

# **Bachelorarbeit**

Tabea Kaarina Kretzmann

## **Prozessentwicklung- und Optimierung des Sulfatisierungsluftsystems im Schwebeschmelzofenprozess der Primärkupfererzeugung Hamburg**

**Tabea Kaarina Kretzmann**

**Prozessentwicklung- und Optimierung des  
Sulfatisierungsluftsystems im  
Schwebeschmelzofenprozess der  
Primärkupfererzeugung Hamburg**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Mechatronik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg,  
Berliner Tor 5, 20099 Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Aurubis AG  
Abteilung: Betriebstechnik Ost  
Hovestraße 50  
20539 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Rasmus Rettig  
Zweitprüfer: Dr. Ing. Harald Wiehler  
Betrieblicher Betreuer: Dr. Ing. Harald Wiehler

Abgabedatum: 15.01.2016

**Tabea Kaarina Kretzmann**

### **Thema der Bachelorthesis**

Prozessentwicklung- und Optimierung des Sulfatisierungsluftsystems im Schwebeschmelzofen der Primärkupfererzeugung Hamburg.

### **Stichworte**

Sulfatisierung, Abgas, Sauerstoffgehalt, Kupfererzeugung, Abfallsäure, Flugstaub

### **Kurzzusammenfassung**

In dieser Arbeit wird das Ersetzen der langjährigen bestehenden Rückgasleitung (Abgasrückführung) durch eine Lufteinblasung im Bereich des Abgasschachtes des Schwebeschmelzofens thematisiert. Im Rahmen dessen werden die Auswirkungen auf den Betrieb untersucht und als Ergebnis die optimierten Einstellungsparameter für die neue Anlagenkonfiguration dokumentiert.

**Tabea Kaarina Kretzmann**

### **Title of the paper**

Development and Improvement of sulphate formation at the Flash Smelting Furnance for primary production of copper in Hamburg

### **Keywords**

Sulphate formation, off-gas, oxygen content, copper production, weak acid, flue dust

### **Abstract**

This report is about exchanging the exhaust gas recirculation with an air injection at the exhaust stack of the Flash Smelting Furnance. Within the project the repercussion on the operation is examined. The results of the optimized setting parameters are documented for the new complex configuration.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Rasmus Rettig für die ausdauernde und gedankenanstrengende Unterstützung während dieser Arbeit bedanken.

Des Weiteren geht ein großes Dankeschön an Herrn Dr. Harald Wiehler, der mir mit seiner Fachkompetenz mit Rat und Tat zur Seite stand und stets neue Ideen eingebracht hat.

Neben Herrn Wiehler konnte ich mich bei jeglicher Art von Fragen stets an die komplette Führungsebene der RWO wenden, die immer eine Antwort parat hatten, wofür ich mich hier ebenfalls bedanken möchte.

Ein großer Dank geht an alle Korrekturleser und Datenspeicherer, die diese Arbeit regelmäßig in den Händen hielten und mich somit unterstützen.

Als letztes möchte ich noch meinem langjährigen Freund danken, der mir vor allem in der Zeit der Bachelorarbeit den Rücken von Haushalt und Co. frei hielt und mich in meiner gesamten Studienzzeit immer wieder ermutigt und motiviert hat das Studium durch zu ziehen.

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	III
Formelverzeichnis.....	III
Glossar.....	V

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Aufgabenstellung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Einleitung und Motivation.....	1
1.2. Aufgabenstellung.....	2
<b>2. Stand der Technik und Problemstellungen .....</b>	<b>3</b>
2.1. Kupferkonzentratverarbeitung allgemein.....	3
2.2. Aufgabe des Sauerstoffs und Folgen bei falscher Konzentration .....	7
2.2.1. Zu hohe Sauerstoffkonzentration .....	9
2.2.2. Zu geringe Sauerstoffkonzentration .....	9
<b>3. Konzentratverarbeitung in Hamburg.....</b>	<b>11</b>
3.1. Störungen im Prozessablauf.....	12
3.1.1. Schieberschlitzaktion .....	12
3.1.2. Schlackenrücklauf und Eisenchargierung .....	13
3.1.3. Ofenabschaltung .....	13
3.2. Sulfatisierungsluftzufuhr.....	14
3.2.1. Konfiguration 1: Gebläse auf der Unterofendecke mit manueller Bedienung ..	15
3.2.2. Konfiguration 2: Gebläse auf der Unterofendecke mit Regelklappe .....	15
3.2.3. Konfiguration 3: Zufuhr über Abgasschachtdecke mit Verwendung von Umgebungsluft .....	15
3.2.4. Konfiguration 4: Zufuhr über Abgasschachtdecke mit Verwendung von Haubenluft .....	16
3.3. Benötigte Messstellen und Zusammenhänge .....	16
<b>4. Messdatenauswertung und Formelherleitung.....</b>	<b>19</b>
4.1. Abgasmenge .....	20

4.2.	Sauerstoffmenge .....	21
4.2.1.	Oxidation des Schwefels und des Eisens .....	23
4.2.2.	Sulfatisierung.....	25
4.2.3.	Entstehung von Schwefeltrioxid .....	26
4.3.	Benötigte Ventilatormenge.....	28
<b>5.</b>	<b>Analyse und Auswertung.....</b>	<b>29</b>
5.1.	Abgasmenge .....	29
5.2.	Luftzufuhr .....	29
5.3.	Aufbau der Analyse-Diagramme.....	31
5.4.	Tonnage .....	35
5.5.	Flugstaubmenge.....	37
5.6.	Zusammenhang zwischen Tonnage und Sulfatisierungsluftbedarf.....	39
5.7.	Fehlerbetrachtung.....	41
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>43</b>
<b>7.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>A1</b>
Anhang 1	Zeitmanagement .....	A2
Anhang 2	Schwebeschmelzofen (SSO).....	A3
Anhang 3	Auszug aus dem PI „Temperatur EGR-Eingang“ .....	A4
Anhang 4	Auszug aus dem PI „Taupunktmessung“ .....	A5
Anhang 5	Auszug aus dem PI „Schieberschlitzaktion“.....	A6
Anhang 6	Auszug aus dem PI „Schlackenrücklauf und Eisenchargierung“ .....	A7
Anhang 7	Auszug aus dem PI „Ofenabschaltung“ .....	A8
Anhang 8	Auszug aus dem PI „24h Übersicht“ .....	A9
Anhang 9	Messdateninformationen .....	A10
Anhang 10	Messdatenauswertung von PI in EXCEL .....	A11
Anhang 11	Berechnung der Ventilatorleistung über Molmassen .....	A13
Anhang 12	Literaturverzeichnis.....	A14
Anhang 13	Eigenständigkeitserklärung.....	A16

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 allgemeiner Prozessablauf .....	3
Abbildung 2 Schwebeschmelzofen .....	4
Abbildung 3 schematischer Kupferweg .....	5
Abbildung 4 Anordnung von Abgasschacht und Abhitzekessel .....	6
Abbildung 5 Schaubild der chronologisch ablaufenden Reaktionen .....	7
Abbildung 6 Grenzwerte des Sauerstoffgehaltes .....	10
Abbildung 7 Reaktormodell vom SSO und AHK.....	11
Abbildung 8 Position Schieberschlitz .....	12
Abbildung 9 Standorte des Ventilators .....	14
Abbildung 10 allgemeine messtechnische Darstellung des Prozesses .....	14
Abbildung 11 physikalisches Modell vom SSO und AHK .....	20
Abbildung 12 Annäherung der Abgasformel.....	21
Abbildung 13 Aufteilung des Konzentrates pro Tonne.....	22
Abbildung 14 Reaktionsdiagramm von SO <sub>2</sub> zu SO <sub>3</sub> (5).....	27
Abbildung 15 Einzelreaktionen ohne Falschluff bei 117t/h .....	31
Abbildung 16 Einzelreaktionen mit Falschluff.....	32
Abbildung 17 nacheinander ablaufende Reaktionen .....	33
Abbildung 18 Ventilatormenge bei verschiedenen Tonnagen und 8% Flugstaubanteil.....	35
Abbildung 19 Luftmenge für eine Steigerung um 0,1Vol.% O <sub>2</sub> im Abgas .....	36
Abbildung 20 Ventilatormenge bei verschiedenen Tonnagen.....	36
Abbildung 21 Ventilatormenge bei verschiedenen Flugstaubmengen und einer Tonnage von 177t/h.....	37
Abbildung 22 Ventilatormenge bei gewünschten Betriebspunkt bei einer Tonnage von 117t/h.....	40

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 bekannte Arbeitspunkte.....	16
Tabelle 2 Abtastfrequenzen der Messgrößen .....	19

## Formelverzeichnis

Formel 1 Reaktionsgleichung Konzentrat mit Sauerstoff.....	8
Formel 2 Reaktionsgleichung Flugstaub allgemein .....	8

Formel 3 Reaktionsgleichung Eisensulfat .....	8
Formel 4 Reaktionsgleichung Kupfersulfat.....	8
Formel 5 Reaktionsgleichung Schwefeltrioxid .....	8
Formel 6 Reaktionsgleichung Schwefelsäure .....	9
Formel 7 Formelsammlung zur Falschlufschätzung .....	18
Formel 8 Grundformel Abgasmenge .....	20
Formel 9 Endgleichung Abgasmenge .....	21
Formel 10 Grundformel Stoffmenge.....	23
Formel 11 Grundformel Dichte .....	23
Formel 12 Reaktionsgleichung Schwefeldioxid .....	23
Formel 13 Reaktionsgleichung Eisenoxid .....	23
Formel 14 Reaktionsgleichung Eisensulfat .....	25
Formel 15 Reaktionsgleichung Kupfersulfat.....	25
Formel 16 Reaktionsgleichung Schwefeltrioxid .....	26
Formel 17 Ventilatormenge in Nm <sup>3</sup> /t .....	28
Formel 18 Ventilatormenge in Nm <sup>3</sup> /h .....	28
Formel 19 Benötigte Ventilatormenge für vollständige Reaktionen und 0Vol.% O <sub>2</sub> im Abgas.....	39
Formel 20 vereinfachte benötigte Ventilatormenge für vollständige Reaktionen und 0Vol.% O <sub>2</sub> im Abgas.....	39
Formel 21 Ventilatormenge für die Erhöhung des Sauerstoffgehaltes.....	39
Formel 22 Berechnungsformel für die benötigte Ventilatormenge im Betriebspunkt.....	39

## Glossar

Abfallsäure	Verschmutzte Schwefelsäure
AHK	Abhitzekessel, in dem das Abgas für die EGR abgekühlt wird
Blisterkupfer	Kupfer, mit einem Kupfergehalt von 98%
Chargierung	Beschickung eines Ofens
EGR	Elektrostatische Gasreinigung
E-Ofen	Elektro-Ofen, dient dem Verwerten der Kupferschlacke
Flugstaub	Staub bestehend aus: Kupfer, Eisen, Schwefel, Blei, Zinn, Cadmium
GGW	Gleichgewicht (Chemie)
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	Schweflige Säure
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure
KAWO	Kontaktanlage Werk Ost
Konverter	Ofen, in dem unter Zugabe von Sauerstoff Kupferstein zu Blisterkupfer verarbeitet wird
Kupferstein	Erstes Zwischenprodukt, bestehend aus 65% Kupfer, Eisen und Schwefel
Me <sub>x</sub> S <sub>y</sub>	Metallsulfid
Me <sub>z</sub> SO <sub>4</sub>	Metallsulfat
mmWS	Millimeter-Wassersäule (1mmWS ≈ 0,1mbar)
mol	Basiseinheit der Stoffmenge
NiCr-Ni Thermoelement	Nickel-Chrom-Nickel-Thermoelement
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PI	Prozessinformationssystem
RWO	Rohhütte Werk Ost
Schlacke	Nichtmetallischer Schmelzrückstand aus Silikat, Eisen und weniger als 2% Kupfer

SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
SO <sub>3</sub>	Schwefeltrioxid
SSO	Schwebeschmelzofen
Taupunkt	Temperatur, die bei Unterschreitung einen Aggregatzustandswechsel von gasförmig zu flüssig zur Folge hat
Vol.%	Volumenprozent

# 1. Einleitung und Aufgabenstellung

## 1.1. Einleitung und Motivation

Diese Bachelorarbeit wurde bei der Aurubis AG in Hamburg durchgeführt. Die Aurubis AG ist ein international führender Kupferrecycler, Europas größter Kupferproduzent und weltweit mit 16 Produktionsstandorten vertreten.

Bekannt ist Aurubis für die Verwertung von Kupferschrott sowie für die Produktion von 99,99-prozentigem Kupfer. Dafür wird Kupferkonzentrat in einem Ofen mit Hilfe von Reaktionswärme eingeschmolzen und anschließend weiterverarbeitet. Durch den Verbrennungsprozess entsteht ein Abgas, welches das Abgassystem bei falscher Zusammensetzung schädigt.

Ein zu geringer Sauerstoffanteil im Abgas verhindert eine vollständige Nachverbrennung des Flugstaubes. Dieser wird klebrig, heftet sich an Rohrleitungen sowie nachfolgenden Aggregaten an und schädigt diese. Ein zu hoher Sauerstoffgehalt im Abgas dagegen fördert die Produktion der sogenannten Abfallsäure, welche durch Korrosion ebenfalls das Abgassystem schädigt und kostenintensiv entsorgt werden muss,

Durch den Dauerbetrieb der Kupferproduktion ist ein Ausfall des Abgassystems durch Leitungsschädigung nicht nur kostenintensiv, sondern auch aus Sicht der Arbeitssicherheit gefährlich.

Die bisherige Einbringung von Sauerstoff fand über eine Sauerstoffanreicherung des Prozessabgases und einer anschließend Rückführung in den AHK statt. Somit konnten die bereits erwärmten Abgase mit einem Restanteil von ca. 3-5Vol% O<sub>2</sub> mit technischem Sauerstoff angereichert werden und als Reaktionsmittel im Abhitzeessel (AHK) genutzt werden. In dieser Leitung, der so genannten Rückgasleitung, kam es im Laufe der Zeit zu Säureablagerungen, so dass die Leitung einen erheblichen Schaden genommen hat und außer Betrieb genommen werden musste.

Daher beschäftigt sich diese Arbeit nachfolgend mit alternativen Luftquellen, der Zusammensetzung des Abgases, sowie den Faktoren, die das Abgas beeinflussen.

## 1.2. Aufgabenstellung

Einer der ersten und wichtigsten Prozessschritte in der Verarbeitung von Kupferkonzentrat ist das Einschmelzen des Konzentrates im Schwebeschmelzofen (SSO). Das in diesem Prozess entstehende Abgas beinhaltet Flugstaub, der vor dem Austritt des Abgases aus dem AHK vollständig ausreagiert sein muss, um keine schädlichen Eigenschaften zu besitzen.

Dafür muss dem Prozessabgas gezielt Sauerstoff zugegeben werden, damit eine definierte Nachverbrennung stattfindet und alle beteiligten Elemente des Flugstaubes vollständig sulfatisiert werden können.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Analyse des Einflusses der Luftzufuhr auf den Sauerstoffgehalt im Abgas sowie eine Prozessoptimierung durch Bestimmung der optimalen Einstellung der benötigten Sauerstoffmenge.

Dazu sind Messwerte und Messstellen festzulegen sowie die verschiedenen Reaktionen im SSO aufzuschlüsseln.

Des Weiteren wird die Auswirkung der Luftzuführung auf den SSO betrachtet, in wie weit sich die Ansätze und das Temperaturprofil verändern und eventuell daraus resultierende Schäden begutachtet.

## 2. Stand der Technik und Problemstellungen

### 2.1. Kupferkonzentratverarbeitung allgemein

Die Verarbeitung von Kupferkonzentraten erfolgt ausschließlich über schmelzmetallurgische Verfahren (1). Eine Grafik für das Verständnis des im Folgenden beschriebenen Prozesses ist nachfolgend dargestellt.

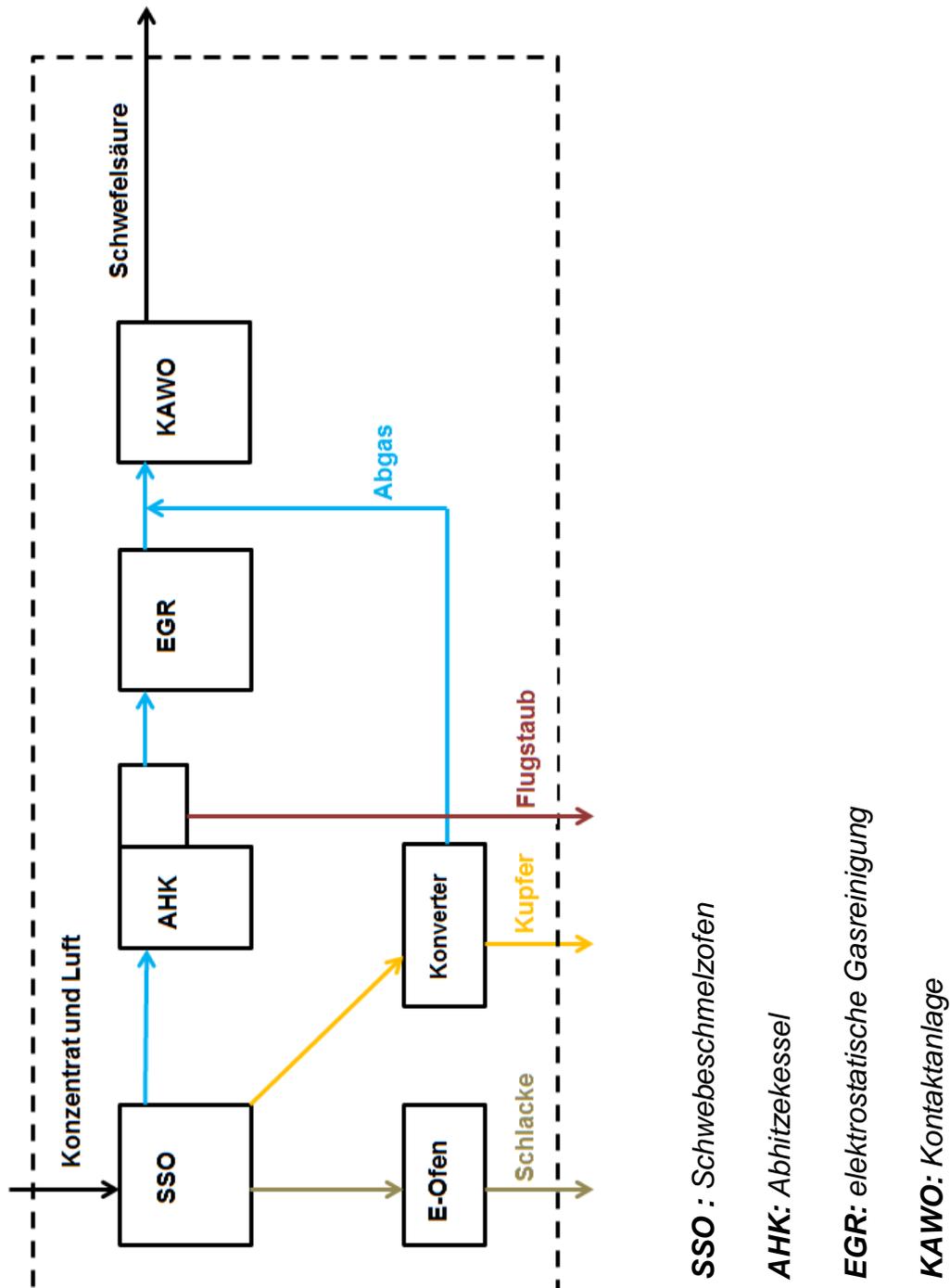


Abbildung 1 allgemeiner Prozessablauf

Dabei wird der erste Schritt, das Einschmelzen des Kupferkonzentrates, mit Hilfe des Schwebeschmelzofens durchgeführt.

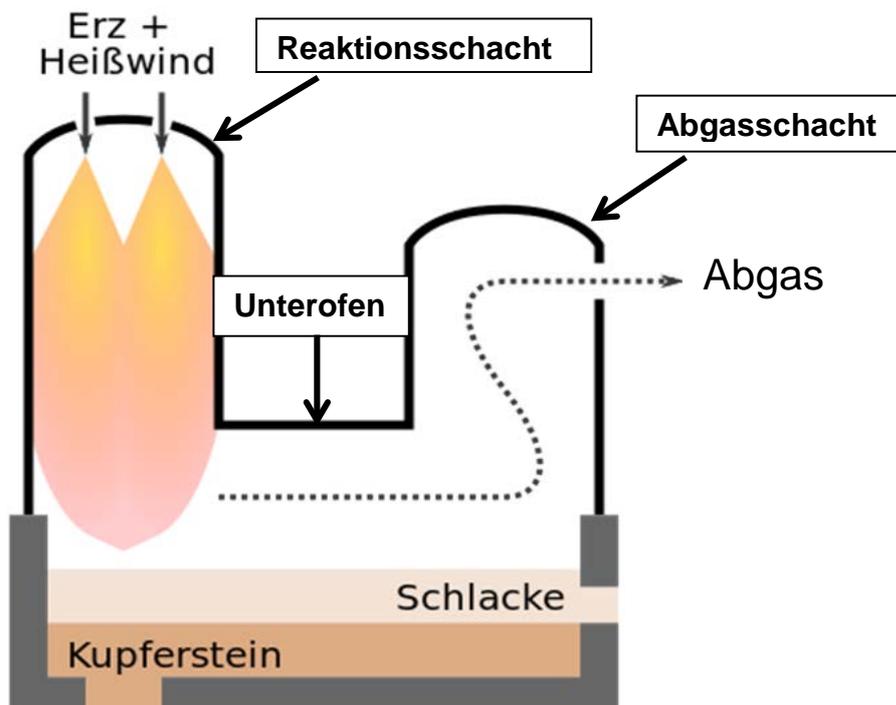


Abbildung 2 Schwebeschmelzofen

Das Konzentrat reagiert mit, durch den Brenner eingeblasenen, Sauerstoff und wird zum Teil oxidiert. Es schmilzt durch die entstehende Reaktionswärme im Reaktionsschacht und setzt sich in Form von Schlacke und Kupferstein in dem Unterofen ab. Dort wird das jeweilige Produkt entweder durch den Schlacken- oder durch den Kupferstich abgestochen und in weiteren Prozessschritten verarbeitet.

Die Schlacke besteht aus Eisen, Silikat und einem Kupferanteil von ca. 1,5%. Die Schlacke wird für die weitere Kupfergewinnung in den E-Ofen transportiert. In dem E-Ofen wird der Kupferanteil über reduzierende Bedingungen und ausreichender Absetzzeit für Kupfersteintröpfchen weiter entkupfert. Die gereinigte Schlacke enthält noch ca. 0,8% Kupfer und wird zu Granulat oder Stückschlacke verarbeitet und verkauft.

Der flüssige Kupferstein, mit einem Kupfergehalt von ca. 64%, wird über Krananlagen in einen der drei Konverter umgelagert. In dem Konverter wird Luft in die Kupfersteinschmelze eingeblasen, wodurch das restliche Eisen und Schwefel abgetrennt werden. Durch die stark exotherme Reaktion wird der Konverter stark

erhitzt, sodass eine Kühlung vorgenommen werden muss. Hierzu wird das recycelte Altkupfer über eine automatische Chargierung in den Konverter gefahren. Am Ende des Konverterprozess erhält man Blisterkupfer mit einem Kupfergehalt von ca. 98%.

Nach dem Schmelzprozess im Konverter wird das flüssige Kupfer ebenfalls über Krananlagen in einen der beiden Anodenöfen befördert. Dort wird der Reinheitsgrad des Kupfers durch Einblasen von Luft und anschließend von Erdgas von 98% auf nahezu 99,5% erhöht. Mit der Luft wird der restliche Schwefel, mit dem Erdgas der restliche Sauerstoff entfernt.

Ein vereinfachtes Schema ist zur Verdeutlichung des Ablaufes nachfolgend dargestellt.

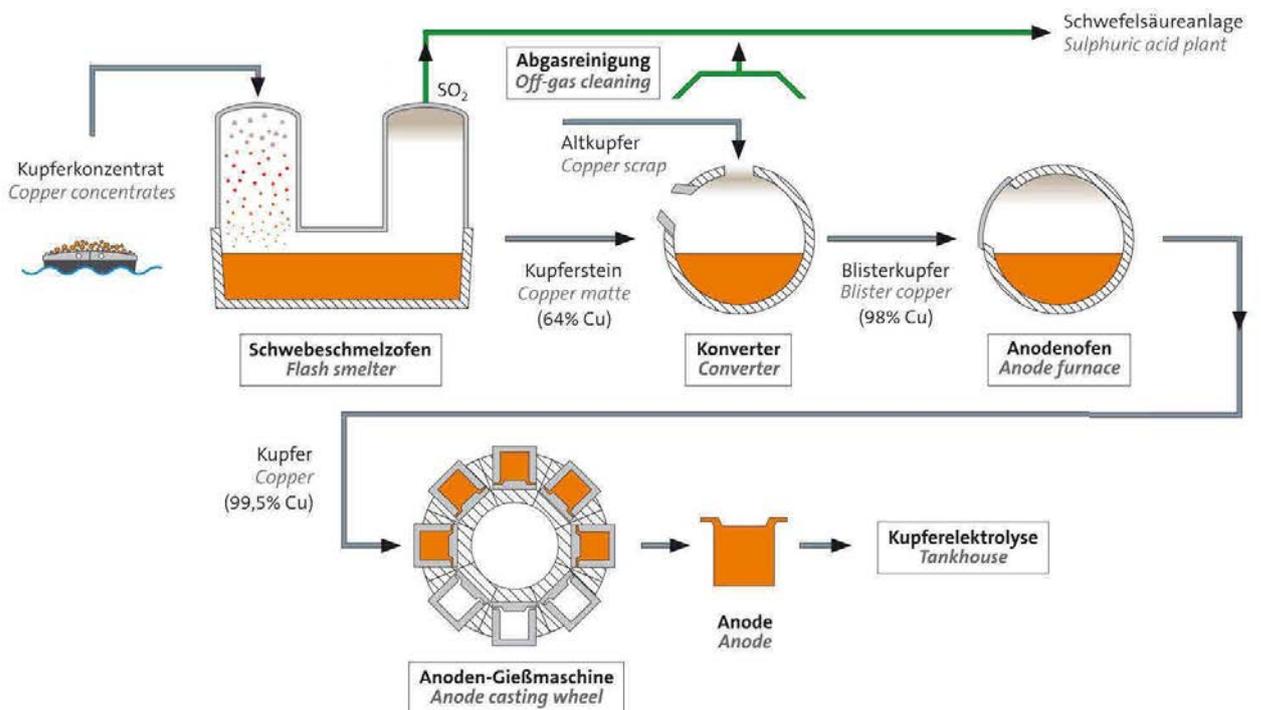


Abbildung 3 schematischer Kupferweg

Das letzte Element des SSOs ist der Abgasschacht. In ihm steigt das Abgas auf und wird in dem nachgeschalteten AHK gekühlt sowie von größeren Partikeln Flugstaub gereinigt (1).

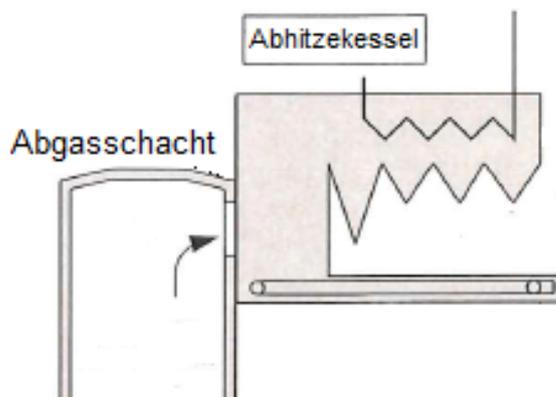


Abbildung 4 Anordnung von Abgasschacht und Abhitzekeessel

Der Abhitzekeessel (AHK) ist ein Kessel, in dem das Prozessabgas auf eine Temperatur von unter 400°C abgekühlt wird. Die niedrigere Temperatur ist notwendig, damit die nachfolgende elektrostatische Gasreinigung (EGR) nicht geschädigt wird.

Für eine vollständige Ausreaktion des Flugstaubes muss in dem oben dargestellten Bereich zwischen Abgasschacht und AHK zusätzlicher Sauerstoff eingebracht werden, der ausschließlich für die Sulfatisierung des Flugstaubes sowie für die unvermeidbare Bildung von Schwefeltrioxid (s. Kapitel 4.2.2 und 4.2.3) genutzt wird.

Wenn der Flugstaub vollständig ausreagiert ist, legt er sich in Form von feinem schwarz-grauem Pulver nieder und wird über einen Austrag aus dem AHK in einen Flugstaubbunker befördert.

Die Menge des anfallenden Flugstaubes ist dabei stark von der Tonnage, dem Unterdruck im Ofen, sowie der Konzentratzusammensetzung abhängig. Als angegebene Erfahrungswerte lag eine Spanne von 6-10% der eingesetzten Konzentratmenge vor (2)

## 2.2. Aufgabe des Sauerstoffs und Folgen bei falscher Konzentration

Die Zugabe von Sauerstoff ist für den Schmelzprozess des Kupferkonzentrates elementar. Das Kupferkonzentrat besteht größtenteils aus sulfidisch vorliegenden Eisen und Kupfer. Hauptbestandteil ist der Kupferkies (CuFeS<sub>2</sub>), welches hier als Modellsubstanz angenommen wird. Da in diesem Abschnitt einige Reaktionsgleichungen folgen, sind diese in ihrer im Prozess stattfindenden Reihenfolge als Basisgleichungen dargestellt.

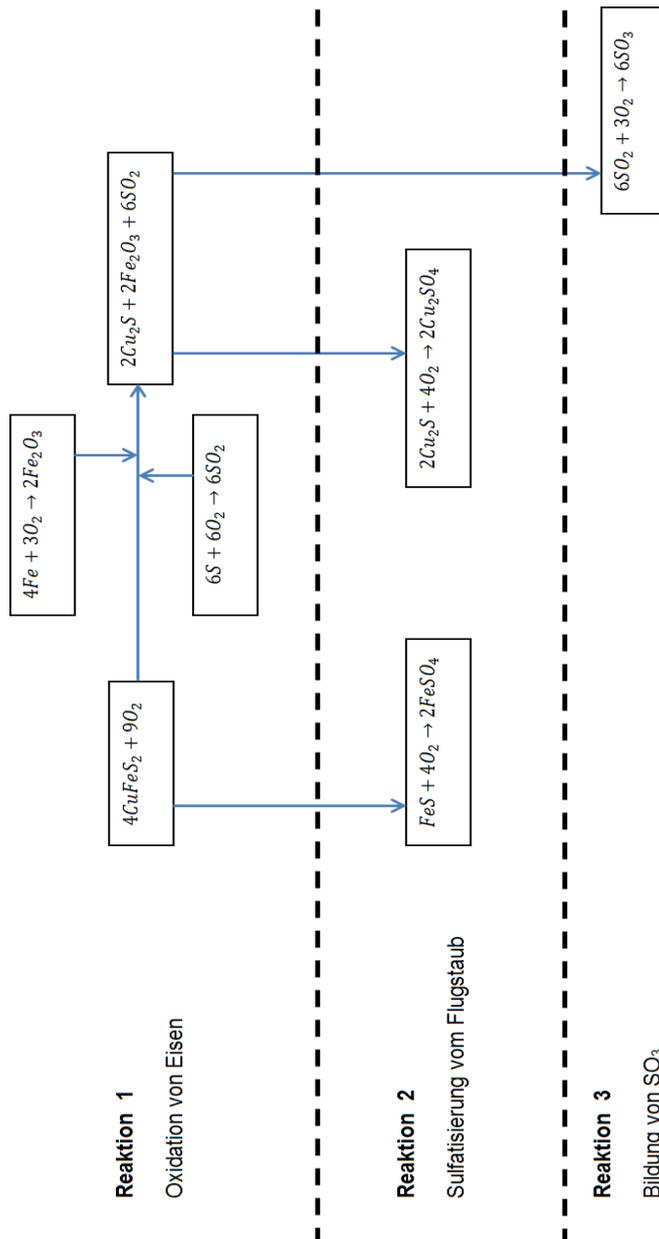


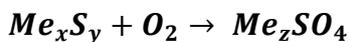
Abbildung 5 Schaubild der chronologisch ablaufenden Reaktionen

Zu Beginn des Schmelzprozesses wird für eine Teiloxidation des Konzentrates mit Sauerstoff angereicherte Luft in den Reaktionsschacht eingebracht. Diese löst ein Teil des Schwefels aus dem Konzentrat und bindet es in Form von Schwefeldioxid.



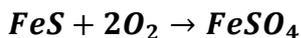
Formel 1 Reaktionsgleichung Konzentrat mit Sauerstoff

Nach der Reaktion des Konzentrates zu Kupferstein ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) wird ein Teil des Konzentrates als Flugstaub oxidiert. Da verschiedene Metalle in dem Flugstaub vorhanden sind, gilt als generelles Elementsymbol  $Me$  für Metalle. Die Indizes  $x$  und  $y$  sind je nach Konzentratzusammensetzung unterschiedliche. Die Reaktionsgleichung muss abhängig von den auftretenden Indizes ausgeglichen werden.

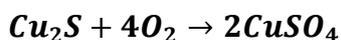


Formel 2 Reaktionsgleichung Flugstaub allgemein

In folgenden Flugstaubbetrachtungen werden lediglich die beiden größten Bestandteile des Flugstaubes betrachtet, Kupfer und Eisen:

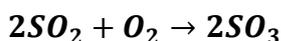


Formel 3 Reaktionsgleichung Eisensulfat



Formel 4 Reaktionsgleichung Kupfersulfat

Anschließend wird ein Teil (ca. 1%) des Schwefeldioxids im Konvektionsteil des AHKs zu  $\text{SO}_3$  oxidiert



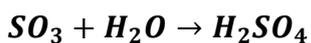
Formel 5 Reaktionsgleichung Schwefeltrioxid

Es entsteht Schwefeltrioxid, welches bei Kontakt mit Wasser in der Kontaktanlage (KAWO) zu Schwefelsäure weiterverarbeitet wird. Diese Reaktion findet hauptsächlich in einem Temperaturbereich von 400-800°C statt (s. Kapitel 4.2.3). Außerhalb dieses Bereiches findet keine chemische Reaktion statt. Da im AHK Temperaturen von 1300°C Eintrittstemperatur bis hin zu 350°C Ausgangstemperatur herrschen, befindet sich der Prozess in dem Reaktionsbereich der Schwefeltrioxidproduktion.

Ist der Sauerstoffgehalt zu hoch oder zu tief hat dies Folgen auf den weiteren Prozessablauf. Ideal für alle weiteren Prozesse ist nach Erfahrungswerten ein Sauerstoffgehalt von 0,15-0,25Vol% O<sub>2</sub> im Abgas, wie im Folgenden erklärt wird.

### 2.2.1. Zu hohe Sauerstoffkonzentration

Bei zu hohen Sauerstoffwerten in der Abgasluft (>0,25Vol.%) wird die Bildung von Abfallsäure verstärkt, da eine größere Menge an SO<sub>3</sub> durch den erhöhten Sauerstoffgehalt vorhanden ist. Dem zu Folge kann auch mehr SO<sub>3</sub> mit H<sub>2</sub>O reagieren und es entsteht Schwefelsäure im AHK. Dieser Prozess soll erst in der Kontakanlage (KAWO) passieren, da dort das Abgas bereits gereinigt ist und zu sauberer Schwefelsäure verarbeitet werden kann. Tritt diese Reaktion im AHK auf, bevor das Abgas gereinigt wird, lösen sich Teile des Flugstaubes ebenfalls in der Schwefelsäure und verunreinigen diese.



#### Formel 6 Reaktionsgleichung Schwefelsäure

So lange die Temperatur des Abgases über dem Taupunkt liegt, besteht das einzige Problem darin, die Abfallsäure in der KAWO, in der alle bei Aurubis entstehende Abgase gereinigt und aufbereitet werden, aufzuspalten, so dass das Schwefeldioxid aus dem Produkt getrennt werden kann. Der Restbestandteil wird gereinigt und aufwendig chemisch neutralisiert. Diese chemische Aufbereitung ist dabei ein sehr kostenintensiver Aspekt.

Fällt die Temperatur des Abgases jedoch unter den Taupunkt, kondensiert das Gas und die flüssige Säure lagert sich in den Rohrleitungen ab und schädigt diese durch Korrosion.

### 2.2.2. Zu geringe Sauerstoffkonzentration

Ein zu geringer Sauerstoffgehalt führt zwar zu einer geringeren Menge an Abfallsäureproduktion, jedoch ebenfalls zu einer unvollständigen Nachverbrennung des zunächst sulfidischen Flugstaubes im AHK. Bei einem unzureichenden Sauerstoffgehalt (<0,05Vol.% O<sub>2</sub>) bleibt der Flugstaub sulfidisch und klebrig. Durch Sauerstoffzugabe reagiert das Metallsulfid zu Metallsulfat.

Kann der Flugstaub nicht ausreagieren, schädigt er durch seine Eigenschaften Rohrleitungen in Form von Ansätzen, sowie schlimmstenfalls die EGR. Da sich der klebrige Flugstaub an den Platten absetzt, reagiert dieser bei Sauerstoffeintritt in der EGR. Der bei dieser Reaktion frei werdenden Wärme folgt eine Temperaturerhöhung an den Platten. Diese überhitzen in Folge dessen und können sich verziehen. Des Weiteren ist die Gasreinigung dann nicht mehr möglich, die Produktion muss daher mit weniger Tonnage fahren und es entstehen Kosten für die Instandsetzung und Reparatur der EGR.

Für eine Verdeutlichung der Grenzen des Sauerstoffgehaltes wurde die nachfolgende Grafik eingefügt.

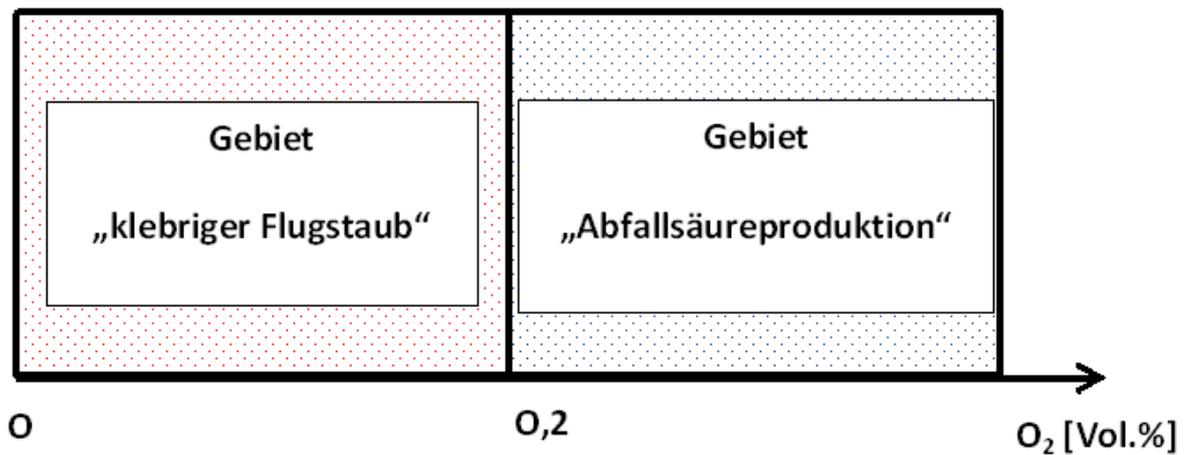


Abbildung 6 Grenzwerte des Sauerstoffgehaltes

### 3. Konzentratverarbeitung in Hamburg

Die Konzentratverarbeitung bei der Aurubis AG in Hamburg läuft wie in Kapitel 2 beschrieben ab.

Je nach Betriebszustand können verschiedene Störgrößen auf den Prozess einwirken, die sich zum Teil erheblich auf das Prozessabgas auswirken und im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht werden. Die in Kapitel 2 beschriebenen Reaktionen laufen nacheinander in den Aggregaten ab, das folgende Ersatzsystem wird zur weiteren Beschreibung verwendet.

Des Weiteren ist der Abhitzekeessel für eine maximale Tonnage dimensioniert, die aufgrund von Reparaturen und Prozesseingriffen nicht immer gewährleistet ist. Dies führt zu einer niedrigeren Ausgangstemperatur am AHK, womit die Prozessabgastemperatur näher an dem Taupunkt rückt. Daher sollte bei Mindertonnage der maximale Grenzwert von 0,25Vol.% Sauerstoff nicht überschritten werden.

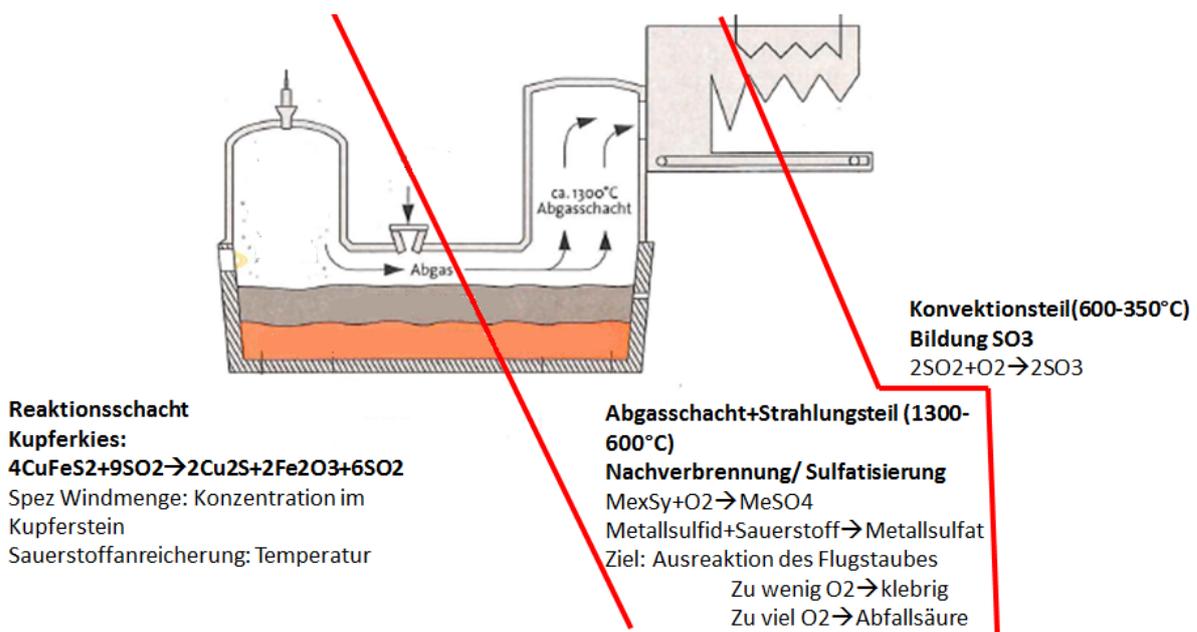


Abbildung 7 Reaktormodell vom SSO und AHK

### 3.1. Störungen im Prozessablauf

Der quasi-kontinuierlich ablaufende Schmelzprozess wird regelmäßig durch verschiedene Aktionen gestört. Diese haben einen Einfluss auf die ausgewählten Parameter und verändern das Abbild des Prozessinformationssystems.

#### 3.1.1. Schieberschlitzaktion

Die so genannte Schieberschlitzaktion ist eine Reinigung des Schieberschlitzes. Dieser ist dafür notwendig, damit im Fall eines Kesselschadens der AHK vom SSO getrennt werden kann. Dafür wird ein wassergekühlter Schieber in den dafür vorgesehenen Schieberschlitz geschoben. Dies kann jedoch nur stattfinden, wenn die Auflageflächen des Schiebers frei von Rückständen sind.

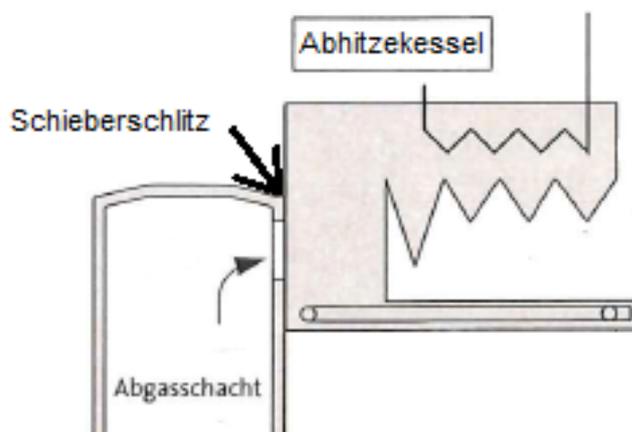


Abbildung 8 Position Schieberschlitz

Auf den Auflageflächen lagert sich im Laufe des Prozesses ein Teil des im Abgas befindlichen Flugstaubes ab und verhindert somit eine vollständige Absperrung. Daher werden einmal pro Woche diese Flächen gereinigt. Dazu ist es notwendig, den Ofen an dieser Stelle zu öffnen. Ein geplantes Öffnen des Ofens setzt immer einen erhöhten Ofenzug voraus, damit das Austreten von Abgasen und Flugstaub verhindert wird.

Bevor diese Aktion durchgeführt wird, wird der Herdraumdruck auf bis zu -30mmWS, dies entspricht einem Unterdruck von 3mbar, herabgesetzt. Dadurch zieht der Ofen bei Öffnung einen erheblichen Teil Umgebungsluft ein, welches den Sauerstoffgehalt im Abgas sowie die Abgasmenge, stark ansteigen lässt. Er verlässt den Messbereich der Sauerstoffmessung, der zwischen 0 und 5Vol.% liegt.

Daraus folgt ein Anstieg des Sauerstoffgehaltes des Prozessabgases, die die EGR erreicht, eine erhöhte Abfallsäureproduktion ist demnach zu erwarten.

Ein Ausschnitt aus dem PI zum Zeitpunkt einer Schieberschlitzaktion ist in Anhang 5 zu sehen, so dass eine bessere Darstellung der Zusammenhänge gegeben ist.

### **3.1.2. Schlackenrücklauf und Eisenchargierung**

Bei der Rückführung der Konverterschlacke muss der Ofen an dem Schieber der Rücklaufrinne geöffnet werden. Dies passiert pro Tag ca. 25mal und ist auf dem PI in Form von aufeinander folgenden „Zacken“ sichtbar (s. Anhang 6).

In dieser Zeit wird ebenfalls der Herdraumdruck erhöht, jedoch nur auf umgerechnet -1mbar (-10mmWs). Der Anstieg hat wiederum zur Folge, dass die Abgasmenge steigt und durch den erhöhten Ofenzug der Sauerstoffanteil im Abgas und damit am Eintritt an der EGR steigt.

Das gleiche Verhalten ist auf dem PI zu sehen, wenn Eisen in den Ofen chargiert wird. Die Eisenchargierung wird ein Mal pro Schicht durchgeführt, dabei ist es prozessabhängig ob zuerst Schlacke oder zuerst Eisen chargiert wird.

### **3.1.3. Ofenabschaltung**

Für eine wöchentliche Sichtkontrolle, sowie die Mittellanzenkontrolle, der Kontrolle des Konzentratbrenners, wird der Ofen für eine Zeit von ca. 30 Minuten abgeschaltet. Das bedeutet, dass die Tonnage auf 0t/h herabgefahren wird,.

Anschließend werden verschiedene Ofenöffnungen geöffnet und eine Kontrolle auf Ansätze, Badstand sowie die Schmelzenkontrolle gemacht.

Bei der Abschaltung wird die Konzentratzugabe gestoppt und, wie bei den vorangegangenen beschriebenen Aktionen, der Herdraumdruck erhöht. In Anhang 7 ist ein Abbild aus dem PI dargestellt, auf dem der Zusammenhang der einzelnen Kenngrößen bei einer Ofenabschaltung sichtbar wird.

### 3.2. Sulfatisierungsluftzufuhr

Für eine Sicherstellung der Luftzufuhr zur Sulfatisierung des Flugstaubes wurden verschiedene Zuführorte für die Sauerstoffanreicherung im Abgasschacht in Betracht gezogen. Als erste und auch einfachste Lösung ergab sich die Aufstellung eines Gebläses auf der Ofendecke des Unterofens. Für die Untersuchung des Einflusses auf den Ort der Luftzufuhr wurde das Gebläse anschließend auf eine Bühne am oberen Ende des Abgasschachtes verschoben. Nachfolgend erklärte Betriebszustände sind in unten stehender Abbildung dargestellt.

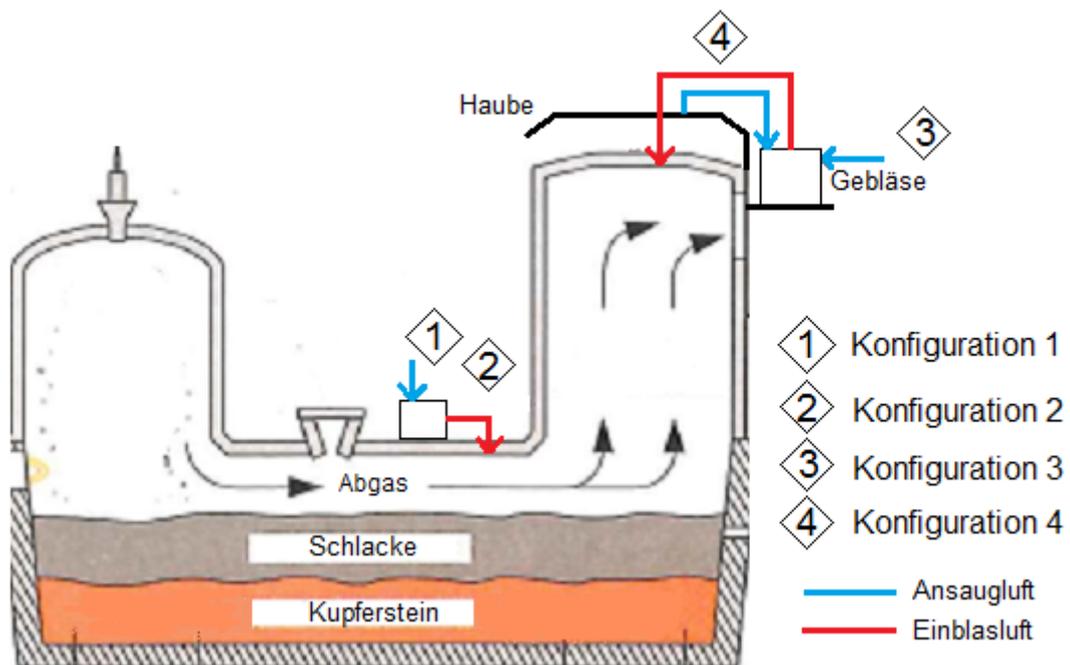


Abbildung 9 Standorte des Ventilators

Neben der realen örtlichen Darstellung wird eine messtechnische Darstellung erstellt:

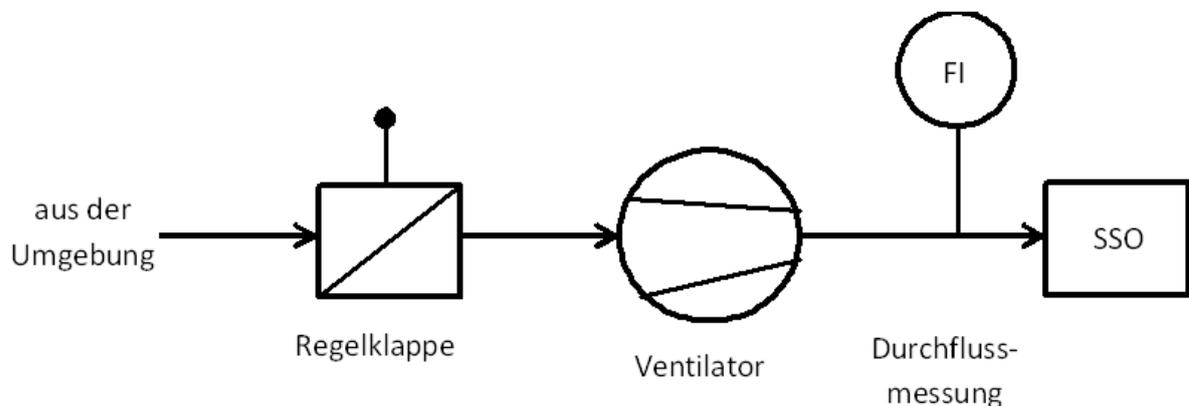


Abbildung 10 allgemeine messtechnische Darstellung des Prozesses

### **3.2.1. Konfiguration 1: Gebläse auf der Unterofendecke mit manueller Bedienung**

Da durch den Ausfall der Rückgasleitung schnell eine Lösung benötigt wurde, um den Sauerstoffgehalt im Abgas zu beeinflussen wurde ein Gebläse aus einem alten, nicht mehr benötigten Ventilator zusammengebaut und mit auf Maß angepassten Übergangsstücken versehen. Als sicherste Luftzufuhröffnung bot sich das südliche Eisenchargierloch auf der Unterofendecke an, da dieses sich am dichtesten am Abgasschacht befindet. Sinkt der Sauerstoffgehalt im Abgas, wird die EGR demnach mit einer zu geringen Sauerstoffkonzentration erreicht, muss der Messwart vor Ort gehen, und die Handklappe manuell weiter öffnen, so dass eine größere Luftmenge in den Abgasschacht geblasen wird. Das messtechnische Schema entspricht dem aus Abbildung 10, jedoch mit manueller Klappe anstatt einer Regelklappe.

### **3.2.2. Konfiguration 2: Gebläse auf der Unterofendecke mit Regelklappe**

Damit eine Regelung der Klappenstellung über die Leitwarte möglich ist, wurde eine elektrische Regelklappe mit Mengemessung installiert. Zuerst wurde diese im Handmodus gefahren, bis eine integrierte Regelung programmiert und in das Leitsystem eingespielt wurde. Dabei wurde der Standort des Ventilators nicht verändert. Die messtechnische Darstellung ist dabei in Abbildung 10 zu sehen.

### **3.2.3. Konfiguration 3: Zufuhr über Abgasschachtdecke mit Verwendung von Umgebungsluft**

Nach drei Wochen Betrieb des Gewölbeventilators auf der Unterofendecke wurde dieser auf einer Bühne im 3. Stock positioniert. Dabei findet nun die Einblasung der Umgebungsluft über die Abgasschachtdecke statt. Dies entspricht Konfiguration 3 auf Abbildung 9. Aus messtechnischer Sicht gab es keine Veränderungen zu der vorherigen Konfiguration.

Es wurden jedoch verschiedene Umbaumaßnahmen durchgeführt. Unter anderem das Versetzen einer Absaugung, der Umbau des Abgasschachtdeckels, sowie die Montage einer festen Rohrleitung, da die Temperaturen für die Nutzung eines Schlauches dort zu hoch sind.

### 3.2.4. Konfiguration 4: Zufuhr über Abgasschachtdecke mit Verwendung von Haubenluft

Durch den Anschluss der Saugseite an die Einhausung der Abgasschachtdecke konnte das, an Leckagen aus dem SSO austretende Abgas, welches durch die einseitig offene Haube mit Frischluft angereichert wird, wieder in den Ofen zurück geführt und für die Oxidation des Flugstaubes genutzt werden. Für eine messtechnische Darstellung kann ebenfalls wieder Abbildung 10 genutzt werden, jedoch muss die Luftquelle in „Haubenluft“ geändert werden.

### 3.3. Benötigte Messstellen und Zusammenhänge

Für eine Auswertung der Zusammenhänge in dem komplexen System des SSOs und den damit verbundenen Aggregaten werden zunächst alle relevanten Messstellen ausgewählt. Dabei handelt es sich um folgende neun:

- Tonnage (Massenstrommessung)
- Eingangstemperatur EGR (NiCr-Ni-Thermoelement)
- Sauerstoffgehalt vor EGR (Zirkoniumoxidmessung)
- Sauerstoffgehalt nach EGR (Zirkoniumoxidmessung)
- Herdraumdruck im SSO (Drucksensor)
- Taupunkt (Lamda-Sonde)
- Zugabe von O<sub>2</sub> /Wind(Durchflussmessung)
- Abgasmenge (Durchflussmessung)
- Ventilatorluftmenge (Durchflussmessung)

Nachfolgend sind die Sollwertbereiche sowie mögliche Abweichungen, wie zum Beispiel bei Störungen aufgelistet.

	Sollwertbereich	Mögliche Abweichungen bei Störungen
Tonnage	150-170t/h	40-200t/h
Eingangstemperatur EGR (s. Anhang 3)	370-405°C	-
O <sub>2</sub> -Gehalt vor EGR	0,15-0,25%	0-10%
Sauerstoffgehalt nach EGR	3-5%	5-10%
Herdraumdruck	-0,7mbar	-3mbar
Taupunkt (s. Anhang 4)	150-200°C	200-280°C
Zugabe von O <sub>2</sub> /Wind	12000-20000Nm <sup>3</sup> /h	-
Abgasmenge	60000-70000Nm <sup>3</sup> /h	30000-60000Nm <sup>3</sup> /h
Ventilatorluftmenge	3000-5000Nm <sup>3</sup> /h	500-3000Nm <sup>3</sup> /h

**Tabelle 1 bekannte Arbeitspunkte**

Nach Auswertungen des Prozessinformationssystems ergaben sich folgende Zusammenhänge, die so lange keine Störungen des Systems (s. Kapitel 3.1) vorhanden sind, generell gelten:

- Die Abgasmenge steigt, sobald der Herdraumdruck verringert wird.

Der Herdraumdruck wird über Gebläse im Abgassystem gesteuert. Wenn der Herdraumdruck verringert wird, der Unterdruck im Ofen demnach steigt, werden die Gebläse mit höheren Drehzahlen betrieben. Das führt dazu, dass mehr Luftvolumen aus dem Ofen gezogen, bzw. größere Mengen Falschluff durch Undichtigkeiten angezogen werden. Durch diese zusätzlichen Luftmengen erhöht sich die Abgasmenge.

- Die Abgasmenge steigt, bei Erhöhung der Tonnage.

Bei erhöhter Tonnage ist eine größere Menge Oxidationsluft notwendig, die sich ebenfalls auf die Gesamtabgasmenge auswirkt.

- Wird keine zusätzliche Luft eingeblasen, sinkt der Sauerstoffgehalt gegen 0Vol.%

Da die am Reaktionsschacht eingebrachte Luft vollständig für die Teiloxidation des Konzentrates benötigt wird, ist im weiteren Prozess kein Sauerstoff für die weiteren Reaktionen vorhanden. Daher ist hinter dem AHK der Sauerstoffgehalt gleich null.

- Ist der Taupunkt niedrig, ist die Produktion der Abfallsäure ebenfalls gering.

Sobald ein niedriger Taupunkt vorliegt ist die Prozesstemperatur weiter von der Taupunkttemperatur entfernt, so dass auch bei einer teilweisen Abkühlung der Taupunkt nicht unterschritten wird und somit keine Abfallsäure auskondensieren kann.

- Zwischen Austritt am AHK und Austritt EGR wird eine größere Menge Falschluff in das System gebracht.

Nach dem das Abgas den AHK verlässt, herrscht normalerweise ein Sauerstoffgehalt von 0,2Vol.%. Bei der nächsten Messstelle, die sich vor den

Abgasgebläsen befindet, ist allerdings ein Sauerstoffgehalt von 3-5% messbar. Demnach wird das Abgas durch Leckagen im System mit Falschlufft angereichert.

$$Abgasgesamt = Prozessabgas + Falschlufft$$

$$O_2Menge = Prozessabgas * 0,002 + Falschlufft * 0,21$$

$$O_2Gehalt = \frac{O_2Menge}{Abgasgesamt} * 100$$

$$Falschlufft = \frac{0,05 * Abgasgesamt - Prozessabgas * 0,002}{0,21}$$

#### Formel 7 Formelsammlung zur Falschlufftschätzung

Um einen derartigen Anstieg zu vollbringen, wird eine Luftmenge von ca. 15.000Nm<sup>3</sup>/h benötigt. Dabei wird von einer Gesamtabgasmenge von durchschnittlich 65000Nm<sup>3</sup>/h ausgegangen. Es wird dabei berechnet, wie viel Luftmenge benötigt wird, um einen Sauerstoffgehalt von 5% bei der oben genannten Abgasmenge zu erreichen.

## 4. Messdatenauswertung und Formelherleitung

Durch die Aufzeichnung aller hier relevanten Eingangs- und Ausgangsgrößen auf dem PI, liegt eine ausführliche Datenbank der Messwerte vor, auf welcher die folgenden Schritte basieren.

Für die Erstellung von Formeln über den Prozessablauf wurden in erster Linie konstante Bedingungen, jedoch zu unterschiedlichen Zeiten, aus den Messdaten herausgesucht. Für die Auswertung wurden jeweils Zeitblöcke von ca. 2h mit EXCEL ausgewertet. Ein Ausschnitt aus dieser Auswertung ist in Anhang 10 zu sehen.

Insgesamt belief sich die Zahl der Zeitblöcke auf 15, die zeitlich zwischen dem 13.11.2015 und dem 23.11.2015 lagen. Die verschiedenen Messgrößen werden dabei mit unterschiedlichen Frequenzen abgetastet und vom PI in EXCEL übertragen (s. Tabelle 3). Dabei wird bei der Messung der Tonnage ein Messwert nur gespeichert, wenn eine Änderung zum vorherigen Messwert vorliegt. Daher muss für diese Messgröße ein Bereich angegeben werden.

Tonnage	0,003-0,03Hz
Sauerstoffgehalt vor EGR	0,1Hz
Abgasmenge	0,1Hz
Ventilatormenge	0,1Hz
Spez. Windbedarf	0,067Hz
Sauerstoffanreicherung	0,067Hz

**Tabelle 2** Abtastfrequenzen der Messgrößen

Eine Übersicht über die genauen Messzeiten und Messgrößen ist in Anhang 9 dargestellt.

Des Weiteren wurde neben dem in Kapitel 3 bereits erwähnten Reaktormodell das physikalische Modell entwickelt, welches die Prozesse nach den tatsächlichen physikalischen Grenzen betrachtet und so eine detaillierte Aufschlüsselung der aufeinander folgenden Prozesse und somit der Abgasberechnung möglich macht.

## 4.1. Abgasmenge

Die Abgasmenge ist in erster Linie direkt abhängig von den in Abbildung 11 stehenden Eingangsgrößen des SSO (Konzentratmenge, Sauerstoffanreicherung, dem spezifischen Windbedarf (770-800Nm<sup>3</sup>/t) und der Ventilatormenge).

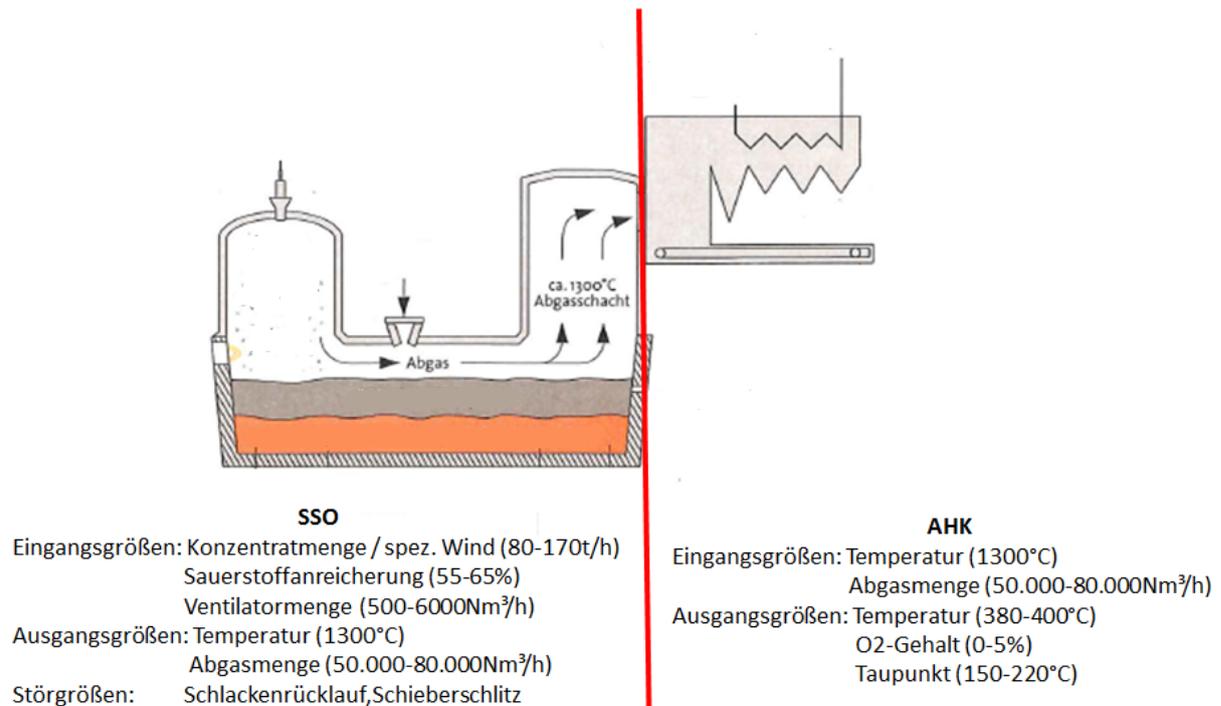


Abbildung 11 physikalisches Modell vom SSO und AHK

Bei einer reinen Multiplikation der ersten Größen und einer anschließenden Addition der Ventilatormenge war der Einheitencheck positiv und es entstand eine Kurve, die den tatsächlichen gemessenen Werten in ihrer Form sehr ähnlich war, jedoch deutlich unterhalb dieser Messkurve lag. Durch die Einführung eines Additions- und eines Multiplikationsfaktor wurde der errechnete Graph dem gemessenen mit Hilfe des NLSQ (nonlinear least squares)-Verfahrens angepasst und wird in unten stehender Abbildung dargestellt.

Damit folgte ein Anpassen der Grundgleichung von Formel 8 auf Formel 9:

$$\dot{V}_{Abgas} = \dot{m}_{Konz} * spez. Windbedarf * \frac{Anreicherung}{21\%} * F2 + \dot{V}_{Ventilator} + F4$$

Formel 8 Grundformel Abgasmenge

$$\dot{V}_{Abgas} = \dot{m}_{Konz} * \text{spez. Windbedarf} * \frac{\text{Anreicherung}}{21\%} * 1,38 + \dot{V}_{Ventilator} + 10555$$

Formel 9 Endgleichung Abgasmenge

Das Ziel ist es, eine Korrelation zwischen den Einflussgrößen und realen Messgrößen für die Abgasmenge zu erhalten.

Die größte Abweichung in der Berechnung liegt einmalig bei 1401m<sup>3</sup>/h, im restlichen Mittel bei ca. 480Nm<sup>3</sup>/h. Dies entspricht einer Abweichung von 0,7% der durchschnittlichen Abgasmenge

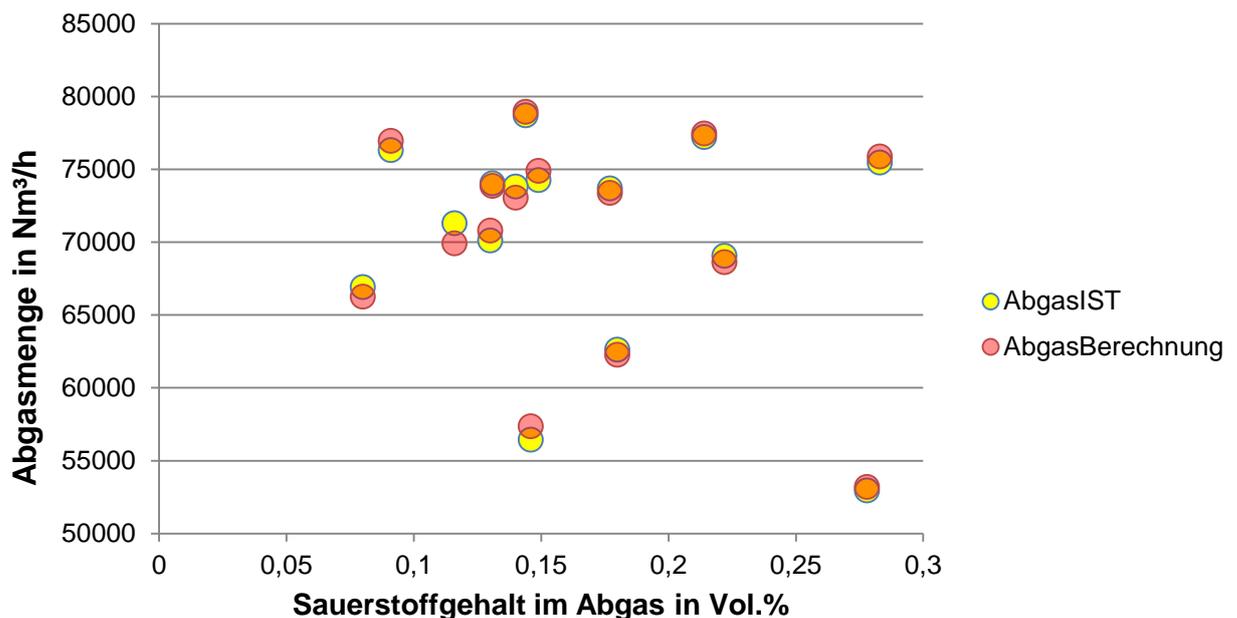


Abbildung 12 Annäherung der Abgasformel

#### 4.2. Sauerstoffmenge

Nach Auswertung der Messergebnisse war kein direkter Zusammenhang zwischen den verschiedenen Eingangsgrößen und dem Sauerstoffgehalt im Abgas als Ausgangsgröße zu erkennen.

Daher wurde ein Modell entwickelt, welches die verschiedenen chemischen Reaktionen im Schwebeschmelzofenprozess trennt und verdeutlicht. Dieses Modell ist bereits in Kapitel 3 aufgeführt. Die Reaktionsgleichungen sind aus Kapitel 2.2 bekannt.

Als erste Reaktion gilt die Oxidation eines Großteils des Schwefels aus dem Konzentrat. Dem folgt im zweiten Teil die Sulfatisierung des Flugstaubes, örtlich auf

den Abgasschacht sowie den Strahlungsteil des AHK begrenzt. Durch den gegebenen Temperaturbereich von ca. 600°C am Anfang und 350°C am Ende des Konvektionsteils geschieht in diesem dritten Bereich die Bildung von SO<sub>3</sub>.

Demnach ist der benötigte Sauerstoffanteil für die definierte Nachverbrennung nicht nur von den bereits bekannten Eingangsgrößen abhängig. Die genaue Zusammensetzung des Konzentrates spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle. In folgenden Abschnitten wird nun die benötigte Sauerstoffmenge anhand von Massen, Molmassen und Volumen berechnet. Über die Zusammensetzung des Konzentrates kann die Menge Schwefel bestimmt werden, die in dem Konzentrat vorhanden ist. Generell gilt folgende Annahme für die Aufteilung des Konzentrates:

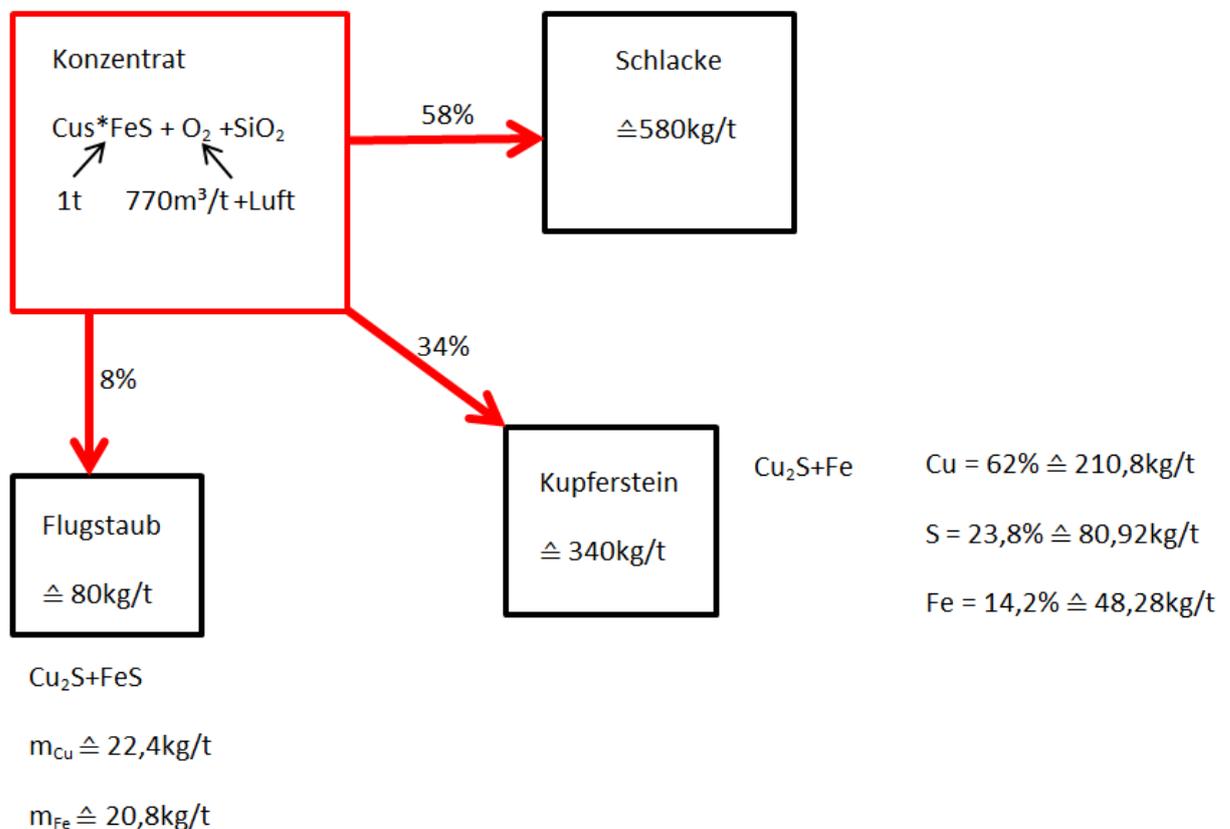


Abbildung 13 Aufteilung des Konzentrates pro Tonne

#### 4.2.1. Oxidation des Schwefels und des Eisens

Allen nachfolgenden Rechnungen zur Bestimmung der benötigten Sauerstoffmenge basieren auf nachstehenden zwei Grundformeln:

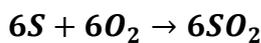
$$n = \frac{m}{M}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Formel 10 Grundformel Stoffmenge

Formel 11 Grundformel Dichte

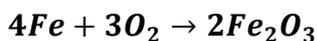
Die Oxidation des Schwefels läuft nach folgender bereits bekannter Reaktionsgleichung ab:



Formel 12 Reaktionsgleichung Schwefeldioxid

In folgender Rechnung ist von einem gemittelten Schwefelgehalt von 24% (3) ausgegangen worden, dies entspricht 240kg/t Konzentrat. Über die Dichte berechnet führt es zu einem Volumen von 0,12m<sup>3</sup> und über die Molmasse zu einer Stoffmenge von 7484mol. Da das Verhältnis von Schwefel zu Sauerstoff bei 1:1 liegt, Sauerstoff jedoch in Bindung als O<sub>2</sub> an dieser Reaktion beteiligt ist werden 14968mol Sauerstoff für eine vollständige Oxidation benötigt. Dies wiederum über die Masse auf ein Volumen umgerechnet ergibt eine Menge von 167Nm<sup>3</sup>/t (Normkubikmeter/Tonne) reinen Sauerstoff.

Da nicht nur der Schwefel aus dem Konzentrat reagiert, sondern auch wie in Formel 1 erkennbar, ein Teil des gebundenen Eisens, wird für diese Reaktion ebenfalls Sauerstoff benötigt.



Formel 13 Reaktionsgleichung Eisenoxid

Der Eisenanteil beträgt in folgender Rechnung 33%, demnach reagieren 264kg/t Eisen mit Sauerstoff zu Eisenoxid. Nach dem gleichem Prinzip wie bei der Oxidation des Schwefels führen Rechnungen über die Stoffmenge und dem Reaktionsverhältnis zu einem Sauerstoffbedarf von 47Nm<sup>3</sup>/t.

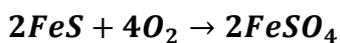
Dem zu Folge werden für die Reaktionen im ersten Reaktor des SSOs 215Nm<sup>3</sup>/t an Sauerstoff benötigt.

Für eine Überprüfung der Berechnung wird zu Grunde gelegt, dass das Kupferkonzentrat in dem ersten Bereich nicht vollständig ausreagiert und oxidiert wird. Um diese These zu überprüfen wird die berechnete benötigte Sauerstoffmenge, mit der tatsächlich dazu gegebenen Menge verglichen.

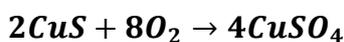
Der Sauerstoff, der der Reaktion zur Verfügung gestellt wird, kommt ausschließlich durch den Brenner in den Reaktionsschacht. Dabei handelt es sich zusammengerechnet um 26381Nm<sup>3</sup>/h. Auch dieser Wert ist eine Momentaufnahme, da er sich jeweils abhängig von der Zusammensetzung des Konzentrates ändert. Der Wert über die zu dem Zeitpunkt vorliegende Tonnage ergibt den tatsächlich hinzugefügten Sauerstoffanteil. Somit ergibt sich bei einer Tonnage von 165t/h eine tatsächlich zugegebene Sauerstoffmenge von 160Nm<sup>3</sup>/t. Damit liegt der Ist-Wert deutlich unter dem errechneten (215Nm<sup>3</sup>/t) und eine vollständige Reaktion kann in diesem Reaktionsteil nicht stattfinden.

#### 4.2.2. Sulfatisierung

In dem zweiten Teil des Reaktormodells findet die Sulfatisierung des Flugstaubes statt. Da die größten Bestandteile in diesem Flugstaub Eisen und Kupfer sind, werden die Sauerstoffberechnungen für eine vollständige Oxidation dieser Stoffe auch nur für die beiden Stoffe durchgeführt.



Formel 14 Reaktionsgleichung Eisensulfat



Formel 15 Reaktionsgleichung Kupfersulfat

Aus den internen Flugstaubanalysen (4) ergaben sich Anteile von 26% Eisensulfid und 28% Kupfersulfid im Flugstaub. Somit muss für 20,8kg Eisensulfid und 22,4kg Kupfersulfid ausreichend Sauerstoff vorhanden sein.

Die beiden Bestandteile benötigen bei einer Oxidation zu 100% umgerechnet 11,6Nm<sup>3</sup>/t Sauerstoff.

### 4.2.3. Entstehung von Schwefeltrioxid

In dem letzten Reaktionsabschnitt reagiert ca. 1% des im Abgas befindlichen SO<sub>2</sub> mit Restsauerstoff zu SO<sub>3</sub>.



#### Formel 16 Reaktionsgleichung Schwefeltrioxid

Für diese Reaktion von ermittelten 4kg SO<sub>2</sub> ist ebenfalls über die Berechnung der Molmasse eine Menge von 0,7Nm<sup>3</sup>/t erforderlich. Die Reaktion kann nicht verhindert werden, soll aber nur in geringem Umfang stattfinden, da es einen Zusammenhang zwischen SO<sub>3</sub>-Bildung und Abfallsäureproduktion gibt. Je mehr SO<sub>2</sub> zu SO<sub>3</sub> reagiert, desto mehr Abfallsäure wird produziert.

Nachfolgendem Diagramm zu folge müssten im Konvektionsteil in dem vorhandenen Temperaturbereich von 350-600°C zwischen 70 und 100% SO<sub>2</sub> zu SO<sub>3</sub> reagieren. Bei einer Temperatur von 1000°C (Strahlungsteil des Kessels) würden im Gleichgewicht mindestens 10% zu Schwefeltrioxid reagieren. Aufgrund der kurzen Verweilzeit des Abgases im Abhitzekeessel (ca. 160s im Strahlungsteil und ca. 33s im Konvektionsteil) wird jedoch das Reaktionsgleichgewicht nicht erreicht. Reaktionsgeschwindigkeiten, die in der vorhandenen Verweilzeit einen Umsatz nahe an das GGW gewährleisten, bedürfen spezieller Katalysatoren. Üblicherweise werden im Kontaktverfahren bei der Schwefelsäureherstellung Metalloxide eingesetzt. Im Flugstaub sind in geringen Mengen Metalloxide vorhanden, die auch katalytisch wirken können, jedoch sind diese nicht für die Reaktion optimiert, so dass die Umsetzungsreaktion deutlich langsamer abläuft.

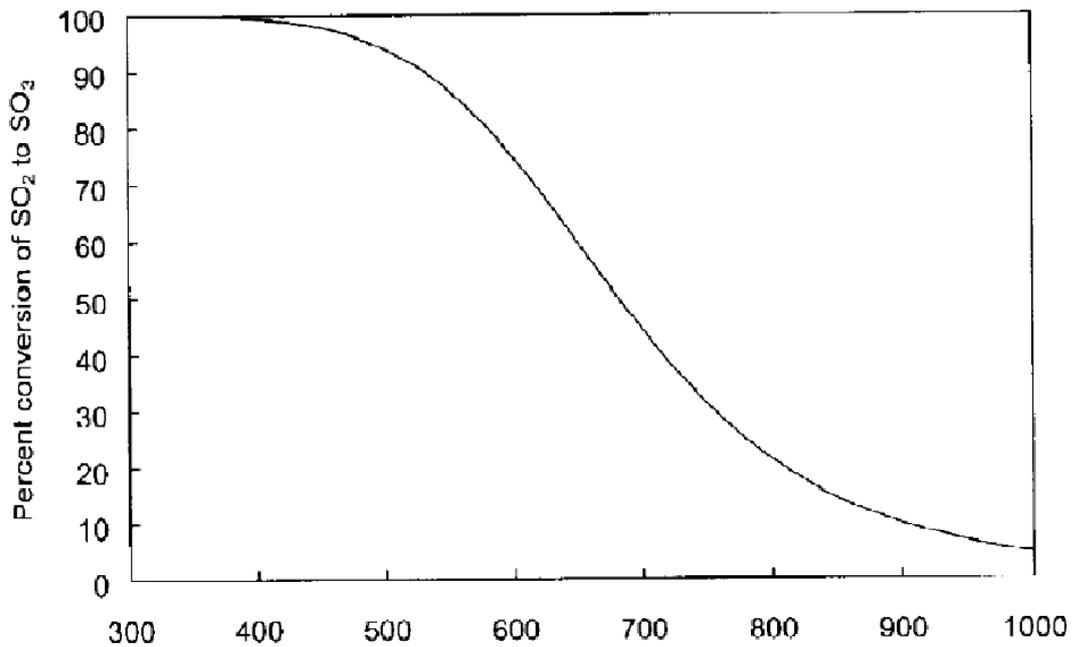


Abbildung 14 Reaktionsdiagramm von SO<sub>2</sub> zu SO<sub>3</sub> (5)

Des Weiteren wird bei oben stehendem Diagramm von einem Sauerstoffgehalt von 12% in der Luft ausgegangen. Da im Schwebeschmelzofenprozess von einem Sauerstoffgehalt von 0% ausgegangen wird, verschiebt sich die Kurve nach links, so dass von einer Reaktionsmenge von 1 Vol.% O<sub>2</sub> Abgasschicht ausgegangen werden kann. Dieser Geraden liegen die Formeln (1) und (2) aus „Extractive Metallurgy of Copper“ von W.G. Davenport zu Grunde (5).

### 4.3. Benötigte Ventilatormenge

Da die Oxidation des Schwefels in Reaktorteil 1 stattfindet und der Ventilator sich zwischen Bereich 2, der Sulfatisierung, und Bereich 3, der Bildung von Schwefeltrioxid befindet, werden auch nur die dafür benötigten Sauerstoffmengen in die Betrachtung mit einbezogen. Für eine Umrechnung auf Stunden muss dieser Wert mit der aktuellen Tonnage multipliziert werden und für die Umrechnung auf Luft durch 0,21 geteilt werden.

$$\dot{V}_{\text{Ventilatorgesamt}} [Nm^3/t] = \dot{V}_{\text{Ventilator Flugstaub}} + \dot{V}_{\text{Ventilator SO}_3\text{-Bildung}}$$

Formel 17 Ventilatormenge in Nm<sup>3</sup>/t

$$\dot{V}_{\text{Ventilatorgesamt}} [Nm^3/h] = \dot{V}_{\text{Ventilatorgesamt}} * \textit{Tonnage} * \frac{1}{0,21}$$

Formel 18 Ventilatormenge in Nm<sup>3</sup>/h

Der in Kapitel 4.1 berechnete Faktor F4 bezieht sich auf eine Menge an Falschluff, die in dem gesamten Prozess eingezogen wird. Ein Teil davon wird bereits zwischen Reaktionsschacht und AHK in den Prozess eingebracht, zum Beispiel durch Aktionen wie Schieberschlitz oder Ofenöffnung. Da nicht genau bekannt ist, um wie viel Luft es sich dort handelt, wird nach Annäherungen ein Wert von 15% des Gesamtfaktors F4 angenommen. Ein Großteil der Leckagen, an denen Falschluff in das System gelangen kann, befindet sich an den EGRn, der Bereich des AHK kann dagegen als dicht angenommen werden. Lediglich der Übergang am Schieberschlitz, sowie der Übergangsbereich zwischen Strahlungs- und Konvektionsteil sind potenzielle Leckagestellen.

Nachfolgend wird somit mit einem gerundeten Wert von 1580Nm<sup>3</sup>/h, welcher 15% von 10555Nm<sup>3</sup>/h entspricht, gerechnet.

Die gesamte Berechnung liegt in einer erstellten EXCEL-Tabelle zugrunde, in der Konzentratzusammensetzung, Tonnagen, Oxidationsgrade sowie die Ventilatorleistung individuell angepasst werden können. Diese ist in Anhang 11 auszugsweise dargestellt.

## 5. Analyse und Auswertung

Für die Analyse der bisherigen Arbeiten werden zunächst der Ort des Ventilators und die Auswirkungen auf den Ofen sowie den Prozess betrachtet. Da die „Flugstaubmengen einen immer wichtigeren Faktor in der Produktion von Primärkupfer“ (6) darstellen, wird auch in diesem Themengebiet ein Blick auf den Zusammenhang zwischen Flugstaubmenge und Ventilatorleistung, bzw. benötigter Sauerstoffmenge, geworfen.

### 5.1. Abgasmenge

Die Berechnung der Abgasmenge über Formel 9 liefert nahezu identische Werte zu den Messwerten. Durch die Einführung der beiden Faktoren F2 und F4 konnte die Gleichung mit Hilfe der Messwerte angepasst und stichprobenartig überprüft werden.

Der Faktor F4 kann als konstante Gesamtfalschlufte im Schwebeschmelzofenprozess betrachtet werden. Als ungefähr benötigter Falschlufte wert für die Sauerstoffhöhung auf von 0,2 auf 5Vol.% wurde in Tabelle 2 ein Wert von 15.000Nm<sup>3</sup>/h berechnet, der Faktor F4 liegt mit 10555Nm<sup>3</sup>/h in derselben Größenordnung und kann daher als passend angenommen werden.

Die Bedeutung des Faktors F2 stellt eine Abhängigkeit zwischen Abgasmenge und Konzentratmenge bzw. spezifischen Windbedarf dar. Je größer die Tonnage ist, desto mehr Abgas wird messtechnisch erfasst.

### 5.2. Luftzufuhr

Nach dem der Ventilator auf der Unterofendecke positioniert worden ist, fiel nach kurzer Zeit auf, dass die Schmelze genau unterhalb des Eisenchargierloches sich nicht mehr vollständig verflüssigt und sich im Eisenchargierrohr selber Ansätze bilden. Als Folge der Schlackenverfestigung ist einer der beiden Schlackenstiche zu gewachsen und das Abstechen der Schlacke somit erschwert wurde.

Durch den schlecht laufenden Schlackenstich konnte der Badstand nicht mehr weit genug abgesenkt werden und der SSO musste in der Tonnage reduziert werden.

Die Druckseite des Ventilators wurde dann tageweise in verschiedene Eisenchargierlöcher eingebracht, so dass ein komplettes Zuwachsen der Eisenchargierrohre nicht stattfinden konnte.

Des Weiteren verhärtete sich die Schlackendecke und das Einbringen von Zusatzmaterial wie zum Beispiel Eisen war nur schwer möglich, da sich die Materialien nicht mehr vollständig vermischten.

Nach dem der Ventilator in den dritten Stock an den Abgasschacht gestellt worden ist, traten die eben genannten Probleme nicht mehr auf, da die kalte Luft des Ventilators nicht mehr in Schlackennähe eingebracht wird.

Durch den Anschluss der Saugseite des Ventilators an die Abgasschachthaube konnte die dort bereits erwärmte Luft als Oxidationsmittel genutzt werden. Somit ist die Differenz der Lufttemperaturen geringer als vorher und die Wahrscheinlichkeit, dass sich Ansätze bilden ist damit gesunken.

### 5.3. Aufbau der Analyse-Diagramme

Für die weiteren Auswertungen wird eine komplexere Darstellungsvariante gewählt, die im Folgenden erklärt wird.

Grundlage für die Berechnungen war die Annahme, dass die drei Reaktionsvorgänge (Formel 3,4 und 5) sowie die Erhöhung des Sauerstoffes, nacheinander und getrennt voneinander ablaufen. Daher sind diese nachfolgend separat betrachtet worden. Jede der Reaktionen findet statt, ohne dass die jeweils anderen beiden einen Einfluss darauf haben. Das bedeutet, dass die Berechnung der Ventilatormenge für die Sulfatisierung des Flugstaubes bei 0% SO<sub>3</sub>-Bildung und 0Vol.% Sauerstoffgehalt durchgeführt worden ist.

In Abbildung 15 sind exemplarisch für eine Tonnage von 117t/h ohne der Annahme von Falschluff die drei Reaktionen dargestellt.

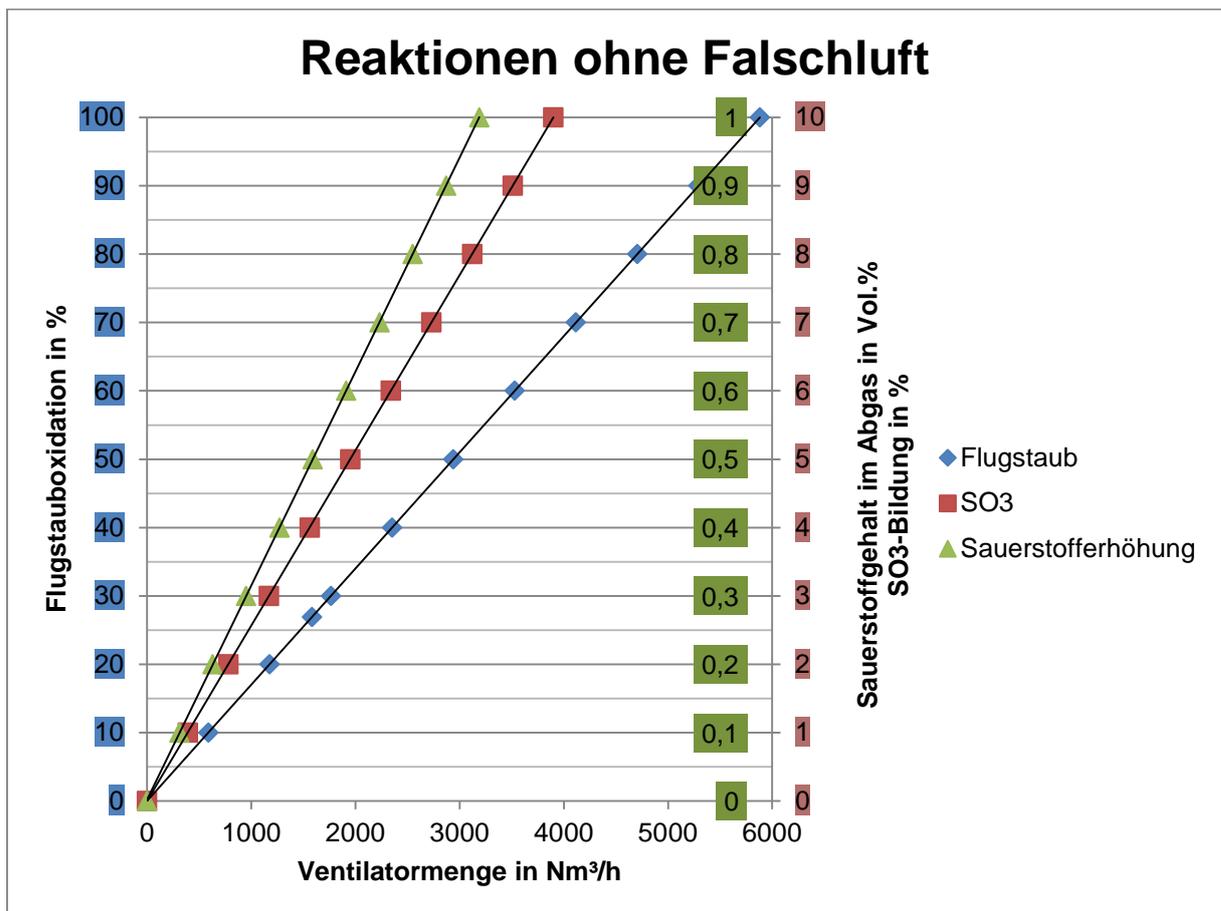


Abbildung 15 Einzelreaktionen ohne Falschluff bei 117t/h

Da eine Falschluffquelle nicht ausgeschlossen werden kann wurden diese Berechnungen erneut mit einer Falschluff von 1580Nm<sup>3</sup>/h durchgeführt.

Zu erwarten ist eine Verschiebung der Geraden nach links, da dieser Betrag Luft nun zusätzlich verfügbar ist.

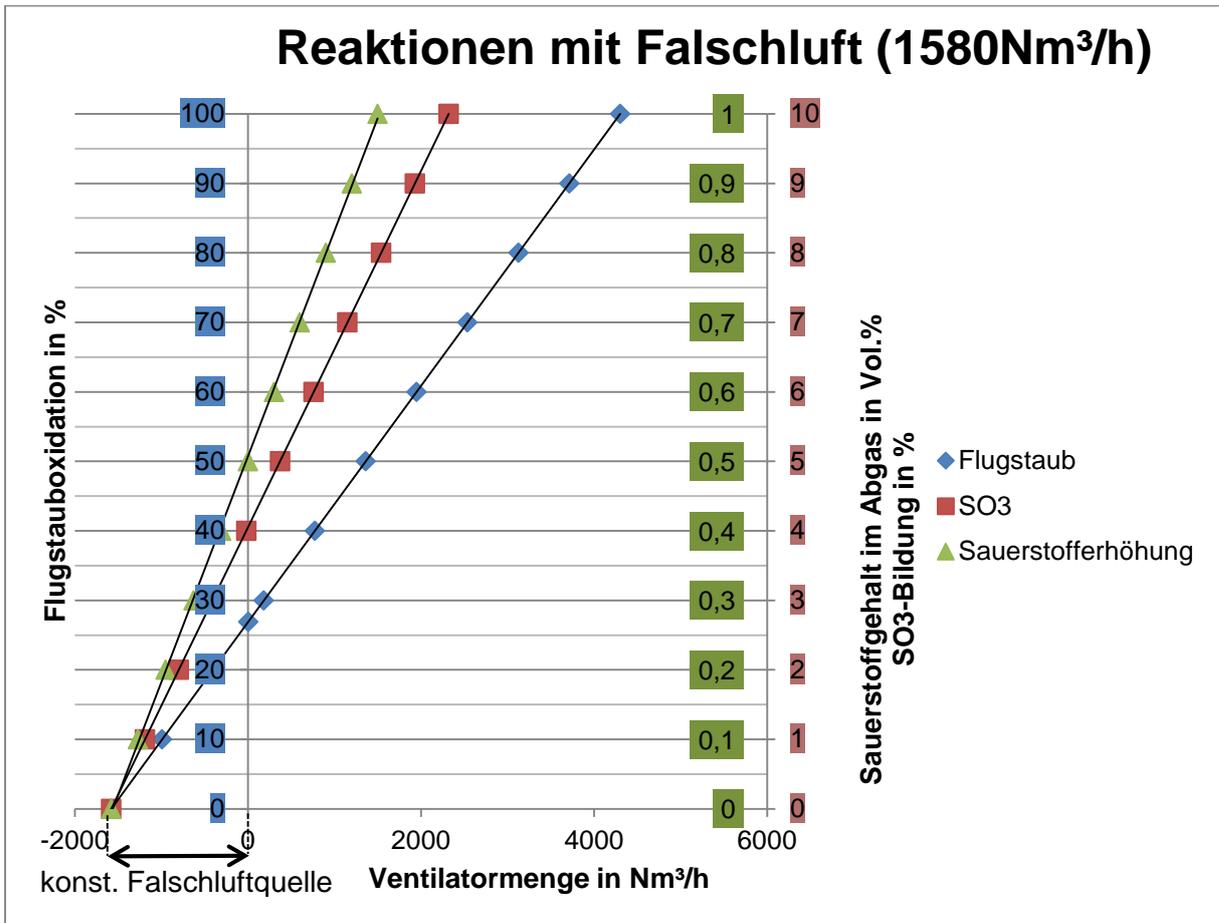


Abbildung 16 Einzelreaktionen mit Falschlufft

Durch die Verschiebung der Geraden nach links fällt auf, dass die Reaktionen einzeln jeweils ohne Zugabe von Luft zum Teil stattfinden könnten.

Da die Reaktionen, im Modell angenommen, nacheinander stattfinden, werden diese nachfolgend in chronologischer Reihenfolge mit der dazu gehörigen Ventilatorluftmenge dargestellt, jedoch für eine Tonnage von 165t/h.

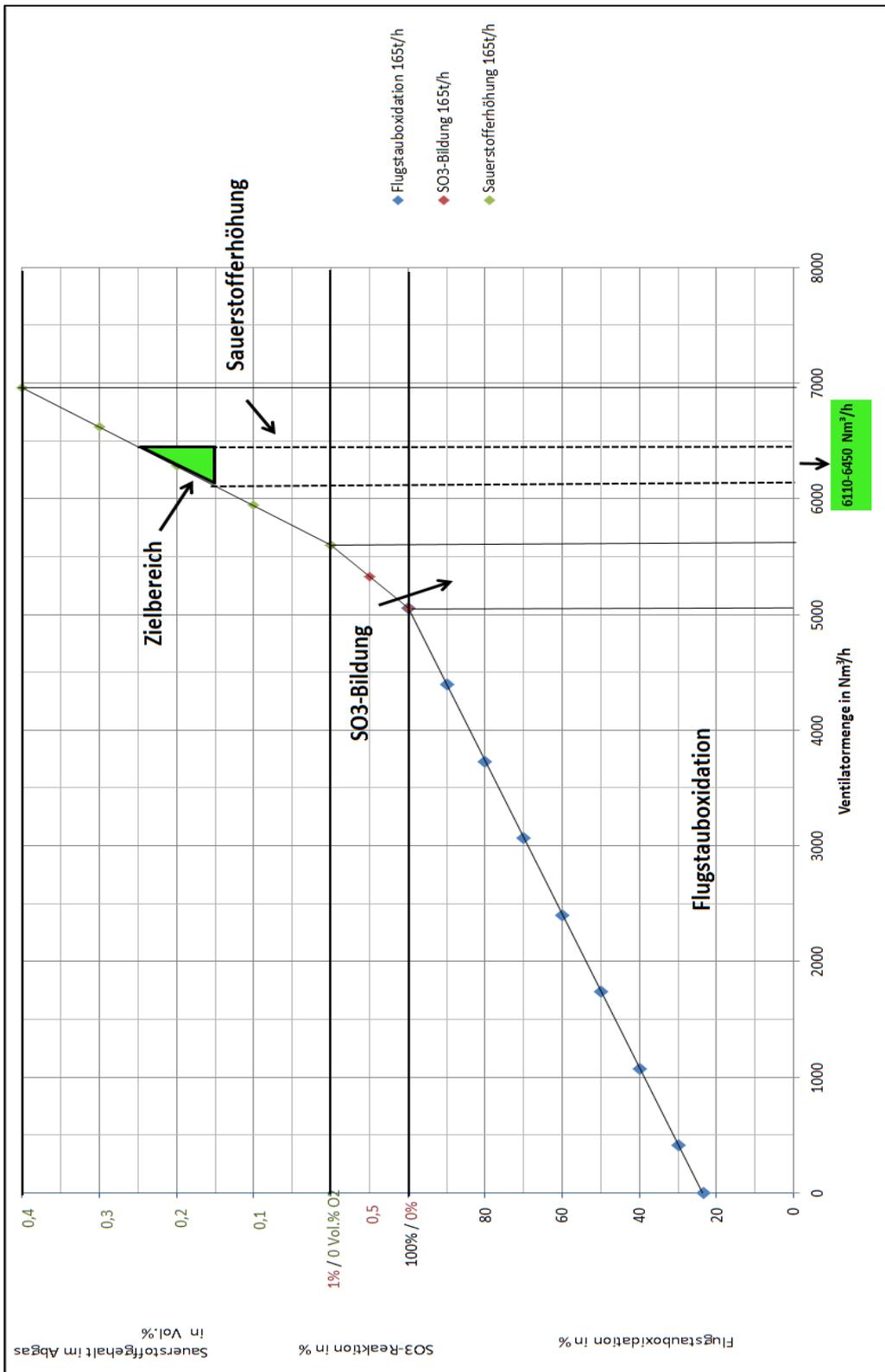


Abbildung 17 nacheinander ablaufende Reaktionen

Demnach ist eine gewisse Menge Luft, die im Verhältnis zu den anderen Reaktionen größte Menge, theoretisch ausschließlich für die Sulfatisierung des Flugstaubes nötig.

In dieser Reaktion wird die angenommene konstante Falschluftrate bereits vollständig verbraucht.

Sobald der Flugstaub vollständig ausreagiert ist, beginnt in dem Modell die Bildung von  $\text{SO}_3$  und erst nach Abschluss dieser Reaktion führt eine weitere Lufteinblasung zu einer Erhöhung des Sauerstoffgehaltes des Abgases.

Anzunehmen wäre, dass der Flugstaub bereits bei einem Sauerstoffgehalt von 0 Vol.%  $\text{O}_2$  vollständig ausreagiert ist. Da sich die Reaktionen von  $\text{SO}_3$ -Bildung und Erhöhung des Sauerstoffgehaltes in der Realität jedoch überlagern und durch lokale Leckagen die Flugstauboxidation begünstigt bzw. erschwert wird, ist ein Zielbereich oberhalb von 0 Vol.%  $\text{O}_2$  angestrebt. Somit soll die lokale Bildung von klebrigem Flugstaub verhindert werden.

Daher kann aus Abbildung 17 nun der angestrebte Betriebspunkt abgelesen werden (grün markiert). Liegt die zugegebene Luftmenge unterhalb des Zielbereiches, bildet sich klebriger Flugstaub, oberhalb hingegen wird die Abfallsäureproduktion begünstigt.

## 5.4. Tonnage

Ein Zusammenhang zwischen benötigter Ventilatormenge und Tonnage ist deutlich zu erkennen. Je höher der Konzentratsdurchsatz ist, desto mehr Luft muss für eine vollständige Reaktion zur Verfügung gestellt werden. Nachfolgend sind die Ergebnisse aus der Untersuchung des Zusammenhangs graphisch dargestellt:

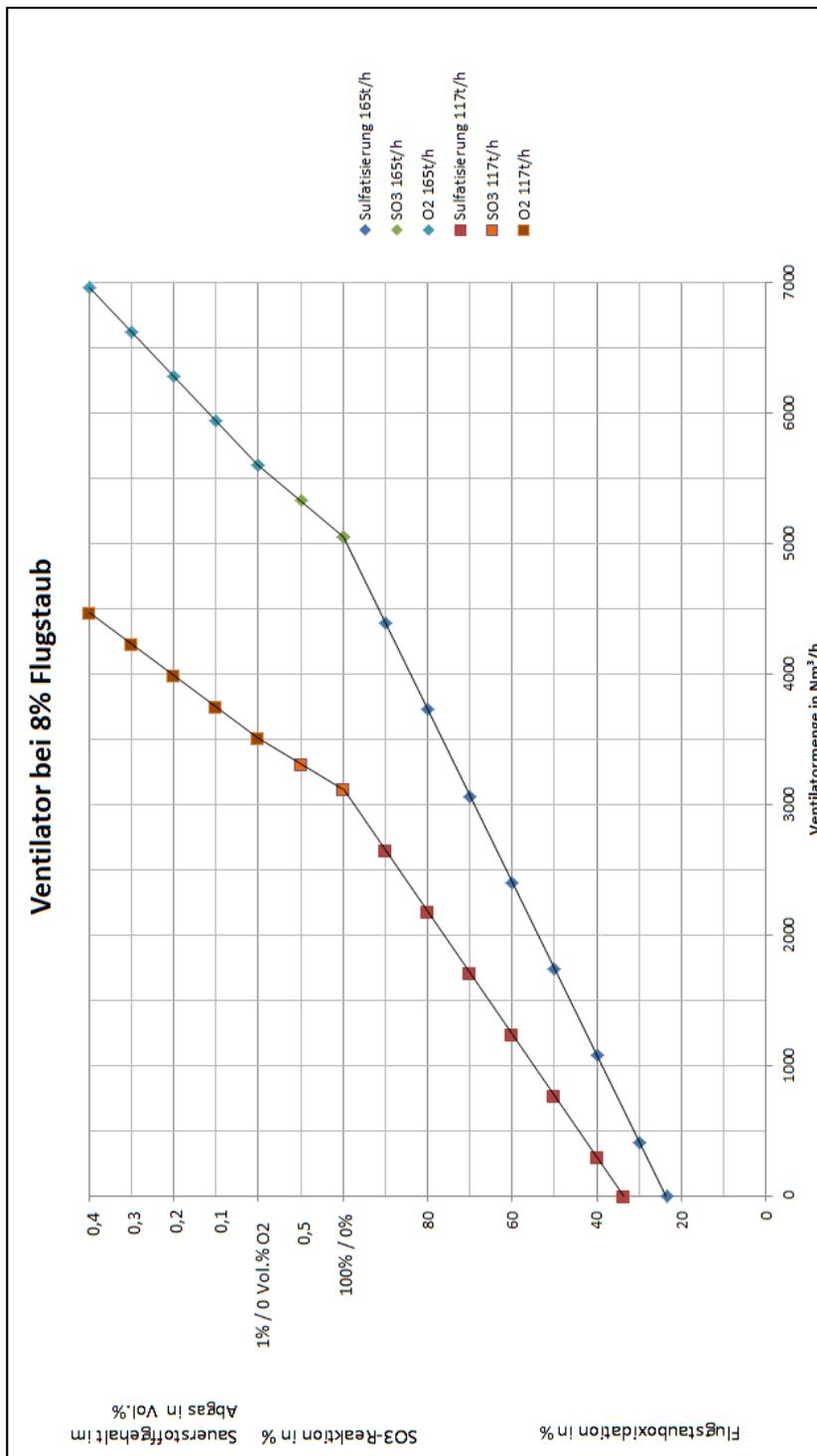


Abbildung 18 Ventilatormenge bei verschiedenen Tonnagen und 8% Flugstaubanteil

Eine höhere Tonnage hat eine geringere Steigung der Geraden zur Folge, da wie bereits beschrieben, mehr Sauerstoff für den gleichen Reaktionsfortschritt benötigt wird.

Da die Abgasmenge steigt, sobald die Tonnage erhöht wird, muss auch die Ventilatorluftmenge dementsprechend erhöht werden. Zwischen der Luftmenge, die für 0,1% Steigerung des Sauerstoffgehaltes im Abgas theoretisch benötigt wird und der Tonnage gibt es ebenfalls folgenden linearen Zusammenhang:

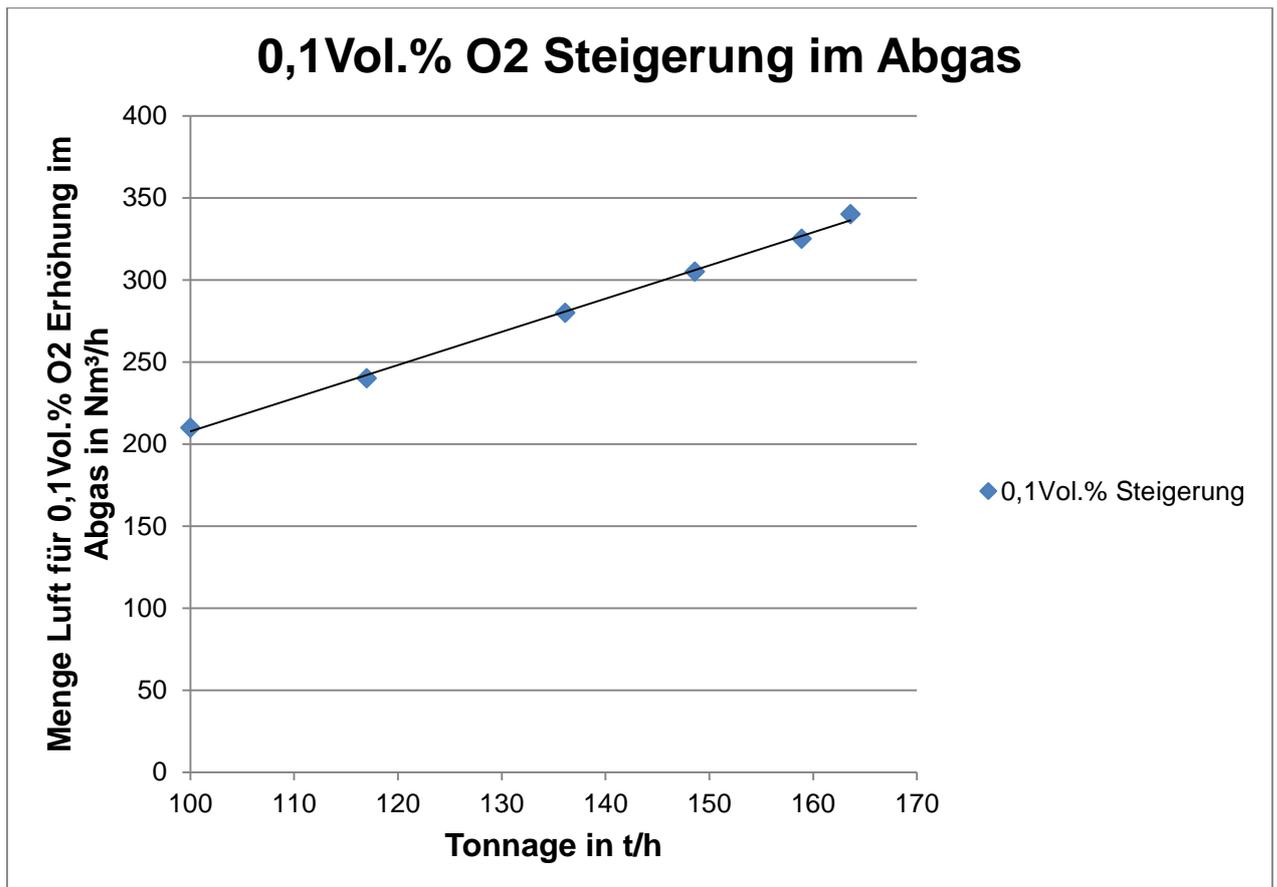


Abbildung 19 Luftmenge für eine Steigerung um 0,1Vol.% O2 im Abgas

Dieser liegt je nach Tonnage zwischen 200 und 350Nm³/h. Dadurch kann die Abflachung der Geraden in Abbildung 18 bei einer höheren Tonnage erklärt werden.

## 5.5. Flugstaubmenge

Als langjähriger Erfahrungswert wird ein Flugstaubanteil von 8% der eingesetzten Konzentratmenge angenommen. In der Realität kann es aber durchaus vorkommen, dass dieser darüber, oder auch darunter liegt. Daher wurden die Auswirkungen von größeren bzw. kleineren Flugstaubmengen genauer betrachtet. Angenommen wird, dass der Anteil Flugstaub sich in einem Bereich zwischen 7 und 10% befinden kann.

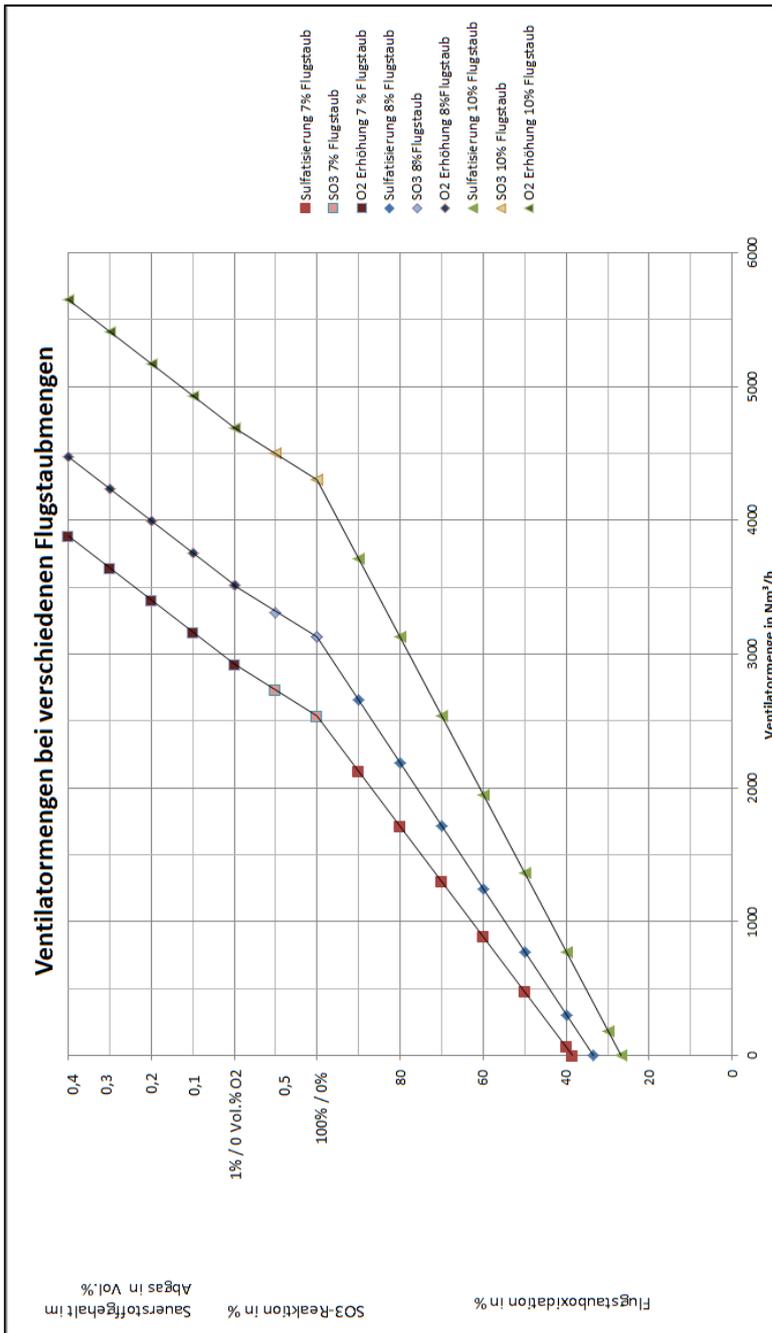


Abbildung 21 Ventilatormenge bei verschiedenen Flugstaubmengen und einer Tonnage von 177t/h

Da der Flugstaubanteil messtechnisch nicht zugänglich ist, kann die Anlage nur über einen gemittelten Wert gefahren werden und muss durch die Auswertung des tatsächlichen Sauerstoffgehaltes vor der EGR sowie die händische Kontrolle des Flugstaubes angepasst werden.

Wie in Abbildung 21 zu sehen, steigt der benötigte Luftbedarf für alle drei Reaktionen mit steigender Flugstaubmenge an. Für eine vollständige Flugstauboxidation muss der Ventilator bei einem Flugstaubanteil von 7% 2537Nm<sup>3</sup>/h Luft in den Prozess einbringen. Bei einem Flugstaubanteil von 8% steigt dieser Wert auf 3125Nm<sup>3</sup>/h und bei 10% auf 4301Nm<sup>3</sup>/h. Dies entspricht einer Differenz von  $588 \frac{\text{Nm}^3/\text{h}}{1\% \text{Flugstaub}}$ . Im weiteren Verlauf der Geraden behalten diese ihren Abstand von 588Nm<sup>3</sup>/h wie zu erwarten bei, da die Reaktionen 2 und 3 unabhängig vom Flugstaubanteil stattfinden.

## 5.6. Zusammenhang zwischen Tonnage und Sulfatisierungsluftbedarf

Da die in dem EXCEL-Tool berechneten Ventilatorluftmenge abhängig von der Tonnage und dem Flugstaubanteil ( $Menge_{FS}$ ) sind, wurden die dort beinhalteten Formeln vereinfacht und mit Hilfe von Faktoren gekürzt. In den Faktoren sind die verschiedenen Molmassen sowie Dichten und Reaktionsverhältnisse enthalten.

$$V_{\text{Ventilator für 0Vol.\% O}_2} = \dot{m}_{\text{Konzentrat}} * (3,12 * Menge_{FS} + 1,85 * Menge_{FS} + 0,04 * Menge_{FS})$$

Formel 19 Benötigte Ventilatormenge für vollständige Reaktionen und 0Vol.% O<sub>2</sub> im Abgas

Der erste Term der Klammer beschreibt die benötigte Menge für die Sulfatisierung des Eisens, der darauffolgende Term die Sulfatisierung des Kupfers und der letzte Term die Oxidation des Schwefeldioxids.

Zusammengefasst ergibt sich folgende Formel:

$$V_{\text{Ventilator für 0Vol.\% O}_2} = \dot{m}_{\text{Konzentrat}} * Menge_{\text{Flugstaub}} * 5,01$$

Formel 20 vereinfachte benötigte Ventilatormenge für vollständige Reaktionen und 0Vol.% O<sub>2</sub> im Abgas

Für die anschließende Erhöhung des Sauerstoffgehaltes auf 0,2Vol.% muss eine zusätzliche Luftmenge eingebracht werden. Diese berechnet sich vereinfacht wie folgt:

$$V_{\text{Sauerstofferhöhung}} = 2 * \dot{m}_{\text{Konzentrat}} + 5,37$$

Formel 21 Ventilatormenge für die Erhöhung des Sauerstoffgehaltes

Werden diese Formeln zusammengefasst ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Tonnage und Ventilatorleistung im gewünschten Betriebspunkt.

$$V_{\text{Ventilator für 0,2Vol.\% O}_2} = 5,01 * \dot{m}_{\text{Konzentrat}} * Menge_{\text{Flugstaub}} + 2 * \dot{m}_{\text{Konzentrat}} + 5,37$$

Formel 22 Berechnungsformel für die benötigte Ventilatormenge im Betriebspunkt

Eine Darstellung der Formel mit verschiedenen Flugstaubanteilen führt zur folgender Abbildung:

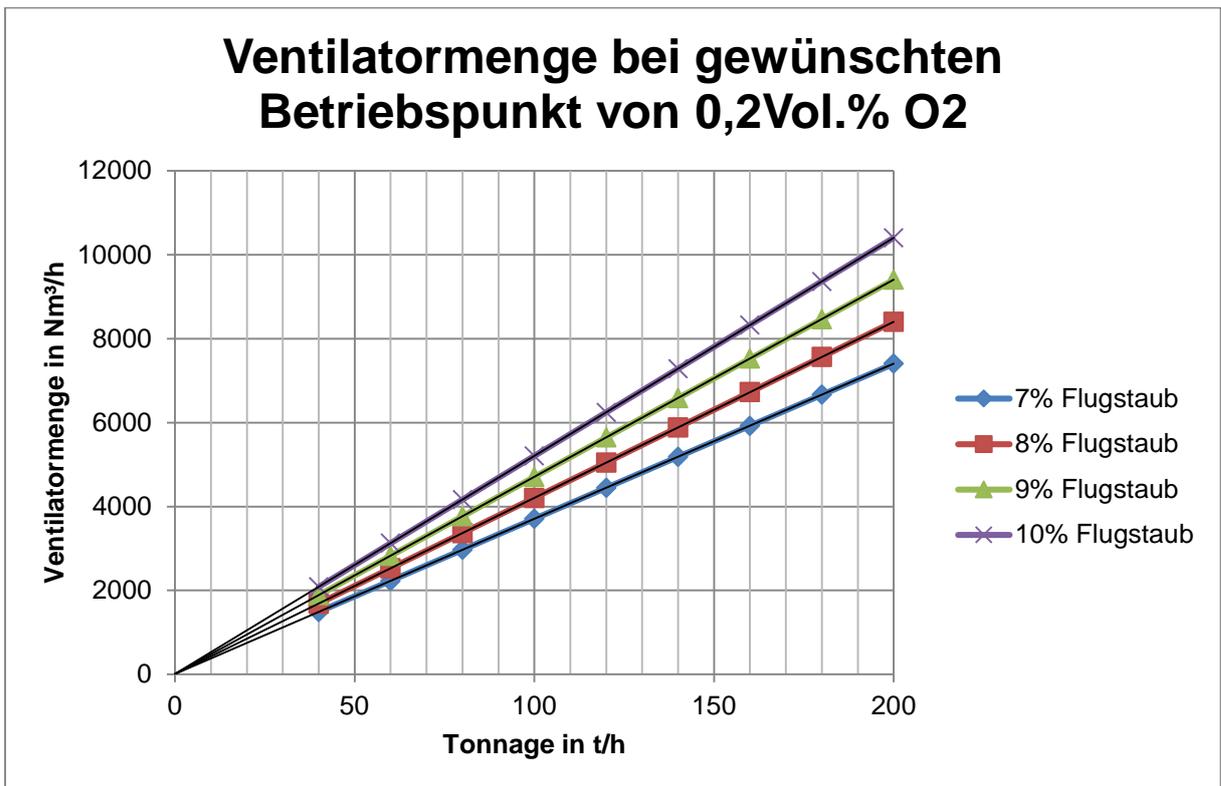


Abbildung 22 Ventilatormenge bei gewünschtem Betriebspunkt bei einer Tonnage von 117t/h

Je höher der angenommene Flugstaubanteil ist, desto größer muss die zusätzlich zugeführte Ventilatormenge sein. Diese Aussage deckt sich ebenfalls mit der Annahme aus Kapitel 5.5.

## 5.7. Fehlerbetrachtung

Für eine Qualifizierung der Berechnung muss überprüft werden, in welchem Rahmen Abweichungen liegen, wie groß eventuelle Fehler sind und woher diese kommen können.

Begonnen wird mit der Betrachtung der Berechnung und Zusammensetzung der Abgasmenge. Diese Berechnungen und Analysen haben als Grundlage über einen Zeitraum gemittelte und anschließend gerundete Werte. Diese können nach Auswertungen durch Histogramme auch als wahr angenommen werden, sind als eine potenzielle Fehlerquelle jedoch nicht auszuschließen. Des Weiteren ist die Totzeit zwischen Änderung einer Eingangsgröße und einem Ergebnis an der Ausgangsgröße nicht präzise bestimmbar. Durch Versuche wurde sie auf ungefähr 8 Minuten eingestuft. Werden nun Werte miteinander verglichen, die physikalisch zur gleichen Zeit geschehen sind, deren Auswirkungen jedoch erst später merkbar sind, ist dies wieder eine potenzielle Fehlerquelle.

Anschließend wird der geringere Ist-Wert der Sauerstoffzugabe am Anfang der Reaktion im Reaktionsschacht betrachtet. Dieser liegt jedoch in der gleichen Größenordnung wie die errechnete Größe. Da tatsächlich weniger Sauerstoff für eine Oxidation hinzugegeben wird als theoretisch benötigt, wird die Aussage, dass nur eine Teiloxidation stattfinden kann, bestätigt.

Des Weiteren werden die berechneten Mengen des Ventilators mit denen tatsächlich zu dem Zeitpunkt gemessenen Werten verglichen. Dabei fällt auf, dass in der Realität auch bei niedrigerer Tonnage, der Ventilator im Verhältnis dazu eine sehr hohe Menge Luft fördert und trotzdem der Sauerstoffgehalt im Abgas nicht zu hoch ist.

Eine mögliche Erklärung wäre hier der Flugstaubanteil, der bereits bei einem Prozent Abweichung eine Ventilator Differenz von  $588\text{Nm}^3/\text{h}$  bei einer Tonnage von  $117\text{t/h}$ , auslöst.

In der Berechnung der Sulfatisierung wurden nur die beiden größten Bestandteile des Flugstaubes betrachtet. Eine Sulfatisierung von anderen Metallen ist wahrscheinlich und kann die benötigte Sauerstoffmenge demnach ebenfalls beeinflussen.

Bei allen durchgeführten Berechnungen ist von einer konstanten Konzentratzusammensetzung ausgegangen worden, die in der Realität jedoch von

Tonnage zu Tonnage variiert und demnach andere Berechnungsergebnisse liefern kann.

Die in dieser Arbeit auftretenden Abweichungen liegen in einer Größenordnung  $<1\%$  und können daher auf Rundungen sowie gemittelte Werte zurückgeführt werden. Diese Größenordnung ist für den Schwebeschmelzofenprozess mit einigen unbekanntem Prozessgrößen durchaus akzeptabel.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es, nach dem das bestehende Rückgassystem außer Betrieb genommen werden musste, eine Lösung für die zusätzliche Sauerstoffzugabe zu finden sowie den Sulfatisierungsprozess im Schwebeschmelzofen aufzuschlüsseln, zu optimieren und einen Zusammenhang zwischen hinzugefügter Luft und Sauerstoffgehalt im Abgas zu finden.

Die Inbetriebnahme eines Ventilators, welcher zuerst Umgebungsluft in den SSO eingebracht hatte, zeigte erste Erfolge. Nach kurzer Zeit musste aufgrund von Materialablagerungen durch die kalte Lufteinblasung in Schmelzennähe, der Standort des Ventilators geändert werden. Durch die Luftzufuhr über die Abgasschachtdecke konnte das Problem behoben werden und es haben sich dort keine Ansätze mehr gebildet.

Eine Auswertung der Messdaten und eine Analyse ihrer Zusammenhänge brachte eine detaillierte Aufschlüsselung der im SSO stattfindenden Prozesse, mit Hilfe dessen berechnet werden kann, wie viel zusätzliche Luft tatsächlich für den Prozess notwendig ist.

Des Weiteren konnte ein EXCEL-Tool entwickelt werden, welches neben der bereits genannten benötigten Luftmenge auch einen unterschiedlichen Oxidationsfortschritt des Flugstaubes sowie variierende Konzentratzusammensetzungen berücksichtigen kann. Die in diesem Tool zu Grunde gelegten Formeln wurden zusammengefasst und mit Hilfe von konstanten Faktoren vereinfacht, so dass ein Zusammenhang zwischen Tonnage und Ventilator geschaffen werden konnte, der verschiedene Flugstaubgehalte beinhaltet. Durch diese Formel hat der jeweilige Messwert einen Anhaltspunkt, ob die im Betrieb eingeblasene Luftmenge plausibel ist.

Für diese Prozessanalyse wurde ein Modell gebildet, welches die Reaktionen im SSO in drei Bereiche bzw. Einzelreaktionen unterteilt, die theoretisch angenommen nacheinander ablaufen. Dieses Modell diente als Berechnungsgrundlage der chemischen Reaktionen und wurde anhand von Messdaten und Analysen bestätigt.

Bei der Analyse der Prozessgrößen fiel auf, dass die Tonnage schlussendlich über die Abgasmenge begrenzt sein kann. Die bei hoher Tonnage anfallende Abgasmenge konnte nicht mehr von der KAWO verarbeitet werden. Da der Ventilator Luft mit 21%

Sauerstoff in den SSO einbringt und nur der Sauerstoffanteil für die Reaktionen genutzt werden kann, ist eine Einblasung von reinem Sauerstoff für die Zukunft denkbar. Diese belastet die Abgasmenge nicht noch zusätzlich, da nur ca. ein Fünftel der bisherigen Menge zusätzlichen in den Ofen eingebracht werden muss. So kann in Betriebszuständen mit hohen Abgasvolumenströmen der Gesamtdurchsatz erhöht werden.

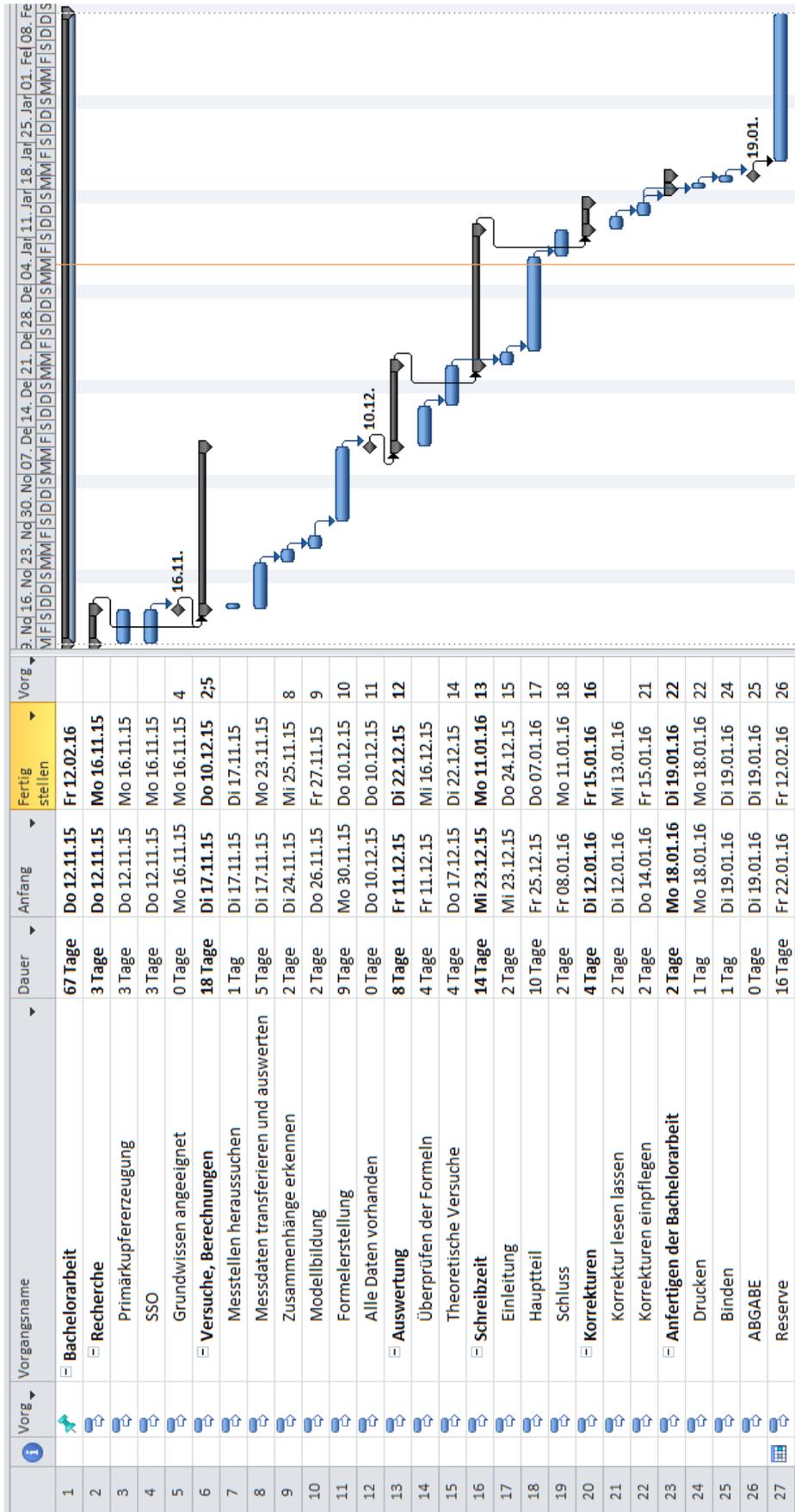
Des Weiteren ist es denkbar, die kleineren Bestandteile des Flugstaubes (wie z.B. Arsen, Bismut, Cadmium, Blei und Zink) ebenfalls in die Sauerstoffberechnung mit einzubeziehen, um einen genaueren Sauerstoffbedarf ermitteln zu können.

Die im Rahmen diese Arbeit analytisch berechnete Sollwerte könnten in eine Regelung implementiert werden und somit für den realen Prozess genutzt werden , so dass der Sauerstoffgehalt im Abgas präzise bestimmt werden kann und nicht über eine händische Annäherung gesteuert werden muss.

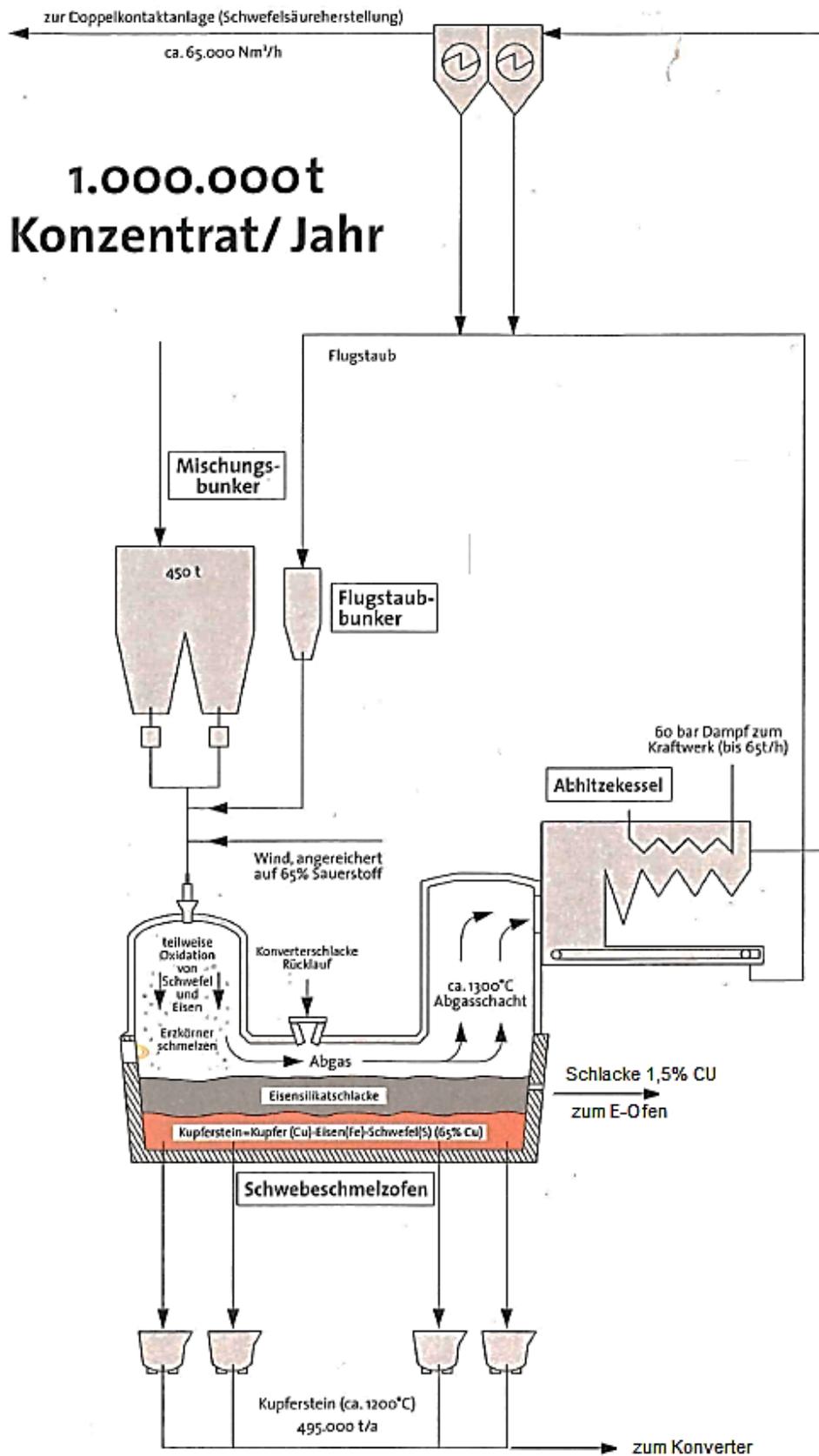
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Aufgabenstellung erfolgreich bearbeitet worden ist, klare Ergebnisse und neue Erkenntnisse entstanden sind und der Sulfatisierungsprozess Schritt für Schritt aufgearbeitet und verstanden worden ist.

# 7. Anhang

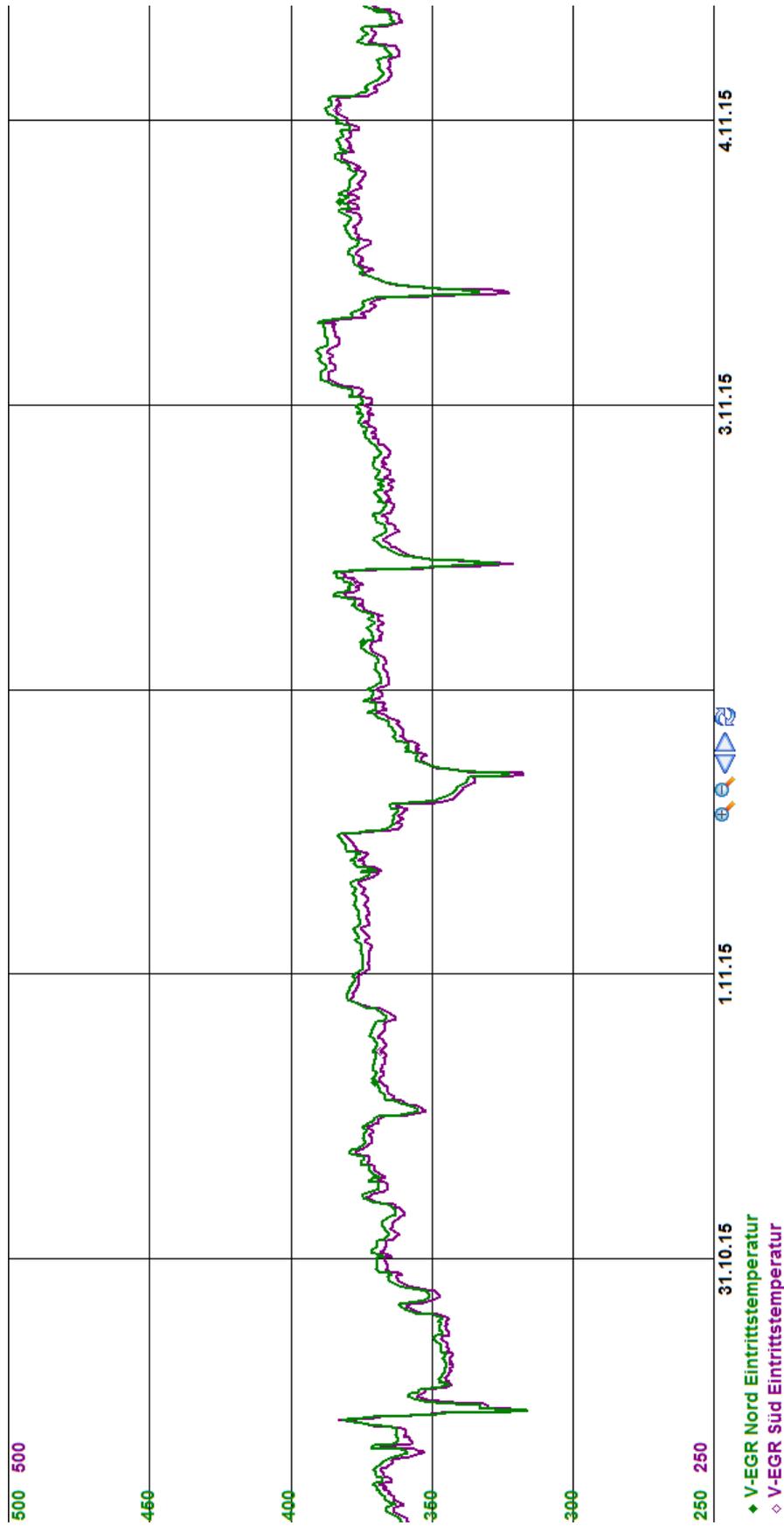
# Anhang 1 Zeitmanagement



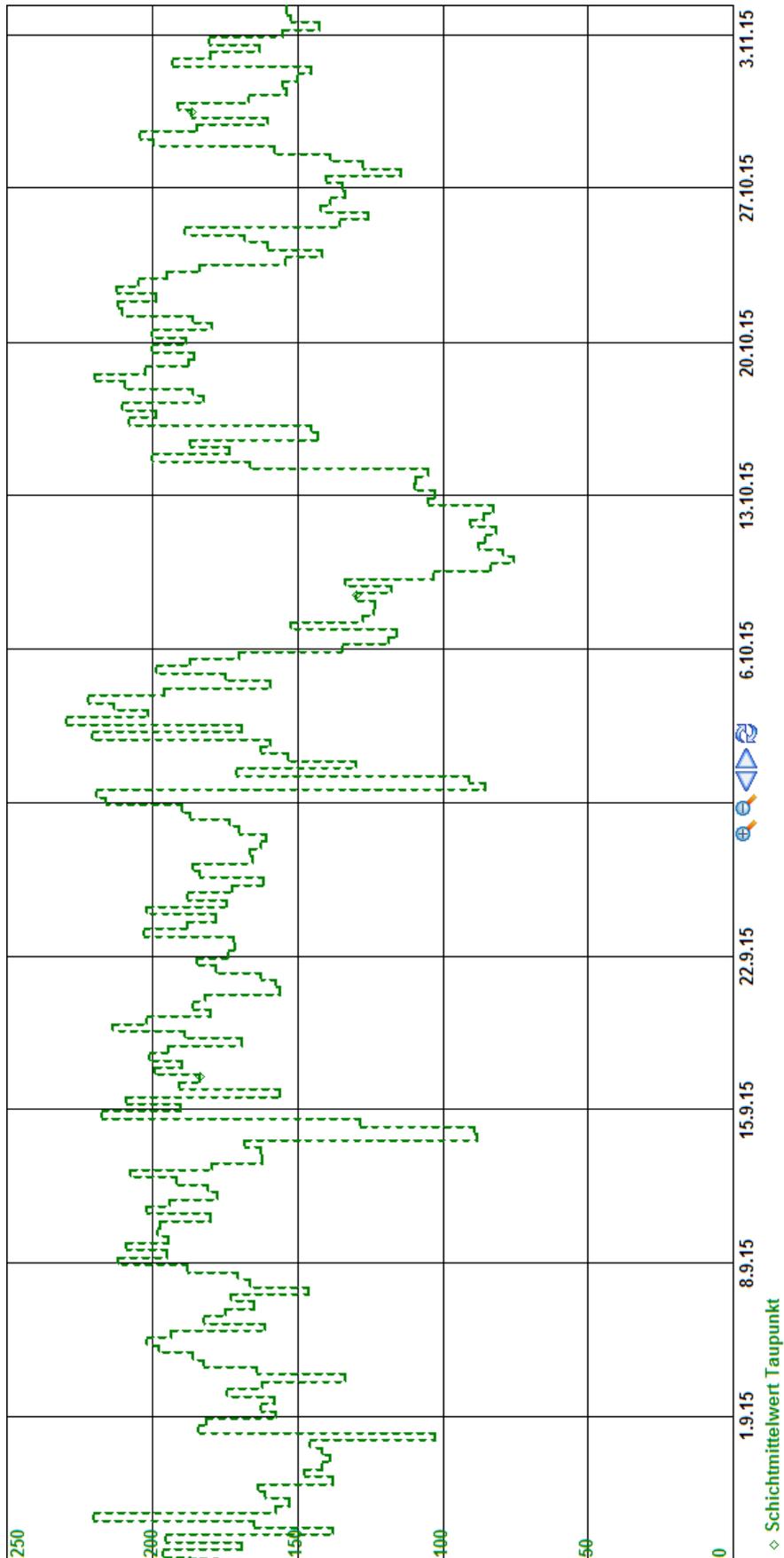
## Anhang 2 Schwebeschmelzofen (SSO)



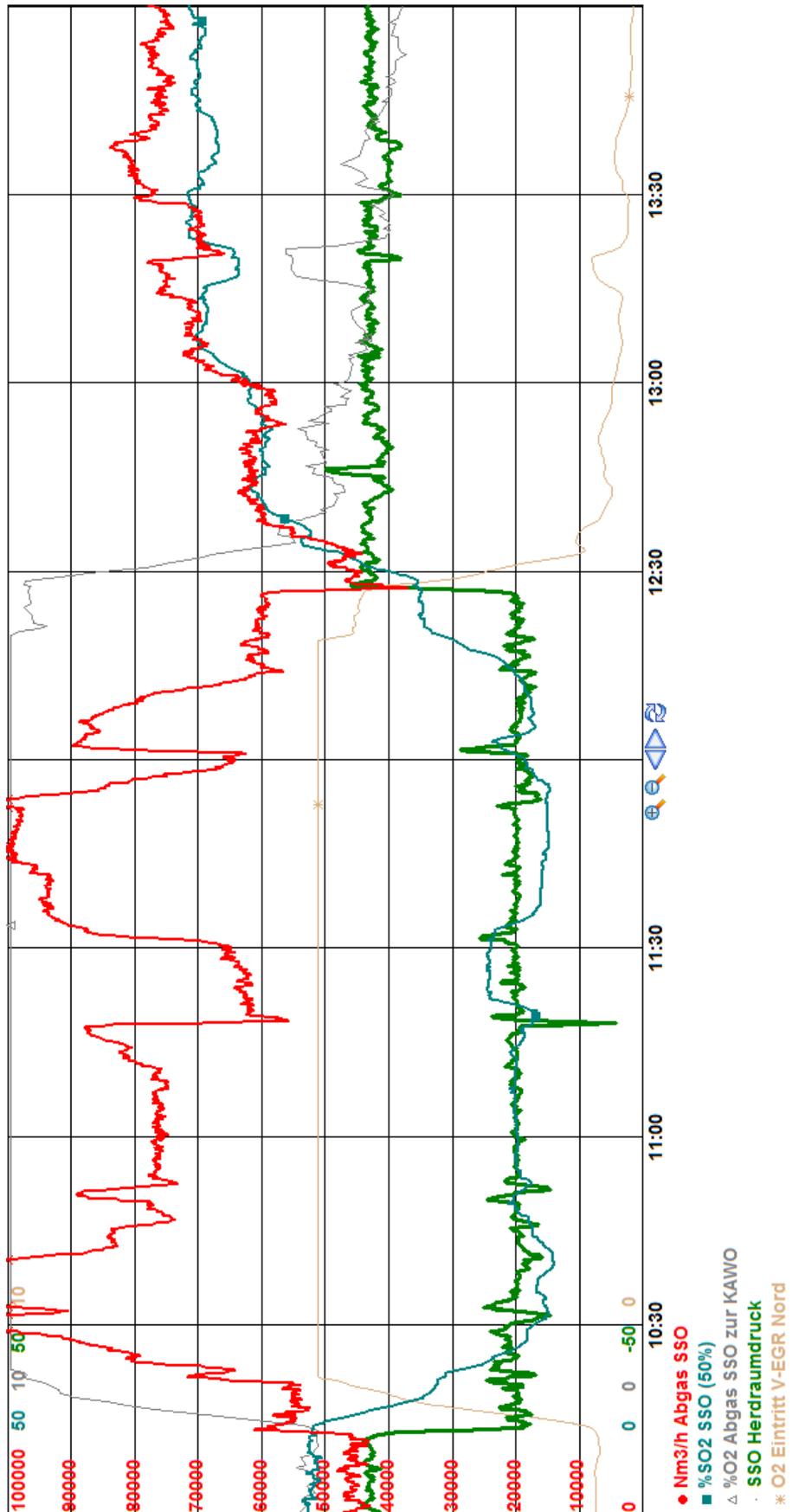
### Anhang 3 Auszug aus dem PI „Temperatur EGR-Eingang“



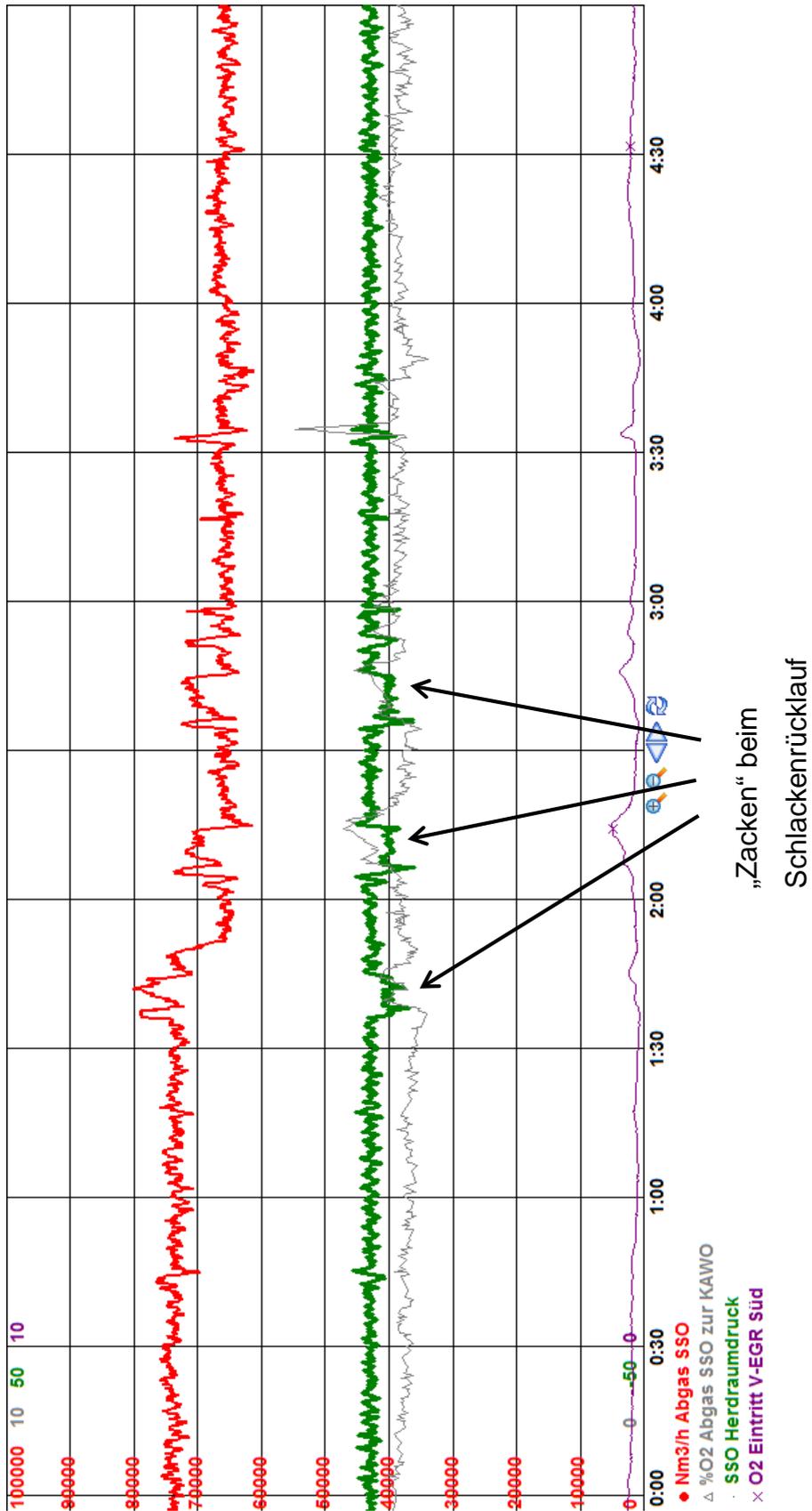
## Anhang 4 Auszug aus dem PI „Taupunktmessung“



## Anhang 5 Auszug aus dem PI „Schieberschlitzaktion“

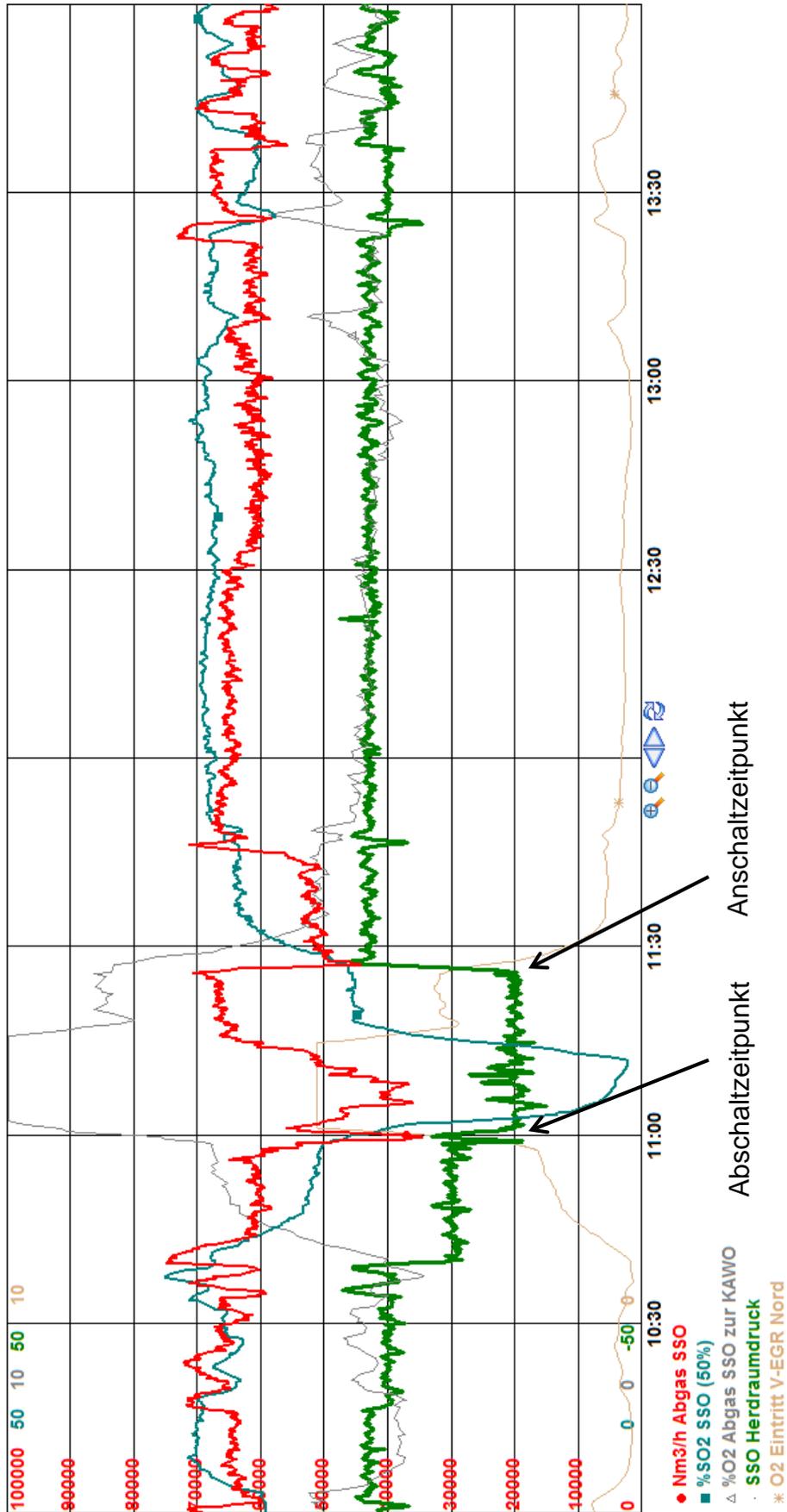


# Anhang 6 Auszug aus dem PI „Schlackenrücklauf und Eisenchargierung“

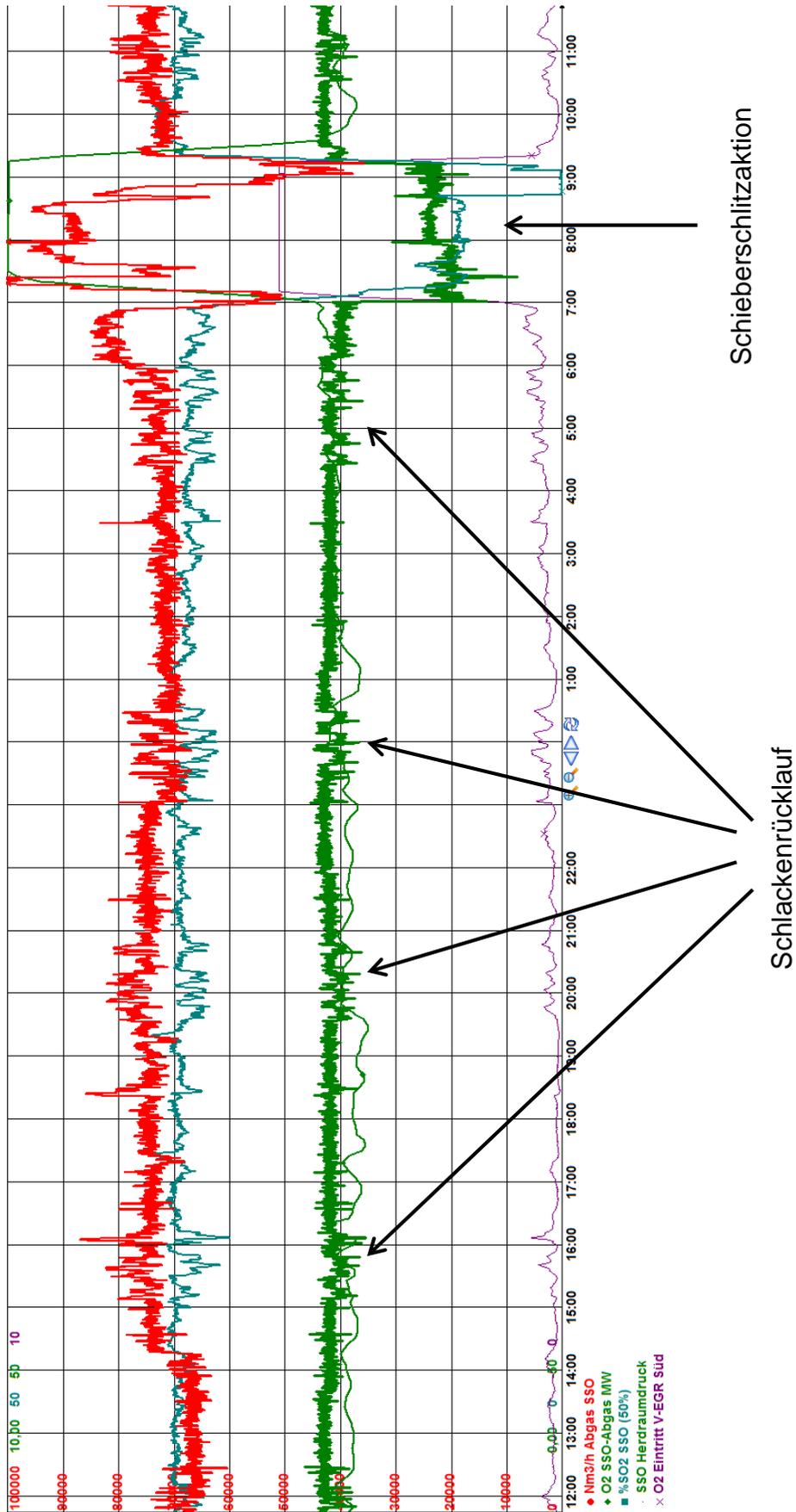


„Zacken“ beim  
Schlackenrücklauf

## Anhang 7 Auszug aus dem PI „Ofenabschaltung“



## Anhang 8 Auszug aus dem PI „24h Übersicht“



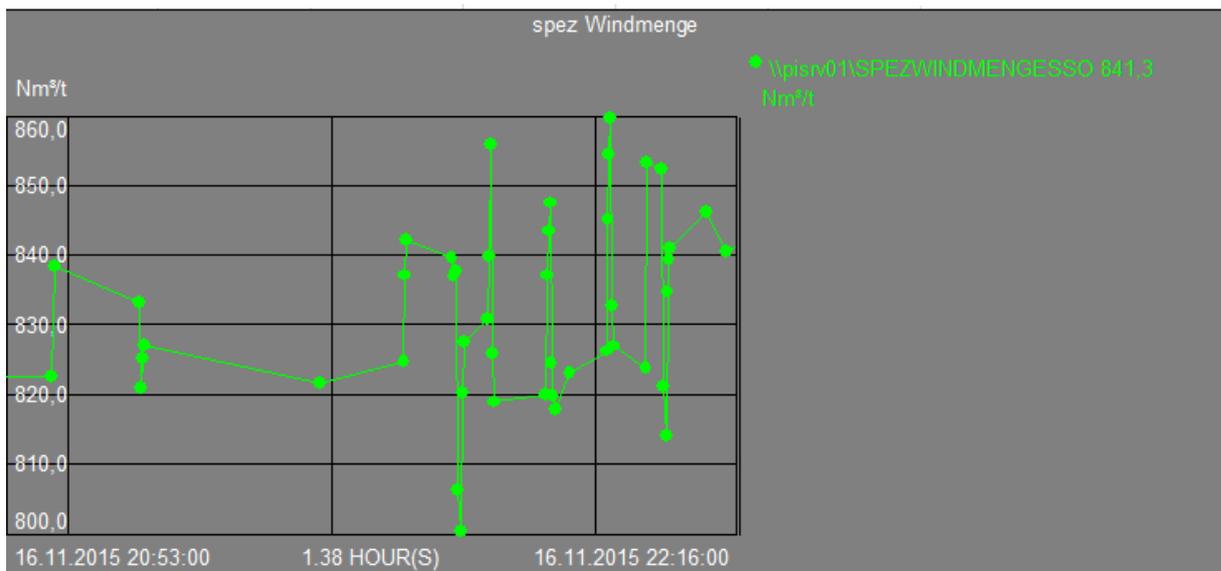
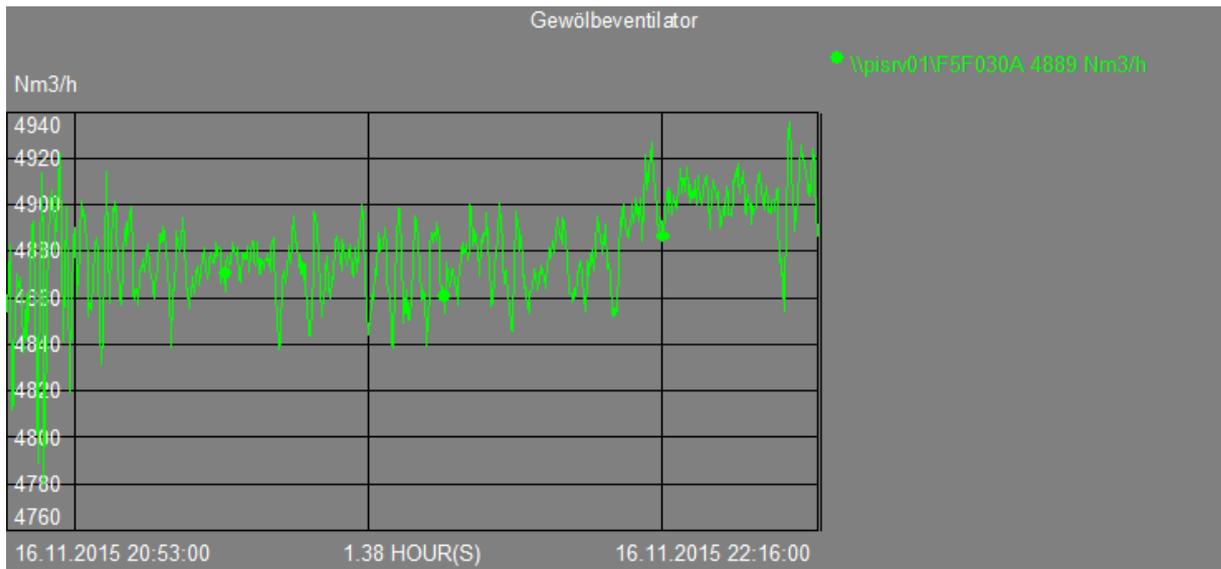
## Anhang 9 Messdateninformationen

Datum	Uhrzeit
13.11.2015	03:24 – 04:48
13.11.2015	18:12 – 20:28
14.11.2015	03:55 – 05:08
14.11.2015	10:30 – 11:47
14.11.2015	18:50 – 19:55
14.11.2015	21:30 – 00:09
16.11.2015	00:56 – 03:52
16.11.2015	12:26 – 13:40
16.11.2015	20:18 – 23:37
20.11.2015	16:36 – 17:19
21.11.2015	13:08 – 14:32
21.11.2015	15:38 – 16:08
22.11.2015	03:12 – 04:48
22.11.2015	07:27 – 08:33
23.11.2015	02:04 – 04:10

Messgröße	Messstellenbezeichnung
Tonnage	SSO.Konz.LIW
O <sub>2</sub> -Gehalt vor EGR	F8Q901A
Abgasmenge	F8F301A
Ventilatormenge	F5F030A
Spez. Windbedarf	SPEZWINDMENGE
Anreicherung	O2ANREICH

M Konzentrat	Menge Abgas	O2 Gehalt	Ventilator	spez Windbedarf	Anreicherung
16.11.15 20:58	157	16.11.15 20:53	16.11.15 20:53	4883	16.11.15 21:16
16.11.15 21:08	160	16.11.15 20:53	16.11.15 20:53	4814	16.11.15 21:55
16.11.15 21:08	158	16.11.15 20:53	16.11.15 20:53	4833	16.11.15 21:56
16.11.15 21:28	159	16.11.15 20:53	16.11.15 20:54	4870	16.11.15 21:58
16.11.15 21:38	158	16.11.15 20:54	16.11.15 20:54	4858	16.11.15 21:58
16.11.15 21:38	156	16.11.15 20:54	16.11.15 20:54	4837	16.11.15 22:09
16.11.15 21:44	161	16.11.15 20:54	16.11.15 20:54	4837	16.11.15 22:14
16.11.15 21:44	163	16.11.15 20:54	16.11.15 20:54	4861	16.11.15 22:15
16.11.15 21:44	161	16.11.15 20:55	16.11.15 20:55	4870	16.11.15 22:36
16.11.15 21:44	157	16.11.15 20:55	16.11.15 20:55	4890	16.11.15 22:40
16.11.15 21:47	160	16.11.15 20:55	16.11.15 20:55	4893	16.11.15 22:41
16.11.15 21:47	151	16.11.15 20:55	16.11.15 20:56	4789	16.11.15 22:44
16.11.15 21:47	151	16.11.15 20:55	16.11.15 20:56	4818	16.11.15 23:05
16.11.15 21:48	160	16.11.15 20:56	16.11.15 20:56	4872	16.11.15 23:08
16.11.15 21:54	159	16.11.15 20:56	16.11.15 20:56	4913	16.11.15 23:14
16.11.15 21:54	155	16.11.15 20:57	16.11.15 20:56	4779	16.11.15 23:20
16.11.15 21:54	160	16.11.15 20:56	16.11.15 20:57	4885	16.11.15 23:21
16.11.15 22:01	159	16.11.15 20:57	16.11.15 20:57	4887	16.11.15 23:45
16.11.15 22:01	154	16.11.15 20:57	16.11.15 20:57	4907	
16.11.15 22:01	160	16.11.15 20:57	16.11.15 20:57	4880	
16.11.15 22:05	155	16.11.15 20:57	16.11.15 20:58	4893	
16.11.15 22:07	159	16.11.15 20:58	16.11.15 20:58	4906	
16.11.15 22:07	162	16.11.15 20:58	16.11.15 20:58	4922	
16.11.15 22:08	157	16.11.15 20:58	16.11.15 20:58	4842	
		16.11.15 20:59	16.11.15 20:59	4899	
		16.11.15 20:59	16.11.15 20:59	4896	
		16.11.15 20:59	16.11.15 20:59	4819	
		16.11.15 21:00	16.11.15 20:59	4888	
		16.11.15 21:00	16.11.15 21:00	4872	
		16.11.15 21:00	16.11.15 21:00	4861	
		16.11.15 21:00	16.11.15 21:00	4901	
		16.11.15 21:00	16.11.15 21:00	826	

## Messdatenauswertung von PI in EXCEL



Schwefel S	M	32,07 g/mol	roh	2070,00 kg/m³
	M	15,89 g/mol		1,43 kg/m³
Sauerstoff O	M	15,89 g/mol	1,43 kg/m³	
	M	64,06 g/mol	2,63 kg/m³	
Schwefeldioxid SO2	M	80,06 g/mol	1920,00 kg/m³	
	M	63,55 g/mol	8920,00 kg/m³	
Schwefeltrioxid SO3	M	80,06 g/mol	1920,00 kg/m³	
	M	63,55 g/mol	8920,00 kg/m³	
Kupfer Cu	M	63,55 g/mol	8920,00 kg/m³	
	M	55,85 g/mol	7874,00 kg/m³	
Eisen Fe	M	55,85 g/mol	7874,00 kg/m³	
	M	87,91 g/mol	4840,00 kg/m³	
Eisensulfid FeS	M	87,91 g/mol	4840,00 kg/m³	
	M	151,91 g/mol	2840,00 kg/m³	
Eisensulfat FeSO4	M	151,91 g/mol	2840,00 kg/m³	
	M	159,14 g/mol	5600,00 kg/m³	
Kupfersulfid Cu2S	M	159,14 g/mol	5600,00 kg/m³	
	M	159,61 g/mol	3600,00 kg/m³	
Kupfersulfat CuSO4	M	159,61 g/mol	3600,00 kg/m³	
	M	159,61 g/mol	3600,00 kg/m³	
1t Konzentrat	1/3 Fe	1/3 Cu	1/3 S	sonst.
	33,3333	33,3333	24	9,33
% aus 1t Konzentrat	333	333	333	240
	333	333	333	240
Schlacke	Kupferstein	Flugstaub	8	
	58	34		
Kupferstein	Fe	Cu	S	
	14,20	62,00	23,80	
Flugstaub	FeS	CuS	sonst	46,00
	26,00	28,00		
Schlacke	Fe	Cu	S	SI
	45,56	1,50	xx	xx
bei 160t:				
Zerstäuberluftmenge	2501	Nm³/h	2501	525
O2 Menge Lanzae Konz Brenner	1204	Nm³/h	1204	1144
Wind Konzentrat Brenner*4	3489	Nm³/h	13956	2931
O2 Konzentrat Brenner *4	5732	Nm³/h	22928	21782
				26381
<p>Reaktion</p> <p>Parameter</p> $p = \frac{m}{V} \quad n = \frac{m}{M}$ <p>Tonnage 165,00 t/h</p>				
<p>Konzentrat</p> <p>Zugabe von O2</p> <p>6CuFeS2+13O2-&gt;3Cu2S+2Fe3O4+9SO2</p> <p>95+902-&gt;95O2</p> <p>ms 240,00 kg/t</p> <p>vs 0,12 Nm³</p> <p>ns9 7484 mol</p> <p>Verhältnis S/O2 1:1</p> <p>ns/9 832</p> <p>no2 1663 mol</p> <p>no29 14967 mol</p> <p>VO2 239 kg/t</p> <p>167 m³/t</p> <p>6Fe+4O2-&gt;2Fe3O4</p> <p>mfe 264,25 kg/t</p> <p>nfe6 4731 mol</p> <p>Verhältnis nfe/6 3:2</p> <p>no2 789 mol</p> <p>no24 4206 mol</p> <p>no24 67 kg/t</p> <p>vo24 47 Nm³/t</p> <p>vo2gesamt 215 Nm³/t</p> <p>mo2gesamt 307 kg/t</p> <p>deitao2 55 Nm³/t</p>				
<p>keine vollständige Oxidation, da weniger zugegeben als berechnet</p> <p>Sauerstoffzugabe bei Tonnage: 26381 Nm³/h</p> <p>o2 160 Nm³/t</p> <p>100%</p> <p>vo2 160 Nm³/t</p> <p>215 Nm³/t</p> <p>100%</p> <p>215 Nm³/t</p>				
<p>Sulfatisierung</p> <p>MexSy+O2-&gt;MeSO4</p> <p>Anteil 8% von Tonnage</p> <p>2ZFeS+4O2-&gt;2FeSO4</p> <p>mZFeS 20,80 kg/t</p> <p>nZFeS 237 mol</p> <p>nCu2S 118,30</p> <p>Verhältnis 1:2</p> <p>no22 473 mol</p> <p>mo24 8 kg/t</p> <p>vo22 5 Nm³/t</p> <p>vlufft 25 Nm³/t</p> <p>2Cu2S+8O2-&gt;4CuSO4</p> <p>mCu2S 22,40 kg/t</p> <p>nCu2S 141 mol</p> <p>nCu2S 70 mol</p> <p>Verhältnis 1:4</p> <p>no24 563 mol</p> <p>mo24 9 kg/t</p> <p>vo24 6 Nm³/t</p> <p>vlufft 30 Nm³/t</p> <p>vollständige Flugstauboxidation</p> <p>vo2gesamt 11,59512785 Nm³/t</p> <p>vlufftgesamt 55 Nm³/t</p> <p>mo2gesamt 17 kg/t</p> <p>mFeSO4 28 kg/t</p> <p>mCuSO4 31 kg/t</p> <p>Oxidation zu mCuSO4 100%</p> <p>vo2gesamt 17 kg/t</p> <p>vo2gesamt 11,6 Nm³/t</p>				
<p>95O2+4,5O2-&gt;95O3</p> <p>Menge So2-&gt;SO3 1,00%</p> <p>msO2 4 kg</p> <p>nSo2 7 mol</p> <p>Verhältnis SO2/O2 2:1</p> <p>no2 7 mol</p> <p>mo2 0 kg</p> <p>vo29 0,7 Nm³/t</p> <p>vlufft 3 Nm³/t</p>				
<p>Sulfatisierung und SO3</p> <p>vo2benötigt 12,3 Nm³/t</p> <p>vo2benötigt 2028 Nm³/h</p> <p>vlufftbenötigt für 0% vlufftbenötigt für% Restgehalt 9677 Nm³/h</p> <p>vluffvorhanden 9677 Nm³/h</p> <p>Falschluft(Schieberschlitz, etc)(20°C) vlufft 4250 Nm³/h</p> <p>Ventilator (70°C) vlufft 5446 Nm³/h</p> <p>Gesamt zur Verfügung: vlufft 9696 Nm³/h</p> <p>Abzüglich 0,2Vol% vlufft 9677 Nm³/h</p>				

## Anhang 12      Literaturverzeichnis

1. **Deutsches Kupferinstitut.** [Online] 2015. [Zitat vom: 23. 12 2015.] <https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/system/herstellung-kupfer.html>.
2. **Pietsch, E. H. Erich.** *Kupfer: Teil A.* s.l. : Springer-Verlag Berlin Heidelberg GMBH, 1978.
3. **Aurubis AG.** Konzentratzusammensetzung. Hamburg : s.n., 2008.
4. —. Flugstaubanalyse SSO. Hamburg : s.n., 2008.
5. **Davenport, W.G., King, M. und Schlesinger, M.** *Extractive Metallurgy of Copper.* USA : booksbutler, 2002.
6. **Steinacker, Stephan.** Thermodynamic Considerations for Primary Copper. *World of Metallurgy-ERZMETALL.* 2015, Bd. 68, 6.
7. **Norddeutsche Affinerie.** *Leistungsfähige Kupfererzeugung aus Konzentraten und Schrotten in RWO.* Hamburg : s.n., 2000.
8. **Aurubis AG, Enno Droste.** *Bachelor Abschlussarbeit.* Hamburg : s.n., 2015.
9. **Wieland in Zusammenarbeit mit Aurubis.** *Kupfer: Gewinnung- und Herstellung.* s.l. : Wieland, 2013.
10. **Stuart, Derek.** Taupunktsensoren geben Sicherheit. *Wasser, Luft und Boden; Zeitschrift für Umwelttechnik.* 2008, 6.
11. **Atlantic Copper.** *A REVIEW OF RECENT IMPROVEMENTS TO CONTROL WEAK ACID PRODUCTION AT THE HUELVA SMELTER.* Huelva, Spain : s.n., 2011.
12. *Regelkreisbeschreibung Nachverbrennungsluft SSO.* **Schildt, Kai.** Hamburg : s.n., 2015.
13. **Aurubis AG.** [Online] Aurubis AG. [Zitat vom: 3. November 2015.] <http://gb2013-14.aurubis.com/reports/aurubis/annual/2014/gb/German/60/weitere-informationen.html>.
14. **RHI AG.** [Online] RHI. [Zitat vom: 4. November 2015.] [http://www.rhi-ag.com/internet\\_de/products\\_solutions\\_de/non\\_ferrous\\_de/non\\_ferrous\\_bm\\_en/non\\_ferrous\\_bm\\_agg\\_en/non\\_ferrous\\_bm\\_agg\\_fsf\\_en/?jsessionid=75431CCD82F462ACD9360BCCB69DC1B7](http://www.rhi-ag.com/internet_de/products_solutions_de/non_ferrous_de/non_ferrous_bm_en/non_ferrous_bm_agg_en/non_ferrous_bm_agg_fsf_en/?jsessionid=75431CCD82F462ACD9360BCCB69DC1B7).
15. **WIKIPEDIA.** [Online] Wikipedia. [Zitat vom: 28. 11 2015.] [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Flash\\_smelting\\_\(Outokumpu\\_furnace\).svg&lang=de](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Flash_smelting_(Outokumpu_furnace).svg&lang=de).

16. **YANMU.** [Online] YANMU. [Zitat vom: 30. November 2015.]  
[http://yanmu.de/de/PRODUCT/jianzhuyongnaihuyuanliao/Flash\\_Smelting\\_F/](http://yanmu.de/de/PRODUCT/jianzhuyongnaihuyuanliao/Flash_Smelting_F/).

## Anhang 13      Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Hausarbeit zum Thema „*Prozessentwicklung- und Optimierung des Sulfatisierungsluftsystems im Schwebeschmelzofenprozess in der Primärkupfererzeugung Hamburg*“ ohne fremde Hilfe und selbstständig ausgearbeitet und dokumentiert habe. Des Weiteren wurden keine weiteren Hilfsmittel und Quellen als die angegebenen verwendet und jegliche Zitate als solche kenntlich gemacht.

Kretzmann, Tabea Kaarina

2062510

---

(Name, Vorname)

(Matr.-Nr.)

Hamburg, 15.01.2016

---

(Ort, Datum)

(Unterschrift im Original)