der Viskosität sowie aller weiteren Parameter sind der Dissertation [11] zu entnehmen. In dem Diagramm ist zu sehen, dass mit geringer werdender Viskosität weniger Molybdän in der Schlacke zu finden ist, da das bereits reduzierte Material leichter in die Schmelze sinken kann. Dies ist anzustreben, da somit weniger Molybdän in die Schlacke verloren geht. Dieser Zusammenhang ist eindeutig zu erkennen und wurde auch mit steigender nachgerechneter Chargenanzahl immer deutlicher.

Der Vergleich des Gehaltes an Molybdän in der Schlacke mit der berechneten gesamten Reaktionsenthalpie ist in nachstehender Abbildung 37 aufgetragen.

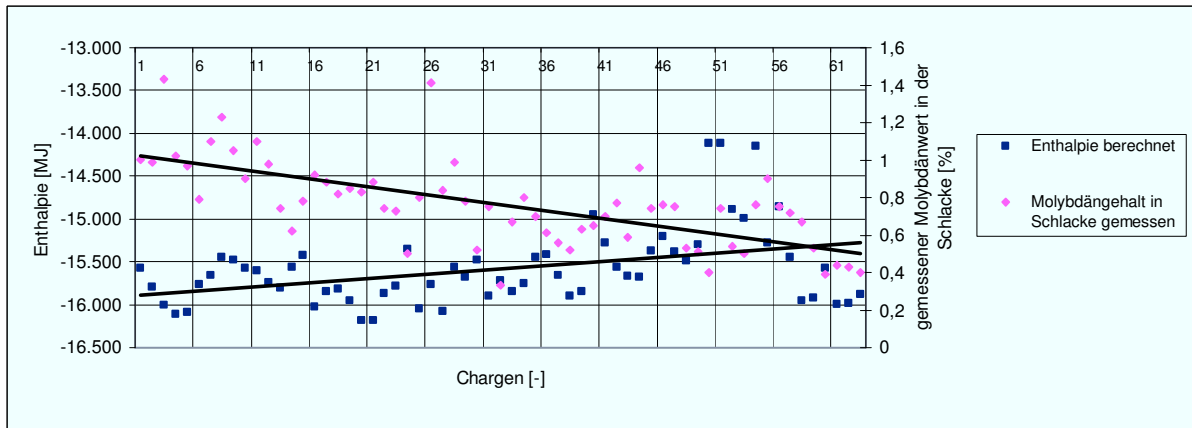


Abbildung 37: Verlauf der Enthalpie und des gemessenen Molybdäns in der Schlacke [11]

Hier ist zu erkennen, dass bei einem Abbrand mit geringerer Enthalpie, weniger Molybdän in die Schlacke verloren geht. Dies erscheint im ersten Moment nicht nachvollziehbar, da ein Abbrand mit hoher Enthalpie günstigere Reduktionsbedingungen schafft und aus diesem Grunde weniger Wertmetall in der Schlacke zu erwarten ist.

Dieser Widerspruch ist dadurch erklärbar, dass bei der Messung des Molybdängehaltes in der Schlacke nicht zu unterscheiden ist, ob das Molybdän bereits in metallischer Form vorliegt, oder noch als nicht reduziertes Oxid mit in die Schlacke geht.

Die grundsätzliche Richtigkeit des Modells ist weiters mit einer Gegenüberstellung der gemessenen Molybdänwerte der Schlacke mit dem errechneten Molybdängehalt des Blockes zu kontrollieren. Dies ist in nachfolgender Abbildung 38 gezeigt.

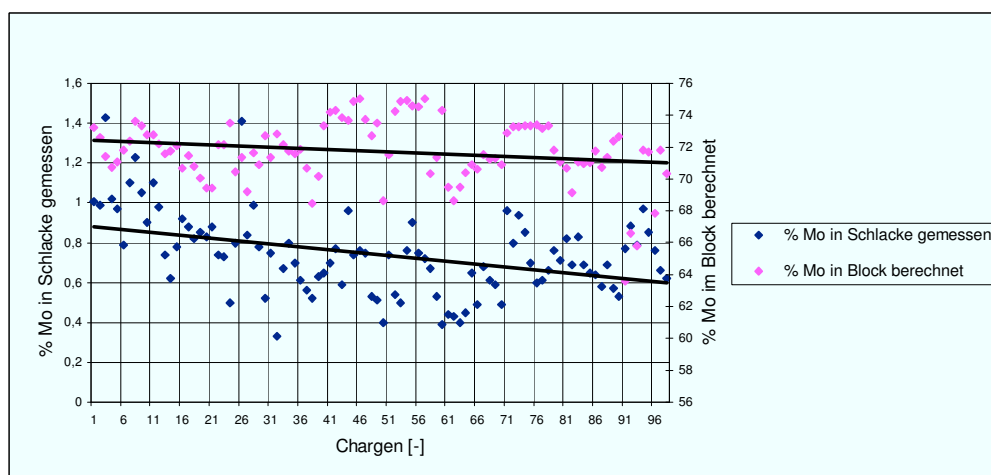


Abbildung 38: Verlauf des Molybdäns im Block und des Molybdäns in der Schlacke [11]

Je geringer der Molybdängehalt der Schlacke ist, umso höher ist der prozentuelle Anteil an Molybdän im Block. Das Modell ist also grundsätzlich richtig.

Weiters konnte aufgrund der Erstellung der Diagramme, die zur Trendanalyse notwendig waren, eine beträchtliche Steigerung der Produktivität ausgearbeitet werden. Dies spiegeln auch die nachfolgenden Abbildung 39 und Abbildung 40 wider.

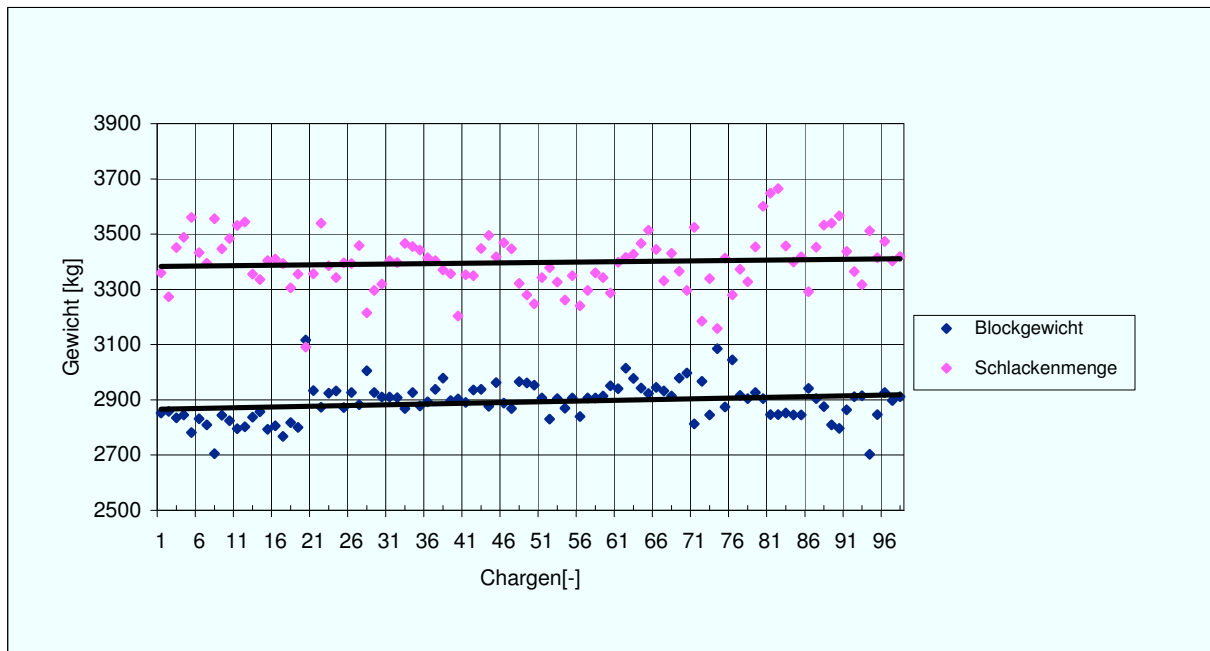


Abbildung 39: Verlauf der Schlackenmenge und des Molybdäns in der Schlacke [11]

Es ist zu erkennen, dass bei annähernd gleicher Schlackenmenge das Blockgewicht über den betrachteten Zeitraum gestiegen ist. Was mit einer Produktivitätssteigerung einher geht.

Diese Erhöhung der Produktionsleistung ist in nachfolgender Abbildung 40 noch deutlicher zu erkennen.

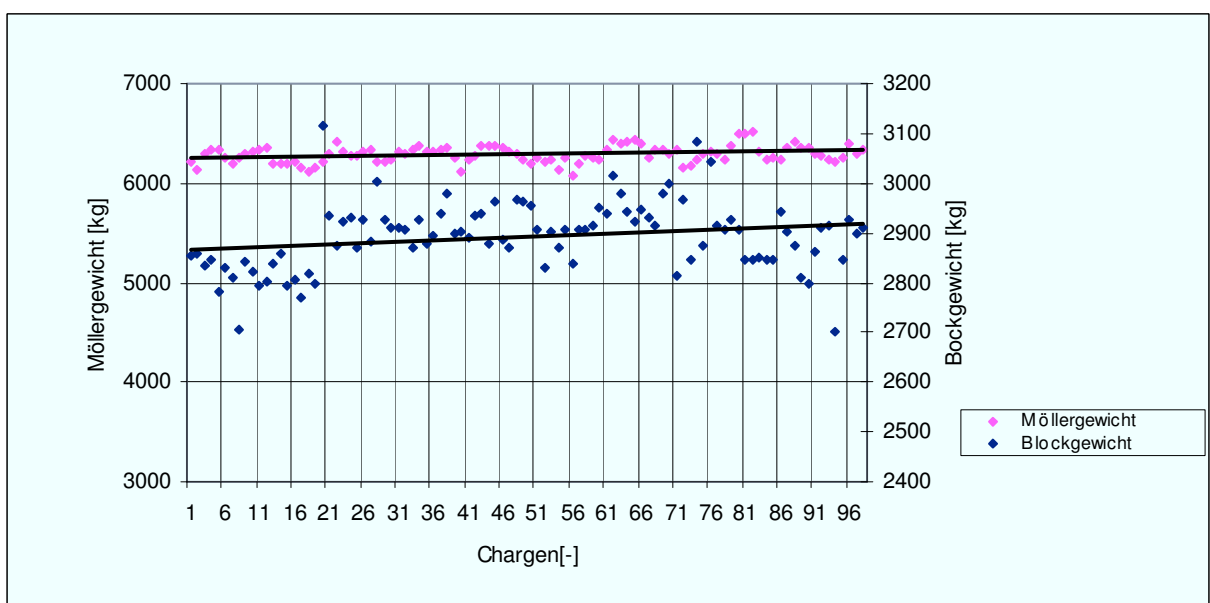


Abbildung 40: Verlauf des Möllergewichts und des Molybdäns in der Schlacke

Auch aus diesem Diagramm ist eine Effizienzsteigerung abzulesen, da sich bei annähernd konstantem Möllergewicht das Blockgewicht erhöht.

Um die optimalen Betriebsparameter für die Erstellung neuer Möllermischungen zu finden, war es notwendig, noch weitere Gegenüberstellungen durchzuführen.

So vergleicht die nachfolgende Abbildung 41 die Viskosität mit den auftretenden Werten an Molybdän in der Schlacke.

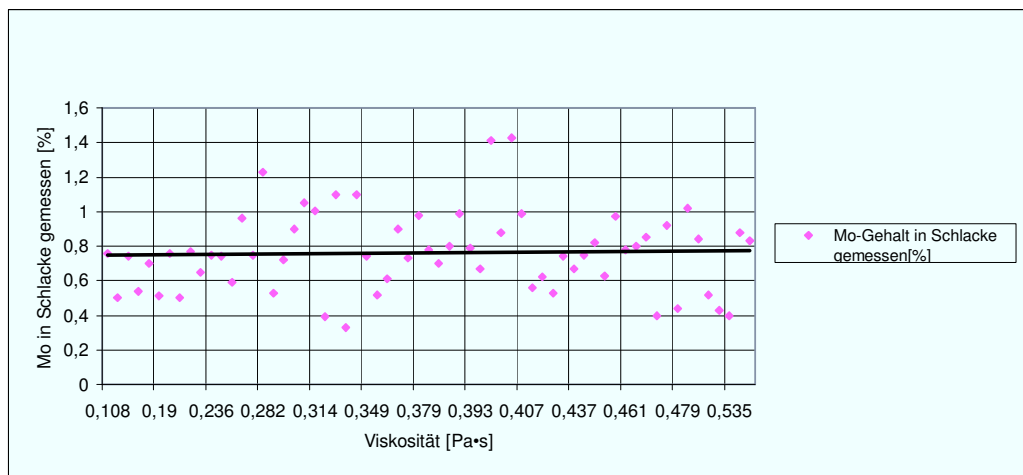


Abbildung 41: Molybdängehalt der Schlacke in Abhängigkeit der Viskosität

Als Ergebnis konnten zwei Viskositätsgebiete gefunden werden, in denen gute Schlackenwerte zu erwarten sind. Der erste Bereich liegt bei Werten um 0,35 Pa·s und der zweite bei etwas höheren Viskositäten um 0,52 Pa·s. Dieses Diagramm bildet die Grundlage für die später folgenden Optimierungsversuche.

Die folgende Abbildung 42 vergleicht die errechnete Enthalpie mit den gemessenen Schlackenwerten.

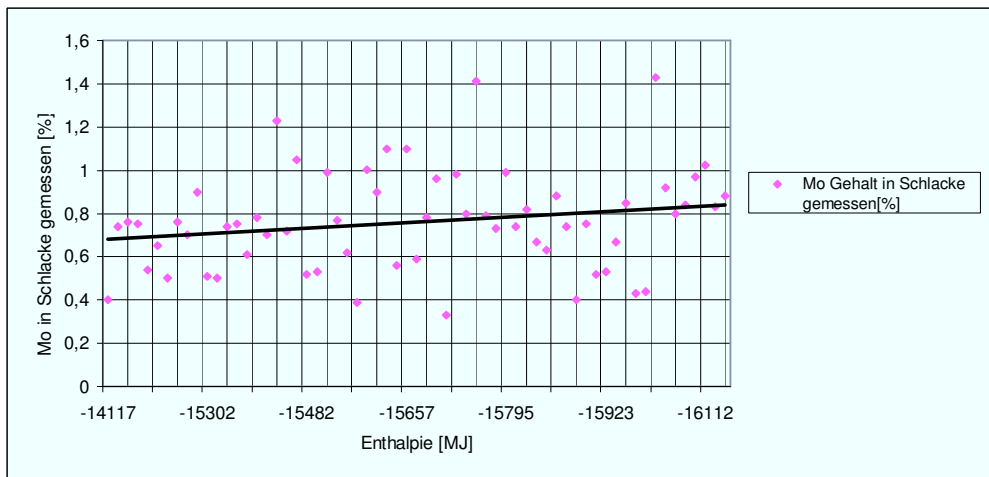


Abbildung 42: Molybdängehalt der Schlacke in Abhängigkeit von der Enthalpie

In dieser Abbildung lässt sich allerdings keine klare Aussage treffen, da kein eindeutiger Bereich zu erkennen ist, in dem ein geringer Molybdängehalt der Schlacke zu erwarten wäre.

Der inverse Zusammenhang, den die Trendlinie zeigt, ist dadurch erklärbar, dass in der Schlacke der gesamte Metallgehalt rechnerisch berücksichtigt wird, das heißt auch der oxidische Anteil. Der Einfluss des Begleitelementes Kupfer ist in nachfolgender Abbildung 43 gezeigt.

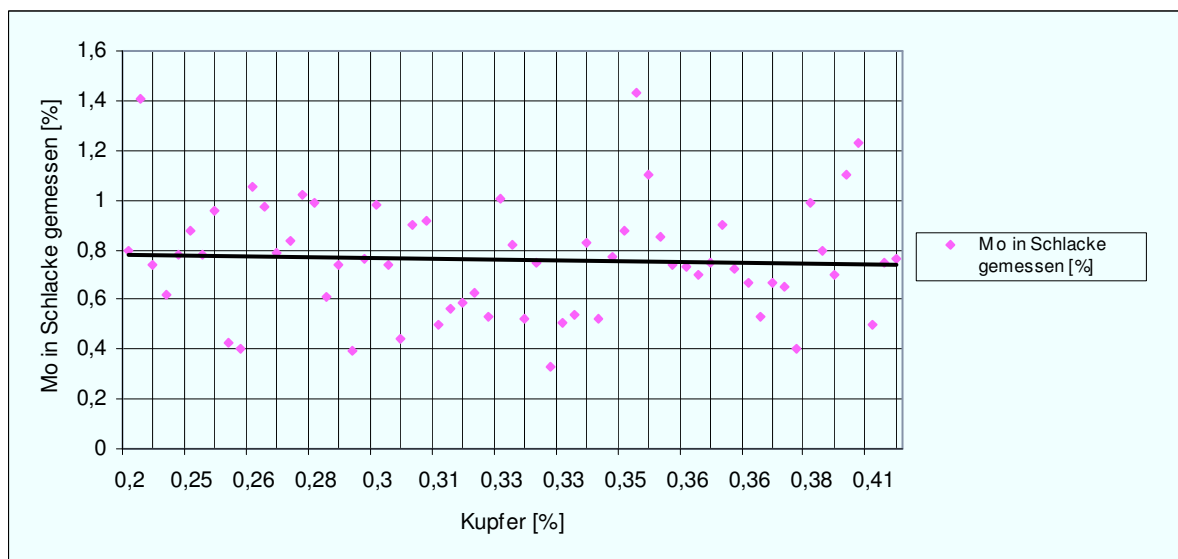


Abbildung 43: Kupfer und Molybdän in der Schlacke gemessen

Bei Kupfer zeichnete sich kein eindeutiger Bereich ab, in dem mit niedrigen Schlackenwerten zu rechnen ist. Dies ist aber durchaus positiv, da durch die Rohstoff und Lagerkapazitäten kein großer Handlungsspielraum hinsichtlich der Rohstoffselektion gegeben ist.

Die untenstehende Abbildung 44 betrachtet den Einfluss von Silizium, dem zweiten nennenswerten Begleitelement in den angelieferten Molybdänkonzentraten.

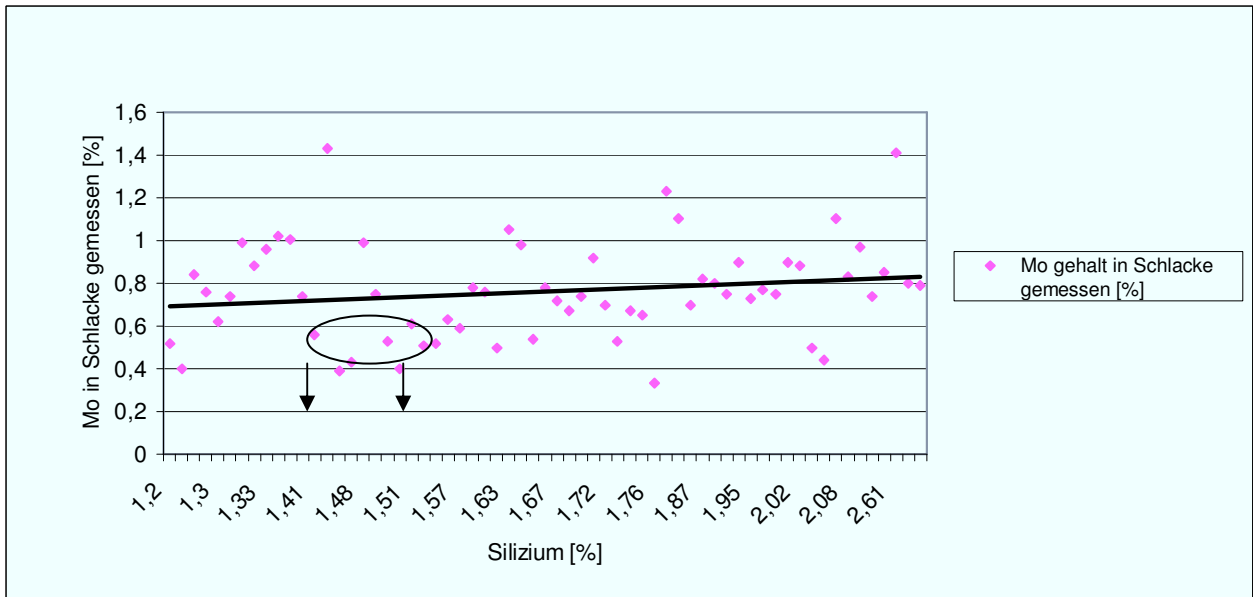


Abbildung 44: Molybdängehalt der Schlacke in Abhängigkeit von Silizium

Auch bei Silizium war kein eindeutiger Bereich für eine Verbesserung der Ergebnisse erkennbar. Das Diagramm lässt aber die Aussage zu, dass bei höherem Siliziumgehalt der Molybdängehalt der Schlacke steigt. Ein mögliches Optimum lässt die Häufung an guten Schlackenwerten bei Gehalten zwischen 1,45 % - 1,55 % Silizium im Block zu. Da Silizium aber keine variable Größe, sondern ohnedies durch die Rohstoffmischung vorgegeben ist, wäre eine Betrachtung eher sekundär.

Abschließend und zusammengefasst konnten folgende Erkenntnisse gefunden werden:

- Je geringer die Viskosität ist, umso weniger Molybdän ist in der Schlacke zu erwarten.
- Das Modell bestätigt, dass bei einer negativeren Enthalpie des Abbrands, weniger Molybdän in der Schlacke verbleibt. Wird allerdings die errechnete Enthalpie mit den gemessenen Schlackenwerten verglichen, tritt dieser Zusammenhang genau umgekehrt auf. Das heißt, je positiver die Enthalpie, desto geringer ist der Molybdängehalt in der Schlacke. Dieser Unterschied ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass nicht zwischen Molybdänoxid und metallischem Molybdän in der Schlacke bei der Analyse zu unterscheiden ist.
- Das Modell liefert grundsätzlich richtige und nachvollziehbare Werte.
- Weiters war eine Steigerung der Produktivität im betrachteten Zeitraum zu erkennen.

Das nächste Kapitel soll einen Überblick über die Versuche, die hinsichtlich der Optimierung der Möllerszusammensetzung durchgeführt wurden, geben.

3.6 Berechnung der optimierten Möllermischung

Wie die Analyse der Abbrände des vorhergehenden Kapitels in Abbildung 41 zeigte, ziehen geringe Viskositäten in diesen zuvor gekennzeichneten Größenordnungen der untersuchten Schlacken einen geringen Wert des Molybdängehaltes der Schlacke nach sich. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache galt es, die mithilfe von NN-Tool neu berechneten Möllermischungen in Richtung geringeren Viskositäten zu verschieben.

3.6.1 Versuchsbeschreibung

Um nun das erstellte neuronale Netz schrittweise in den bestehenden Ferromolybdänbetrieb implementieren zu können, kamen eine Reihe von Versuchskampagnen zur Anwendung.

Bei diesen wurde eine Teilung der jeweils Mischungsgleichen Chargen durchgeführt. Die Möllermischanlage und die Rohstoffmengen ließen meist ein Mischprogramm von sechs bis acht Mischungsgleichen Chargen zu, welche zu Versuchskampagnen zusammengefasst wurden.

Die eine Hälfte dieser Kampagnen wurde mit der ursprünglichen Gattierungsrechnung nach herkömmlicher Art und Weise berechnet und gemischt. Bei dem anderen Teil dieser vom Molybdänkonzentrat Mischungsgleichen Chargen, kam das neu erstellte Modell mit dem neuronalen Netz als Optimierungsfunktion zum Einsatz.

Mithilfe des neuronalen Netzes konnten unterschiedliche Optimierungsvariationen hinsichtlich der Zuschlagsstoffe und bezüglich der im neuronalen Netz einzugebenden Zielwerte Viskosität und Molybdängehalt der Schlacke verfolgt werden.

Auf diese Art war es möglich, die einzelnen Optimierungsvarianten direkt mit der herkömmlichen Mischungsvariante zu vergleichen und diese im Bezug auf Molybdängehalt der Schlacke und erhaltenes Blockgewicht zu vergleichen.

3.7 Optimierung der Möllierzusammensetzung hinsichtlich einer Viskositätsverminderung

Der erste Lösungsansatz, eine Verringerung der Menge an Molybdän in der Schlacke zu erreichen, war die Verminderung der Viskosität. Hierzu fand als Zielvorgabe in der Optimierungsfunktion von NN-Tool die Viskosität der Schlacke Verwendung. Nach Eingabe der wichtigsten Parameter gibt das Programm die hierfür optimierte Möllierzusammensetzung aus. Es erfolgte die Beobachtung von vier Referenzchargen, sowie vier weiteren Chargen,

die als Versuchschargen dienen. Die nachfolgenden Kapitel erläutern diese Versuche genau.

3.7.1 Auswertung der Chargen aus Kampagne 1

Die Tabelle 18 zeigt die zulässigen Variationsparameter, in denen das NN-Tool die Zuschlagsstoffe verändern kann, um eine Viskositätsverminderung herbeizuführen.

Tabelle 18: Variationsparameter der Chargen 790 - 797

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	700	720
Aluminium	250	265
Kalk	320	360
Eisenschrott fein	520	540
Walzenzunder	1010	1050

Wie zu erkennen ist, variiert die mögliche Zugabe von Silizium zwischen 700 kg und 720 kg. Aluminium unterliegt einer zulässigen Variationsbreite von 250 kg und 265 kg. Kalk weist ein großes Variationsfenster zwischen 320 kg und 360 kg auf, da der Prozess auf kleine Änderungen der Kalkmenge nicht reagiert. Die Variationsbreiten der Zusatzstoffe liegen bei Eisenschrott zwischen 520 kg und 540 kg und bei Walzenzunder von 1010 kg bis 1050 kg.

3.7.1.1 Möllierzusammensetzung der Chargen aus Kampagne 1

In der Tabelle 19 sind die tatsächlichen Abbrandparameter der Referenzchargen bzw. der neu gemischten optimierten Chargen dargestellt.

Tabelle 19: Vergleich der Möllierzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen
790 – 797

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen Nummer	790 - 793	794 - 797	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	494	489	-5
Walzenzunder	542	525	-17
Kalk	170	170	0
Mo-Oxid 1	500	500	0
Mo-Oxid 2	800	800	0
Mo-Oxid 3	328	328	0
Fe Schrott	145	150	5
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	0	0	0
Filterstaub	52	52	0
Alugieß 1	30	30	0
Alugieß 2	106	101	-5
Gesamt	3167	3145	-22

Bei der ersten Versuchskampagne kam es zu einer deutlichen Einsparung an Walzenzunder, bei gleichzeitiger Abnahme an Aluminium und Ferrosilizium. Die Menge an Eisenschrott war um 5 kg zu erhöhen. In Summe bedeutete dies eine Abnahme der Zuschlagsstoffe um 22 kg pro halben Abbrand.

3.7.1.2 Diskussion der Abbrandergebnisse

Die nachfolgende Tabelle 20 zeigt die berechneten Ergebnisse der Kampagne 1.

Tabelle 20: Ergebnisse der Chargen 790 - 797

Chargen	FI-Nummern	Protokoll-Nummern	
Referenzchargen 790 - 793	133,132,129+131	837/08;836/08;825/08+826/08	133,132,129+131
optimierte Chargen 794 - 797	133,132,129+131	837/08;836/08;825/08+826/08	133,132,129+131
	Mo-Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 790 - 793	70,26	-15.336	0,393
optimierte Chargen 794 - 797	70,35	-15.268	0,388
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 790 - 793	1045,19	8,07	2,934
optimierte Chargen 794 - 797	1044,79	8,10	2,875

Es kann festgestellt werden, dass die Viskosität der beiden betrachteten Chargen annähernd gleich ist, auch der errechnete Schmelzpunkt der Schlacke unterscheidet sich kaum. Auffällig ist der Unterschied des Blockgewichts. Die Referenzchargen ergaben im Durchschnitt ein Gewicht von 2934 kg. Die optimierten Chargen lagen hingegen bei 2875 kg.

Das Abbrennen der Chargen 795, 796 und 797 wurde genau beobachtet, um etwaige Unterschiede im Zünd- und Reaktionsverhalten erkennen zu können.

Die benötigte Abbrandzeit der Charge 795 betrug etwa 25 Minuten. Diese Zeit entspricht ebenfalls der durchschnittlichen Abbrenndauer. Der Absetzzeit bis zum Gießen betrug 1 h und 20 min.

Auch bei den nächsten beiden Chargen 796 und 797 waren keine Auffälligkeiten zu beobachten.

Tabelle 21 zeigt die gemessenen Werte der Kampagne 1.

Tabelle 21: Analysen der Chargen 790 - 797

	Metall		Schlacke	
Charge	Cu	Si	Mo	Blockgewicht
Nr.	[%]	[%]	[%]	[kg]
Referenzcharge 790	0,33	1,74	0,53	2970
Referenzcharge 791	0,33	1,74	0,57	2960
Referenzcharge 792	0,33	1,74	0,41	2980
Referenzcharge 793	0,33	1,74	0,65	2920
Mittelwert	0,33	1,74	0,54	2956
optimierte Charge 794	0,37	1,93	0,52	2880
optimierte Charge 795	0,37	1,93	0,59	2970
optimierte Charge 796	0,37	1,93	0,79	2800
optimierte Charge 797	0,37	1,93	0,66	2850
Mittelwert	0,37	1,93	0,64	2875

Wie aus den Zahlenwerten zu erkennen ist, konnte in der Kampagne 1 keine Verbesserung hinsichtlich des Molybdängehaltes erreicht werden. Dieser Versuch brachte allerdings eine Einsparung der Zuschlagsstoffe um 22 kg. Dabei ist zu beachten, dass das durchschnittliche Blockgewicht von 2956 kg auf 2875 kg um fast 80 kg sank.

3.7.2 Auswertung der Chargen aus Kampagne 2

Nach der Berechnung der Referenzmischung erfolgte die Ermittlung der Möllierzusammensetzung mit NN-Tools mit dem Ziel, die Viskosität weiter zu senken.

Da die neue Mischung hinsichtlich der Mengen an Molybdänrohstoffen mit der Gattierungsberechnung des Betriebes ident ist, sind wie oben bereits erwähnt, nur die Zuschlagsstoffe veränderbar.

Die Variation der Zugabemengen von Silizium, Aluminium, Kalk, feinem Eisenschrott und Walzenzunder ist in einem fixen Fenster möglich. Die nachfolgende Tabelle 22 zeigt den Bereich in dem das Programm das Optimum gesucht hat.

Tabelle 22: Variationsbreiten der Zugabekomponenten der Chargen 940 - 946

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	700	720
Aluminium	250	270
Kalk	320	360
Eisenschrott fein	510	540
Walzenzunder	1000	1050

Tabelle 23 zeigt, dass die Variationsbreite von Silizium, gleich wie die vorhergehende Kampagne, zwischen 700 kg und 720 kg liegt. Aluminium verschob sich zu etwas höheren Werten. Diese lagen von 250 kg bis 270 kg, und der Kalk blieb unverändert. Das Spektrum von Eisenschrott war mit Werten zwischen 510 kg und 540 kg etwas eingeeengt und jenes von Walzenzunder zwischen 1000 kg und 1050 kg leicht vergrößert.

Zu beachten ist, dass die Grenzen der Zuschlagsstoffe, in denen NN-Tool variiert, nur in dem prozessrelevanten Bereich gewählt werden.

Ist das Variationsspektrum zu groß, würde dies eine Verfälschung der Ergebnisse herbeiführen, da das NN-Tool ein Minimum finden würde, welches außerhalb des relevanten und reellen Bereiches liegt.

3.7.2.1 Möllierzusammensetzung der Chargen aus Kampagne 2

In der Tabelle 23 ist ein Vergleich der Möllierzusammensetzungen für die betrachteten Chargen dargestellt, sowie eine Spalte, welche die Differenz zur herkömmlichen Mischung wiedergibt

Tabelle 23: Vergleich der Möllierzusammensetzung bei den Versuchschargen und den Referenzchargen 940 - 946

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	940 - 942	943 - 946	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	492	487	-5
Walzenzunder	540	521	-19
Kalk	170	182	+12
Mo-Oxid 1	550	550	0
Mo-Oxid 2	500	500	0
Mo-Oxid 3	503	503	0
Fe Schrott	150	150	0
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	0	0	0
Alugrieß 1	30	30	0
Alugrieß 2	105	105	0
Gesamt	3051	3039	-12

In dieser Tabelle ist zu sehen, dass 19 kg Walzenzunder bzw. 5 kg Silizium bei der optimierten Charge eingespart wurden. Dem gegenüber fand allerdings eine Erhöhung der Zugabemenge an Kalk von 12 kg statt. Daraus ergibt sich eine Gesamteinsparung von 12 kg pro halber Möllermenge.

3.7.2.2 Diskussion der Abbrandergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle 24 ist eine Gegenüberstellung der Referenzchargen des herkömmlichen Berechnungsmodells mit den optimiert berechneten Mischungen angeführt.

Tabelle 24: Ergebnisse der Chargen 940 - 946

Chargen	FL-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 940 - 942	159,156,155	1014/08;982,2/08;982,1/08	
optimierte Chargen 943 - 946	159,156,155	1014/08;982,2/08;982,1/08	
	Mo-Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 940 - 942	71,59	-14.107	0,35
optimierte Chargen 943 - 946	72,11	-14.063	0,32
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 940 - 942	1044,31	8,04	2870
optimierte Chargen 943 - 946	1042,46	8,05	2823

Bei beiden Abbränden wird weniger Energie frei, da die berechnete Enthalpie im Bereich von etwa -14.000 MJ liegt. Eine Verringerung der errechneten Viskosität von 0,032 Pa·s ergab eine Einsparung von 19 kg Walzenzunder, erforderte allerdings 12 kg mehr Kalk. Weiters ergab sich eine Verringerung der Ferrosiliziummenge um 5 kg.

Der durchschnittliche gemessene Molybdängehalt der Schlacke stieg mit +0,06 % leicht an. Allerdings gestaltet sich eine Beurteilung der Ergebnisse als schwierig, da die Werte innerhalb der Mischungsgleichen Kampagnen stark schwanken. Dies ist in der Tabelle 25 zu sehen, welche die genauen Analysen aller Chargen beinhaltet.

Tabelle 25: Analysen der Chargen 940 - 946

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 940	0,37	1,18	0,82	2930
Referenzcharge 941	0,37	1,18	0,63	2870
Referenzcharge 942	0,37	1,18	0,86	2810
Mittelwert	0,37	1,18	0,77	2870
optimierte Charge 943	0,35	1,01	0,91	2820
optimierte Charge 944	0,35	1,01	1,08	2820
optimierte Charge 945	0,35	1,01	0,63	2830
optimierte Charge 946	0,35	1,01	0,70	2820
Mittelwert	0,37	1,01	0,83	2823

Mit der optimierten Möllermischung war zwar Reduktionsmittel zu sparen, doch ist das durchschnittliche Blockgewicht von 2870 kg auf 2823 kg um fast 50 kg gesunken.

3.7.3 Auswertung der Chargen aus Kampagne 3

Auch bei dieser Kampagne galt es, eine Viskositätsverminderung durch Veränderung der Zuschlagsstoffe zu erreichen. Die zulässigen Variationsbereiche sind für diese Mischungskampagnen in der Tabelle 26 abgebildet.

Tabelle 26: Variationsbreiten der Chargen

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	720	750
Aluminium	245	255
Kalk	320	360
Eisenschrott fein	520	540
Walzenzunder	1000	1050

Das Fenster für die zulässigen Mengen an Silizium war bei dieser Versuchskampagne etwas größer und zu höheren Werten verschoben. Die Variationsbreite von Aluminium ist gegenüber der vorherigen Chargenmischung verkleinert und zu niedrigeren Werten verschoben worden. Die Minimalmenge an feinem Eisenschrott lag bei dieser Versuchsreihe um 10 kg höher. Kalk und Walzenzunder bleiben unverändert gegenüber der vorhergehenden Kampagne.

3.7.3.1 Möllierzusammensetzung der Chargen aus Kampagne 3

Kampagne 3 besteht aus vier Versuchschargen und vier Referenzchargen. Die folgende Tabelle 27 zeigt die Möllierzusammensetzungen für die Versuchskampagne 3. Bei der Neuberechnung kamen ähnliche Werte bezüglich Ferrosilizium und Walzenzunder zur Anwendung. Ein deutlicher Unterschied zu der vorangegangenen Versuchskampagne ist aber die höhere Zugabemenge an Kalk.

Tabelle 27: Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen 947 - 953

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	947 - 950	951 - 953	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	510	510	0
Walzenzunder	540	521	-19
Kalk	170	183	+13
Mo-Oxid 1	380	380	0
Mo-Oxid 2	400	400	0
Mo-Oxid 3	810	810	0
Fe-Schrott	150	150	0
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	0	0	0
Alugieß 1	30	20	-10
Alugieß 2	106	108	+2
Gesamt	3106	3092	-14

Aus dieser Versuchskampagne lässt sich erkennen, dass sich die Zugabemenge an Walzenzunder um 19 kg verringert hat, 13 kg mehr Kalk chargiert und um 8 kg weniger Aluminium zugegeben wurde. Die Gesamteinsparung der Zuschlagsstoffe beträgt 14 kg.

3.7.3.2 Diskussion der Abbrandergebnisse

Die Tabelle 28 liefert eine Übersicht aus den gewonnenen Werten dieser Versuchsserie.

Tabelle 28: Ergebnisse der Chargen 947 - 954

	FI-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzcharge 947 - 950	159,156,160	1014/08;982,2/08;1023/08	
optimierte Chargen 951 - 953	159,156,160	1014/08;982,2/08;1023/08	
	Mo-Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzcharge 947 - 950	71,09	-14.649	0,40
optimierte Chargen 951 - 953	72,88	-14.489	0,35
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 947 - 950	1043,40	7,70	2855
optimierte Chargen 951 - 953	1041,75	7,88	2860

Die veränderten Zugabemengen ergeben eine Viskositätssenkung von 0,05 Pa·s. Wieder ist zu erkennen, dass bei der Reduktion eher wenig Energie frei wurde, und die Enthalpie deutlich unter -15.000 MJ liegt.

Diese Kampagne zeigt, dass trotz deutlicher Einsparung an Reduktionsmittel, der durchschnittliche Molybdängehalt in der Schlacke um lediglich 0,02 % angestiegen ist. Weiters hat sich das Blockgewicht um 5 kg erhöht.

Eine Detaildarstellung der gesamten Analysenwerte ist in der Tabelle 29 angeführt.

Tabelle 29: Analysen der Chargen 947 - 953

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 947	0,35	1,03	0,96	2810
Referenzcharge 948	0,35	1,03	0,73	2820
Referenzcharge 949	0,35	1,03	0,47	2910
Referenzcharge 950	0,35	1,03	0,55	2880
Mittelwert	0,35	1,03	0,68	2855
optimierte Charge 951	0,31	1,33	0,80	2840
optimierte Charge 952	0,31	1,33	0,81	2830
optimierte Charge 953	0,31	1,33	0,48	2910
Mittelwert	0,31	1,33	0,70	2860

Bei dieser Kampagne ist auffällig, dass sowohl in der nach herkömmlicher Art berechneten Charge, als auch in der optimierten Mischung sehr hohe Molybdänwerte in der Schlacke (Charge Nr. 947, Charge Nr. 952) aber auch niedrige Schlackenwerte (Charge Nr. 949, Charge Nr. 953) auftreten. Dies lässt vermuten, dass die deutliche Einsparung an Reduktionsmittel keine negativen Auswirkungen auf den Abbrand hat.

3.7.4 Auswertung der Chargen aus Kampagne 4

Die Tabelle 30 zeigt die zulässigen Variationsbreiten der Zuschlagsstoffe für die Chargen der Kampagne 4.

Tabelle 30: Variationsbereiche der Chargen 954 - 959

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	720	750
Aluminium	245	260
Kalk	340	370
Eisenschrott fein	520	540
Walzenzunder	980	1030

Bei dieser Versuchskampagne ist das Fenster der Aluminiumzugabe weiter verkleinert, sowie der Gehalt an Walzenzunder gesenkt worden. Die zulässige Menge an Kalk ist zu tieferen Werten verschoben. Jene von Silizium, Aluminium und Eisenschrott erfuhren keine Veränderung gegenüber der vorhergehenden Mischung.

3.7.4.1 Möllierzusammensetzung der Chargen aus Kampagne 4

Die nachfolgende Tabelle 31 listet die Zusammensetzung des Möllers für die Versuchschargen auf.

Tabelle 31: Vergleich der Möllierzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen 954 - 959

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	954 - 956	957 - 959	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	512	507	-5
Walzenzunder	540	510	-30
Kalk	170	189	+19
Mo-Oxid 1	550	550	0
Mo-Oxid 2	350	350	0
Mo-Oxid 3	671	671	0
Fe-Schrott	151	152	+1
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	47	46	-1
Alugrieß 1	30	28	-2
Alugrieß 2	106	100	-6
Gesamt	3137	3113	-24

Bei dieser Kampagne war eine Einsparung hinsichtlich der Zuschlagsstoffe von insgesamt 24 kg zu erzielen. Diese ist hauptsächlich auf die deutliche Verminderung von Walzenzunder zurückzuführen.

3.7.4.2 Diskussion der Abbrandergebnisse

In Tabelle 32 sind die berechneten bzw. gemessenen Ergebnisse der Versuchschargen mit den Nummern 954 - 959 angeführt.

Tabelle 32: Ergebnisse der Chargen 954 - 959

Chargen	FI-Nummern	Protokoll-Nummern	
Referenzcharge 954 - 956	161,156,160	1038/08;982,2/08;1023/08	
optimierte Chargen 957 - 959	161,156,160	1038/08;982,2/08;1023/08	
	Mo-Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzcharge 954 - 956	71,86	-14.812	0,38
optimierte Chargen 957 - 959	72,46	-14.669	0,33
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 954 - 956	1044,55	8,21	2860
optimierte Chargen 957 - 959	1041,77	7,97	2787

Eine Viskositätssenkung kam durch eine Senkung der Zugabemenge an Walzenzunder um 30 kg, Ferrosilizium um 5 kg und Aluminium um 8 kg zustande. Im Gegenzug fand einer Erhöhung der Menge an Kalk um 19 kg statt.

Die hier gegenübergestellten Chargenkampagnen sind zwar vom enthaltenen Molybdängehalt in der Schlacke im Durchschnitt gleich, jedoch ist das durchschnittliche Blockgewicht um 73 kg niedriger als bei der nach herkömmlicher Art berechneten Möllermischung.

Eine genaue Auflistung aller Analysenwerte dieser Versuchskampagne zeigt die nachfolgende Tabelle 33.

Tabelle 33: Analyse der Chargen 954 - 960

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 954	0,26	0,85	0,76	2910
Referenzcharge 955	0,26	0,85	0,82	2840
Referenzcharge 956	0,26	0,85	0,73	2830
Mittelwert	0,26	0,85	0,77	2860
optimierte Charge 957	0,24	0,87	0,80	2740
optimierte Charge 958	0,24	0,87	0,56	2760
optimierte Charge 959	0,24	0,87	0,90	2840
optimierte Charge 960	0,24	0,87	0,83	2810
Mittelwert	0,24	0,87	0,77	2787

In der Tabelle ist zu sehen, dass die beiden Mittelwerte der jeweiligen Molybdänwerte in der Schlacke bei der Referenzmischung und der optimierten Mischung annähernd gleich sind. Allerdings ist auch hier die Signifikanz nicht erreicht. Wieder ist zu erkennen, dass das durchschnittliche Blockgewicht bei den Referenzchargen höher ist, als bei den optimierten Chargen.

3.7.5 Zusammenfassung der Möllermischung mit dem Ziel einer Viskositätsverringering

In nachfolgender Abbildung 45 ist eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der einzelnen Kampagnen gezeigt.

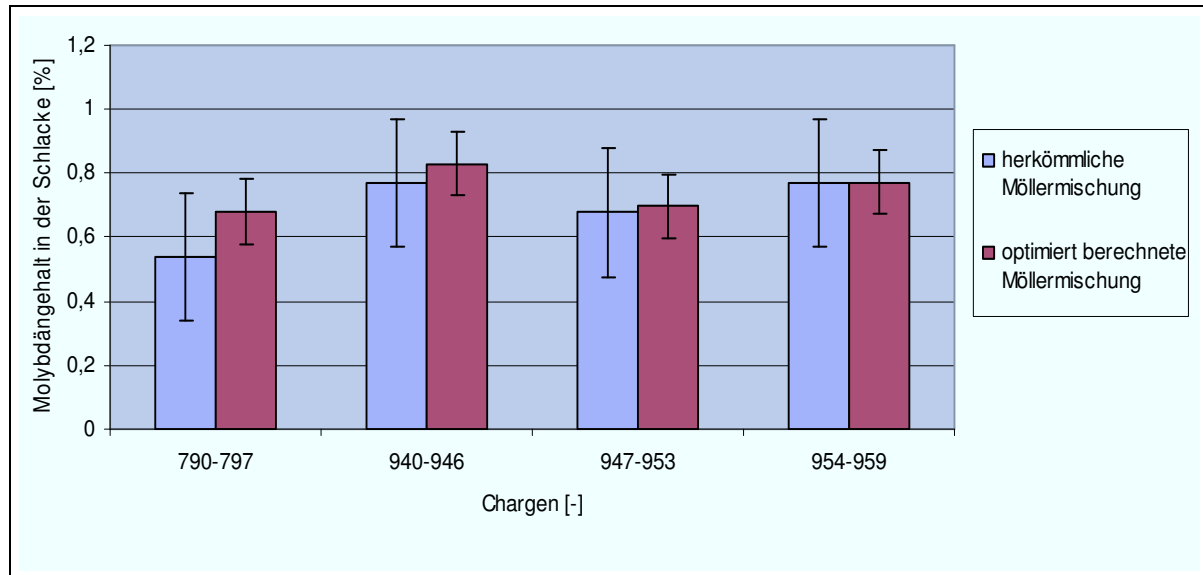


Abbildung 45: Vergleich der Molybdängehalte

Die ersten drei Versuchskampagnen mit den Chargennummern 790 - 797, 940 - 946 und 947 - 953 lieferten hinsichtlich des Molybdängehaltes in der Schlacke keine Verbesserung. Lediglich eine Einsparung an Zuschlagsstoffen war zu verzeichnen. Die Kampagne der Nummer 954 - 959 brachte im Durchschnitt dieselben Gehalte an Molybdän in der Schlacke.

Es ist zu berücksichtigen, dass mit diesem Umfang an Versuchschargen allerdings keine Signifikanz zu erreichen ist. Um signifikante Werte zu erhalten, wäre ein größerer Umfang an Versuchschargen notwendig.

Allerdings ist darauf zu achten, dass das Blockgewicht beim optimierten Möller bei allen Versuchskampagnen mit Ausnahme der Kampagne 947 - 953 deutlich geringer ausfällt als bei einem herkömmlich gemischten Möller. Dies alleine kann allerdings nicht als Beurteilungskriterium der Versuche herangezogen werden, da z. B. eine nicht vollständige Entleerung der Flow Bins zu Ungenauigkeiten hinsichtlich der Massenbilanz führen können.

Allerdings ist eine Einsparung an Zuschlagsstoffen nicht zufriedenstellend bei gleichzeitiger Verschlechterung der Molybdänschlackenwerte und niedrigerem Durchschnittsblockgewicht.

Aus diesen Gründen war es nicht sinnvoll, eine Optimierung mit diesen Zielparametern weiterzuverfolgen. Das nachfolgende Kapitel erläutert eine weitere Variante zur Verbesserung der Molybdänausbeute.

3.8 Abbrandversuche mit Kalziumsilizium

Um die Reduktionsbedingungen weiter zu verstärken, findet bei den nachfolgenden Versuchskampagnen eine Substitution des durch die Optimierung eingesparten Reduktionsmittels Ferrosiliziums durch Kalziumsilizium statt. Bei der Berechnung mit dem NN-Tool war das Ziel eine niedrigere Viskosität der Schlacke, welche durch Verkleinerung der Mengen an Aluminium und Silizium erreicht wurde, wobei eine Substitution mit Kalziumsilizium erfolgte. Dieses Reduktionsmittel weist eine Zusammensetzung von etwa 40 % Kalzium und 60 % Silizium auf, und die Körnung liegt zwischen 0 - 3 mm. Die reduzierende Wirkung auf den Abbrand sollte ähnlich der ursprünglichen Reduktionsmittel sein. Lediglich die Viskosität der Schlacke wird noch weiter verringert, da das so zusätzlich eingebrachte Kalzium als eine Art Flussmittel fungiert. Kalk bleibt bei dieser Versuchsreihe annähernd unverändert.

Um eine vollständig homogene Durchmischung des Möllers zu erreichen, erfolgte während des gesamten Mischungsvorganges eine händische Beimengung.

3.8.1 Auswertung der Chargen aus Kampagne 5

In der nachfolgenden Tabelle 34 sind die zulässigen Variationsbreiten der Zugabemengen, in denen die Software NN-Tool variieren kann, angeführt.

Tabelle 34: Variationsbreiten der Chargen 995 - 1003

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	720	750
Aluminium	245	260
Kalk	335	370
Eisenschrott fein	520	540
Walzenzunder	980	1030

Die Variationsbereiche sind auch hier sehr eng. Eine Optimierung hinsichtlich niedrigerer Zugabemengen an Silizium, Aluminium und Walzenzunder ist anzustreben.

3.8.1.1 Möllierzusammensetzung der Chargen aus Kampagne 5

Die nachfolgende Tabelle 35 zeigt die Abbrandparameter für die Chargen der Nummern 996 - 1003. Die eingesparte Menge an Aluminium und Silizium erfuhr bei dieser Versuchskampagne, wie oben bereits erwähnt, eine Substitution durch Kalziumsilizium.

Tabelle 35: Vergleich der Möllierzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen 995 - 1003

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	995 - 998	999 -1003	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	520	513	-7
Walzenzunder	542	511	-31
Kalk	170	170	0
Mo-Oxid 1	850	850	0
Mo-Oxid 2	500	500	0
Mo-Oxid 3	312	312	0
Fe-Schrott	149	140	+9
Abreiniger	10	10	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	0	0	0
Alugrieß 1	30	28	-2
Alugrieß 2	105	100	-5
CaSi			+14
Gesamt	3189	3153	-36

Durch die optimierte Möllermischung ergab sich als Summe der Einsparung von Aluminium und Silizium eine Menge von 14 kg pro Flow Bin, also einem halben Abbrand.

Pro Abbrand sind dementsprechend 28 kg an CaSi zu substituieren. Hierzu war es notwendig, diese Menge von 28 kg zu wiegen und händisch am Ende der Mischanlage zu chargieren.

Zu erwähnen ist, dass die Zugabe an Kalziumsilizium bei der Chargennummer 1003 um 4 kg weniger betrug als berechnet, da keine ausreichend große Menge mehr zur Verfügung stand.

3.8.1.2 Diskussion der Abbrandergebnisse

In der Tabelle 36 sind die berechneten und gemessenen Ergebnisse der betrachteten Versuchschargen angeführt.

Tabelle 36: Ergebnisse der Chargen 996 - 1003 mit CaSi

Chargen	FL-Nummer	Protokoll Nummer	
Referenzchargen 996 - 998	167+172+176, 177,175	1062/08+1071/08+1081/08; 1081/08;1079/08	
optimierte Chargen 999 - 1003	167+172+176, 177,175	1062/08+1071/08+1081/08; 1081/08;1079/08	
	Mo-Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 996 - 998	73,09	-15.419	0,32
optimierte Chargen 999 - 1003	74,04	-15.099	0,23
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke Berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 996 - 998	1043,76	10,17	3046
optimierte Chargen 999 - 1003	1042,25	10,19	2949

Durch die substituierte Menge ergibt sich laut Thermodynamik ein zusätzlicher Wärmeeintrag von etwa 300 MJ. Somit ist der Wärmeinhalt der Referenzmischung und der Vergleichsmischung nahezu identisch.

Der Durchschnittswert der herkömmlich berechneten Chargen ist bei 0,75 % angesiedelt, und der mittlere Wert, bei denen eine CaSi-Substitution stattgefunden hat bei 0,64 % Molybdän in der Schlacke (siehe Tabelle 39).

Um das Einsparungspotenzial aufzuzeigen, beinhalten die nachfolgenden Absätze eine ökonomische Betrachtung dieser Versuchskampagne.

In der unten stehenden Tabelle 37 ist zu erkennen, dass durch eine Substitution der Menge an eingespartem Ferrosilizium und Aluminium durch Kalziumsilizium auch an den Kosten des nötigen Reduktionsmittels (z.B. Chargen 999 – 1003) zu sparen ist. Die Preise der jeweiligen Rohstoffe entsprechen keinem Durchschnitt, sondern sind Stand vom 14.08.2008.

Tabelle 37: Vergleich der Kosten Reduktionsmittelkosten für Chargen 996 - 1003

Reduktionsmittel	Preis in [€/t] (Stand:14.08.08)	Einsparung pro Charge [€]	Mehraufwand pro Charge [€]
CaSi	1640		45,92
Aluminiumgrieß	1800	25,20	
FeSi 75	1550	21,70	
Summe Einsparung:		46,90 €/Charge	
Summe Mehraufwand		45,92 €/Charge	
Differenz:		-0,98 €/kg	

Wie Tabelle 37 zeigt, wäre es möglich, bei einer teilweisen Substitution von Aluminium und Ferrosilizium bis zu 0,98 €/kg durch Verwendung von CaSi einzusparen. In Tabelle 38 sind die detaillierten Werte für jede Charge der herkömmlichen Mischung angeführt.

Tabelle 38: Analysen der Chargen 995 - 1003

Charge Nr.	Metall		Schlacke	
	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 995	0,35	1,65	0,88	2910
Referenzcharge 996	0,35	1,65	0,88	3110
Referenzcharge 997	0,35	1,65	0,70	3070
Referenzcharge 998	0,35	1,65	0,68	2960
Mittelwert	0,35	1,65	0,75	3046
optimierte Charge 1038	0,26	1,67	0,68	2880
optimierte Charge 999	0,26	1,67	0,67	2930
optimierte Charge 1000	0,26	1,67	0,55	2980
optimierte Charge 1001	0,26	1,67	0,60	3040
optimierte Charge 1002	0,26	1,67	0,68	2960
Mittelwert	0,26	1,67	0,64	2949

Die durchschnittlichen Werte des Molybdängehaltes in der Schlacke der optimierten Chargen sind bei dieser Kampagne, wie zuvor bereits erwähnt, um 0,09 % geringer als bei den Referenzchargen. Das durchschnittliche Blockgewicht fällt bei den optimierten Chargen wieder um fast 100 kg geringer aus. Die Auswertung der Kampagnen 6 - 10 ist dem Anhang zu entnehmen.

3.8.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Chargen mit Kalziumsilizium

Nach dieser Art der Optimierung wurden sechs Versuchskampagnen untersucht, deren Ergebnisse in nachfolgender Abbildung 46 dargestellt sind.

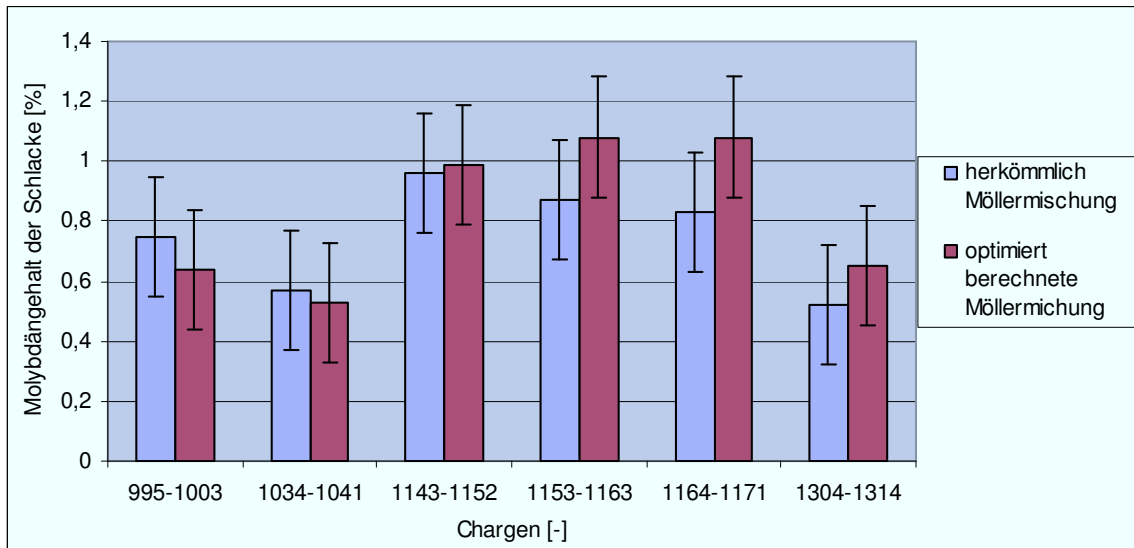


Abbildung 46: Vergleich der Ergebnisse der Optimierung mit CaSi-Substitution

Die ersten beiden Versuchsreihen lieferten sehr viel versprechende Verringerungen des Molybdängehaltes der Schlacke. Nur ein deutlich geringeres Blockgewicht im Vergleich zu den Referenzchargen ist bei diesen beiden Kampagnen zu erwähnen. Kein zufrieden stellendes Ergebnis brachten die Kampagnen, die einen deutlich höheren Molybdänwert in der Schlacke aufweisen. Auch hier ist zu erwähnen, dass eine Signifikanz nur mit einem höheren Umfang an Versuchschargen gegeben wäre. Um deshalb eine eindeutige Aussage treffen zu können, wären auch bei dieser Art der Optimierung weitere Untersuchungen nötig.

Damit der Einfluss der Korngröße des zugegebenen Kalziumsiliziums ausgeschlossen werden kann, wurde das zugegebene CaSi bei der letzten Kampagne gemahlen. Allerdings brachte diese Vorkehrung keine Verbesserung der Resultate. Die Ergebnisse der ersten beiden Kampagnen dieser Optimierungsart sind möglicherweise auf günstige Rohstoffkombinationen zurückzuführen, die gemeinsam mit der niedriger eingestellten Viskosität zu einer Verbesserung der Schlackenwerte führten. Allerdings ist hier zu beachten, dass es aufgrund der angespannten Rohstoffsituation nicht möglich ist, zwischen den Konzentraten zu wählen Und es ist oft notwendig, unterschiedliche Konzentrate von verschiedenen Herstellern einzusetzen.

Es ist hier auch er der negative Trend des deutlich niedrigeren Blockgewichtes zu beachten.

Die ersten beiden Chargen lieferten Verbesserungen hinsichtlich des Molybdängehaltes in der Schlacke. Da sich aber bei den darauf folgenden Untersuchungen keine Verbesserung einstellte und die optimierten Chargen deutlich niedrigere Blockgewichte ergaben, ist es nicht sinnvoll, diesen Weg der Optimierung weiter zu verfolgen.

3.9 Kalk- und Walzenzunderreduktion

Da die Substitution der eingesparten Menge an Ferrosilizium und Aluminium durch Kalziumsilizium keine eindeutige Verbesserung der Schlackenwerte brachte, galt es bei den nächsten Versuchskampagnen eine neue Optimierungsvariante zu verfolgen.

Diese zielt auch auf eine Viskositätsverringerung ab, jedoch wird zusätzlich bewusst die Zugabemenge an Kalk, welcher als Flussmittel in der Schlacke wirkt, und Walzenzunder niedriger gewählt als bei den Referenzchargen.

Die Zielwerte waren dabei so zu wählen, dass sie hinsichtlich Kalk und Walzenzunder unter den Werten der Referenzcharge liegen. Die Viskosität verschiebt sich so zu geringeren Werten. Dies geschieht jedoch nicht über die höhere Zugabemenge an Kalk welche eine Viskositätsverminderung der Schlacke über seine Funktion als Flussmittel bewirkt. Auch nicht über den höheren Energieeintrag durch Walzenzunder, sondern durch den annähernd gleichen Wärmeeintrag auf eine geringere Möllermenge bezogen. Dies bedeutet, dass bei der Reaktion annähernd die gleiche Wärmemenge frei wird und somit die Reaktionstemperatur steigt, da weniger Gesamtmasse vorliegt. Durch diese höhere Temperatur sinkt die Viskosität der Schlacke und Molybdän kann leichter aus der Schlacke in den Block absinken.

Als Größenordnung für die Viskositätsverringerung sollte zumindest 0,1 Pa·s gelten. Die erste Kampagne lieferte bereits bei den Referenzchargen eine rechnerische Viskosität von nur 0,13 Pa·s. Hier fiel die Optimierung wesentlich geringer aus.

3.9.1 Auswertung der Chargen aus Kampagne 11

Diese Versuchskampagne erfuhr wieder dieselbe Art der Berechnung, wie auch schon einige Chargen zuvor. Dabei erstellt die herkömmliche Möllerberechnungsmethode die Referenzchargen und anschließend wird diese Konzentratmischung einer Optimierung hinsichtlich Reduktionsmittel sowie den weiteren Zuschlagsstoffen unterzogen.

In der Tabelle 39 sind die zulässigen Zugabemengen, in der die Optimierungsfunktion im NN-Tool variieren kann aufgelistet.

Tabelle 39: Variationsbereiche der Chargen 1009 - 1019

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	705	720
Aluminium	245	265
Kalk	320	360
Eisenschrott fein	490	520
Walzenzunder	990	1040

Die Variationsbreite von Silizium betrug bei dieser Kampagne 705 kg bis 720 kg, bei Aluminium lag dieses Spektrum zwischen 245 kg und 265 kg, Kalk und Walzenzunder wurden mit Grenzen zwischen 320 kg und 360 kg bzw. 990 kg und 1040 kg so gewählt, dass sie niedriger als die Referenzchargen liegen. Die Grenzen von Eisenschrott wurden im Gegenzug dazu leicht nach oben zwischen 490 kg und 520 kg verschoben. Diese Wahl der Grenzen sollte eine deutlich geringere Menge an Gesamtmöller bedeuten.

3.9.1.1 Möllierzusammensetzung der Chargen aus Kampagne 11

Die nachfolgende Tabelle 40 zeigt die Abbrandparameter für die untersuchten Versuchschargen.

Tabelle 40: Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen
1009 - 1019

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1009 - 1013	1014 - 1019	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	495	490	-5
Walzenzunder	542	516	-26
Kalk	170	158	-12
Mo-Oxid 1	400	400	0
Mo-Oxid 2	750	750	0
Mo-Oxid 3	459	459	0
Fe-Schrott	140	145	+5
Abreiniger	10	10	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	0	0	0
Alugrieß 1	35	28	-7
Alugrieß 2	100	100	0
Gesamt	3111	3066	-45

Bei dieser Versuchskampagne setzte sich ebenfalls der Trend einer Verringerung der Zugabemenge von Ferrosilizium, Walzenzunder und Aluminium fort. Allerdings ist zu beachten, dass die Viskosität bereits bei den Referenzchargen sehr niedrig ist und somit im Gegensatz zu den vorangegangenen Mischungen auch die Zugabemenge an Kalk um beachtliche 12 kg zurückzunehmen war.

Ungewöhnlich dabei ist, dass das Mischrezept bei dieser Versuchsreihe bereits in der Optimierungsfunktion der Software NN-Tool auch zu kleineren Kalkmengen als in der herkömmlichen Mischung geführt hat.

Dieser Optimierungsansatz bringt einen beachtlichen Rückgang der Zuschlagsstoffe um 45 kg pro halben Abbrand.

3.9.1.2 Diskussion der Abbrandergebnisse

In der hier dargestellten Tabelle 41 sind die Ergebnisse dieser Versuchskampagne angeführt.

Tabelle 41: Ergebnisse der Chargen 1009 - 1019

Chargen	FI-Nummern	Protokoll-Nummern	
Referenzchargen 1009 - 10013	170,174,175	1062/08;1071/08;1072/08	
optimierte Chargen 1014 - 1019	170,174,175	1062/08;1071/08;1072/08	
	Mo-Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 1009 - 1013	75,09	-14.740	0,13
optimierte Chargen 1014 - 1019	75,06	-14.571	0,10
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 1009 - 1013	1045,42	13,69	2978
optimierte Chargen 1014 - 1019	1044,69	12,27	2860

Bei dieser Kampagne ist auffällig, dass die von NN-Tool ursprünglich berechnete Viskosität mit einem Wert von 0,13 Pa·s sehr niedrig ist und somit keine großen Änderungen zu geringeren Werten möglich war. Die in variierbaren Parameter sind jedoch so gesetzt, dass trotzdem eine Verringerung der Viskosität erreichbar ist. Mit diesen gewählten Variationsbreiten lieferte das NN-Tool eine rechnerische Viskosität von 0,10 Pa·s.

Die Tabelle 42 zeigt die vollständigen Analysenwerte dieser Versuchskampagne.

Tabelle 42: Analysen der Chargen 1009 - 1019

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1009	0,28	1,16	0,91	3040
Referenzcharge 1010	0,28	1,16	0,66	3140
Referenzcharge 1011	0,28	1,16	0,50	2940
Referenzcharge 1012	0,28	1,16	0,74	2830
Referenzcharge 1013	0,28	1,16	0,40	2940
Mittelwert	0,28	1,16	0,64	2978
optimierte Charge 1014	0,30	0,87	0,66	2870
optimierte Charge 1015	0,30	0,87	0,35	2820
optimierte Charge 1016	0,30	0,87	0,44	2820
optimierte Charge 1017	0,30	0,87	0,53	2900
optimierte Charge 1018	0,30	0,87	0,81	2780
optimierte Charge 1019	0,30	0,87	0,51	2970
Mittelwert	0,30	0,87	0,55	2860

Wie in der Tabelle zu sehen ist, liegt der Mittelwert des Molybdäninhaltes der Schlacke bei den optimierten Charge um 0,1 % niedriger, als die der Referenzchargen.

Bei der Auswertung des Blockgewichts ist wiederum auffällig, dass die Referenzchargen im Durchschnitt um 118 kg höher sind, als die neu berechneten Chargen.

Um den Einfluss des niedrigeren Blockgewichts gegenüber der Einsparung an Zuschlagsstoffen zu verifizieren, bietet das nachfolgende Kapitel 3.9.1.3 eine wirtschaftliche Betrachtung dieser Versuchscharge.

3.9.1.3 Wirtschaftliche Betrachtung der Kampagne 11

Die Ergebnisse dieser Versuchskampagne zeigten, dass einerseits der Einsatz der optimierten Möllermischung zu einer Einsparung der nötigen Reduktionsmittel führt und sich andererseits eine deutliche Kostenreduktion hinsichtlich der Molybdänverluste in die Schlacke ergibt.

In der nachfolgenden Tabelle 43 ist eine Auflistung der anfallenden Kosten und Ersparnisse, die sich aufgrund der eingesetzten Reduktionsmittel und Zuschlagsstoffe ergeben, dargestellt.

Tabelle 43: Kostenauflistung der Reduktionsmittel

Referenzchargen	Preise [€/kg]	benötigte Menge [kg]	sich ergebende Kosten [€]
FeSi	0,78	495	386,1
Walzenzunder	0,02	542	13,008
Kalk	0,07	170	12,41
Fe-Schrott	0,28	140	39,2
Alugrieß	1,9	135	256,5
Gesamt			707,2
optimierte Chargen			
FeSi	0,78	490	382,20
Walzenzunder	0,02	516	12,384
Kalk	0,07	158	11,534
Fe-Schrott	0,28	145	40,6
Alugrieß	1,9	128	243,2
Gesamt			689,9
Differenz der Kosten			17,3 €/Charge

Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass pro Charge eine Einsparung an 17,3 Euro durch die Optimierung der Reduktionsmittel und der Zuschlagstoffe zu erzielen ist, wobei hierbei der erhöhte Molybdängewinn, der durch die Verringerung des Gehaltes in der Schlacke auftritt, noch nicht berücksichtigt ist.

Wie bereits aus der oben dargestellten Tabelle 42 ersichtlich ist, erzielte diese optimierte Kampagne auch einen verminderten Wert des Molybdäns, welches in die Schlacke verloren geht.

Dieser um 0,09 % geringere Molybdänwert in der Schlacke bedeutet ein höheres Ausbringen, was ebenfalls ein Gewinnpotenzial birgt (siehe Tabelle 44).

Tabelle 44: Ausbringungssteigerung hinsichtlich Molybdän der Kampagne 11

	Möllermenge [kg]	Blockgewicht [kg]	Schlackenmenge [kg]	Mo in der Schlacke [%]	Mo in der Schlacke [kg]
Referenzchargen	6222	2978	3244	0,64	20,76
optimierte Chargen	6132	2860	3272	0,55	18,00
Mehrausbringung Mo pro Charge					2,77 kg

In der obigen Tabelle ist zu sehen, dass pro Charge ein Einsparungspotenzial von 2,77 kg Molybdän zu erzielen ist. Wird dieser Wert mit einem Molybdänpreis, der im Durchschnitt bei etwa 48,9 €/kg liegt, multipliziert, ist der sich dadurch ergebende finanzielle Vorteil von 134,9 €/Charge beträchtlich.

Unter Berücksichtigung der optimierten Zugabe von Reduktionsmittel (siehe Tabelle 40) ergibt sich eine insgesamt Einsparung von 152,2 €/Charge. Auch die Einsparung, die sich durch die optimierte Zugabe von Reduktionsmittel und Zuschlagsstoffe wie in Tabelle 40 gezeigt ist ergibt, ist zu beachten. Insgesamt wäre der Erlös um 152,2 €/Charge zu steigern.

Bei einer durchschnittlichen Produktion von 100 Abbränden im Monat bedeutet dies rechnerisch einen Mehrgewinn von 15.220 €/Monat.

Die Auswertung der Versuchschargen 12 - 16 sind dem Anhang zu entnehmen.

3.9.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Chargen mit Kalk und Walzenzunderreduktion

In diesem Kapitel erfolgte neben der Verringerung des Reduktionsmittels auch eine Reduzierung des Kalks und des Walzenzunders.

Der Grund für diese Optimierungsart in dieser Versuchskampagne ist dadurch erklärbar, dass laut Thermodynamik schwer reduzierbare Phasen wie FeMoO_4 und CaMoO_3 in der Schlacke vorkommen, die unerwünscht sind. Die Kampagnen 11 – 16 zielten darauf ab diese Phasen zu verringern. Diese Verbindungen treten durch die Mischung der Zuschlagsstoffe mit den Molybdänkonzentraten auf. Die Reaktionsgleichung, nach der die Phasenbildung verläuft, lässt sich wie folgt formulieren.



Ist die Zugabemenge an Walzenzunder geringer, verschiebt sich die Reaktion laut Le Chatelier in Richtung der Edukte und es entsteht weniger FeMoO_4 , welches schwer zu reduzieren ist. Dadurch ist es möglich, dass weniger Molybdän in die Schlacke verloren geht und im Prozess als Ferromolybdän zu gewinnen wäre. Dies ist in Gleichung (34) dargestellt.



Ähnliche Abläufe könnten sich auch aus einer Verringerung der Zugabemenge an Kalzium in Form von Kalk ergeben. Die Reaktionsgleichung, bei der das schwierig zu reduzierende CaMoO_3 entsteht, lässt sich nach Gleichung (35) beschreiben:



Eine geringere Menge an zugegebenen Kalk verringert die vorhandene Menge an Kalzium. Dadurch verschiebt sich laut Le Chatelier das Gleichgewicht ebenfalls in Richtung Edukte. Dies beschreibt die nachfolgende Gleichung (36).



Dies könnte zu einer geringeren Menge an gebildeten CaMoO_3 führen, welches wiederum schwer zu reduzieren ist und sich so geringere Werte von Molybdän in der Schlacke ergeben. Da allerdings beide Zuschlagsstoffe wichtige Funktionen im Gesamtprozess erfüllen, ist deren Zugabe nicht willkürlich zu verringern. Kalk ist für eine ausreichend gute Trennung von Metall und Schlacke als Flussmittel unumgänglich. Weiters wird ein Teil der benötigten Reaktionswärme über die Zugabe von Walzenzunder eingebracht. Fällt die

Zugabe dieser Zuschlagsstoffe zu gering aus, ist entweder die Trennung von Metall und Schlacke nicht mehr gewährleistet, oder die eingebrachte Wärme ist zu gering und der Abbrand verläuft nur unvollständig. Dies würde wiederum eine Erhöhung des in die Schlacke verlorenen Molybdäns bedeuten und sich in deutlich niedrigeren Blockgewichten widerspiegeln.

Die hier erhaltenen Ergebnisse dieser Art der Optimierung sind in unten dargestellten Abbildung 47 zusammengefasst.

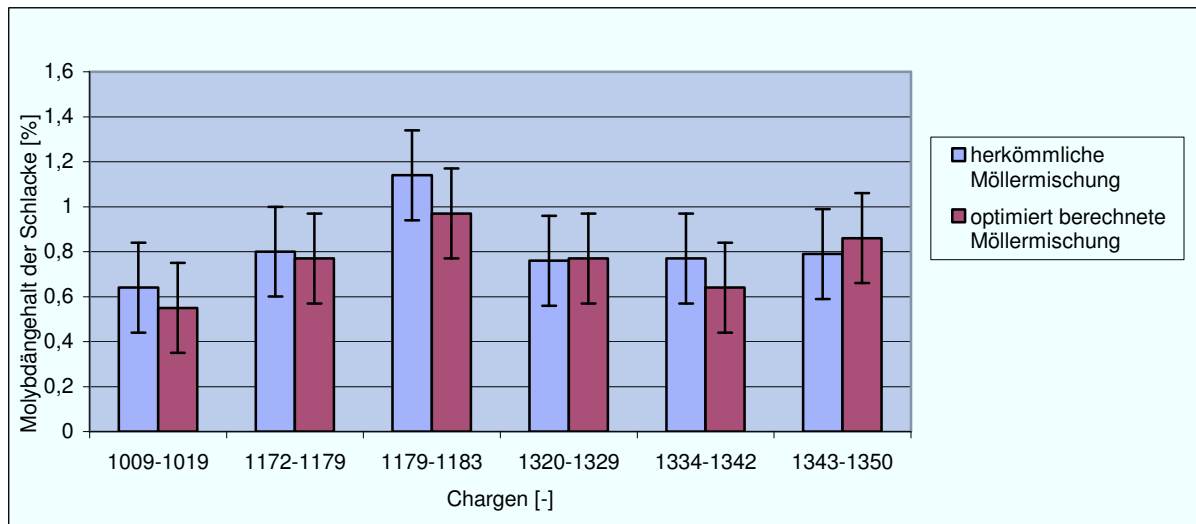


Abbildung 47: Vergleich der Ergebnisse der Referenz- und der optimierten Chargen der Kampagne 11 - 16 [11]

Die erste Kampagne brachte ein sehr positives Ergebnis und lieferte einen deutlich niedrigeren Schlackenwert bei ebenso deutlicher Einsparung an Reduktionsmittel und Zuschlagsstoffen. Die weiteren zwei Kampagnen brachten ebenfalls eine Verbesserung der Schlackenwerte. Auch die durchschnittlichen Blockgewichte waren bei diesen Optimierungsarten vielversprechend. Die Versuchskampagne der Chargen 1320 - 1329 brachte praktisch dasselbe Ergebnis, wie die Referenzchargen bei einer deutlichen Einsparung an Zuschlagsstoffen. Die Chargen der Nummern 1334 - 1342 führten wiederum zu einer erheblichen Verbesserung der Molybdängehalte der Schlacken bei gleichzeitigem Anstieg der durchschnittlichen Blockgewichte. Allerdings ist auch der Versuchsumfang, um signifikante Werte zu erhalten, zu gering.

Die letzte Kampagne dieser Art der Optimierung lieferte auf den ersten Blick zwar eine Verschlechterung, die aber nicht unbedingt mit den neu eingestellten Prozessparametern zusammenhängen muss.

Die eingestellten Prozessparameter sind empirisch ermittelt, was bedeutet, dass eine weitere Senkung der Zuschlagsstoffe Walzenzunder und Kalk bei gleichzeitiger Erhöhung an Eisenschrott, um den Wärmeverlust auszugleichen, vielleicht noch möglich wäre. Auch die

Zugabemenge der Reduktionsmittel Silizium und Aluminium könnten eventuell noch weiter gesenkt werden. Diese Arbeit gibt somit nur eine Richtung der Optimierung vor. Ein genauer Betriebspunkt mit einer minimalen Einsatzmenge ist noch zu finden.

Die Größenordnungen der Verringerung der Möllierzusammensetzung, die sich im Laufe dieser Versuchskampagne als günstig erwiesen haben, zeigt die Tabelle 45.

Tabelle 45: Größenordnung der Variationsbereiche der optimierten Chargen

	Minimale Änderung	Maximale Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]
FeSi	-5	-8
Walzenzunder	-16	-26
Kalk	-8	-12
Fe-Schrott	+5	+8
Aluminium	-3	-7
Gesamteinsparung	-27	-45

Diese Werte sind nur Anhaltspunkte bei denen es sich um keine optimierten Werte mit minimalen Zugabemengen handelt. Zu beachten, dass eine Möllermischung als Gesamtsystem zu betrachten ist und dadurch keinesfalls von jeder einzelnen Komponente nur der kleinste Wert, der die größte Einsparung bedeuten würde, zu chargieren ist. Da somit der Möller aus dem Gleichgewicht gebracht werden würde, und die Wechselwirkungen der Komponenten untereinander gestört werden würde.

Es waren folgende empirische Zusammenhänge ersichtlich:

- Die Summe der eingesparten Menge an Aluminium und Silizium sollte 12 kg nicht überschreiten.
- Je weniger Reduktionsmittel chargiert ist, desto weiter kann auch Walzenzunder und Kalk zurückgenommen werden.
- Im Gegenzug dazu ist Eisenschrott leicht zu erhöhen, um die nötige Menge an eingebrachten Eisen etwa konstant zu halten.

An dieser Stelle ist nochmals darauf hinzuweisen, dass eine weitere Einsparung der Hilfsstoffe vielleicht noch möglich wäre, allerdings nur unter Einhaltung der oben genannten Zusammenhänge.

4 Ergebnisse und Diskussion

In dieser Arbeit fanden bei einem Gesamtumfang von 16 Versuchskampagnen, die 135 Chargen ergaben, 3 verschiedene Optimierungsarten statt.

- Optimierung der Möllerzusammensetzung hinsichtlich einer Viskositätsminderung
- Substitution des eingesparten Reduktionsmittels mit Kalziumsilizium
- Reduktion von Kalk und Walzenzunder

Die Mölleroptimierung hinsichtlich einer Viskositätsverminderung erwies sich aufgrund steigender Werte des Molybdängehaltes der Schlacke bei gleichzeitig deutlichem Rückgang der durchschnittlichen Blockgewichte als wenig zielführend.

Tabelle 46 zeigt die Ergebnisse aller Versuchschargen welche nach dieser Methode variiert wurden.

Tabelle 46: Zusammenfassung der Ergebnisse der Optimierung hinsichtlich Viskositätsverringering

	Referenzchargen	optimierte Chargen
Kampagnen	Mo in Schlacke [%]	Mo in Schlacke [%]
1	0,54	0,64
2	0,77	0,83
3	0,68	0,70
4	0,77	0,77
Mittelwert	0,69	0,74

Die Mittelwerte der Referenzchargen liegen mit 0,69 % Molybdän in der Schlacke unter dem Mittelwert der optimierten Chargen mit 0,74 %.

Dies zeigt auch nachfolgende Abbildung 48 welche die jeweiligen Mittelwerte der Referenzchargen mit denen der optimierten Chargen grafisch darstellt.

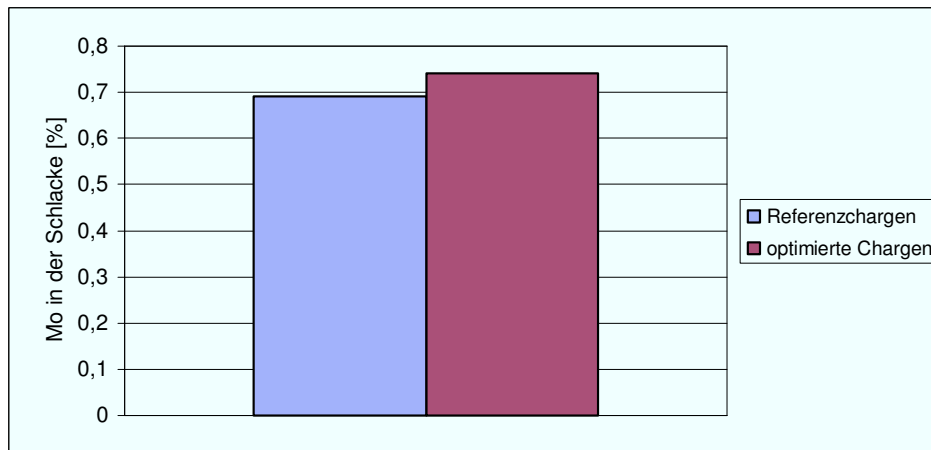


Abbildung 48: Vergleich der Mittelwerte bei einer Optimierung hinsichtlich Viskositätsverringern

Weiters waren die Blockgewichte bei den optimierten Chargen gegenüber den Referenzchargen deutlich niedriger.

Aufgrund dieser Tatsachen war dieser Optimierungsansatz nicht weiter verfolgenswert. Gründe für die nicht zufriedenstellende Optimierungsvariante können unzureichend verringerte Viskositätsbereiche, zu geringe Enthalpien oder auch ungünstige Rohstoffkombinationen sein.

Um das Reduktionspotenzial der eingesetzten Mischung zu erhöhen, fand bei diesem Optimierungsansatz eine Substitution des eingesparten Reduktionsmittels durch Kalziumsilizium statt.

Die ersten beiden Versuchskampagnen mit Kalziumsilizium erwiesen sich anfangs als viel versprechend, da der Molybdängehalt der Schlacke sank. Weitere Versuchskampagnen brachten aber keine Verbesserung. Der Gehalt an Molybdän in der Schlacke gegenüber den Referenzchargen stieg an.

Dies zeigt auch Tabelle 47, welche die Ergebnisse dieser Optimierungsvariante darstellt.

Tabelle 47: Zusammenfassung der Ergebnisse mit Kalziumsilizium

	Referenzchargen	optimierte Chargen
Kampagnen	Mo in Schlacke [%]	Mo in Schlacke [%]
5	0,75	0,64
6	0,57	0,53
7	0,96	0,99
8	0,87	1,01
9	0,83	1,08
10	0,52	0,65
Mittelwert	0,75	0,81

Auch bei dieser Art der Optimierung lagen die Mittelwerte des Gehaltes an Molybdän in der Schlacke mit 0,75 % bei den Referenzchargen deutlich unter jenen der optimierten Chargen mit 0,81 %.

Diesen Unterschied zeigt nachfolgende Abbildung 49 auch grafisch.

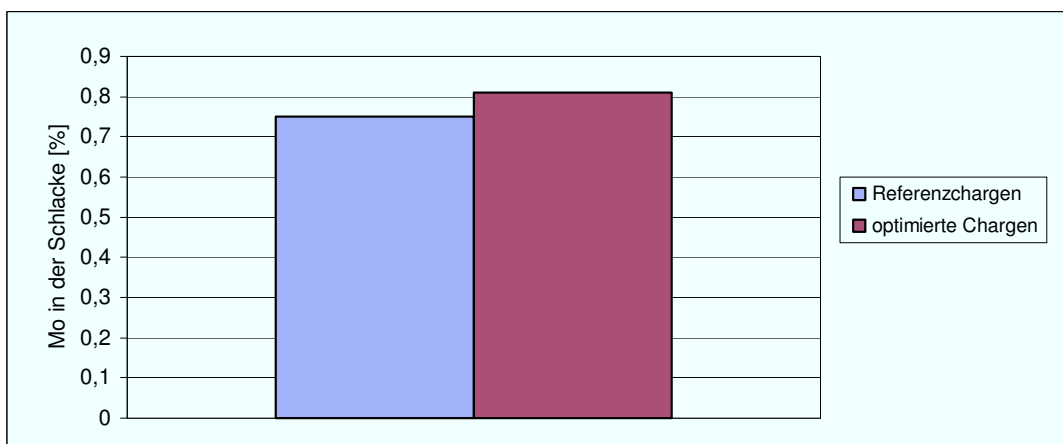


Abbildung 49: Vergleich der Mittelwerte der Versuche mit Kalziumsilizium

Gleichzeitig sank bei den optimierten Chargen auch das durchschnittliche Blockgewicht, was einer der Hauptgründe war diese Optimierungsart nicht weiter zu verfolgen.

Ursache für die nicht zielführende Optimierung könnte ein unzureichendes Reduktionspotenzial der Mischung sein, dass durch eine zu geringe Menge an chargierten Kalziumsilizium entsteht.

Der dritte Ansatz der Optimierung brachte die besten Ergebnisse. Es wurden die Zugabemengen an Kalk und Walzenzunder bewusst niedrig gewählt, um die Schlackenmenge bei annähernd gleichem Energieeintrag zu reduzieren, um über höhere Schlackentemperaturen eine geringere Viskosität zu erreichen. Gleichzeitig ergab wahrscheinlich die Reduktion der Zugabemenge an Walzenzunder eine geringere Bildung

der nur schwer zu reduzierenden Phase FeMoO_4 . Auch die Senkung der zugegebenen Menge an Kalk führte zu einer mengenmäßigen Verminderung der im Prozess entstehenden ebenfalls schwer zu reduzierende Phase CaMoO_3 .

Diese Maßnahmen bewirkten, dass sich Molybdän einerseits durch die dünnflüssigere Schlacke leichter absenken kann. Andererseits hatte die Verringerung dieser schwer zu reduzierenden Phasen wahrscheinlich zur Folge, dass weniger Molybdän in Form von FeMoO_4 bzw. CaMoO_3 in die Schlacke verloren geht.

Dies spiegelt auch die nachfolgende Tabelle 48 wider, welche die Ergebnisse dieser Optimierungsmethode zusammenfasst.

Tabelle 48: Zusammenfassung der Ergebnisse mit Reduktion von Kalk und Walzenzunder

	Referenzchargen	optimierte Chargen
Kampagnen	Mo in Schlacke [%]	Mo in Schlacke [%]
11	0,64	0,55
12	0,80	0,77
13	1,14	0,97
14	0,76	0,77
15	0,77	0,64
16	0,79	0,83
Mittelwert	0,82	0,76

Bei dieser Art der Optimierung lagen die Mittelwerte der Referenzchargen mit 0,82 % Molybdän in der Schlacke über jenen der optimierten Chargen mit 0,76 %. Dies stellt nachfolgende Abbildung 50 grafisch dar.

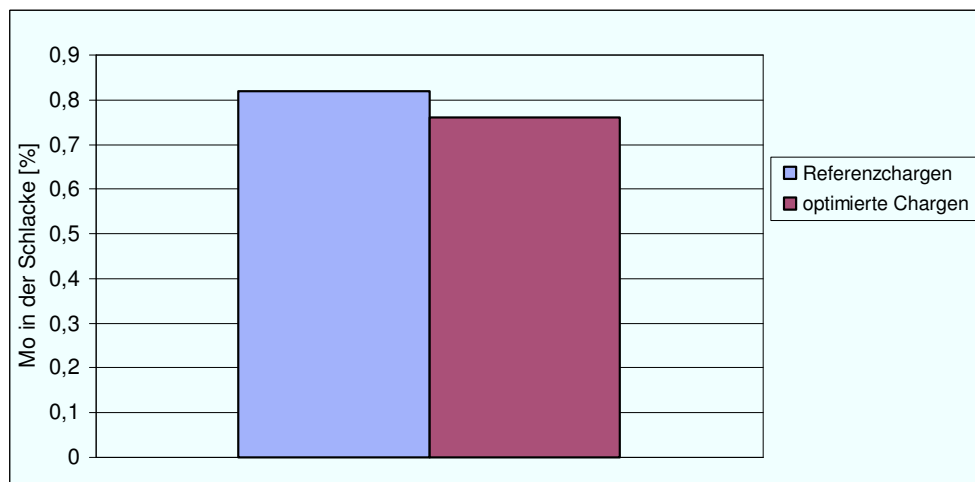


Abbildung 50: Vergleich der Mittelwerte der Versuche mit Reduktion von Kalk und Walzenzunder

Bei dieser Art der Optimierung ist positiv zu werten, dass sich das durchschnittliche Blockgewicht bei der Mehrzahl der Versuchskampagnen erhöhte, oder zumindest nur geringfügig verringerte.

Diese Verminderung des Molybdängehaltes in der Schlacke, und die großen Einsparungen bei den Mengen der Zuschlagsstoffe, ergeben ein großes Einsparungspotenzial.

Wie zuvor bereits erwähnt, waren die neuen Prozessparameter dieser optimierten Abbrände empirisch zu ermitteln und die Zugabemengen der Zuschlagsstoffe nur schrittweise mit jeder Kampagne zu verringern.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit erfolgte die Optimierung eines neuen Möllerberechnungsmodells für die metallothermische Ferromolybdänproduktion. Darüber hinaus sollte die Implementierung in den Betrieb durchgeführt werden.

Mithilfe eines dafür entwickelten neuronalen Netzes lässt dieses neue Modell eine Optimierung des chargierten Möllers zu, welche einerseits den Gehalt an Molybdän, der über die Schlacke verloren geht, verkleinert und andererseits eine Einsparung hinsichtlich der prozesstechnisch relevanten Zuschlags- und Hilfsstoffe erzielt.

Im Rahmen einer ausführlichen Literaturrecherche wurden die unterschiedlichen Arten von neuronalen Netzen, deren Arbeitsweise sowie deren entscheidenden Vorteile gegenüber statistischen Methoden ausgearbeitet.

Anschließend erfolgte die Erstellung des neuronalen Netzes, dem eine Datenbank aus thermodynamischen Daten zugrunde liegt. Nach einer Überprüfung und Kontrolle des erstellten Netzes kam es zu einer Reihe von unterschiedlichen Optimierungsmethoden.

Dazu wurden die untersuchten Kampagnen, die bezogen auf die eingesetzte Menge an Molybdänkonzentrat mischungsgleich waren, zweigeteilt. Ein Teil dieser Chargen erfuhr die Berechnung anhand des ursprünglich im Betrieb eingesetzten Möllerberechnungsmodells, den Referenzchargen. Der andere Teil dieser Chargen wurde mittels des neu entwickelten Berechnungsdatenblattes das gestützt durch das neuronale Netz eine Möglichkeit der Optimierung bot, erstellt, welche die optimierten Chargen darstellten. Diese Arbeitsweise ließ einen direkten Vergleich der Auswirkungen der unterschiedlichen Optimierungsansätze mit den jeweiligen herkömmlichen Abbrandvariationen zu.

Darüber hinaus wurden die Auswirkungen einer Verringerung der Viskosität, einer Substitution der Reduktionsmittel Ferrosilizium und Aluminium durch Kalziumsilizium und einer bewussten Absenkung der Zugabemengen von Kalk und Walzenzunder untersucht.

Die Optimierungsvariante, welche ausschließlich auf eine Verringerung der Viskosität abzielte, erwies sich als nicht weiter verfolgenswert. Auch die Option, das Reduktionspotenzial der Mischung durch den Einsatz von Kalziumsilizium zu erhöhen, brachte keine Verbesserung und wurde deshalb nicht weiterverfolgt. Hingegen erzielte die Optimierungsvariation der Absenkung von Kalk und Walzenzunder in beiden vorgegeben Punkten eine Verbesserung. So konnte der Gehalt an Molybdän in der Schlacke gesenkt, und auch eine deutliche Einsparung an Silizium, Aluminium, Kalk und Walzenzunder erzielt werden.

Auch die aus dem Abbrand erhaltenen Blockgewichte lagen bei dieser Art der Optimierung im Bereich der herkömmlich gemischten Referenzchargen oder sogar über diesen.

Zurückzuführen ist dieses Mehrausbringen an Molybdän wahrscheinlich auf die Verringerung der Bildung von schwer zu reduzierenden Phasen, wie FeMoO_4 und CaMoO_3 . Einen weiteren Grund könnte die Temperatur darstellen. Der annähernd gleiche Wärmeeintrag gepaart mit geringeren entstandenen Schlackenmengen führen zu höheren Temperaturen. Durch diese erhöhten Schlackentemperaturen sinkt die Viskosität und Molybdän kann leichter aus der Schlacke absinken. Da die beiden Hilfsstoffe Walzenzunder und Kalk wichtige Aufgaben im Gesamtprozess übernehmen, ist eine vollständige Ausgrenzung dieser Phasen nicht möglich. Auch die Rücknahme der Zuschlagsstoffe ist damit nur schrittweise sinnvoll, um eine vollständige Separation von Schlacke und Metall zu erreichen und genügend Reaktionswärme in den Prozess einzubringen.

Diese Verringerung des in die Schlacke verlorenen Molybdäns ergibt zusammen mit den Kostensenkungen bei Zuschlagsstoffen und Reduktionsmitteln ein beträchtliches Einsparungspotenzial.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit erfolgte abschließend eine teilweise Implementierung dieses neu erstellten Möllerberechnungssystems in den Betrieb.

6 Ausblick

Da die einzelnen Prozessparameter der Optimierung schrittweise und empirisch ermittelt wurden, ist noch kein optimaler Betriebspunkt, welcher sich aus einer minimalen Menge an Zuschlagsstoffen und einer maximalen Ausbeute zusammensetzt, erreicht.

Dieses Optimum der Zusammensetzung, welches beide Kriterien erfüllt, ist über die Durchführung weiterer Versuche zu finden und stellt den idealen Betriebspunkt dar.

Ziel der fortführenden Experimente sollte dabei sein, einen idealen Bereich hinsichtlich minimaler Einsatzmengen der Zuschlagsstoffe zu finden, der gleichzeitig einen minimalen Molybdängehalt in der Schlacke bei hohem Blockgewicht garantiert.

Ein weiteres Ziel ist die vollständige Implementierung des neu erstellten Möllerberechnungsdatenblattes in der laufenden Produktion. Dies lässt sich durch eine Verknüpfung des Datenblattes mit den Analysen des angelieferten Ferrosiliziums sowie durch die ständige Aktualisierung der Molybdänoxid-Rohstoffdateien und der Mittelwerte der Molybdänkonzentrate der unterschiedlichen Lieferanten hinsichtlich Sauerstoffgehalts, realisieren.

Auf diese Weise ist es möglich, mit nur einem Exceldatenblatt alle relevanten Prozessparameter zu erfassen sowie weitestgehend zu optimieren und zu vereinfachen.

In Hinblick auf die Zukunft, unter Berücksichtigung der immer höher werdenden Qualitätsanforderungen, gepaart mit der komplexen Preissituation, welche Ferromolybdän unterliegt, ist auf größtmögliches Ausbringen mit einer minimalen Menge an Rohstoffen besonders Augenmerk zu legen.

Weiters lässt sich durch weitere Optimierung bzw. Vereinfachung des Möllerberechnungsdatenblattes die Gefahr einer Fehlcharge nahezu ausschließen.

Durch weitere Versuchschargen unter Einhaltung der erwähnten Punkte ist eine größtmögliche Effizienz bei der metallothermischen Produktion von Ferromolybdän der Treibacher Industrie AG zu erreichen, wodurch die Konkurrenzfähigkeit auch in Zukunft gewährleistet ist.

7 Literatur

- [1] Treibacher Industrie AG: Homepage des Betriebes, Online im Internet, Abfrage am 20.12.2008, URL: <http://www.treibacher.com>
- [2] Pucher P.: Stand der Technik in der Ferrolegierungsproduktion. Bakkalaureatsarbeit, Montanuniversität Leoben, 2005, 67 - 76.
- [3] Pokorny E.: Molybdän, W. Knapp, Halle 1927 .
- [4] Mineralienatlas, Online im Internet, Abfrage am 16. September 2008, URL: <http://www.mineralienatlas.de>
- [5] Roskill Information Service, Molybdenum, 2011, Abfrage am 12. Mai 2012, URL: <http://www.roskill.com/reports/molybdenum>.
- [6] Magyar M.J.: Molybdenum, U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2003, Vol. 1.
- [7] Bartholome E., Ullmann F.: Ullmann Enzyklopädie der technischen Chemie. Band 17, 4. Aufl. Verlag Chemie, Weinheim-New York, 1979, 23 - 49
- [8] DIN-Taschenbuch 454, Gießereiwesen 1, Stahlguß und Gußeisen, Deutsches Institut für Normung e.V., 1. Aufl., Beuth Verlag GmbH Berlin-Wien-Zürich, 1999.
- [9] Zeiler S.: Optimierung der metallothermischen Ferromolybdänproduktion. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben. (2007)
- [10] Ressel R.: Untersuchung des Oxidationsverhalten von Vanadium, Phosphor und Molybdän bei der Ferrolegierungsherstellung. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben. (2005)
- [11] Ressel R.: Optimierung der metallothermischen Ferrololybdänproduktion. Dissertation, Montanuniversität Leoben. (2009)
- [12] European Commission- Institute of Prospektive Technological Studies: Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries (2000). 466 - 519
- [13] Haag H.: Die Herstellung von Ferromolybdän und Molybdänmetall, Erzmetall, Nr. 15, Dr. Riederer Verlag, 1962, S. 229 – 234

-
- [14] Sierrita D.: Duval Sierrita adds flexibility with ferromolyplant, Eng. Min. J. Vol. 176, Nr. 6; McGraw- Hill 1975, 98 - 99
- [15] Durrer R., Volkert G. (Hsrg.: G. Volkert, K.-D. Frank): Metallurgie der Ferrolegierungen. 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin 1972.
- [16] W.E. Lauprecht, R. Q. Barr, R. M. Fichte, M. Kuhn, in Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 4. Aufl., Band 17, Verlag Chemie, Weinheim-New York, 1979.
- [17] Bartholome E., Ullmann F.: Ullmann Enzyklopädie der technischen Chemie. Band 17, 4. Aufl. Verlag Chemie, Weinheim-New York 1979, 351 - 361
- [18] Grundstudium Informatik, Homepage, Online im Internet, Abfrage am 27. Juni 2008, URL: <http://www.grundstudium.info/neuro/node3.php>,
- [19] Reutner M., Sudhölter S.: Gebrauch neuronaler Netze zur Simulation schwach definierter Systeme in der Metallurgie. Schriftenreihe der GDMB, Heft 77, 31 – 58
- [20] Institut für Mathematik der BTU Cottbus, Homepage, online im Internet, Abfrage am 12. Dezember 2008, URL: <http://vieta.math.tu-cottbus.de/~kolb/ml-nn/node10.html>
- [21] Institut für Informatik der Universität Innsbruck, Vortragsfolien, Online im Internet, Abfrage am 28. Februar 2008, URL: <http://informatik.uibk.ac.at/teaching/ss2007/nn/slides/>
- [22] Institut für Mathematik der Universität Münster, Homepage, Online im Internet, Abfrage am 27. Februar 2008, URL: <http://wwwmath.uni-muenster.de/SoftComputing/lehre/material/wwwnscript/modifikationen2.html>;
- [23] Brause R.: Neuronale Netze, 2. Aufl.(1995), B.G. Teubner, Stuttgart, 15 - 55, ISBN- 3-519-12247-2
- [24] NN-Tool- die neuronale Netzsoftware für Anwendung in der Prozessindustrie, Homepage, Online im Internet, Abfrage am 27. Februar 2008, URL: <http://www.baermann.de/prozessmodellierung.htm>
- [25] Mayer H. A., Schweiger R.: Evolutionary and Coevolutionary approaches to time series prediction using generalized multi layer perceptrons. In Congress on Evolutionary Computation; (1999) 275 - 280;
- [26] Haykin S.: Neural networks: a comprehensive foundation, Prentice Hall Inc.; ISBN- 0-13-273350

- [27] Lutz W.: Umweltgerechte Produktion von Ferromolybdän. Diplomarbeit Montanuniversität Leoben. (1998)

8 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Molybdänglanz [2].....	2
Abbildung 2: Bleiglanz [2].....	2
Abbildung 3: Molybdänit [4]	3
Abbildung 4: Wulfenit [4].....	3
Abbildung 5: Powellit [4]	3
Abbildung 6: Freie Bildungsenthalpie in Abhängigkeit der Temperatur [10]	6
Abbildung 7: Biologisches Neuron und Modellneuron [19].....	13
Abbildung 8: Darstellung eines neuronalen Netzes [18].....	15
Abbildung 9: binäre Ausgabefunktionen mit den Werten 0 und 1 bzw. -1 und +1 [19].....	19
Abbildung 10: Perzeptron [22]	20
Abbildung 11: binäre Stufenfunktion [19].....	21
Abbildung 12: semilineare Ausgabefunktion [22]	22
Abbildung 13: Fermi- bzw. Cosinusfunktion [19].....	23
Abbildung 14: gebräuchliche Aktivierungsfunktionen [22].....	24
Abbildung 15: ebenweis verbundenes feedforward Netz [22]	25
Abbildung 16: allgemeines feedforward Netz mit shortcut connections [22].....	26
Abbildung 17: direct feedback Netz [22]	26
Abbildung 18: Netz mit indirekter Rückkoppelung [22].....	27
Abbildung 19: winner-takes-all Netzwerk [22]	27
Abbildung 20: Hopfield- Netz [22]	28
Abbildung 21: Ein zweischichtiges Netz [19].....	28
Abbildung 22: Aufbau eines „backpropagation“-Netzwerks [19].....	29
Abbildung 23: Zugehörigkeitsfunktion für die Variable x [19]	30
Abbildung 24: Stofffluss der Möllermischanlage [9]	36

Abbildung 25: Fließbild der Abbrandstellen [9]	37
Abbildung 26: Übersicht der Schlackenaufbereitung [9].....	38
Abbildung 27: Fließschema der Brecherstraße [9].....	39
Abbildung 28: Fließschema der Filteranlage [9].....	40
Abbildung 29: Molybdänkonzentrat [9].....	42
Abbildung 30: Korngrößenverteilung eines Molybdänkonzentrates [9].....	42
Abbildung 31: Korngrößenverteilung Aluminiumgrieß unterschiedlicher Lieferanten [9].....	44
Abbildung 32: Aluminiumgrieß [9].....	44
Abbildung 33: Ferrosilizium mit 75,5 % Silizium [9].....	45
Abbildung 34: Korngrößenverteilung von Ferrosilizium [9].....	46
Abbildung 35: Korngrößenverteilung des Walzenzunders [9]	47
Abbildung 36: Verlauf der Viskosität und gemessenes Molybdän in Schlacke.....	55
Abbildung 37: Verlauf der Enthalpie und des gemessenen Molybdäns in der Schlacke.....	56
Abbildung 38: Verlauf des Molybdäns im Block und des Molybdäns in der Schlacke	56
Abbildung 39: Verlauf der Schlackenmenge und des Molybdäns in der Schlacke	57
Abbildung 40: Verlauf des Möllergewichts und des Molybdäns in der Schlacke	57
Abbildung 41: Molybdängehalt der Schlacke in Abhängigkeit der Viskosität.....	58
Abbildung 42: Molybdängehalt der Schlacke in Abhängigkeit von der Enthalpie	58
Abbildung 43: Kupfer- Mo in der Schlacke gemessen	59
Abbildung 44: Molybdängehalt der Schlacke in Abhängigkeit von Silizium	60
Abbildung 45: Vergleich der Molybdängehalte.....	77
Abbildung 46: Vergleich der Ergebnisse der Optimierung mit CaSi-Substitutio.....	83
Abbildung 47: Vergleich der Ergebnisse der Referenz- und der optimierten Chargen der Kampagne 11 – 16.....	92
Abbildung 48: Vergleich der Mittelwerte bei einer Optimierung hinsichtlich Viskositätsverringerng	95
Abbildung 49: Vergleich der Mittelwerte der Versuche mit Kalziumsilizium.....	96

Abbildung 50: Vergleich der Mittelwerte der Versuche mit Reduktion von Kalk und Walzenzunder.....	97
--	----

8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Molybdän [7].....	4
Tabelle 2: Zusammensetzung von Ferromolybdän nach DIN 17561 [8]	5
Tabelle 3: Verbrauchszahlen der karbothermischen Ferromolybdänerzeugung [7].....	8
Tabelle 4: Typische Abbrandparameter bei der FeMo-Metallthermie [15].....	11
Tabelle 5: Auflistung der Anwendungen von neuronalen Netzen [20].....	33
Tabelle 6: Zusammensetzung von Molybdänkonzentraten.....	43
Tabelle 7: Siebanalyse von Aluminiumgrieß.....	43
Tabelle 8: Zusammensetzung von Ferrosilizium	46
Tabelle 9: Zusammensetzung von Filterstaub	47
Tabelle 10: Zusammensetzung von Walzenzunder	47
Tabelle 11: Zusammensetzung des erzeugten Ferromolybdäns	48
Tabelle 12: Massenanteil der verschiedenen Kornklassen.....	48
Tabelle 13: Typische Zusammensetzung der Schlacke.....	49
Tabelle 14: Variable Eingabeparameter des neuronalen Netzes.....	51
Tabelle 15: Ausgabewerte des neuronalen Netzes	52
Tabelle 16: Auswirkung von Gehaltsänderungen von Sauerstoff und Molybdän am Beispiel von Charge 767 [11].....	53
Tabelle 17: Kontrolle der Waagen am Beispiel der Charge 735/2	54
Tabelle 18: Variationsparameter der Chargen 790 - 797.....	62
Tabelle 19: Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen 790 – 797	63
Tabelle 20: Ergebnisse der Chargen 790 - 797	64
Tabelle 21: Analysen der Chargen 790 - 797	65
Tabelle 22: Variationsbreiten der Zugabekomponenten der Chargen 940 - 946.....	66

Tabelle 23:	Vergleich der Möllerzusammensetzung bei den Versuchschargen und den Referenzchargen 940 - 946	67
Tabelle 24:	Ergebnisse der Chargen 940 - 946	68
Tabelle 25:	Analysen der Chargen 940 - 946	69
Tabelle 26:	Variationsbreiten der Chargen	70
Tabelle 27:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen 947 - 953	71
Tabelle 28:	Ergebnisse der Chargen 947 - 954	72
Tabelle 29:	Analysen der Chargen 947 - 953	73
Tabelle 30:	Variationsbereiche der Chargen 954 - 959	73
Tabelle 31:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen 954 - 959	74
Tabelle 32:	Ergebnisse der Chargen 954 - 959	75
Tabelle 33:	Analyse der Chargen 954 - 960	76
Tabelle 34:	Variationsbreiten der Chargen 995 - 1003	78
Tabelle 35:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen 995 - 1003	79
Tabelle 36:	Ergebnisse der Chargen 996 - 1003 mit CaSi.....	80
Tabelle 37:	Vergleich der Kosten Reduktionsmittelkosten für Chargen 996 - 1003.....	81
Tabelle 38:	Analysen der Chargen 995 - 1003	81
Tabelle 39:	Variationsbereiche der Chargen 1009 - 1019	85
Tabelle 40:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1009 - 1019	86
Tabelle 41:	Ergebnisse der Chargen 1009 - 1019	87
Tabelle 42:	Analysen der Chargen 1009 - 1019	88
Tabelle 43:	Kostenauflistung der Reduktionsmittel.....	89
Tabelle 44:	Ausbringungssteigerung hinsichtlich Molybdän der Kampagne 11.....	90
Tabelle 45:	Größenordnung der Variationsbereiche der optimierten Chargen.....	93

Tabelle 46:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Optimierung hinsichtlich Viskositätsverringerung	94
Tabelle 47:	Zusammenfassung der Ergebnisse mit Kalziumsilizium.....	96
Tabelle 48:	Zusammenfassung der Ergebnisse mit Reduktion von Kalk und Walzenzunder.....	97
Tabelle 49:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen 1034 - 1041	111
Tabelle 50:	Ergebnisse der Chargen 1034 - 1041	111
Tabelle 51:	Analysen der Chargen 1034 - 1041	112
Tabelle 52:	Variationsbreiten der Chargen 1143 - 1152	112
Tabelle 53:	Vergleich der Möllerzusammensetzungen der Versuchschargen und der Referenzchargen 1143 - 1152	113
Tabelle 54:	Ergebnisse der Chargen 1143 - 1152 mit CaSi.....	113
Tabelle 55:	Analysen der Chargen 1143 - 1152	114
Tabelle 56:	Variationsbreiten der Chargen 1153 - 1163	114
Tabelle 57:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1153 – 1163	115
Tabelle 58:	Ergebnisse der Chargen 1153 - 1163 mit CaSi.....	115
Tabelle 59:	Analysen der Chargen 1153 - 1163	116
Tabelle 60:	Variationsbereiche der Chargen 1164 - 1171	116
Tabelle 61:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1164 - 1171	117
Tabelle 62:	Ergebnisse der Chargen 1164 - 1171	117
Tabelle 63:	Analysen der Chargen 1164 - 1171	118
Tabelle 64:	Variationsbereiche der Chargen 1304 - 1314	118
Tabelle 65:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1304 - 1314	119
Tabelle 66:	Ergebnisse der Chargen 1304 - 1314	119
Tabelle 67:	Analysen der Chargen 1304 - 1314	120
Tabelle 68:	Variationsbereiche der Chargen 1172 - 1179	120

Tabelle 69:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1172 - 1179	121
Tabelle 70:	Ergebnisse der Chargen 1172 - 1179	121
Tabelle 71:	Analysen der Chargen 1172 - 1179	122
Tabelle 72:	Variationsbereiche der Chargen 1180 - 1186	122
Tabelle 73:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1180 - 1186	123
Tabelle 74:	Ergebnisse der Chargen 1180 - 1186	123
Tabelle 75:	Analysen der Chargen 1180 - 1186	124
Tabelle 76:	Variationsbereiche der Chargen 1320 - 1329	124
Tabelle 77:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1320 - 1329	125
Tabelle 78:	Ergebnisse der Chargen 1320 - 1329	125
Tabelle 79:	Analysen der Chargen 1320 - 1329	126
Tabelle 80:	Variationsbereiche der Chargen 1334 - 1342	126
Tabelle 81:	Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1334 - 1342	127
Tabelle 82:	Ergebnisse der Chargen 1334 - 1342	127
Tabelle 83:	Analysen der Chargen 1334 - 1342	128
Tabelle 84:	Variationsbreiten 1343 - 1350	128
Tabelle 85:	Abbrandparameter der Chargen 1343 - 1350	129
Tabelle 86:	Ergebnisse der Chargen 1343 - 1350	129
Tabelle 87:	Analysen der Chargen 1343 - 1350	130

9 Anhang A

Tabelle 49: Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchschargen und der Referenzchargen
1034 - 1041

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1034 - 1037	1038 - 1041	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	522	509	-13
Walzenzunder	548	526	-22
Kalk	172	171	-1
Mo-Oxid 1	720	720	0
Mo-Oxid 2	600	600	0
Mo-Oxid 3	336	336	0
Fe-Schrott	145	146	+1
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	50	50	0
Alugrieß 1	30	30	0
Alugrieß 2	107	102	-5
CaSi		18	+18
Gesamt	3240	3200	-40

Tabelle 50: Ergebnisse der Chargen 1034 - 1041

Chargen	FI-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 1034 - 1037	171,173,184	1069/08;1072/08;1101/08	
optimierte Chargen 1038 - 1041	171,173,184	1069/08;1072/08;1101/08	
	Mo Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 1034 - 1037	64,67	-16.364	0,72
optimierte Chargen 1038 - 1041	-	-	-
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet[kg]	Ø Blockgewicht[kg]
Referenzchargen 1034 - 1037	1042,84	2,61	3032
optimierte Chargen 1038 - 1041	-	-	2940

Tabelle 51: Analysen der Chargen 1034 - 1041

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1034	0,37	0,89	0,53	3040
Referenzcharge 1035	0,37	0,89	0,62	2970
Referenzcharge 1036	0,37	0,89	0,52	3080
Referenzcharge 1037	0,37	0,89	0,61	3040
Mittelwert	0,37	0,89	0,57	3032
optimierte Charge 1038	0,42	0,96	0,49	2930
optimierte Charge 1039	0,42	0,96	0,55	3030
optimierte Charge 1040	0,42	0,96	0,32	3030
optimierte Charge 1041	0,42	0,96	0,77	2770
Mittelwert	0,42	0,96	0,53	2940

Tabelle 52: Variationsbreiten der Chargen 1143 - 1152

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	740	770
Aluminium	250	270
Kalk	355	380
Eisenschrott fein	500	540
Walzenzunder	1030	1050

Tabelle 53: Vergleich der Möllierzusammensetzungen der Versuchschargen und der Referenzschargen 1143 - 1152

	Referenzschargen	optimierte Schargen	
Chargen-Nummer	1143 - 1146	1147 - 1152	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	524	516	-8
Walzenzunder	548	536	-12
Kalk	172	166	-6
Mo-Oxid 1	850	850	0
Mo-Oxid 2	470	470	0
Mo-Oxid 3	313	313	0
Fe-Schrott	140	145	+5
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	50	50	0
Alugrieß 1	30	30	0
Alugrieß 2	107	100	-7
CaSi		15	+15
Gesamt	3214	3186	-28

Tabelle 54: Ergebnisse der Schargen 1143 - 1152 mit CaSi

Chargen	Fl-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzschargen 1143 - 1146	195,192,197	1216/08;1207/08;1218/08	
optimierte Schargen 1147 - 1152	195,192,197	1216/08;1207/08;1218/08	
	Mo Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzschargen 1143 - 1146	74,66	-15.444	0,18
optimierte Schargen 1147 - 1152	74,85	-15.243	0,13
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke Berechnet [kg]	Ø Blockgewicht[kg]
Referenzschargen 1143 - 1146	1042,04	12,36	2980
optimierte Schargen 1147 - 1152	1041,68	12,28	2910

Tabelle 55: Analysen der Chargen 1143 - 1152

	Metall		Schlacke	
Charge	Cu	Si	Mo	Blockgewicht
Nr.	[%]	[%]	[%]	[kg]
Referenzcharge 1143	0,34	0,74	0,64	3050
Referenzcharge 1144	0,34	0,74	1,48	2950
Referenzcharge 1145	0,34	0,74	0,77	2940
Referenzcharge 1146	0,34	0,74	Ofendurchbruch	2980
Mittelwert	0,34	0,74	0,96	2980
optimierte Charge 1147	0,37	1,39	1,11	2910
optimierte Charge 1148	0,37	1,39	0,95	2940
optimierte Charge 1149	0,37	1,39	0,98	2880
optimierte Charge 1150	0,37	1,39	1,06	2900
optimierte Charge 1151	0,37	1,39	0,73	2920
optimierte Charge 1152	0,37	1,39	1,14	2910
Mittelwert	0,37	1,39	0,99	2910

Tabelle 56: Variationsbreiten der Chargen 1153 - 1163

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	780	805
Aluminium	265	285
Kalk	390	410
Eisenschrott fein	535	555
Walzenzunder	1080	1115

Tabelle 57: Vergleich der Möllierzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1153 – 1163

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1153 - 1158	1159 - 1163	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	532	529	-3
Walzenzunder	548	557	9
Kalk	172	179	7
Mo-Oxid 1	630	630	0
Mo-Oxid 2	500	500	0
Mo-Oxid 3	521	521	0
Fe-Schrott	140	135	-5
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	50	50	0
Alugrieß 1	37	35	-2
Alugrieß 2	100	100	0
CaSi		8	+8
Gesamt	3240	3246	+6

Tabelle 58: Ergebnisse der Chargen 1153 - 1163 mit CaSi

Chargen	FI-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 1153 - 1158	195,199,197	1216/08;1225/08;1218/08	
optimierte Chargen 1159 - 1163	195,199,197	1216/08;1225/08;1218/08	
	Mo Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa s]
Referenzchargen 1153 - 1158	61,98	-16.492	0,82
optimierte Chargen 1159 - 1163	62,09	-16.291	0,69
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet[kg]	Ø Blockgewicht[kg]
Referenzchargen 1153 - 1158	1042,04	1,50	2953
optimierte Chargen 1159 - 1163	1042,13	1,65	2926

Tabelle 59: Analysen der Chargen 1153 - 1163

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1153	0,37	1,21	1,26	2920
Referenzcharge 1154	0,37	1,21	0,70	2900
Referenzcharge 1155	0,37	1,21	0,86	2900
Referenzcharge 1156	0,37	1,21	0,85	3020
Mittelwert	0,37	1,21	0,87	2953
optimierte Charge 1157	0,37	1,06	0,94	3020
optimierte Charge 1158	0,37	1,06	0,60	2960
optimierte Charge 1159	0,37	1,06	1,40	2940
optimierte Charge 1160	0,37	1,06	0,78	3030
optimierte Charge 1161	0,37	1,06	1,40	2900
optimierte Charge 1162	0,37	1,06	0,81	2800
optimierte Charge 1163	0,37	1,06	1,01	2960
Mittelwert	0,37	1,06	1,08	2956

Tabelle 60: Variationsbereiche der Chargen 1164 - 1171

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	760	780
Aluminium	265	280
Kalk	340	370
Eisenschrott fein	545	565
Walzenzunder	1075	1110

Tabelle 61: Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1164 - 1171

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1164 - 1168	1169 - 1171	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	516	506	-10
Walzenzunder	548	555	7
Kalk	172	182	10
Mo-Oxid 1	500	500	0
Mo-Oxid 2	500	500	0
Mo-Oxid 3	595	595	0
Fe-Schrott	150	150	0
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	50	50	0
Alugrieß 1	30	30	0
Alugrieß 2	107	105	-2
CaSi		12	+12
Gesamt	3178	3183	+5

Tabelle 62: Ergebnisse der Chargen 1164 - 1171

Chargen	FI-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 1164 - 1168	195,199,200	1216/08;1225/08;1236/08	
optimierte Chargen 1169 - 1171	195,199,200	1216/08;1225/08;1236/08	
	Mo Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa s]
Referenzchargen 1164 - 1168	65,61	-16.282	0,66
optimierte Chargen 1169 - 1171	67,37	-16.055	0,47
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet[kg]	Ø Blockgewicht[kg]
Referenzchargen 1164 - 1168	1043,99	3,42	2946
optimierte Chargen 1169 - 1171	1042,99	5,12	2913

Tabelle 63: Analysen der Chargen 1164 - 1171

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1164	0,34	0,97	0,90	2970
Referenzcharge 1165	0,34	0,97	0,84	2910
Referenzcharge 1166	0,34	0,97	0,77	2990
Referenzcharge 1167	0,34	0,97	0,78	2990
Mittelwert	0,34	0,97	0,83	2946
optimierte Charge 1168	0,34	1,03	0,88	2870
optimierte Charge 1169	0,34	1,03	0,85	2910
optimierte Charge 1170	0,34	1,03	1,35	2890
optimierte Charge 1171	0,34	1,03	1,05	2940
Mittelwert	0,34	1,03	1,08	2913

Tabelle 64: Variationsbereiche der Chargen 1304 - 1314

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	730	770
Aluminium	270	300
Kalk	370	395
Eisenschrott fein	540	560
Walzenzunder	1070	1100

Tabelle 65: Vergleich der Möllierzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1304 - 1314

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1304 - 1307	1308 - 1314	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	501	488	-13
Walzenzunder	544	550	6
Kalk	172	178	6
Mo-Oxid 1	650	650	0
Mo-Oxid 2	260	260	0
Mo-Oxid 3	666	666	0
Fe-Schrott	150	157	7
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	50	50	0
Alugrieß 1	30	30	0
Alugrieß 2	112	105	-7
CaSi		20	+20
Gesamt	3145	3144	-1

Tabelle 66: Ergebnisse der Chargen 1304 - 1314

Chargen	FI-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 1304 - 1307	227,225,222	1381/08;1376/08;1374/08	
optimierte Chargen 1308 - 1314	227,225,222	1381/08;1376/08;1374/08	
	Mo Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 1304 - 1307	66,72	-16.156	0,54
optimierte Chargen 1308 - 1314	71,23	-15.931	0,35
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke Berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 1304 - 1307	1043,99	3,99	3102
optimierte Chargen 1308 - 1314	1042,99	8,38	3018

Tabelle 67: Analysen der Chargen 1304 - 1314

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1304	0,33	2,16	0,49	3170
Referenzcharge 1305	0,33	2,16	0,63	3090
Referenzcharge 1306	0,33	2,16	0,43	3080
Referenzcharge 1307	0,33	2,16	0,54	3070
Mittelwert	0,33	2,16	0,52	3102
optimierte Charge 1308	0,34	1,96	0,90	2960
optimierte Charge 1309	0,34	1,96	0,51	3170
optimierte Charge 1310	0,34	1,96	0,65	3010
optimierte Charge 1311	0,34	1,96	0,61	3010
optimierte Charge 1312	0,34	1,96	0,70	2890
optimierte Charge 1313	0,34	1,96	Ofendurchbruch	2980
optimierte Charge 1314	0,34	1,96	0,79	3010
Mittelwert	0,34	1,96	0,65	3018

Tabelle 68: Variationsbereiche der Chargen 1172 - 1179

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	755	780
Aluminium	270	285
Kalk	325	345
Eisenschrott fein	550	565
Walzenzunder	1085	1090

Tabelle 69: Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1172 - 1179

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1172 - 1175	1176 - 1179	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	512	503	-9
Walzenzunder	547	537	-10
Kalk	172	165	-7
Mo-Oxid 1	880	880	0
Mo-Oxid 2	250	250	0
Mo-Oxid 3	452	452	0
Fe-Schrott	150	157	7
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	50	50	0
Alugrieß 1	37	30	-7
Alugrieß 2	105	105	0
Gesamt	3165	3139	-26

Tabelle 70: Ergebnisse der Chargen 1172 - 1179

Chargen	FI-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 1172 - 1175	198,199,200	1219/08;1225/08;1236/08	
optimierte Chargen 1176 - 1179	198,199,200	1219/08;1225/08;1236/08	
	Mo Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 1172 - 1175	66,17	-16.207	0,62
optimierte Chargen 1176 - 1179	68,69	-16.145	0,50
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 1172 - 1175	1044,03	3,64	2995
optimierte Chargen 1176 - 1179	1044,69	5,71	2980

Tabelle 71: Analysen der Chargen 1172 - 1179

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1172	0,34	2,70	0,92	3000
Referenzcharge 1173	0,36	2,70	0,88	3060
Referenzcharge 1174	0,36	2,70	0,79	2930
Referenzcharge 1175	0,36	2,70	0,72	2990
Mittelwert	0,36	2,70	0,80	2995
optimierte Charge 1176	0,31	0,84	0,68	2980
optimierte Charge 1177	0,31	0,84	0,85	3050
optimierte Charge 1178	0,31	0,84	0,81	2940
optimierte Charge 1179	0,31	0,84	0,74	2950
Mittelwert	0,31	0,84	0,77	2980

Tabelle 72: Variationsbereiche der Chargen 1180 - 1186

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	740	760
Aluminium	265	285
Kalk	330	340
Eisenschrott fein	550	570
Walzenzunder	1050	1060

Tabelle 73: Vergleich der Möllierzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1180 - 1186

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1180 - 1183	1184 - 1186	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	501	493	-8
Walzenzunder	547	535	-12
Kalk	172	165	-7
Mo-Oxid 1	850	880	0
Mo-Oxid 2	525	250	0
Mo-Oxid 3	200	452	0
Fe-Schrott	155	162	7
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	50	50	0
Alugrieß 1	30	30	0
Alugrieß 2	107	103	-4
Gesamt	3147	3123	-24

Tabelle 74: Ergebnisse der Chargen 1180 - 1186

Chargen	FI-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 1180 - 1183	198,202+203,200	1219/08;1250/08+1251/08;1236/08	
optimierte Chargen 1184 - 1186	198,202+203,200	1219/08;1250/08+1251/08;1236/08	
	Mo Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 1180 - 1183	66,28	-15.998	0,54
optimierte Chargen 1184 - 1186	68,43	-15.835	0,41
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 1180 - 1183	1043,98	5,23	2938
optimierte Chargen 1184 - 1186	1045,20	8,27	2946

Tabelle 75: Analysen der Chargen 1180 - 1186

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1180	0,35	1,75	1,09	2920
Referenzcharge 1181	0,35	1,75	1,17	2870
Referenzcharge 1182	0,35	1,75	1,17	3040
Referenzcharge 1183	0,35	1,75	1,16	2920
Mittelwert	0,35	1,75	1,14	2938
optimierte Charge 1184	0,34	1,76	0,91	2980
optimierte Charge 1185	0,34	1,76	1,05	2940
optimierte Charge 1186	0,34	1,76	0,96	2920
Mittelwert	0,34	1,76	0,97	2946

Tabelle 76: Variationsbereiche der Chargen 1320 - 1329

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	735	745
Aluminium	275	285
Kalk	325	335
Eisenschrott fein	550	565
Walzenzunder	1045	1055

Tabelle 77: Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1320 - 1329

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1320 - 1324	1325 - 1329	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	500	492	-8
Walzenzunder	544	528	-16
Kalk	172	164	-8
Mo-Oxid 1	500	500	0
Mo-Oxid 2	650	650	0
Mo-Oxid 3	459	459	0
Fe-Schrott	150	158	+8
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	10	10	0
Filterstaub	50	50	0
Alugrieß 1	30	30	0
Alugrieß 2	111	107	-4
Gesamt	3176	3148	-28

Tabelle 78: Ergebnisse der Chargen 1320 - 1329

Chargen	Fl-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 1320 - 1324	229;226;223	1387/08;1380/08;1374/08	
optimierte Chargen 1325 - 1329	229;226;223	1387/08;1380/08;1374/08	
	Mo Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 1320 - 1324	66,84	-15.997	0,56
optimierte Chargen 1325 - 1329	69,87	-15.928	0,46
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 1320 - 1324	1044,96	4,63	2936
optimierte Chargen 1325 - 1329	1046,77	6,90	2916

Tabelle 79: Analysen der Chargen 1320 - 1329

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1320	0,33	2,10	0,88	2940
Referenzcharge 1321	0,33	2,10	0,77	2960
Referenzcharge 1322	0,33	2,10	0,75	2960
Referenzcharge 1323	0,33	2,10	0,67	2900
Referenzcharge 1324	0,33	2,10	0,71	2920
Mittelwert	0,33	2,10	0,76	2936
optimierte Charge 1325	0,32	1,02	0,73	2810
optimierte Charge 1326	0,32	1,02	0,94	2930
optimierte Charge 1327	0,32	1,02	0,66	2970
optimierte Charge 1328	0,32	1,02	0,84	2950
optimierte Charge 1329	0,32	1,02	0,69	2920
Mittelwert	0,32	1,02	0,77	2916

Tabelle 80: Variationsbereiche der Chargen 1334 - 1342

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	755	770
Aluminium	277	290
Kalk	330	340
Eisenschrott fein	550	565
Walzenzunder	1050	1060

Tabelle 81: Vergleich der Möllerzusammensetzung der Versuchs- und der Referenzchargen 1334 - 1342

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1334 - 1337	1338 - 1342	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	509	503	-6
Walzenzunder	544	530	-14
Kalk	172	163	-9
Mo-Oxid 1	590	590	0
Mo-Oxid 2	850	850	0
Mo-Oxid 3	200	200	0
Fe-Schrott	150	156	+6
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	0	0	0
Filterstaub	50	50	0
Alugrieß 1	30	30	0
Alugrieß 2	111	108	-3
Gesamt	3206	3180	-26

Tabelle 82: Ergebnisse der Chargen 1334 - 1342

Chargen	FI-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 1334 - 1337	230;228;223	1397/08;1382/08;1374/08	
optimierte Chargen 1338 - 1342	230;228;223	1397/08;1382/08;1374/08	
	Mo Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 1334 - 1337	66,50	-16.350	0,64
optimierte Chargen 1338 - 1342	68,67	-16.288	0,56
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 1334 - 1337	1044,80	3,68	2937
optimierte Chargen 1338 - 1342	1046,76	5,31	2950

Tabelle 83: Analysen der Chargen 1334 - 1342

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1334	0,37	1,05	0,98	2830
Referenzcharge 1335	0,37	1,05	0,71	2990
Referenzcharge 1336	0,37	1,05	0,93	2910
Referenzcharge 1337	0,37	1,05	0,46	3020
Mittelwert	0,37	1,05	0,77	2937
optimierte Charge 1338	0,36	0,74	0,65	2900
optimierte Charge 1339	0,36	0,74	0,54	3030
optimierte Charge 1340	0,36	0,74	0,67	2930
optimierte Charge 1341	0,36	0,74	0,69	2970
optimierte Charge 1342	0,36	0,74	0,65	2920
Mittelwert	0,36	0,74	0,64	2950

Tabelle 84: Variationsbreiten 1343 - 1350

Zugabekomponente	Minimale Zugabe [kg]	Maximale Zugabe [kg]
Silizium	750	775
Aluminium	278	290
Kalk	330	340
Eisenschrott fein	550	565
Walzenzunder	1040	1050

Tabelle 85: Abbrandparameter der Chargen 1343 - 1350

	Referenzchargen	optimierte Chargen	
Chargen-Nummer	1343 - 1346	1347 - 1350	Änderung
Material	Menge [kg]	Menge [kg]	[kg]
FeSi	510	501	-9
Walzenzunder	544	525	-19
Kalk	172	166	-6
Mo-Oxid 1	580	580	0
Mo-Oxid 2	290	290	0
Mo-Oxid 3	736	736	0
Fe-Schrott	150	156	+6
Abreiniger	0	0	0
Rückführmaterial	0	0	0
Filterstaub	45	45	0
Alugrieß 1	100	100	0
Alugrieß 2	42	39	-3
Gesamt	3179	3148	-31

Tabelle 86: Ergebnisse der Chargen 1343 - 1350

Chargen	FI-Nummern	Protokoll Nummern	
Referenzchargen 1343 - 1346	230;228;232	1397/08;1382/08;1419/08	
optimierte Chargen 1347 - 1350	230;228;232	1397/08;1382/08;1419/08	
	Mo-Gehalt des Blockes [%]	Enthalpie [MJ]	Viskosität [Pa·s]
Referenzchargen 1343 - 1346	66,70	-16.360	0,60
optimierte Chargen 1347 - 1350	69,52	-16.250	0,50
	Schmelzpunkt [°C]	Mo in der Schlacke berechnet [kg]	Ø Blockgewicht [kg]
Referenzchargen 1343 - 1346	1044,7	3,77	2935
optimierte Chargen 1347 - 1350	1045,7	5,32	2888

Tabelle 87: Analysen der Chargen 1343 - 1350

	Metall		Schlacke	
Charge Nr.	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Blockgewicht [kg]
Referenzcharge 1343	0,41	1,54	0,62	2960
Referenzcharge 1344	0,41	1,54	0,67	2960
Referenzcharge 1345	0,41	1,54	0,95	2860
Referenzcharge 1346	0,41	1,54	0,93	2960
Mittelwert	0,41	1,54	0,79	2935
optimierte Charge 1347	0,32	1,47	0,88	2950
optimierte Charge 1348	0,32	1,47	0,86	2840
optimierte Charge 1349	0,32	1,47	0,88	2850
optimierte Charge 1350	0,32	1,47	0,83	2910
Mittelwert	0,32	1,47	0,86	2888

