

Masterarbeit

Massen- und Energiebilanz bei einem Drehrohrofen zur Kausterherstellung

erstellt für

**RHI – AG Rohstoff- und Produktionsstandort
Radenthein, Österreich**

Vorgelegt von:

Christoph Schneeweiss, BSc.
0861330

Betreuer/Gutachter:

A.o.-Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. Josef Draxler
Dipl.-Ing.(FH) Heimo Wagner, MSc.

Leoben, 13.05.2015

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

DANKSAGUNG

Mein Dank gilt:

Herrn Dipl. – Ing. (FH) Heimo Wagner, MSc., der mir das Verfassen dieser Arbeit ermöglicht und mich bei Fragen immer unterstützt hat.

Herrn Eduard Heckenbichler und Herrn Reinhard Zammernig, die für Fragen und Anregungen meinerseits immer ein offenes Ohr hatten und ihre Erfahrungen und ihr Wissen mit mir bereitwillig geteilt haben.

Allen Mitarbeitern der RHI – AG Radenthein, die mir bei der Erstellung meiner Diplomarbeit behilflich waren, aber besonders den Herren Nobert Apolloner, Gerwin Hofer, Gerhard Kreuzer, Ivica Vincetic und Johann Prettnner.

Herrn Dipl. – Ing Thomas Müller, der mich bei der Erstellung der Bilanzen unterstützt und sich immer Zeit für mich genommen hat.

Herrn André Schmickl, der mich bei der Organisation von Terminen und Aufbereitung von Präsentationen unterstützt hat sowie immer gerne bereit war mir mit Rat und Tat zur Seite zu stehen.

Meiner Lebensgefährtin Silvia, die mich während meines Studium immer unterstützt und motiviert hat.

Meine Großeltern, meiner Tante mit Familie, meinen zukünftigen Schwiegereltern und allen meinen Freunden, für die Unterstützung und dafür, dass sie immer Verständnis gezeigt haben, wenn ich für mein Studium eingespannt war.

Kurzfassung

Massen- und Energiebilanz bei einem Drehrohrofen zur Kausterherstellung

Heutzutage ist es für die europäische Industrie von immer größerer Bedeutung, dass Produktionsprozesse nicht nur effektiv, sondern auch effizient gestaltet werden, da die immer größer werdende Anzahl von Konkurrenten aus Billiglohnländern ständig Druck auf den Verkaufspreis ausübt.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Drehrohrofen zur Herstellung von kaustisch gebranntem Magnesit, so genanntem Kauster, auf etwaige vorhandene Potentiale zur Effizienzsteigerung untersucht. Eine besondere Herausforderung stellte dabei das Alter des Ofens dar, da dieser bereits 1912 in Betrieb genommen wurde.

Zur Erarbeitung von Optimierungsmöglichkeiten wurden möglichst viele Parameter des Drehrohrofens erfasst und für eine Zeit von vier Monaten gemessen. Dadurch war es möglich, den Ofen mit einer detaillierten Massen- und Energiebilanz abzubilden und darauf aufbauend Optimierungspotentiale abzuleiten. Diese wurden mit Hilfe der Bilanzen auf ihren Nutzen untersucht und die Durchführbarkeit anschließend überprüft. Die so erstellte Maßnahmenliste zur Verbesserung der Effizienz wird derzeit von den Verantwortlichen umgesetzt.

Abstract

Mass- and energy balance of a rotary kiln for the production of caustic calcinated magnesia

Nowadays it is increasingly important for European industry to perform their production processes not only in an effective but also in an efficient way, as the growing number of competitors from low wage countries is constantly lowering the sales price of products.

In this thesis a rotary kiln for producing caustic calcinated magnesia, called CCM, was examined for potentials to increase the efficiency of the unit. The particular challenge of finding these potentials was that the year of construction and putting the rotary kiln into operation was 1912.

To explore as many potentials for increasing the efficiency as possible, many different parameters of the kiln were recorded and measured for a period of four months. This made it possible to represent the oven with a detailed mass and energy balance and deduce optimization potentials based on it. These findings were analyzed for their benefit by using the balances and the feasibility was subsequently checked afterwards. The action list which has been created is presently being processed.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung.....	3
2 GRUNDLAGENTEIL.....	5
2.1 Vorstellung des Unternehmens und des Standorts Radenthein.....	5
2.2 Prozess der Kausterherstellung	8
2.2.1 Wissenswertes über die Kalzination von Magnesit.....	8
2.2.2 Qualitätsparameter der Kaustersorten	10
2.3 Drehrohrofenprozess	11
2.3.1 Geschichte und Aufbau von Drehrohröfen	11
2.3.2 Anwendungsgebiete von Drehrohröfen	13
2.3.3 Transportvorgänge im Ofen	14
3 ERFASSUNG UND AUSWERTUNG DER IST-SITUATION	16
3.1 Darstellung des Prozesses inklusive vor und nachgeschalteter Schritte	16
3.1.1 Rohsteinabbau.....	16
3.1.2 Steinplatz und Rohmagnesitzerkleinerung	18
3.1.3 Drehrohrofen und Kausterkühler inklusive Abgasreinigung	20
3.1.4 Mahlung und Verladung von Kauster	22
3.2 Derzeitige Prozessregelung.....	22
3.3 Durchgeführte Messungen.....	23
3.3.1 Temperaturen	23
3.3.1.1 Ermittlung der Ofenaußenmanteltemperatur	24
3.3.1.2 Kühlermanteltemperatur.....	27
3.3.1.3 Feststofftemperaturen	29
3.3.1.4 Lufttemperaturen.....	31
3.3.1.5 Rauchgastemperaturen.....	33
3.3.2 Luftmengen.....	33
3.3.3 Staubanfall und Glühverlust des Staubs	38
3.3.4 Abgasparameter	41
3.3.5 Korngrößenverteilungen und Wassergehalte	41
3.4 Massen- und Energiebilanz.....	44
3.4.1 Erstellung der Massen- und Energiebilanz.....	44

3.4.2	Berechnung der Wärmeverluste.....	66
3.4.3	Vergleich der hergestellten Produkte	68
3.5	Prozessbetrachtung hinsichtlich Qualität	69
3.5.1	Organisation und Durchführung der FMEA	69
3.5.2	Prozessstruktur.....	69
3.5.3	Fehleranalyse	72
3.5.4	Fehlerbewertung.....	75
3.5.5	Optimierungs- und Verbesserungspotentiale	78
4	ERGEBNISSE UND POTENTIALE	81
4.1	Optimierung des Saugzugventilators und des Schlauchfiltermaterials.....	81
4.2	Zugoptimierung im Drehrohrföfen und in der Rauchgasreinigung.....	82
4.3	Sekundärluft zu Falschlufverhältnis	85
4.4	Zustellung Ofeneinlauf	86
4.5	Optimierung der Aufgabe	89
5	ZUSAMMENFASSUNG	91
6	VERZEICHNISSE	93
6.1	Literatur.....	93
6.2	Abkürzungsverzeichnis	94
6.3	Tabellen	94
6.4	Abbildungen	95
ANHANG	I

1 Einleitung

Heutzutage können sich europäische Unternehmen der produzierenden Industrie auf Grund der immer größer werdenden Konkurrenz in Europa und den aus aller Welt in den Markt drängenden Billiganbietern von Produkten keine Produktionsprozesse mehr leisten, bei denen nicht Effektivität (die richtigen Dinge tun) und Effizienz (die Dinge richtig tun) im Vordergrund stehen. Besonders bei energieintensiven Wertschöpfungsschritten sind Ingenieure immer mehr gefordert effiziente Lösungen zu entwickeln, um eine Minimierung der Energiekosten zu ermöglichen und so die gesamten Herstellkosten bestmöglich zu optimieren. In der produzierenden Industrie in Europa kommt noch erschwerend hinzu, dass viele Firmen schon seit mehr als hundert Jahren existieren und daher die Umstände und Gegebenheiten moderne Lösungen oft nur schwer zulassen.

1.1 Problemstellung

Am Standort der RHI – AG in Radenthein wird seit 1912 unter anderem kaustisch gebrannter Magnesit für die weitere Verarbeitung hergestellt. Früher wurde der Drehrohrofen, der im Rahmen der Masterarbeit genauer untersucht werden soll, hauptsächlich für die Produktion von so genanntem Plattenkauster für die Knauf AG, früher Heraklith AG, in Ferndorf in Kärnten und in Simbach in Deutschland genutzt. In den letzten zwanzig Jahren hat sich die Produktion aber langsam weg vom Baustoffkauster hin zum Futtermittelkauster entwickelt, der nun fast zwei Drittel der Gesamtproduktion des Drehrohrofens ausmacht. Dieser wird für die Weiterverarbeitung zu fertig abgesackten Futtermittelmischungen in den verschiedensten Körnungen mit einem Magnesiumanteil von 83 % hergestellt. Ein hoher Anteil von Magnesium im Produkt verlangt einen niedrigen restlichen Glühverlust von kleiner zwei Prozent bei dem fertig gebrannten Kauster, der aus dem Ofen kommt. Um diesen Wert konstant zu halten kann nur die Aufgabemenge des Ofens reduziert werden, was dazu geführt hat, dass die gesamte Jahreskapazität kontinuierlich über die letzten zwanzig Jahre gesunken ist.

Etwaige Potentiale für eine Steigerung der Effizienz des 103 Jahre alten Aggregates können nur erfasst werden, wenn eine gründliche Untersuchung der Ist-Situation des Ofens für jedes hergestellte Produkt vorangeht. Aus dieser detaillierten Erfassung können in weiterer Folge Möglichkeiten für die Effizienzsteigerung herausgearbeitet und versuchsweise umgesetzt werden. Eine weitere Herausforderung stellt die begrenzte Anzahl an vorhandenen Messungen und Messmöglichkeiten am Ofen dar, da selbst die jetzige Rauchgasreinigung aus dem frühen 1960ern bzw. aus Ende 1970 stammt.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist eine gründliche Erfassung der Ist – Situation des Ofens und Prozesses sowie die Erarbeitung von möglichen Potentialen zur Effizienzsteigerung. Das zu erreichende Optimum stellt eine Erhöhung der Produktionsmenge bei gleichbleibendem Gasverbrauch oder eine Senkung der verbrauchten Gasmenge für dieselbe Menge an

Produkt dar. Hierbei ist besonders auf den Erhalt der Produktqualität, speziell beim Magnesiumgehalt des Futtermittelkausters und der Reaktionszeit/Reaktionstemperatur beim Baustoffkauster, zu achten. Sind diese Parameter nämlich nicht zu hundert Prozent erfüllt kommt es sofort zu einer Reklamation der Kunden, was nicht nur monetären Schaden nach sich zieht, sondern auch Auswirkungen auf Folgeaufträge haben kann, da vor allem die Kunden aus der Futtermittelbranche selbst äußerst strengen Kontrollen unterliegen. Aus diesem Grund wird auch eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, kurz FMEA, durchgeführt, die alle im Prozess der Kausterherstellung möglicherweise auftretenden Fehler untersucht und bewertet.

2 Grundlagenteil

In diesem Kapitel sollen kurz die Firma RHI-AG kurz vorgestellt, sowie einige interessante Aspekte der Kausterherstellung und des Drehrohrofenprozesses erwähnt werden.

2.1 Vorstellung des Unternehmens und des Standorts Radenthein

Der Rohstoff und Produktionsstandort Radenthein ist Teil der Firma Veitsch – Radex GmbH. & Co OG, einer 100 Prozent Tochter der RHI – AG, die weltweit 32 Standorte betreibt und insgesamt ca. 8000 Mitarbeiter beschäftigt. [6]

Der Standort Radenthein, an dem derzeit 377 Mitarbeiter tätig sind, hat eine lange Geschichte, die mit der Entdeckung der Magnesitlagerstätte 1908 beginnt. Der deutsch-amerikanische Bankier Emil Winter erwirbt die Schürfrechte auf der Millstätter Alpe und beginnt mit dem Bau der Werkshallen. Seit 1912 werden in Radenthein Kauster, Sinter, feuerfeste Materialien und deren Ausgangsstoffe hergestellt. Die nachfolgende Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Prozesse und Zusammenhänge am Standort.

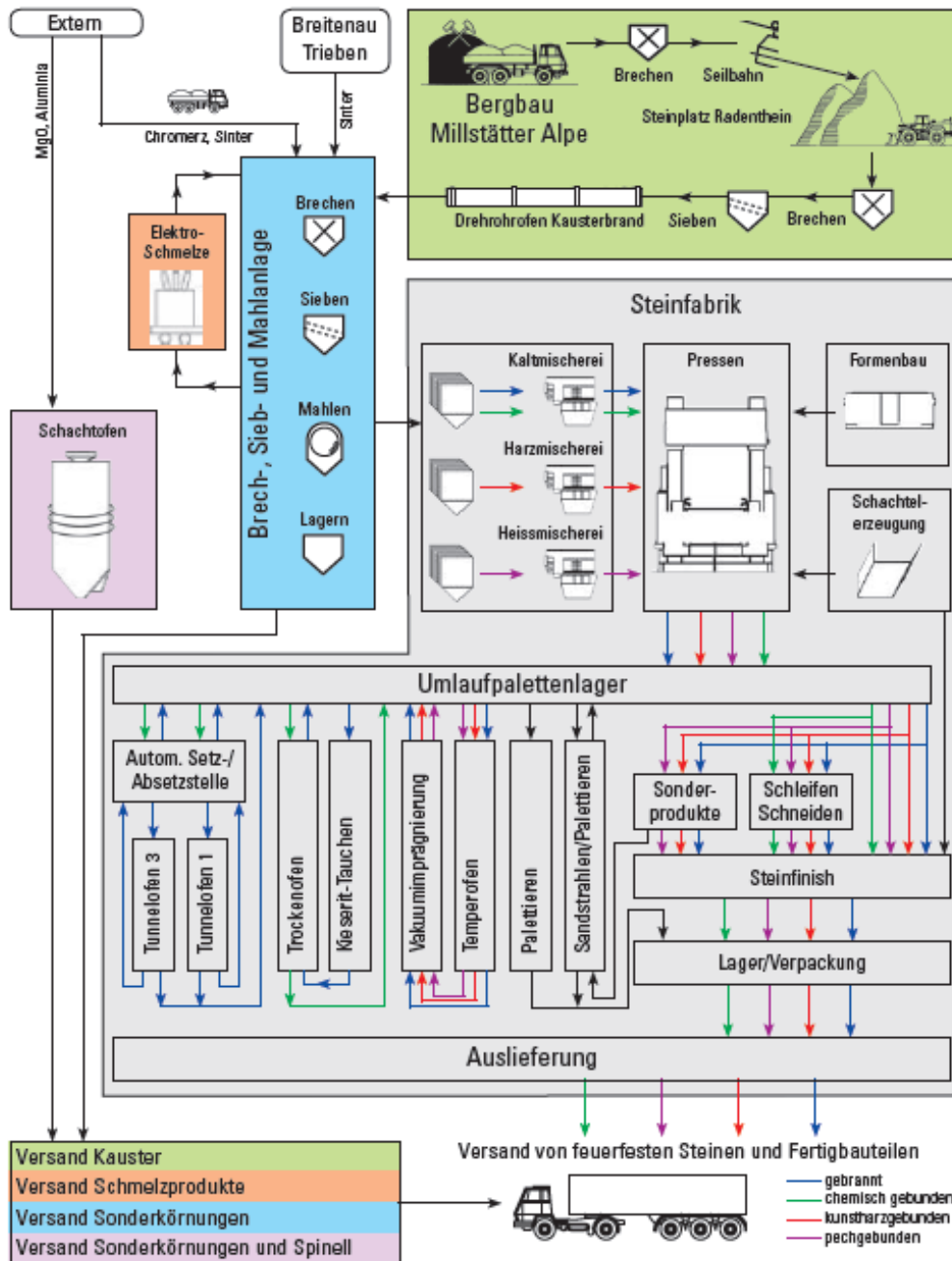


Abbildung 1: Flussdiagramm durch das Werk Radenthein [7]

Der komplexe Zusammenhang der einzelnen Fertigungsschritte, vor allem in der Steinfabrik, lässt sich auf die strategische Ausrichtung des Standorts auf Spezialprodukte und –formate zurückführen, die oft in kleinen Losgrößen von Kunden nachgefragt werden. Bis zu 20.000 Einzelartikel, deren Losgröße zu 75 Prozent bei unter 200 Steinen liegt, können gefertigt werden.

Im Bergbau werden untertägig jährlich rund 80.000 Tonnen Rohmagnesit aus der Millstätter Alm gefördert. Die Lagerstätte erstreckt sich auf einer Länge von 600 m und in eine Tiefe von 450 m unter Tage. Die Abbaumethode und weitere Details werden in 3.1.1 beschrieben.

In der Sieb-, Bruch- und Mahlanlage werden die angelieferten Rohstoffe auf den Einsatz in der Steinfabrik vorbereitet. Auch Sonderkörnungen oder Spezialmehle für andere Standorte werden erzeugt. Spezielle Rohstoffe für Sonderanwendungen können in der Elektroschmelze bei über 3000 °C erschmolzen werden. Durch den Energieeintrag von ca. 20.000 kWh je Schmelzblock werden die speziellen Eigenschaften, wie große oder längliche Kristalle, bei Spinellen, Magnesiadolomit oder Kalziumaluminat erreicht. Außerdem können in der E-Schmelze Versuchssorten, die im konzerneigenen Forschungszentrum in Leoben zusammengestellt werden, gefahren werden.

Neben dem Drehrohrofen Baujahr 1912, der in dieser Arbeit genauer betrachtet wird, werden noch ein Schachtofen, zwei Tunnelöfen, ein Temperofen und diverse Trockenöfen in Radenthein betrieben. Der im Drehrohrofen produzierte Kauster wird als Baustoffkauster zum Binden von Dämm- und Sichtplatten und als Futtermittelzuschlagstoff verkauft. Vor allem der Markt beim Futtermittelkauster wächst stark. Im Schachtofen, der Ende der siebziger Jahre als Versuchsofen errichtet wurde, werden heute 20.000 Tonnen Spinelle erzeugt, die einerseits für den Eigenverbrauch verwendet und andererseits an andere Industrien verkauft werden.

In der Steinfabrik werden jährlich rund 80.000 Tonnen feuerfeste Steine produziert. Zwei Drittel davon werden gebrannt, also keramisch gebunden, das andere Drittel wird mit Pech oder Kunstharz gebunden. Etwa die Hälfte der erzeugten Steine wird zusätzlich noch weiterbearbeitet, um den Kundenansprüchen in Hinsicht auf Festigkeit und Belastbarkeit nachzukommen. Weitere 12.500 Tonnen Steine werden zu Fertigbauteilen zusammengebaut.

Die Produktion der Feuerfeststeine beginnt mit dem Mischen der Pressmassen entsprechend entwickelten Rezepten. Dabei wird besonders auch die Mischzeit, Mischtemperatur und Mischfolge geachtet. Anschließend werden die Steine mit bis 2.200 Tonnen Presskraft zu Steinen geformt. Die Pressformen hierfür stellt die Abteilung Formenbau in Radenthein her. Jedes Monat werden bis zu 20 Neuförmungen angefertigt, da sich die Kundenanforderungen ständig ändern.

Die gepressten Steine, die keramisch gebunden werden, kommen in zwei etwa 140 m lange Tunnelöfen, die einen Tagesdurchsatz von ca. 160 Tonnen haben und werden dort bei 1.500 °C bis 1.800°C, je nach Sorte, gebrannt. Dieser Vorgang dauert inklusive Aufheiz- und Abkühlphase vier bis fünf Tage. Ist ein Stein kohlenstoffgebunden, wird er, um die entsprechende Steinfestigkeit zu erhalten, bei einer Temperatur von ungefähr 300°C getempert. [7]

2.2 Prozess der Kausterherstellung

In diesem Kapitel sollen kurz einige interessante und für das Verständnis der Kausterproduktion wichtige Zusammenhänge erklärt werden, die auch maßgeblich auf Qualität des erzeugten Produkts Einfluss haben.

2.2.1 Wissenswertes über die Kalzination von Magnesit

Magnesit (MgCO_3) wird ähnlich dem Kalk (CaCO_3) durch thermische Beaufschlagung schrittweise entsäuert. Dieser Vorgang wird Kalzination genannt und findet ab ca. 300 °C (die Gibbsenergie ist ab dieser Temperatur negativ) statt. Ab 500 °C weist die Reaktion eine annehmbare Reaktionsgeschwindigkeit auf und hat eine Reaktionsenthalpie von 1298 kJ/kg MgCO_3 . [5, S. 267-270]

Beim Kalzinieren wird CO_2 aus dem Stein ausgetrieben. Das geht mit einer Gewichtsreduktion durch den Gasaustritt einher. Dadurch verliert das Korn fast die Hälfte seines Gewichts und wird kleiner bzw. sehr porös. Abbildung 2 verdeutlicht die Korngrößenreduktion.

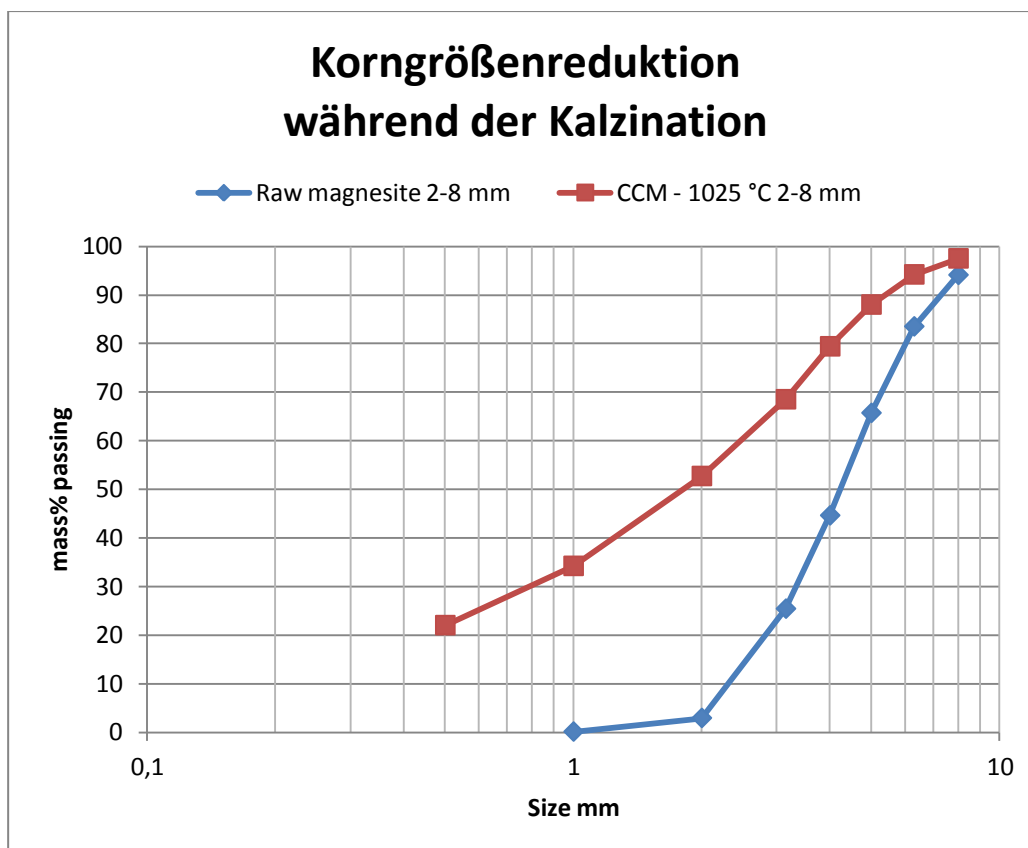


Abbildung 2: Kornverkleinerung beim Brand des Korns bei 1025 °C

Aus der Siebanalyse ist zu erkennen, dass vor dem Kalzinieren 25 Prozent der Körner kleiner 3mm und danach fast 70 Prozent kleiner 3mm waren. Wie oben beschrieben reduziert sich nicht nur die Korngröße, sondern dementsprechend auch die Masse der aufgegeben Probe.

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer thermogravimetrischen Analyse für Magnesit mit geringen Anteilen an Kalk, Kieselsäure, Aluminiumoxid und Eisenoxid.

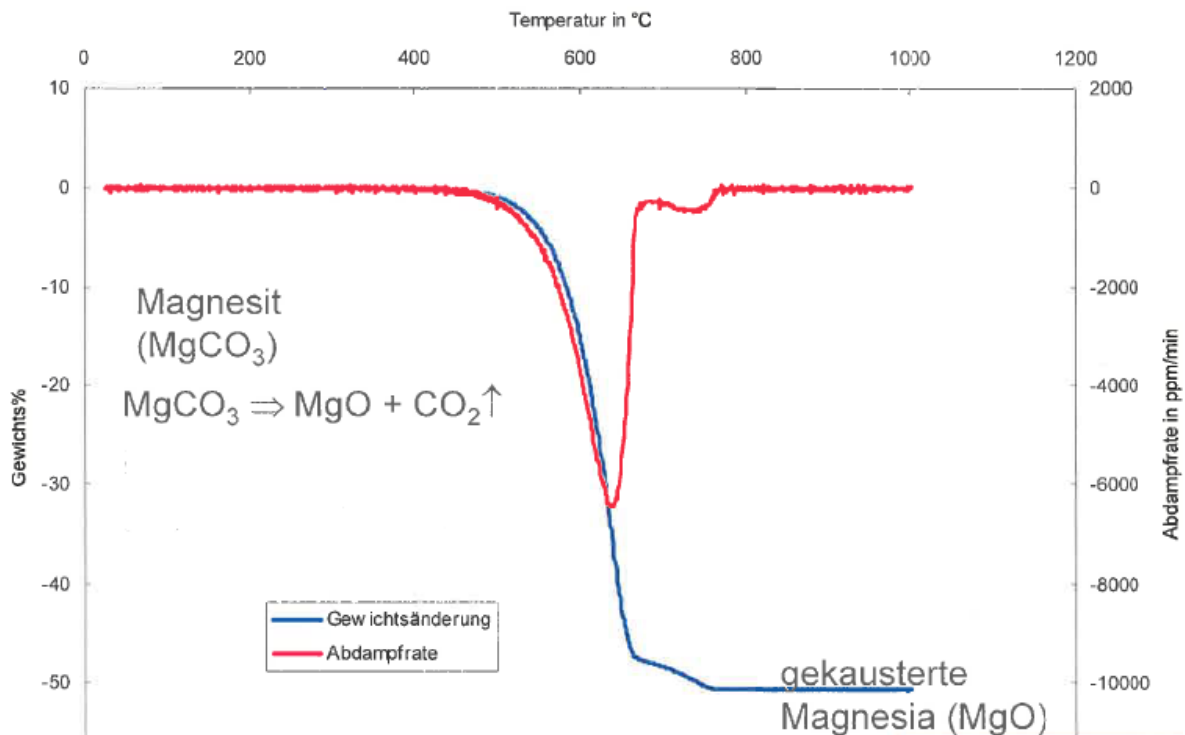


Abbildung 3: Masseverlust beim Kalzinieren

Bei konstanter Heizrate von 5 K/min wurde die Probe im Labor im Forschungszentrum in Leoben aufgeheizt und das aktuelle Gewicht automatisch bestimmt. Die Gesamtgewichtsreduktion beläuft sich auf ungefähr 50 Prozent, was sich auch in den Molmassenverhältnis widerspiegelt. Der zweite Peak bei der Abdampfrate ist auf die Entsäuerung des Kalziumcarbonats zurückzuführen. Dieser ist wegen des geringen Anteils von nur ca. drei Gewichtprozent Kalk in der Probe nicht sehr signifikant und trägt nur wenig zur Gesamtgewichtsreduktion bei.

Auch die spezifische Oberfläche der Körner verändert sich mit dem Austritt des gasförmigen Kohlenstoffdioxids und steigt stark an. Abbildung 4 vermittelt einen Eindruck, wie sich die spezifische Oberfläche der Körner verändert.

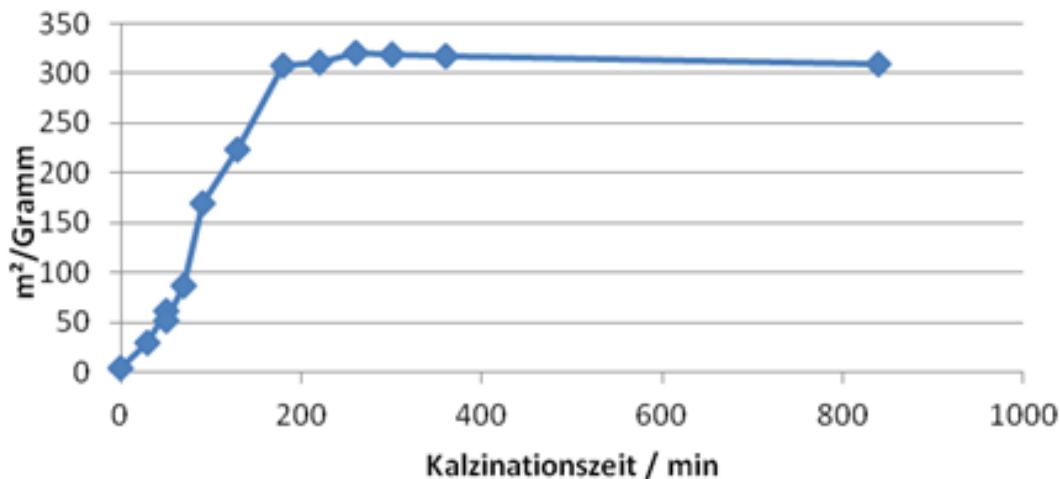


Abbildung 4: Änderung der spezifischen Oberfläche von Kauster

Der Anstieg der spezifischen Oberfläche ist auf das gestiegene Porenvolumen der Körner zurückzuführen und ist besonders wichtig für die Reaktivität des Kausters beim Abbinden.

2.2.2 Qualitätsparameter der Kaustersorten

Da Kauster in verschiedenen Branchen angewandt wird, unterscheiden sich dementsprechend auch die Qualitätsansprüche der Kunden. Man kann die hergestellten Kaustersorten aber in die zwei Produktgruppen, Baustoffkauster und Futtermittelkauster, einordnen.

Baustoffkauster wird vor allem bei der Herstellung von Holzfaserplatten als Bindemittel (RKM – H) und bei der Erzeugung von feuerbeständigen Türen als Füllstoff (RKM – P) verwendet. Hier ist es den Kunden wichtig, dass der Kauster die in Tabelle 1 angeführten Spezifikationen erfüllt.

Tabelle 1: Produkthanforderungen Baustoffkauster

Spezifikationen Baustoffkauster							
Sorte	MgO [w-%]	Glühverlust. [w-%]	CaO [w-%]	SiO ₂ [w-%]	Fe ₂ O ₃ [w-%]	Al ₂ O ₃ [w-%]	Korngröße [mm]
RKM – H	min 73	15	4,0	4,0	3,0	1,0	D90 = 0,032
RKM – P	min 70	14	4,0	7,0	3,0	1,0	D80 = 0,032

Zusätzlich werden vom Kunden noch die Parameter Reaktionszeit und Reaktionstemperatur überprüft. Diese Werte sind für das Abbindeverhalten des Kausters bei der nachgeschalteten kundenseitigen Produktion wichtig. Zahlenwerte hierfür können auf Grund von Betriebsgeheimnissen nicht genannt werden.

Futtermittelkauster wird für die Weiterverarbeitung zu Futtermittel hergestellt und unterliegt besonders strengen Qualitätskontrollen. Zum einen dürfen keinerlei Verunreinigungen im Produkt enthalten sein, die in irgendeiner Form die Tiere oder daraus gewonnene Erzeugnisse beeinträchtigen. Andererseits sollte das Korn eine runde Form haben, damit sich die Tiere beim Kauen die Zähne nicht zu stark abnutzen.

Tabelle 2: Produkthanforderungen Futtermittelkauster

Spezifikationen Futtermittelkauster							
Sorte	MgO [w-%]	Glühverlust. [w-%]	CaO [w-%]	SiO ₂ [w-%]	Fe ₂ O ₃ [w-%]	Al ₂ O ₃ [w-%]	Korngröße [mm]
RKM83 fein	min 83	3	4,5	4,1	4,0	0,8	0 – 0,1
RKM83 grob	min 83	2	5,0	5,0	4,0	1,0	0,1 – 1,6

Zusätzlich zu den in Tabelle 2 angeführten Parametern dürfen die Schwermetallgrenzwerte für

- Cadmium (Cd < 2,0 mg/kg),
- Quecksilber (Hg < 0,1 mg/kg),
- Blei (Pb < 10,0 mg/kg),
- Arsen (As < 20,0 mg/kg),
- Fluor (F < 600 mg/kg) und
- Dioxine (PCDD + PCDF < 1,0 ng/kg)

nicht überschritten werden, da es sonst zu Akkumulierung über die Nahrungskette kommen könnte.

2.3 Drehrohrofenprozess

Es soll in diesem Unterkapitel kurz auf die Geschichte, den Aufbau, die Anwendungsgebiete und die Vorgänge im Ofen eingegangen werden.

2.3.1 Geschichte und Aufbau von Drehrohröfen

Der erste Drehrohrofen wurde in Großbritannien 1853 von den Engländern Russel und Elliot gebaut, um im Batchbetrieb Soda zu herzustellen und später auch Erze darin zu rösten. [1] Erst 32 Jahre später patentierte 1885 Ransome, ebenfalls ein Engländer, den kontinuierlich betriebenen Drehrohrofen für die Erzeugung von Zement. [2] Probleme beim Betrieb der Öfen gab es hauptsächlich dadurch, dass sie nicht die optimalen geometrischen Abmessungen hatten, wodurch die benötigte Temperatur, vor allem bei der Zementproduktion, nur schwer erreicht werden konnte. Außerdem konnten sie den

energieeffizienteren Schachttöfen beim spezifischen Energieverbrauch nicht das Wasser reichen. Nach einigen Entwicklungsschritten, vor allem durch die Vereinigten Staaten vorangetrieben, wurden Drehrohröfen immer weiter bis zum heutigen Stand verbessert. [3]

Die Bauart von Drehrohröfen ist in zwei große Bereiche unterteilt, je nachdem ob das Gut mit dem Abgas in Berührung kommen darf. Daher unterscheidet man

- indirekt beheizte Drehrohröfen und
- direkt beheizte Drehrohröfen.

Bei der indirekten Befuerung wird der Ofenmantel meist von heißen Gasen, wie Verbrennungsgasen oder Satttdampf, umströmt oder der Ofen ist mit zum Beispiel Rohrbündeln ausgestattet in denen sich Dampf befindet. Der Wärmeübergang auf das zu behandelnde Gut ist in beiden Fällen nicht besonders gut, wodurch nur bei Prozessen, die keine hohe Temperatur benötigen, indirekt beheizt wird.

Die direkte Feuerung ist weitaus häufiger verbreitet. Der Brenner ragt hierbei in das Innere des Ofens und die Verbrennungsgase strömen über das Schüttgut hinweg und erwärmen es durch verschiedene Wärmeübergangsmechanismen, wie aus Abbildung 5 zu entnehmen.

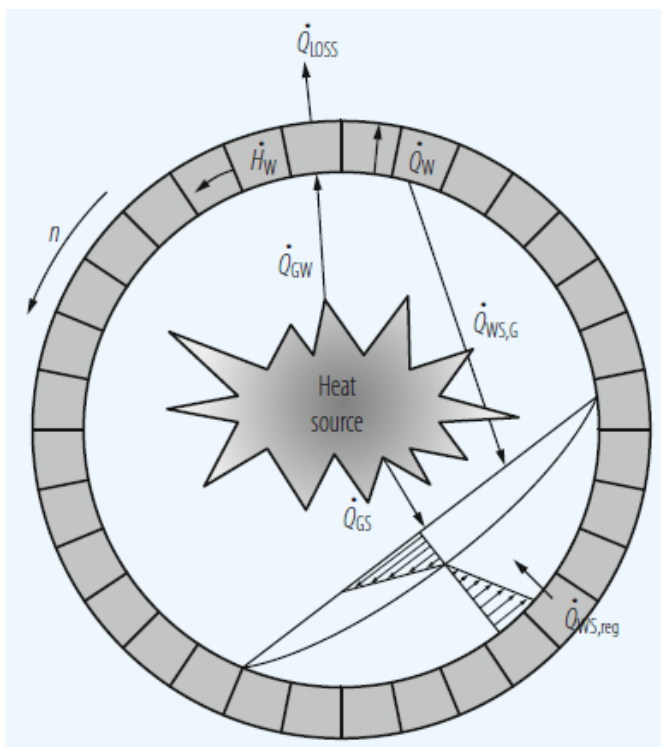


Abbildung 5: Wärmeübertragungsmechanismen in einem direkt beheizten Drehrohr [4]

Als Wärmequelle (Heat Source) kann beispielsweise eine Gas- oder Erdölflamme dienen. Vom Verbrennungsgas geht die Wärme durch Strahlung einerseits in das Gut und andererseits auf die Wand des Drehrohrs über. Die Wand gibt die Energie wiederum dann über Strahlung oder Konvektion wieder an das Schüttgut ab. Ein Teil der eingebrachten

Energie tritt durch die feuerfeste Auskleidung hindurch und wird dort in Form von Strahlung und Konvektion als Verlustwärme abgegeben.

Abbildung 6 veranschaulicht den Aufbau eines Drehrohrofens, ähnlich dem in Radenthein verwendeten Modell. Der Einlass und die Dosiervorrichtung dienen zum Steuern der Aufgabemenge des Ofens. Am oberen und unteren Ende ist der Zylinder jeweils mit einem Ofenkopf versehen, der als Abdichtung gegen die umgebende Atmosphäre dient. In diesem Bereich ist auch die Zustellung des Ofens wie ein Stauring ausgeführt, um ein zu schnelles Austreten aus dem Ofen bzw. einen Rückfluss bei der Aufgabe des Materials zu verhindern.

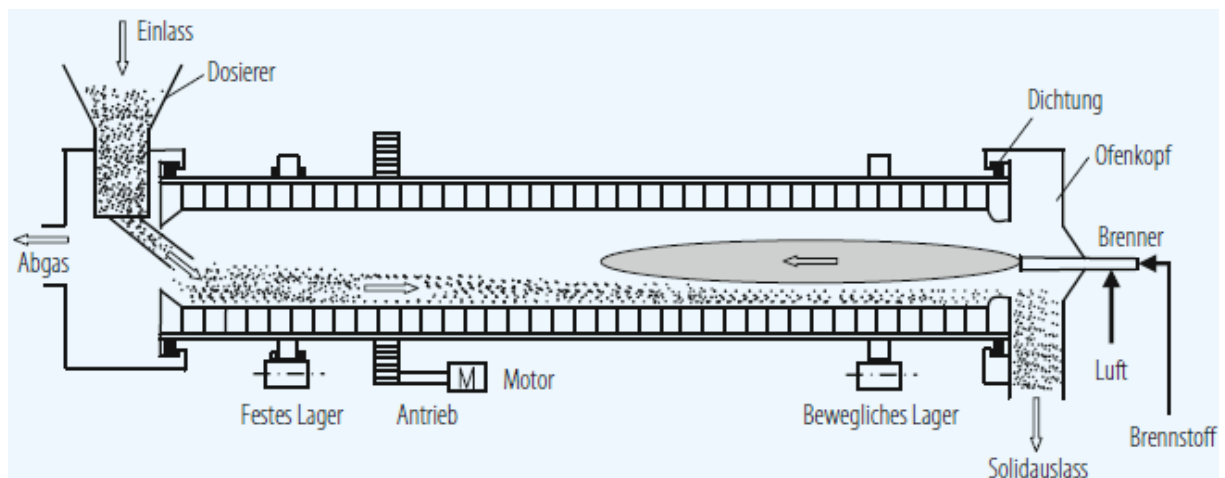


Abbildung 6: Schema eines direkt beheizten Drehrohrofens [4]

2.3.2 Anwendungsgebiete von Drehrohröfen

Drehrohröfen finden in vielen verschiedenen Industrien in unterschiedlichen Temperaturbereichen Anwendung. Die nachfolgende Tabelle 3 gibt einen Überblick über Prozesse bei denen Drehrohröfen zum Einsatz kommen.

Tabelle 3: Anwendungsgebiete von Drehrohröfen [4]

Anwendungsgebiete von Drehrohröfen		
Prozesse	Beispiel	Temperaturbereich [°C]
Trocknung	Pflanzliche Stoffe (Rübenschnitzel) Schlämme (Kohleschlamm)	60 – 300
Pyrolyse	Pflanzliche Stoffe (Biomasse)	200 – 600
Vergasung	Organische Stoffe in Böden	600 – 900
Dehydration	Gips (Calciumsulfatdihydrat)	300 – 700
Reduktion	Erze (Nickelerz)	600 – 1200
Röstung	Erze Wolframcarbid	bis 1300 750 – 850
Kalzination	Kalkstein	1200 – 1300
	Magnesit	600 – 1000
	Dolomit	1200 – 1700
	Soda	300 – 600
Sinterung	Zement Magnesit	1450 – 1500 bis 2100
Verbrennung	Sondermüll	1100-1200

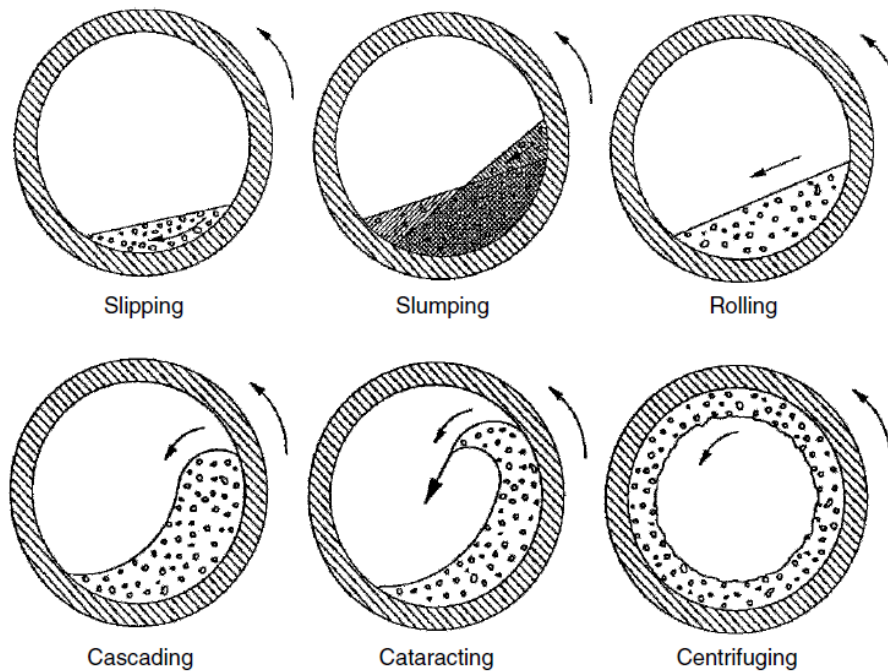
2.3.3 Transportvorgänge im Ofen

Der Materialtransport im Ofen wird durch diverse Vorgänge, konstruktive Eigenschaften und die aktuellen Betriebsbedingungen beeinflusst. Dadurch bewegt sich das Schüttgut schneller oder langsamer, mit mehr oder weniger Abrieb durch den Ofen, was zu unterschiedlichen Verweilzeiten, verschiedenem Materialdurchsatz und vielem mehr führt. Einige wichtige Merkmale für die Transportvorgänge in Drehrohröfen sind

- Durchmesser des Ofens,
- Länge des Ofens,
- Vorhandensein/Ausführung von Hubschaufeln,
- Korngrößenverteilung des Materials,
- dynamischer Schüttwinkel des Guts,
- Drehzahl des Ofens und
- der Füllungsgrad des Ofens.

Vor allem der Durchmesser und die Drehzahl des Ofens sind wichtig für die Bewegungsform des Schüttguts im Ofen (Quertransport), die wichtig für den Wärmeübergang von der

Wärmequelle ins Gut ist. Die dimensionslose Froudezahl lässt eine Einordnung der Bettbewegung in die in Abbildung 7 dargestellten Bereiche zu. [5, S. 16-31]



Mode	$Fr(=\omega^2 R/g)$ at $\phi = 35^\circ$
1. Slipping	$Fr < 1.0 \times 10^{-5}$
2. Slumping	$1.0 \times 10^{-5} < Fr < 0.3 \times 10^{-3}$
3. Rolling	$0.5 \times 10^{-3} < Fr < 0.2 \times 10^{-1}$
4. Cascading	$0.4 \times 10^{-1} < Fr < 0.8 \times 10^{-1}$
5. Cataracting	$0.9 \times 10^1 < Fr < 1$
6. Centrifuging	$Fr > 1.0$

Abbildung 7: unterschiedliche Bettbewegungen [5, S. 16-31]

Befindet man sich im Slipping oder Slumping Bereich ist die Bettoberfläche im Gegensatz zum Rolling oder Cascading eher gering, wodurch sich auch der Wärmeübergang verschlechtert, da nicht so viel Austauschfläche zur Verfügung steht.

3 Erfassung und Auswertung der Ist-Situation

Die Erfassung der aktuellen Ist-Situation und Auswertung der daraus resultierenden Daten ist bei einem Aggregat, das vor mehr als hundert Jahren entworfen und ausgelegt wurde, von besonders großer Bedeutung. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen Rückschlüsse auf die ursprüngliche Konzeption des Aggregats zu, woraus man mögliche Verbesserungspotentiale in der Prozessführung erarbeiten kann.

3.1 Darstellung des Prozesses inklusive vor und nachgeschalteter Schritte

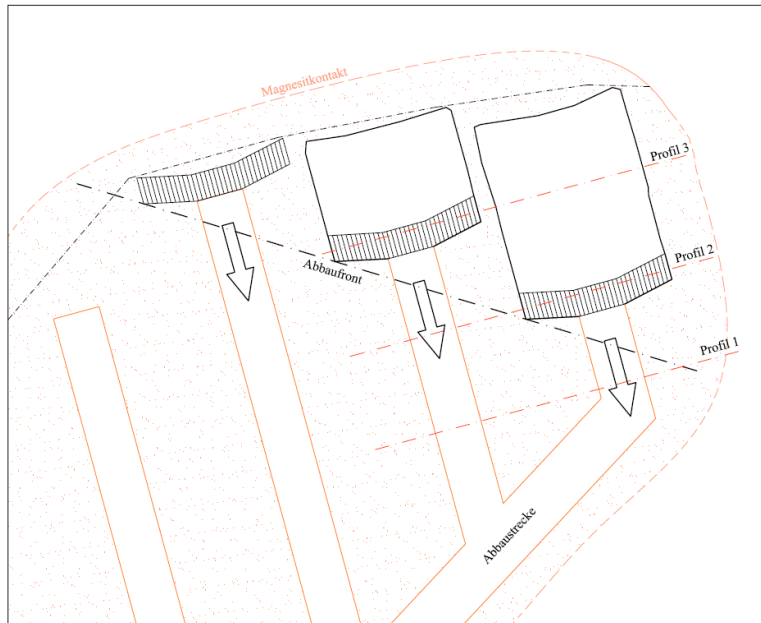
Der Prozess der Kausterherstellung ist am Standort der RHI – AG in Radenthein schon gleich alt wie das Werk selbst. Seit 1912 wird der Rotierofen I, kurz RO I, wie der Drehrohrföfen in Radenthein noch genannt wird, mit Rohmagnesit beschickt um daraus kaustisch gebrannten Magnesit herzustellen. Wenn sich auch das Produktionsprogramm gewandelt hat, so ist der Prozess an sich doch immer derselbe geblieben und wird im Folgenden detailliert beschrieben.

3.1.1 Rohsteinabbau

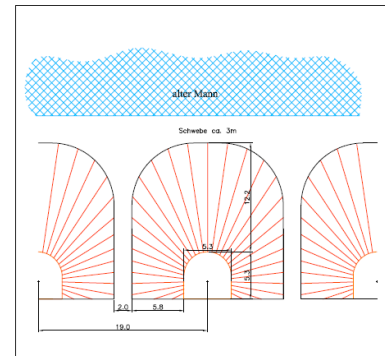
Der Rohmagnesit, $MgCO_3$, wird im werkseigenen Bergbau auf der Millstätter-Alpe untertägig abgebaut und mittels Materialseilbahn direkt in das im Tal gelegene Werk transportiert. Früher erfolgte der Abbau des Magnesits noch obertägig, was aber auf Grund der immer größer werdenden Abraumverhältnis und der schlechter werdenden Qualität des Rohmagnesits Schritt für Schritt eingestellt wurde. Die Betriebsleitung hat sich in den 1970er Jahren entschieden den Tagebau komplett einzustellen und nur mehr untertägig zu fördern. Das heute in der Grube angewandte Abbaufahren ist der Teilsohlenbruchbau.

Bei dieser Methode wird die Lagerstätte scheibenweise, in Teilsohlen gegliedert, von oben nach unten abgebaut. Im ersten Schritt werden die parallelen Abbaustrecken bis an die Lagerstättengrenzen vorangetrieben. Anschließend werden die Abbaustrecken durch Herstellung eines Schlitzes aufgeweitet. Durch Sprengung der fächerförmigen Produktionsbohrlöcher wird die Weitung hergestellt und der Magnesit gewonnen. In Abbildung 8 zeigt das Schema des Abbaus.

Abbauschema Grundriss



Bohrschema Fächer




 RHI Völkner-Planen GmbH & Co. KG		Magnesitbergbau Millstätteralpe RADENTHEIN <small>Geplantes Bergbauunternehmen, 2013 bis 2014 nach: § 10 Abs. 1 Z. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100</small>	Nr. Abbauschema BB_R
MARKSCHNEIDER Ing.-Büro Marktstraße 1 89073 Ulm		Abbauschema, Bohrschema Südfeld, Mittelfeld	Blatt 1/1
Name: Markschneider Stand: Nov. 2013 Gezeichnet: [unleserlich]			

Abbildung 8: Teilsohlen-Bruchbau Ablaufschema

Ist die jeweilige Weitung ausgeerzt, wird sie zum Einsturz gebracht. Das Hauwerk wird mittels ferngesteuertem Radlader auf Schwerlast – LKW's geladen, mit diesen Obertrage transportiert und in einen Sturzbunker abgekippt. Anschließend wird der Magnesit in einer zweistufigen Durchlaufzerkleinerung mit einem Backenbrecher und einem Kreiselbrecher zerkleinert und zu den Seilbahnbunkern gefördert. Dort wird der Magnesit nach Qualität getrennt für den Weitertransport mittels Seilbahn zwischengelagert. Abbildung 9 fasst den Ablauf im Bergbau zusammen und gibt einen groben Überblick der gefördert Menge.

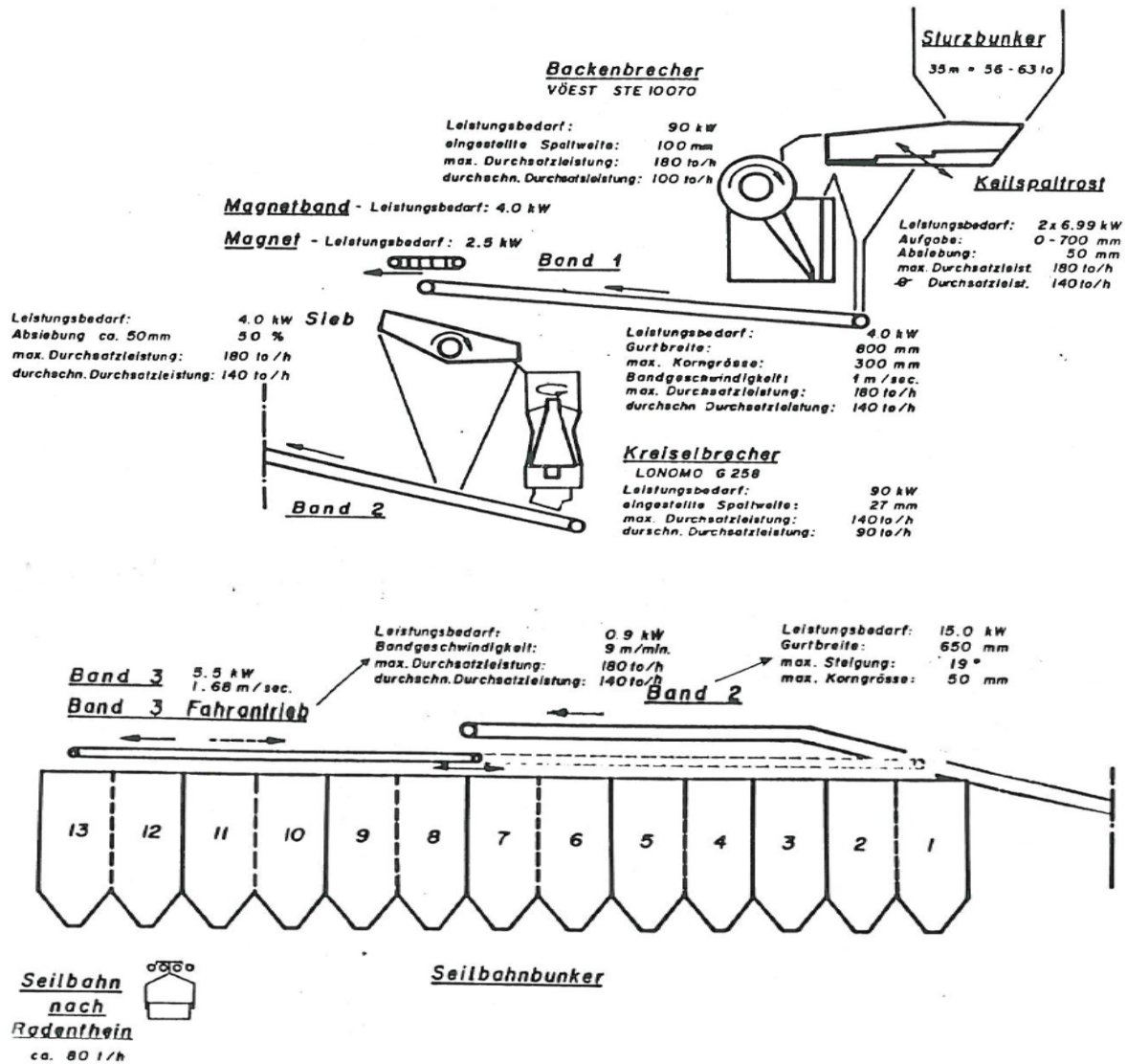


Abbildung 9: Fließbild Rohmagnesitaufbereitung im Bergbau

Die Materialseilbahn nach Radenthein überwindet 800 Höhenmeter ins Tal und kann nach einer kurzen Anfahrphase sogar Strom erzeugen, der durch einen Generator gewonnen wird. Ungefähr 80 t/h Material werden so zum Steinplatz ins Werk transportiert, wo die Seilbahnwagen mittels Hampelmännern, die direkt am Seil angebracht sind, entleert werden.

3.1.2 Steinplatz und Rohmagnesitzerkleinerung

Nach der Anlieferung des Rohsteins aus dem Bergbau wird dieser entsprechend den Qualitäten sortenrein für die Zerkleinerung zwischengelagert. Des Weiteren befinden sich die bereits aufbereiteten Fraktionen, wiederum sortenrein und zusätzlich nach Korngrößenbereichen getrennt gelagert, am Steinplatz. Abbildung 10 zeigt den Steinplatz und einen am Seil hängenden Hampelmann zum Umkippen der Seilbahnwagen. Aktuell wird der Steinplatz saniert, um ein Abrutschen der Stützmauer zu verhindern.



Abbildung 10: Steinplatz; links Rohmagnesit, Mitte und rechts aufbereiteter Magnesit

Der Rohmagnesit wird mittels Radlader in einen Sturzbunker aufgegeben und über ein 6 mm Sieb zu einem Prallbrecher gefördert. Jedes Korn durchläuft den geschlossenen Kreislauf so lange, bis es eine Korngröße kleiner 6 mm erreicht hat. Entweder wird der zerkleinerte Magnesit direkt in den Aufgabebunker des Drehrohrofens gefördert (dies wird als direkte Fahrweise bezeichnet) oder wird in einem weiteren Schritt nass klassiert und so in drei Fraktionen getrennt. Die erste Fraktion ist der Korngrößenbereich von 0,8 – 6 mm, die zweite 0,1 – 0,8 mm und die dritte, die feinsten Körner, befinden sich im Bereich von 0 – 0,1 mm. Der Feinstanteil wird mit Pumpen auf Klärteiche gepumpt und dort zwischengelagert. Momentan wird diese Fraktion nicht weiter für die Herstellung von Produkten genutzt, da der Anteil an Kalk und Kieselsäure hoch ist. Dieser beeinflusst besonders die Eigenschaften des Baustoffkausters negativ. Nachdem die mittlere und die grobe Fraktion nass klassiert wurden, werden sie für ein paar Tage am Steinplatz zwischengelagert, damit der Großteil des Wassers abrinnen kann. Anschließend werden die jeweiligen Qualitäten in einem Schlitzbunker miteinander verschnitten und mittels Förderbändern zum Aufgabebunker des Ofens gefördert. In Abbildung 11 ist der Ablauf der Rohmagnesitzerkleinerung inklusive aller Förderbänder dargestellt.

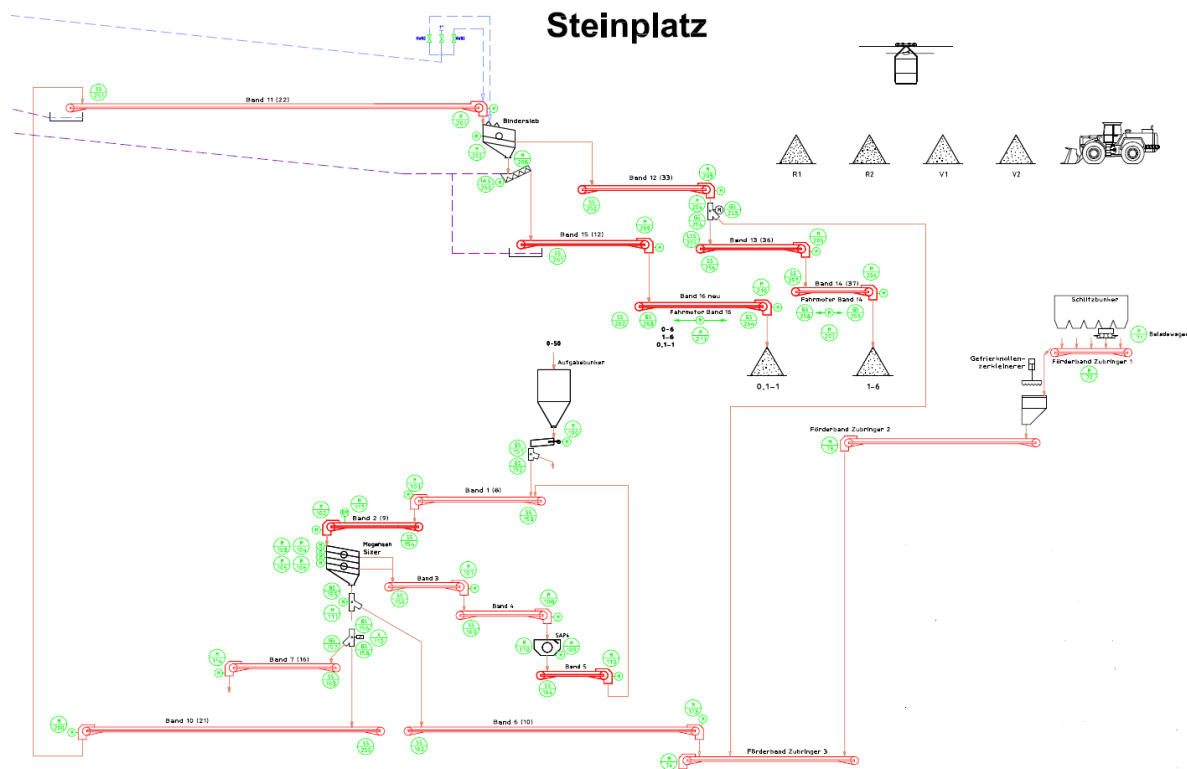


Abbildung 11: Ablaufschema der Rohmagnesitzerkleinerung

3.1.3 Drehrohrföfen und Kausterkühler inklusive Abgasreinigung

Nachdem der Rohmagnesit direkt nach dem Brechen und Sieben, oder verschnitten mit anderen Qualitäten, in den Aufgabebunker gefördert wurde, wird er mittels einer Telleraufgabe kontinuierlich in den Drehrohrföfen aufgegeben. Wie in Abbildung 12 zu erkennen, mündet der Bunker direkt auf den Aufgabeteller. Die aufgegebene Menge kann mit der Drehgeschwindigkeit des Tellers oder mit der Öffnungshöhe des Kragens gesteuert werden. Der Rohstein fällt direkt ohne zwischengeschaltete Klappen oder Ähnlichem in das Drehrohr hinein.



Abbildung 12: Tellerabgabe des Ofens aus zwei Blickwinkeln

Nach einer Ofenreise von zwei bis drei Stunden, je nach Materialaufgabe und produziertem Kauster, fällt das kalzinierte Produkt in einen Rotationskühler mit Hubschaufeln. Zu diesem Zeitpunkt hat das gebrannte Produkt einen Glühverlust von kleiner zwei Prozent bei Futtermittelkauster oder zwischen zehn und vierzehn Prozent bei Baustoffkauster. Beim Übergang vom Drehrohrföfen in den Kühler fällt das fertige Produkt direkt unter der Brennerlanze in den Schacht, der zum Kühlrohr führt. Am Ende des Kühlers sind Siebe eingebaut die bereits eine Vorklassierung des Produktes vornehmen. Anschließend wird der Kauster mit Becherwerken und Schneckenförderern zu einem Taumelsieb weitertransportiert, dort gesiebt und je nach Produkt und Korngröße in Silos zwischengelagert, bevor er weiterverarbeitet wird.

Dort wo der Rohstein aufgegeben wird, tritt zugleich das Rauchgas aus dem Ofen aus und wird zur Rauchgasreinigung weitergeleitet. Diese wurde 1963 bzw. 1972 errichtet und 1982 um einen Schlauchfilter erweitert. Zuerst wird ein Großteil des Staubs mit einer Zyklonbatterie entfernt, dann das Rauchgas über einen Luft-Wasser-Wärmetauscher geleitet und anschließend in einen Schlauchfilter geführt. Die dafür notwendige Druckdifferenz wird von einem Saug-Zug-Ventilator Baujahr 1963 aufgebracht, der gleichzeitig das Reingas über den Kamin ins Freie fördert. Abbildung 13 fasst das Beschriebene in einer Skizze zusammen.

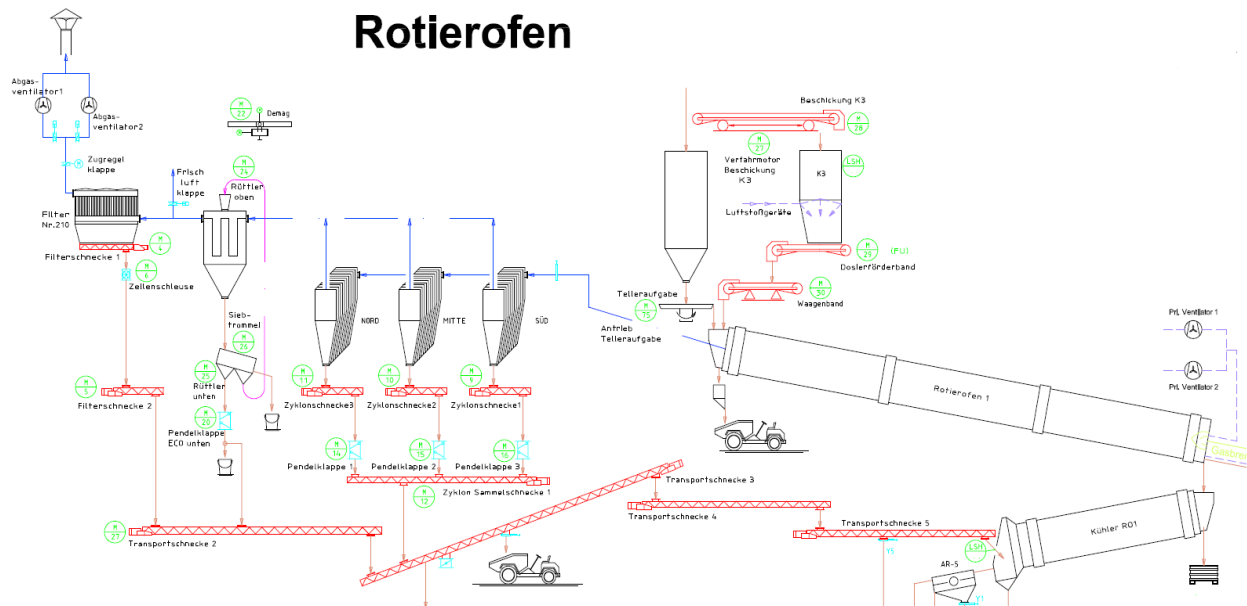


Abbildung 13: Fließbild Drehrohrföfen, Kühler und Rauchgasreinigung

3.1.4 Mahlung und Verladung von Kauster

Der in den Silos gelagerte Kauster wird je nach Produkt und Kundenwunsch weiter verarbeitet. Beim Futtermittelkauster wird beim Verkauf zwischen Grobem und Feinem unterschieden. Das Grobe wird lose, abgesackt in 25 kg Säcken oder in Big-Bags verkauft. Der feine Futtermittelkauster wird, wie auch der Baustoffkauster, vor dem Verkauf gemahlen. Hierzu wird der Kauster mittels pneumatischer Förderung in die Feinstmahanlage geblasen, wo aus einem Vorlagebunker eine Walzenmühle und aus dieser eine Prallmühle beschickt werden. Die Partikel werden mit einem Abweiseradsichter vom ansonsten geschlossenen Kreislauf getrennt und mittels Rundfilter aus dem Luftstrom entfernt. Das fertige Produkt wird wieder in Silos zwischengelagert und anschließend direkt verladen oder, im Fall von feinem Futtermittelkauster, in Säcken zu 25 kg oder in Big-Bags abgesackt.

3.2 Derzeitige Prozessregelung

Der Drehrohrföfen wird derzeit laut Betriebsvorschrift konstant gefahren. Das bedeutet, dass der Anlagenfahrer beim Ofen selbst wenig verstellt und nur je nach Produkt, zeitgleich mit dem Produktwechsel, die Einstellungen ändert.

Aufgabemenge:

Die Aufgabemenge des Ofens hängt stark mit dem jeweils gefahrenen Produkt zusammen. So wird bei der Produktion von Futtermittelkauster (RKM 83), bedingt durch den niedrigen Glühverlust, wesentlich weniger Rohstein aufgegeben, als bei der Produktion von

Baustoffkauster (RKM-H). In Tabelle 4 sind die durchschnittliche Aufgabemenge und die am Häufigsten aufgeführte Korngröße für das jeweilige Produkt aufgelistet.

Tabelle 4: Aufgabemengen und Korngrößen

Durchschnittliche Aufgabe des Drehrohrofens		
	t/h	Korngröße in mm
RKM – 83	8	0 – 6 / 0,8 – 6
RKM – H/ RKM –P	11	0,1 – 0,8

Die Aufgabemenge wird zusätzlich noch mit der Öffnungsweite des Kragens bei der Telleraufgabe gesteuert. Wird der Kragen um einige Zentimeter weiter geöffnet, so fließt deutlich mehr Material aus dem Aufgabebunker heraus. Daher wird der Kragen bei der Produktion von Baustoffkauster weiter geöffnet als beim Futtermittelkauster.

Drehzahl des Ofens:

Die Drehzahl des Drehrohrofens hängt von der Temperatur und dem Glühverlust des produzierten Kausters ab. Wird der Kauster am Ofenauslauf, also beim Übergang vom Ofen zum Kühler, zu kalt, muss der Anlagenfahrer die Aufgabemenge reduzieren und gleichzeitig die Drehzahl des Ofens senken. Tritt hingegen der Fall ein, dass der Kauster zu heiß wird und dadurch der Glühverlust zu stark sinkt, was vor allem beim Baustoffkauster negative Auswirkungen auf die Produkteigenschaften hat, muss die Aufgabemenge gesteigert und die Drehzahl erhöht werden, damit das heiße Material so schnell als möglich aus dem Ofen gebracht wird, um nicht noch weiter zu kalzinieren.

Weitere wichtige Parameter, wie die zugeführte Menge an Verbrennungsluft, die Gasmenge oder der Zug im Ofen, können vom Anlagenfahrer zwar angepasst werden, dürfen aber laut Betriebsvorschrift nur in Anheiz- oder Abkühlphasen und in Notfällen verstellt werden.

Durch das Alter des Ofens und der nachgeschalteten Aggregate sind diese Steuerungsmöglichkeiten ohnehin relativ eingeschränkt, da der Ofenzug zum Beispiel verstellt werden kann, aber durch die große Anzahl an Falschluffquellen, diese Regelmöglichkeit wenig bis gar keine Wirkung zeigt.

3.3 Durchgeführte Messungen

In diesem Kapitel werden die einzelnen Messungen, Messmethoden bzw. Messprinzipien zusammengefasst und die Ergebnisse kurz erläutert.

3.3.1 Temperaturen

Die Überprüfung der bereits vorhandenen Temperaturmessungen sowie die systematische Kontrolle und Erfassung von weiteren wichtigen Prozesstemperaturen ist einerseits für die Erstellung der Energiebilanz besonders wichtig und andererseits können von bestimmten

Temperaturverhältnissen Rückschlüsse auf andere Parameter gezogen werden. Daher wurden entlang des Drehrohrofens inkl. Kühler und der Rauchgasreinigung einige Referenzmessungen und etliche Messungen von zuvor noch nicht erfassten Faktoren durchgeführt.

3.3.1.1 Ermittlung der Ofenaußenmanteltemperatur

Da der Ofenmantel im Bereich des Ofeneinlaufs noch aus 1912 stammt und dieser Bereich des Ofens innen nicht zugestellt ist, treten dort besonders hohe Ofenaußenmanteltemperaturen auf. Da ab einer Festkörpertemperatur von ca. 550 °C auch die Festigkeit von Stahl erhebliche Einbußen zeigt, war die Erstellung eines Temperaturprofils von besonders großer Bedeutung. Des Weiteren dient dieses Profil zur Ermittlung der Wärmeverluste über Strahlung und Konvektion über die Mantelfläche des Drehrohrofens.

Für die lückenlose Erstellung eines Temperaturprofils wäre eine dauerhafte online Aufzeichnung der Manteltemperatur mit Sensoren, die den Messwert direkt übertragen, sehr von Vorteil. Man könnte den Einfluss von Wind, Wetter, Tageszeit oder gerade produziertem Produkt sehr gut nachverfolgen. Am Standort Breitenau der RHI – AG wird diese Messung durchgeführt, um eine dauerhafte Überwachung des Mantels zu gewährleisten. Der Hintergrund hier ist allerdings ein Anderer, da an diesem Standort Sintermagnesia hergestellt wird. Durch die prozessbedingten hohen Temperaturen ist die Manteltemperatur besonders genau zu überwachen, da es bei einem Verschleiß oder beim Herausbrechen der innen anliegenden Mauerung zu gefährlichen hohen Temperaturen des Ofenmantels kommen kann. Diese Problematik ist in Radenthein zwar ebenfalls denkbar, aber auf Grund der im Vergleich niedrigeren Temperaturen beim Kaustern, wie in der Branche das kaustische Brennen von Magnesit bezeichnet wird, eher unwahrscheinlich.

Um eine lückenlose und gleichmäßige Darstellung des Ofenmantels zu erhalten, wurde beim Ofenauslauf beginnend alle 100 Zentimeter ein fixer Messpunkt samt Nummerierung eingezeichnet. So wurde sichergestellt, dass über die gesamte Dauer der Erfassung immer genau am selben Punkt gemessen wird. Zur Ermittlung der Temperatur wurde ein Strahlungsthermometer mit fixem Emissionsfaktor von 0,95 verwendet. An jedem der 40 Messpunkte wurde die Messung für die Dauer von mindestens zwei Minuten durchgeführt, um zu gewährleisten, dass der Ofen eine vollständige Umdrehung ausführt. Die niedrigste und höchste gemessene Temperatur wurden notiert sowie gleichzeitig der Mittelwert der Temperaturmessungen gebildet.

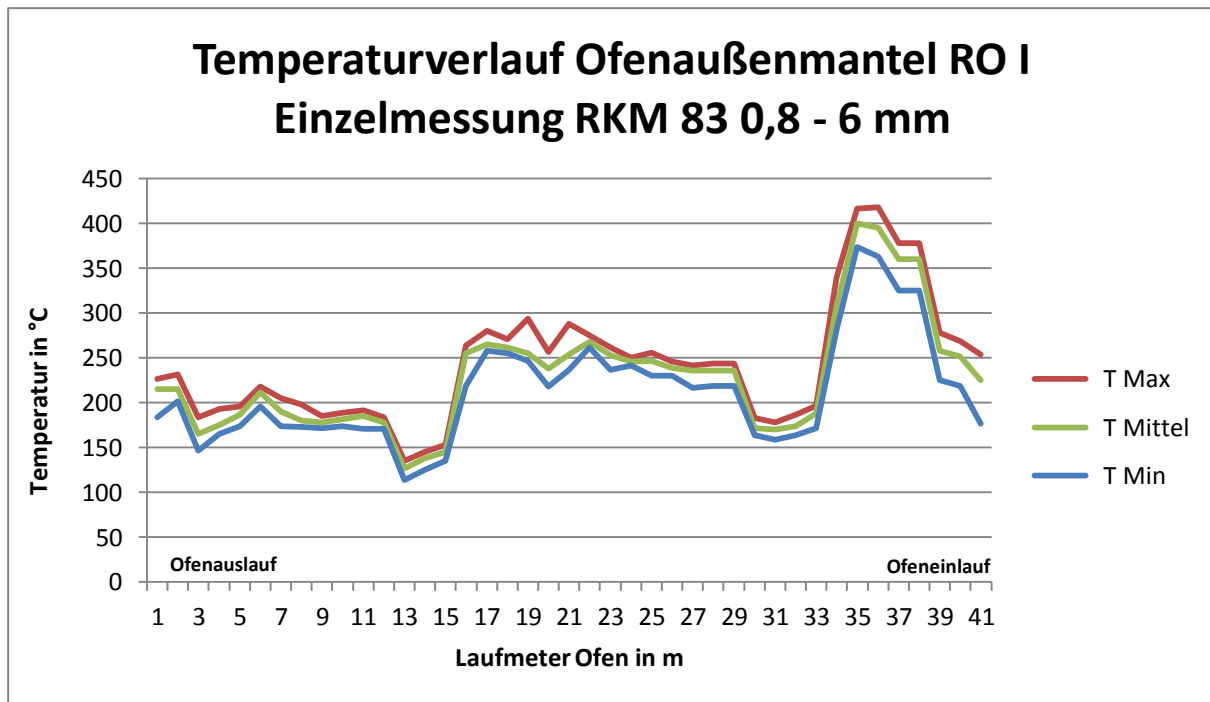


Abbildung 14: Temperaturprofil einer einzelnen Messung

Für jedes der drei meistproduzierten Produkte wurde die Manteltemperatur mindestens fünf Mal gemessen und für jede Messung ein Profil, ähnlich dem der Abbildung 14, erstellt. Es zeigt sich bei dieser Einzelmessung, bei der gerade Futtermittelkauster der Korngröße 0,8 – 6 mm aufgegeben wurde, dass die Temperatur vom Ofenauslauf, wo der heiße Kauster in den Kühler fällt, in Richtung Ofeneinlauf immer weiter ansteigt. Eigentlich sollte bei der Materialaufgabe die Manteloberfläche am Kühlfesten sein, da hier auch die größten Energieabnehmer vorhanden sind. Vergleicht man dieses Temperaturprofil mit dem eines modernen bzw. vollständig ausgemauerten Drehrohrofens, so ist es genau umgekehrt zur Theorie. Es sollte der Ofenauslauf, bei im Gegenstrom geführten Prozessen, immer die heißeste Zone sein. Je näher man der Ofeneinlaufzone kommt, desto kühler sollte der Ofenmantel werden. Da beim Drehrohrofen in Radenthein der obere Teil des Drehrohrofens überhaupt nicht ausgemauert ist, sondern nur aus 25 mm starkem Stahl aus 1912 besteht, ist die Temperatur dementsprechend hoch und man kann nur schwer die Auswirkungen abschätzen, da die Zusammensetzung des Stahls völlig unbekannt ist. Die plötzlichen Ausreißer der Temperatur nach unten sind darauf zurückzuführen, dass sich diese Messpunkte in der Nähe von Laufringen oder beim Zahnkranz des Ofens befinden. Dadurch ist zum einen der Wärmedurchgangswiderstand höher, was den Wärmedurchtritt vermindert, und zum anderen ist die Oberfläche hier deutlich größer, was zu spezifisch kleinerem Wärmeverlust, und damit niedrigerer Temperatur, führt.

Es ist auch sehr interessant, dass sich die Temperatur bei einer Ofenumdrehung oftmals bis zu 100 Grad unterscheidet. Das ist wahrscheinlich auf etwaige Beschädigungen der feuerfesten Masse im Ofen zurückzuführen, oder darauf, dass sich lokal Anbackungen im Ofeninneren bilden, die besonders häufig in der Brennzone auftreten.

Die nachfolgende Abbildung 15 zeigt die Zusammenfassung der Manteltemperaturmessungen für die Futtermittelaufgabe 0,8 – 6 mm aus sechs Einzelmessungen. Der Verlauf der Linien ist denen in Abbildung 14 ähnlich, aber nicht identisch.

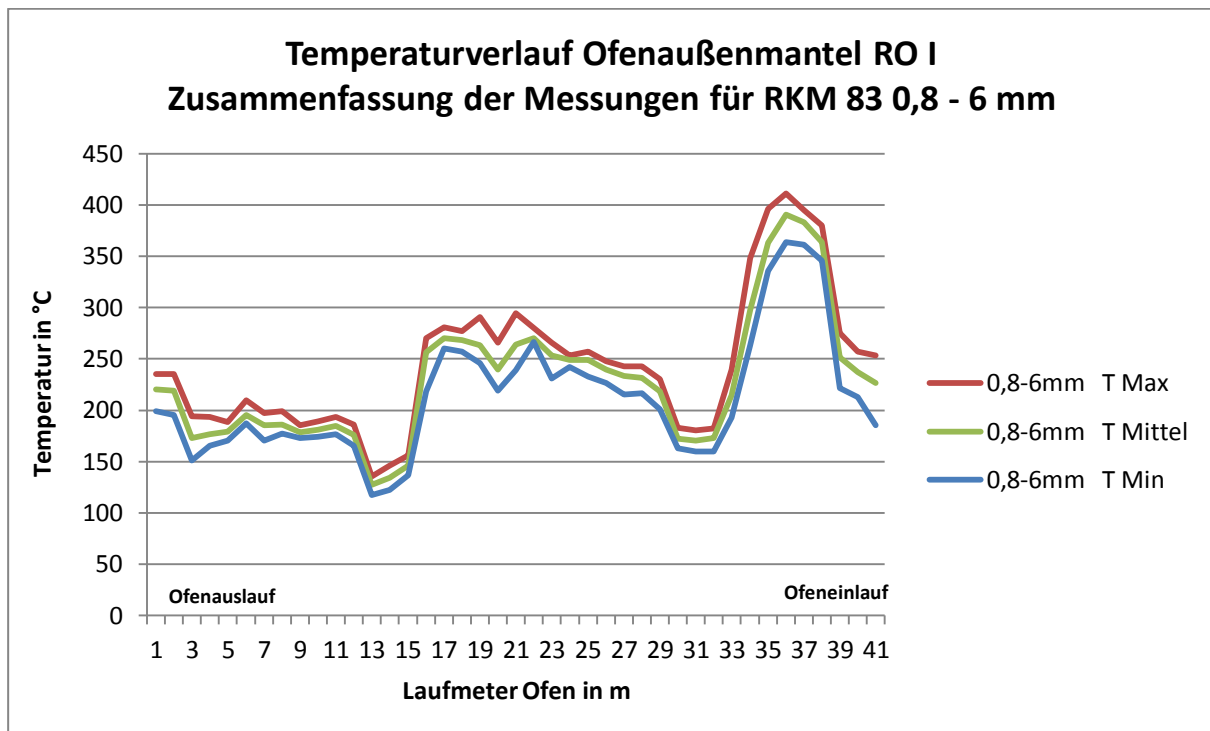


Abbildung 15: Zusammenfassendes Temperaturprofil der Korngrößenfraktion 0,8 – 6 mm

Die mittleren Temperaturen der zusammenfassenden Messungen wurden herangezogen um einen Vergleich der Produkte untereinander durchzuführen. Dabei zeigt sich, wie in Abbildung 16 deutlich zu erkennen, dass es große Unterschiede bei der Manteltemperatur zwischen den einzelnen Produkten gibt. Der Unterschied zeigt sich besonders, wenn man Futtermittel- und Baustoffkauster (RKM – H) miteinander vergleicht. Der Temperaturunterschied ist in der Brennzone relativ gering, wird aber zwischen Laufmeter 15 und 25 etwas größer und erreicht beim Materialeinlauf mit fast 150 °C sein Maximum. Es zeigt sich des Weiteren, dass sich auch bei der Herstellung von Futtermittelkauster je nach Kornaufgabe eine andere Manteltemperatur einstellt. Die Produkte unterscheiden sich nur durch eine etwas feuchtere Rohsteinaufgabe, wie in 3.3.5 näher beschrieben. Die Messungen sind auch konform mit dem empfundenen Temperaturunterschied im Bereich des Ofeneinlaufs. Steht man in der Nähe der Rohsteinaufgabe, wenn gerade Baustoffkauster produziert wird, so kann man sich dem Ofenmantel bis auf einen Meter nähern. Wird allerdings gerade Futtermittelkauster hergestellt, egal mit welcher Aufgabe, so ist es ohne entsprechende Schutzbekleidung nicht möglich für längere Zeit näher als drei Meter vom Ofen entfernt zu stehen.

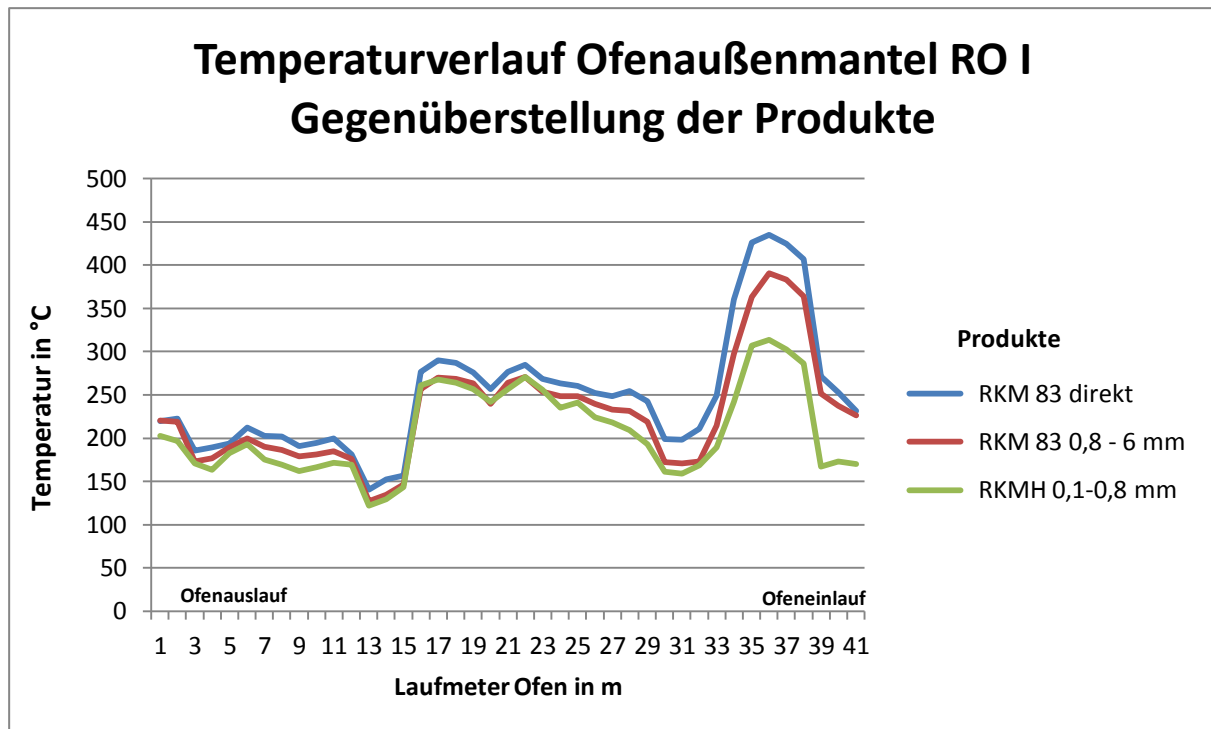


Abbildung 16: Gegenüberstellung Manteltemperaturverlauf der verschiedenen Produkte

Betrachtet man die obige Abbildung und bedenkt, dass der Drehrohrföfen 1912 ursprünglich für die Herstellung von RKM – P konzipiert wurde, erklärt sich die Problematik der hohen Manteltemperatur. RKM – P ist ein, wie man in der Branche sagt, relativ weich kalzinierter Baustoffkauster. Das bedeutet, dass der Glühverlust auf durchschnittlich vierzehn Prozent gehalten wird. Dadurch kann deutlich mehr Material aufgegeben werden, was zu einer deutlichen Abkühlung des Ofeneinlaufs führt.

3.3.1.2 Kühlermanteltemperatur

Die Ermittlung der Kühlermanteltemperatur wurde mittels einer Infrarotkamera mit verstellbarem Emissionsfaktor durchgeführt. Dieser wurde mit 0,9 angenommen und der Rotationskühler an vier Messpunkten vermessen. Abbildung 17 zeigt die folgenden Infrarotbilder: Kühlereinlauf (links oben), Ende des zugestellten Bereichs (rechts oben), Mittelteil des Kühlers (links unten) und Kühlerauslauf (rechts unten).

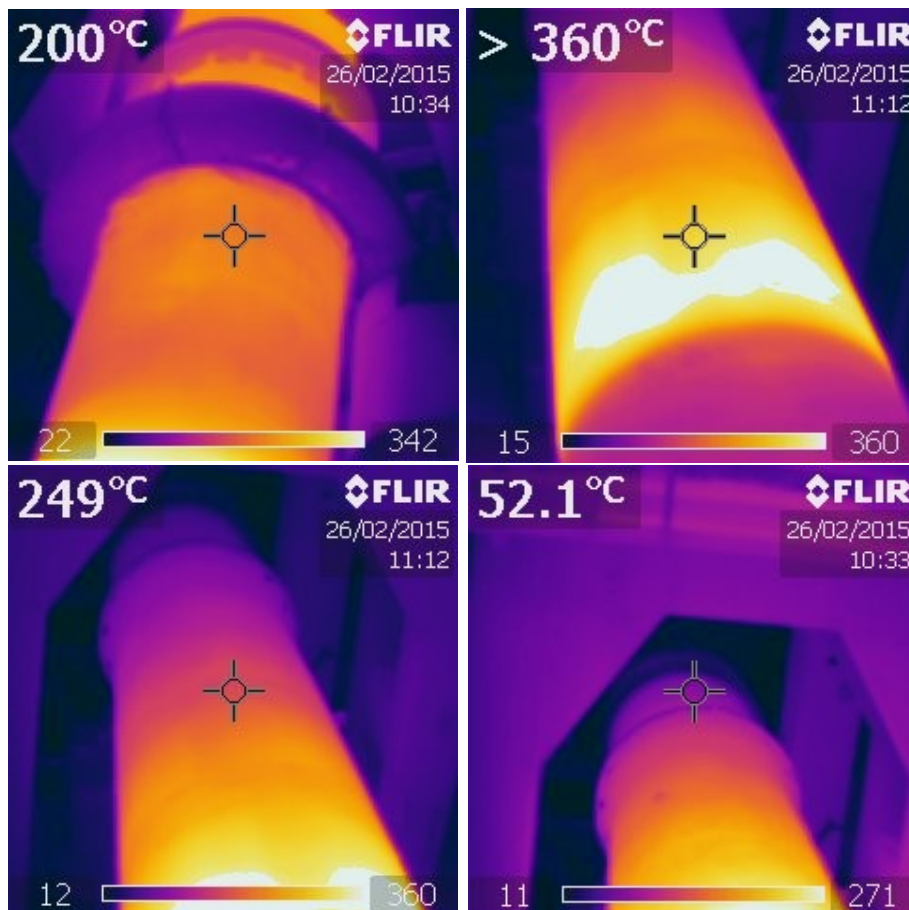


Abbildung 17: Infrarotbilder des Kühlermantels

Es ist eindeutig zu erkennen, dass der Einlaufbereich des Kühlers mit feuerfester Ausmauerung ausgekleidet ist, da hier die Manteltemperatur trotz des noch heißen Kausters auch im Mittel 200 °C nicht überschreitet. Den Übergang vom zugestellten Bereich in den Teil des Kühlers der nur aus Stahl besteht, erkennt man an den weißen Flecken auf den Bildern, da hier die Kamera an die Grenzen des Messbereichs stößt. Eine Überprüfungsmessung ergab in diesem Bereich eine Spitzentemperatur von 385 °C und bestätigt die Annahme, dass der Kauster in diesem Bereich noch sehr heiß ist. Je näher man dem Kühlerauslauf kommt, desto mehr kühlt auch der Mantel des Kühlers ab, was mit den innen aufgeschweißten Hubschaufeln zu erklären ist, die das Material im Kühler mit nach oben nehmen und langsam wieder durch die Luft herunterfallen lassen, wodurch das Material nicht so lange an der Kühlerinnenseite anliegt. Abbildung 18 zeigt wie der Kühler mit Blick in Richtung Einlauf aussieht. Am Kühlerauslauf sind die letzten drei Meter als Siebboden ausgeführt, was eine Vorklassierung des Kausters erlaubt und gleichzeitig bei der Abtrennung von groben Steinen oder Mauerungsteilen hilft.



Abbildung 18: Blick in den Rotationskühler bei einem Wartungsstillstand

Das Ende der Ausmauerung des Ofens und die Hubschaufeln sind in Abbildung 18 deutlich zu erkennen.

3.3.1.3 Feststofftemperaturen

Nicht nur für die Energiebilanz, sondern auch für die Überprüfung der nachgeschalteten Aggregate, sind Temperaturen von Feststoffen von großer Bedeutung. Daher wurde sowohl die Rohsteinaufgabe und die Kaustertemperatur, als auch die Temperatur des anfallenden Staubes im Prozess gemessen.

Rohsteintemperatur:

Diese ist von der Jahreszeit und der Art der Aufgabe abhängig. So kommt es im Winter bei gewaschenem Magnesit häufig vor, dass das aufgegebene Material teilweise komplett durchgefroren ist. Das ist meist der Fall, wenn das frisch gewaschene Material auf einem Haufen gelagert wird und in der Nacht abtrocknen soll. Vor allem der Rand des Haufwerks ist dann bis zum einem Meter hinein durchgefroren, wie Abbildung 19 anschaulich zeigt.



Abbildung 19: Gefrorener aufbereiteter Rohstein am Steinplatz und bei der Tellerabgabe

Es konnte die Temperatur des aufbereiteten Rohsteins mit zahlreichen Messungen von Oktober bis März mit 15 °C bestimmt werden. Die Abweichungen der Messwerte waren teilweise auf Grund einiger kalter Tage im Winter sehr groß, was sich aber mit einigen heißen Tagen im Sommer ziemlich genau aufhebt.

Kaustertemperatur:

Die Ermittlung der Temperatur des Kausters, der direkt aus dem Ofen in den Kühler fällt, gestaltete sich relativ schwierig, da der Zugang nur über das Ofenfenster gefahrlos möglich ist. Hierzu wurde mit einer mit Eisenschienen geschützten Schaufel mehrmals Kauster herausgeschöpft und die Temperatur mittels Ni-Cr-Ni-Fühler öfters hintereinander bestimmt. Es ist besonders wichtig, dass der Kauster vor der Messung nicht zu lange an der Luft liegt, da er sonst merklich abkühlt.

Beim Kühlerauslauf erfolgte die Temperaturmessung ebenfalls mit einem Ni-Cr-Ni-Fühler, der 90 Zentimeter lang ist, um unmittelbar vor dem Austritt des Kausters aus dem Kühlrohr zu messen. Die Tabelle 5 gibt einen Überblick des Temperaturbereichs der einzelnen Produkte.

Tabelle 5: Kaustertemperaturen im Vergleich

Gemittelte Kaustertemperaturen		
	Ofenauslauf	Kühlerauslauf
RKM – 83 direkt	1000 °C	130 °C
RKM – 83 0,8 – 6 mm	850 °C	140 °C
RKM – H	650 °C	150 °C

Staubtemperaturen:

Wie in 3.3.3 zusammengefasst, fallen beim Drehrohrföfen große Mengen an Staub an, die natürlich ein wesentlicher Bestandteil der Energiebilanz sind. Aus diesem Grund wurde die Temperatur des Zyklonstaubes sowie des Filterstaubes gemessen. Für den Zyklonstaub ergibt sich eine Temperatur von 130 °C beim Einblasen in den Ofen bzw. eine

Austrittstemperatur aus dem Zyklon von mindestens 180 °C. Für den Filterstaub wurde eine Austrittstemperatur aus dem Filter von 90 °C gemessen. Beide Werte dürften allerdings etwas höher liegen, da es keine Möglichkeit gibt die Staubtemperatur unmittelbar nach dem Anfall zu messen, weil beide Stäube direkt in Schneckenförderer fallen und weiter transportiert werden.

3.3.1.4 Lufttemperaturen

Die Bestimmung der Temperatur von Verbrennungsluft und Falschluff sind für die Energiebilanz und für die Effizienz des Drehrohrofens von großer Bedeutung. Daher wurde systematisch an möglichst allen Stellen an denen Luft in den Prozess eindringt die Temperatur bestimmt. Aus mehreren Messungen ergaben sich die in Tabelle 6 zusammengefassten Werte.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Temperaturmessungen

Gemittelte Lufttemperaturen	
Messstelle	Temperatur [°C]
Primärwind	65 °C
Falschluff Ofenfenster	15 °C
Falschluff Ofenkopf	40 °C
Falschluff Telleraufgabe	20 °C
Frischluff vor Schlauchfilter	10 °C

Die Messung der Primärlufttemperatur erfolgte über einen Zeitraum von mehr als einem Monat. Hierzu wurde ein batteriebetriebenes Messwertespeichergerät mit einem Ni-Cr-Ni-Temperaturfühler direkt neben der Primärwindleitung angebracht und der Messfühler in der Mitte des aufgewärmten Luftstroms positioniert. Die Luft wird vorgewärmt indem sie unter einer Stahlhaube über dem heißen Ofenmantel mit einem Ventilator abgezogen wird. Abbildung 20 zeigt die bereits 1912 montierte Luftvorwärmung, die mit sechs Stahlseilen bei der Dachkonstruktion fixiert ist.



Abbildung 20: Luftvorwärmung Baujahr 1912

Die Tagesmittelwerte der Primärluft sind in Abbildung 21 zusammengefasst. Es ist deutlich zu erkennen, dass trotz gleichbleibender Luftmenge die Temperatur um einige Grad auf und ab schwankt. Das ist wahrscheinlich auf die nicht eindeutig bestimmbareren Umgebungsfaktoren, wie Wassergehalt oder Temperatur der Umgebungsluft und aber auch Wind, zurückzuführen. Es konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen erzeugtem Produkt und Primärwindtemperatur festgestellt werden.

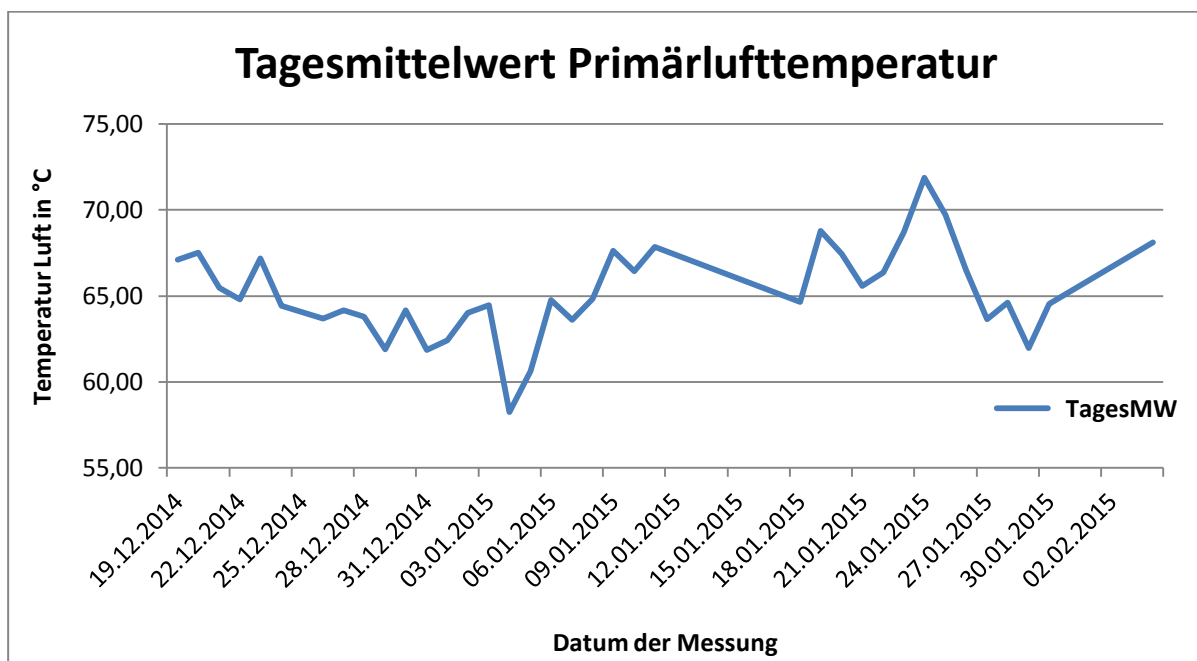


Abbildung 21: Primärlufttemperatur im Tagesmittel

3.3.1.5 Rauchgastemperaturen

Eine genaue Kenntnis über die Rauchgastemperaturen ist besonders wichtig, wenn man die dem Drehrohrofen nachgeschalteten Aggregate genauer betrachtet. Hier spielt vor allem die Auslegung der einzelnen Baukomponenten auf Temperaturfestigkeit eine wesentliche Rolle.

Es war besonders irritierend, dass das Rauchgas am Ofenkopf lediglich 425 °C hatte, da die Temperatur des Ofenmantels sechs Meter vor dem Messpunkt, an dem die besagte Abgastemperatur gemessen wurde, 430 °C hat. Schätzt man über den Wärmedurchgangswiderstand von Stahl und den Energieübergang von Gastemperaturen auf Feststoffe, die Innenraumtemperatur des Rauchgases ab, müsste dieses mindestens 500 °C haben, damit eine derart hohe Mantelaußentemperatur erreicht werden kann. Diese erste Abschätzung und die Annahmen lassen sich durch die lizenzpflichtige Software Simu – Therm 6.5 bestätigen. Das Programm arbeitet mit empirischen Daten und Parametern. Mit der Eingabe der bekannten Werte in die Software und einigen Erfahrungswerten der Fachleute des Konzerns, errechnet sich eine mindestens benötigte Temperatur des Rauchgases von 550°C.

Alle Messwerte, die online in der Drehrohrofenwarte angezeigt werden, wurden nochmals mit Unterstützung des standortinternen Zuständigen für Messtechnik überprüft. Es hat sich gezeigt, dass es unbedingt notwendig war Referenzmessungen durchzuführen und einige Messsonden auszutauschen. In Tabelle 7 sind die Temperatur- und Zugmessungen vor und nach dem Austauschen bzw. neu Kalibrieren gegenübergestellt.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Kontrollmessungen

Übersicht korrigierte bzw. erstmals erfasste Werte		
Messwert	Vorher	Nachher
Abgastemperatur Ofenkopf	390 – 420 °C	490 – 535 °C
Abgastemperatur nach Zyklonen	320 – 340 °C	385 – 405 °C
Zug nach Zyklone	550 Pa	450 Pa
Abgastemperatur nach Wärmetauscher	Unbekannt	105 – 115 °C
Abgastemperatur Kaminaustritt	Unbekannt	94 °C

3.3.2 Luftmengen

Um den Ofen energetisch abzubilden und darzustellen sind die Mengen an Verbrennungsluft sowie Falschluff von großer Bedeutung. Wie aus Kapitel 3.4.1 hervorgeht, beläuft sich die theoretische Mindestverbrennungsluftmenge auf ungefähr 8500 Nm³/h. Bezieht man nun noch mit ein, dass jederzeit eine vollständige Verbrennung stattfinden soll, so muss man mit Verbrennungsluftüberschuss von mindestens zehn Prozent rechnen ($\lambda \geq 1,1$) und es ergibt sich ein neuer Luftbedarf von ungefähr 9300 Nm³/h. Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt wie sich die Verbrennungsluft des Ofens zusammensetzt.

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Luftmengen

Verbrennungsluftzufuhr RO I			
	Ist – Wert [Nm³/h]	Soll – Wert [Nm³/h]	Ideal – Wert [Nm³/h]
Primärluft	2000	2000	800
Sekundärluft aus Kühler (errechnet)	2800	6800	8200
Ofenkopfabdichtung	2200	200	0
Ofenfenster	2000	0	0
Blasleitung	300	300	300
Summe	9300	9300	9300

Der Ist – Wert beschreibt die momentan vorherrschende Situation beim Drehrohrföfen in Radenthein und lässt deutlich erkennen, dass der Großteil der Verbrennungsluft derzeit aus nicht gewünschten Falschlufquellen bezogen wird. Diese sind beim Soll – Wert so weit als möglich abgedichtet. Theoretisch wäre bei Ofenkopf durch die Verwendung einer Labyrinth – Dichtung die Reduktion Null möglich, was realistisch betrachtet bei einem 112 Jahre alten Gerät aber nicht möglich ist. Wenn man es schafft zusätzlich zur Abdichtung des Ofenkopfs noch die Primärluftmenge auf ein laut Brennerhersteller heutzutage übliches Maß von ungefähr sechs bis acht Prozent der Mindestverbrennungsluftmenge zu senken, ergeben sich die aufgelisteten Idealwerte.

Die Daten der Tabelle 8 wurden alle durch separate Messungen ermittelt und beruhen jeweils auf mindestens sechs voneinander unabhängigen Messungen.

Primärluftmenge:

Die Menge der Primärluft wurde unmittelbar nach der Temperaturmessung am selben Messpunkt mittels Flügelrad Strömungssensor FA der Firma Höntzsch durchgeführt. Hierzu wurde der Sensor durch eine zuvor aufgeschweißte Muffe in den Luftstrom so eingeführt, dass sich Einlauf- und Auslaufstrecke der Messstelle wie 2:1 verhalten. Dabei ergab sich der oben genannte Wert von 2000 Nm³/h aus der mittleren Anströmgeschwindigkeit und dem Rohrdurchmesser.

Luftmenge durch die Ofenabdichtung:

Da der Drehrohrofen I in Radenthein einzig auf vier Rollenstationen gelagert ist, kann er sich bei Ofeneinlauf und Ofenauslauf verschieben. Über die Jahrzehnte im Betrieb und die zwischenzeitlichen Stillstände hat sich der Ofen leicht verformt und läuft nicht mehr exakt symmetrisch. Dadurch öffnet und schließt sich der in Abbildung 22 gezeigte Spalt während einer Umdrehung mehrmals. Die Zahlen geben die gemittelte Einstromgeschwindigkeit in m/s an. Der weiße Kreisring stellt die Eintrittsfläche der Falschlufft dar.

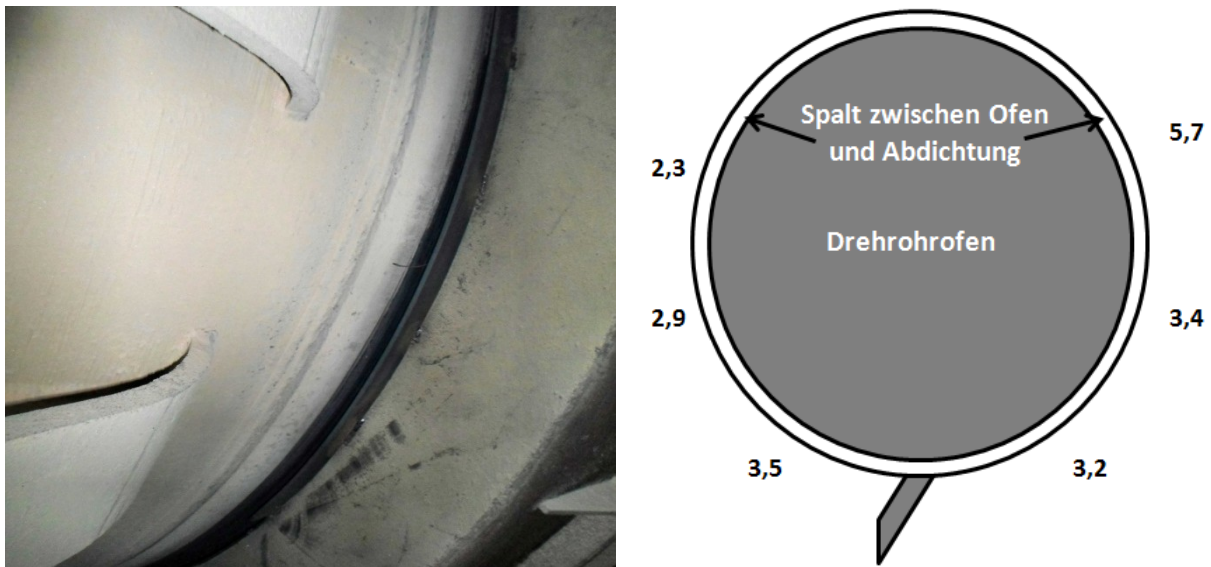


Abbildung 22: Ofenabdichtung und angenommenes Berechnungsschema

Durch den eindeutig zu erkennenden 1,5 – 4 cm breiten Spalt strömt kontinuierlich Luft in die Brennzonen und dient als nicht vorgewärmte Verbrennungsluft. Die Berechnung erfolgte mit der gemittelten Einstromgeschwindigkeit (Messung mittels Flügelrad Strömungssensor FA der Firma Höntzsch) und der mittleren Eintrittsfläche. Auf Grund der Fehlerquellen bei der Messung ergibt sich hier ein geschätzter Messfehler von +/- 15 Prozent.

Luftmenge durch das Ofenfenster

Das Ofenfenster ist derzeit für den Anlagenfahrer der wichtigste Kontrollpunkt für die Steuerung des Ofens, da dieser derzeit nur nach dem Glühverlust des Produkts gesteuert wird. Dort strömt immer konstant Luft in den Drehrohrofen ein. Die Ermittlung der Luftmenge erfolgt ebenfalls mit dem Flügelrad Strömungssensor FA der Firma Höntzsch. Das Ofenfenster und das Schema der Berechnung sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 zu sehen.



Abbildung 23: Ofenfenster (knapp über dem Boden) unterhalb des Brenners

mm		400							
		1	2	3	4	5	6		
270	1	5,6	5,1	4,5	4,7	4,9			
	2	4,6	4,7	4,3	4,5	4,2			
	3	4,5	4,6	4,7	4,5	4,2	4,1	70	
		alle Geschwindigkeiten in m/s						120	mm

Abbildung 24: Messschema beim Ofenfenster mit Längenangaben

Bei der Messung hat sich gezeigt, dass der Ofen die Luft ungleichmäßig, aber im Mittel mit 4,64 m/s ansaugt. Diese Unregelmäßigkeit hängt mit den ungleichmäßigen Zugverhältnissen im Ofen direkt zusammen.

Luftstrom durch die Ofenaufgabe:

Dadurch dass die Tellerlaufbahn des Ofens eine mehr oder weniger offene Verbindung zwischen dem Drehrohrföhrer und der Umgebung schafft, strömt dort, durch den Unterdruck im Ofen bedingt, Umgebungsluft mit geringem Widerstand ein.



Abbildung 25: Tellerlaufbahn im Drehrohrföhrer

Wie in Abbildung 25 zu erkennen, steht die unter der Tellerlaufbahn beginnende Materialrutsche direkt in den Abgaskopf hinein. Da an dieser Stelle auf Grund der Querschnittsverengung große Gasgeschwindigkeiten herrschen und zusätzlich der Strömungswiderstand durch die Tellerlaufbahn geringer ist, als durch die gesamte Länge des Ofens, wird durch dieses Rohr eine Luftmenge von ungefähr 2000 Nm³/h eingesaugt.

Die Messung der einströmenden Falschlufmenge erfolgte durch die Einteilung der Tellerlaufbahn in mehrere, ungefähr gleich große Bereiche. In jedem Bereich wurde die Luftgeschwindigkeit mehrmals gemessen und gemittelt. Abbildung 26 zeigt das Vorgehen beim Ermitteln der Falschlufmenge.

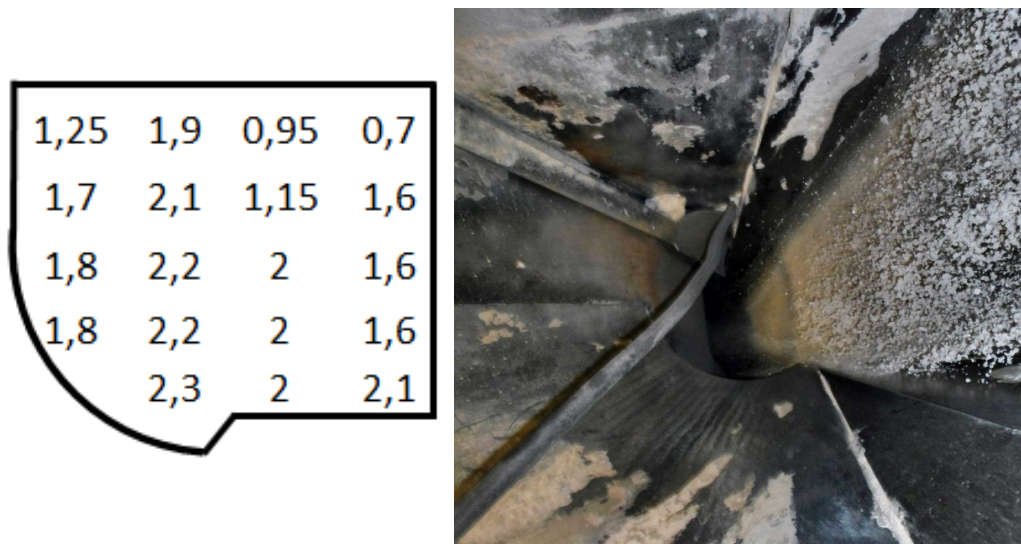


Abbildung 26: Teller Aufgabe als Prinzipskizze und in Realität

Die Querschnittsfläche der Messung ist ungefähr 0,4 m² groß und befindet sich ca. 50 cm unterhalb der Öffnung der Teller Aufgabe. Man erkennt an der Auswertung, dass die im Mittel 25 °C warme Luft vermehrt am linken unteren Rand im Bereich der Materialaufgabe einströmt.

3.3.3 Staubanfall und Glühverlust des Staubs

Die Aufgabe beim Drehrohrföfen in Radenthein liegt mit 0 – 6 mm in einem recht feinen Bereich, wodurch der Staubanfall in der nachgeschalteten Entstaubungsanlage relativ hoch ist. Die nachfolgende Tabelle 9 fasst den Staubanfall in den einzelnen Aggregaten produktspezifisch zusammen.

Tabelle 9: Staubanfall in der Abgasreinigung

Staubanfall in der Abgasreinigung			
	Zyklonstaub [kg]	Filterstaub [kg]	Gesamtanfall [kg]
RKM – 83 direkt	1550	650	2200
RKM – 83 0,8 – 6 mm	1230	470	1700
RKM – H	1620	380	2000

Die Messergebnisse je Produkt basieren auf drei Einzelmessungen. Eine häufigere Bestimmung der Staubmengen ist auf Grund des großen zeitlichen Aufwands von mehr als vier Stunden je Messung nur schwer durchführbar. Des Weiteren ist der Temper (ein Fahrzeug mit fix montierter, kippbarer Schaufel) auch im betrieblichen Ablauf nicht so häufig über längere Zeit verfügbar. Abbildung 27 zeigt den Temper unter der Entnahmestelle für die Stäube.



Abbildung 27: Probenahmestelle für die Staubmengenbestimmung

Bei jeder Messung musste die gesamte Entstaubungsanlage händisch umgeschaltet und gleichzeitig der Drehrohrföfen anders beschickt werden, da der in dieser Zeit nicht eingeblassene Zyklonstaub ein Aufheizen des Ofens begünstigt. Für die Erfassung der Filterstaubmenge wurde der leere Temper für eine Stunde unter die Austragsöffnung des Schneckenförderers gestellt und anschließend verwogen. Aus der Differenz von Leergewicht und befülltem Temper ergab sich die Menge an Filterstaub. Zur Ermittlung der Zyklonstaubmenge mussten Filter- und Zyklonstaub gemeinsam erfasst werden. Durch den entsprechenden Mehranfall von Staub konnte der Temper nur für dreißig Minuten unter den Austrag gestellt werden. Nach der Verwiegung des befüllten Fahrzeuges musste das Leergewicht und das zuvor bestimmte Gewicht des Filterstaubs, bezogen auf dreißig Minuten Messzeit, berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Staubmessung stimmen mit der Annahme überein, dass bei direkter Fahrweise und bei der Aufgabe von Feinkorn größere Staubmengen zu erwarten sind. Es zeigt sich auch, dass beim direkter Fahren der Zustand der Schlagleisten des Brechers einen Einfluss auf die Staubmenge hat. Sind diese erst kürzlich getauscht worden, so ist der Feinanteil in der Rohsteinaufgabe deutlich höher.

Derzeit wird der Filterstaub, je nach hergestelltem Produkt, entweder direkt zum Produkt hinzugegeben oder langsam zu einem hochwertigen Produkt beigemischt. Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen die Auswertung der Glühverlustmessungen des Filterstaubs bei der Herstellung von Futtermittelkauster.

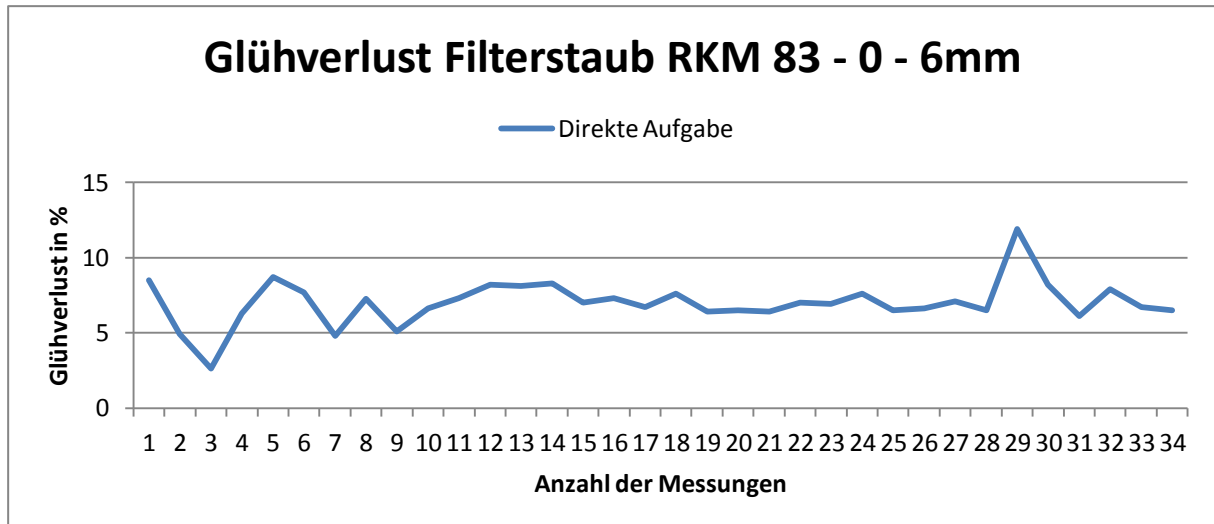


Abbildung 28: Auswertung Glühverlust Filterstaub RKM 83 – 0 – 6 mm

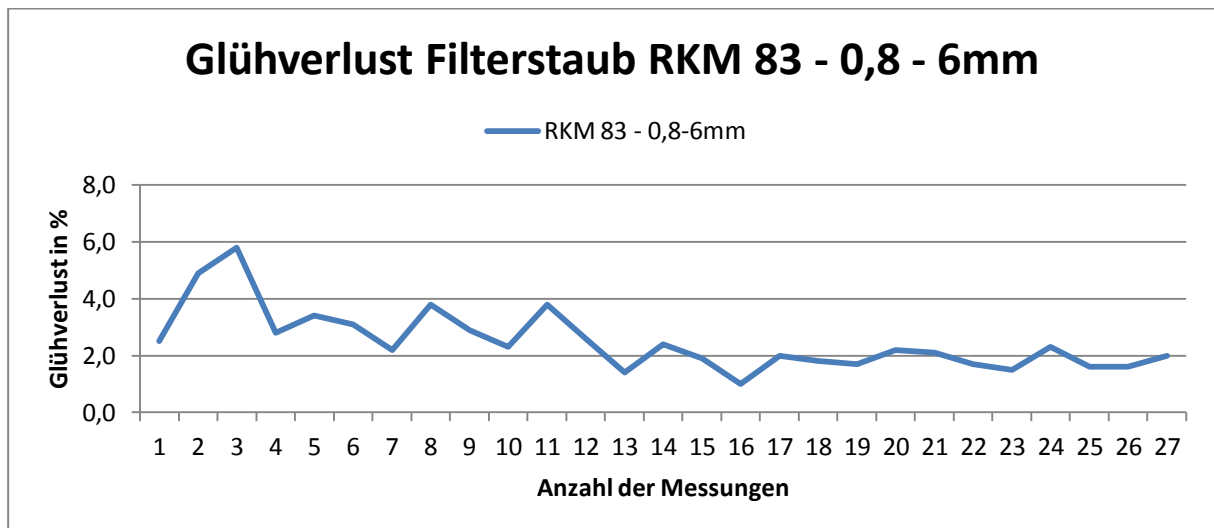


Abbildung 29: Auswertung Glühverlust Filterstaub RKM 83 – 0,8 – 6 mm

Bei der Baustoffkausterherstellung ist es nicht notwendig den Glühverlust des Filterstaubs zu bestimmen, da dieser immer kleiner zwölf Prozent ist. Dadurch kann der anfallende Filterstaub direkt in die Produktsilos gefördert und weiter verarbeitet werden. Abbildung 29 ist zu entnehmen, dass der Glühverlust bei diesem Produkt meistens relativ nahe bei zwei Prozent liegt. Somit kann der Filterstaub zum Produkt hinzugegeben werden und es ist möglich, dass der Staub direkt in die Produktsilos gefördert wird. In Abbildung 28 ist zu erkennen, dass der Glühverlust deutlich mehr schwankt und im Mittel bei ungefähr acht Prozent liegt. Dadurch kann der Filterstaub nicht unmittelbar zum Fertigprodukt zugegeben werden, sondern muss kontinuierlich in kleinen Mengen dem Produkt beigemischt werden. Dabei ist immer der MgO – Gehalt der Mischung zu kontrollieren.

3.3.4 Abgasparameter

Durch das Kalzinieren des Magnesits weist das Abgas eine hohe Konzentration an Kohlendioxid und einen relativ hohen Feuchtegehalt auf. Für den Betrieb der nachgeschalteten Schlauchfilteranlage ist der hohe Wassergehalt, zusätzlich zur Abgastemperatur, ein wichtiger Parameter bei der Auswahl des Filtermaterials.

Der Zug im Drehrohrofen ist derzeit nur schwer für den Anlagenfahrer abschätz- und regelbar. Am Ofenkopf ist zwar eine Druckmessung installiert, doch die Fluktuation des angezeigten Wertes beträgt oft mehr als hundert Prozent. Dadurch stellen sich im gesamten Abgassystem keine konstanten Zugverhältnisse ein und dementsprechend schwankt auch die Sauerstoffzufuhr in der Brennzone. Das führt dazu, dass die vollständige Verbrennung oft in eine unvollständige Verbrennung umschlägt und die CO – Konzentration im Abgas ansteigt. Die gemessenen Spitzenkonzentrationen und Durchschnittswerte lagen oft im vierstelligen mg/Nm³ Bereich. Damit geht unmittelbar einher, dass der energetische Wirkungsgrad sinkt und die Effizienz des Ofens abnimmt. Unabhängig davon ergibt sich dadurch auch eine Umweltthematik, da es zu einer Grenzwertüberschreitung für Kohlenmonoxid kommen kann. Dieser liegt, angelehnt an die BAT – Dokumente der Zementindustrie, bei 1000 mg/Nm³ als Halbstundenmittelwert [8] und wird im Betrieb in Form von Spitzenkonzentrationen manchmal überschritten.

Bei der Durchführung der Messungen hat sich auch gezeigt, dass es einen Zusammenhang zwischen der aufgegeben Korngröße und der CO – Konzentration gibt. Je feiner die Ofenaufgabe ist, desto höher auch die Konzentration von CO im Abgas. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass durch die höhere Beladung des Abgases mit Staub der Differenzdruck der Einzelaggregate steigt und sich dadurch der Zug im Ofen verschlechtert. Das wiederum führt zu einer zu geringen Sauerstoffkonzentration in der Brennzone.

3.3.5 Korngrößenverteilungen und Wassergehalte

Die variierende Aufgabe in den Ofen unterscheidet sich nicht nur maßgeblich in der Korngröße bzw. der Korngrößenverteilung, sondern auch im Feuchtegehalt. Beide Parameter haben einen großen Einfluss auf die Produktionsleistung des Ofens. Bei der Auswertung und Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen und Wassergehalte werden die drei am meisten verwendeten Korngrößenbereiche herangezogen. Ein Zusammenhang zwischen der Kornverteilung, Wassergehalt und Qualität des Rohsteins kann nicht festgestellt werden. In den nachfolgenden Abbildung 30 sowie der Tabelle 10 sind die Auswertungen und die Gegenüberstellung der Wassergehalte dargestellt.

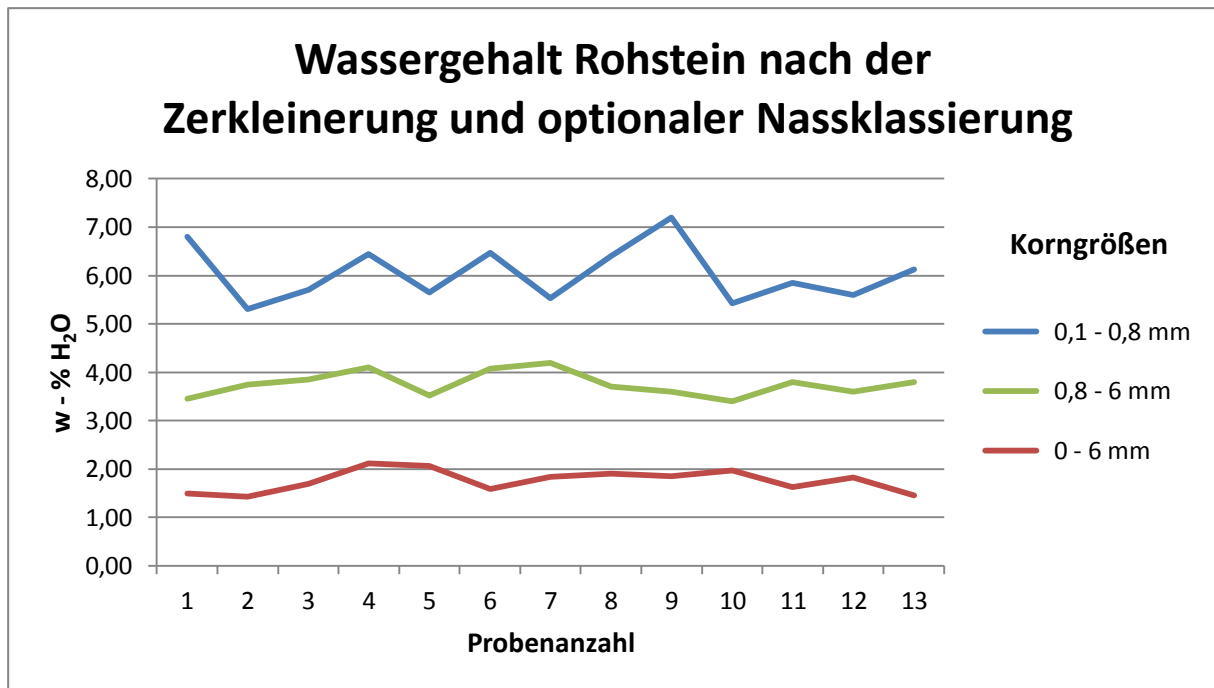


Abbildung 30: Auswertung der Wassergehalte

Jede der einzelnen Proben besteht aus einer Mischprobe von mindestens vier Einzelproben, die wiederum aus zwei Stichproben bestehen. Aus der homogenisierten Mischprobe wurden immer zwanzig Gramm Probe in einen Tiegel eingewogen und anschließend bei 110 °C für vier Stunden getrocknet. Die Streuung der Messwerte ist durch die unterschiedlich lange Lagerung des gewaschenen Korns und durch die Korngröße erklärbar. Das Kornband von 0 – 6 mm wird auf Grund der hohen Qualität des Rohsteins nicht gewaschen, sondern nur gebrochen. Die Korngrößen 0,1 – 0,8 mm und 0,8 – 6 mm werden gebrochen und anschließend nassklassiert, wodurch der Anteil an Verunreinigungen abnimmt. Da hier besonders die feinen Körner viel Wasser in den Zwischenräumen aufnehmen, wird das Material nach dem Waschen für einige Tage am Steinplatz zwischengelagert, wodurch die Flüssigkeit langsam abrinnen kann und der Wassergehalt sinkt.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Wassergehalte und Abgastemperatur

Mittelwert der Wassergehalte und der jeweiligen Abgastemperatur		
Korngröße	Wassergehalt [w-%]	Mittlere Abgastemperatur [°C]
0 – 6 mm	1,76	535
0,8 – 6 mm	3,76	500
0,1 – 0,8 mm	6,01	480

Die Aufgabe von 0,1 – 0,8 mm muss mindestens sieben Tage am Steinplatz zwischengelagert werden, damit der Wassergehalt im Durchschnitt ca. sechs Prozent erreicht. Die Auswirkungen von feuchtem Material auf den Ofenprozess kann man, wie aus Tabelle 10 hervorgeht, deutlich an der Korrelation der Abgastemperatur mit dem Wassergehalt sehen.

Neben den Korngrößenbereichen und dem Wassergehalt der Aufgabe ist auch die Kornverteilung wichtig für den Durchsatz und die Qualität des produzierten Kausters. Daher wurde für jede Aufgabearbeit eine Siebanalyse durchgeführt. Exemplarisch für alle Analysen ist in Abbildung 31 die Siebanalyse für die direkte Fahrweise dargestellt.

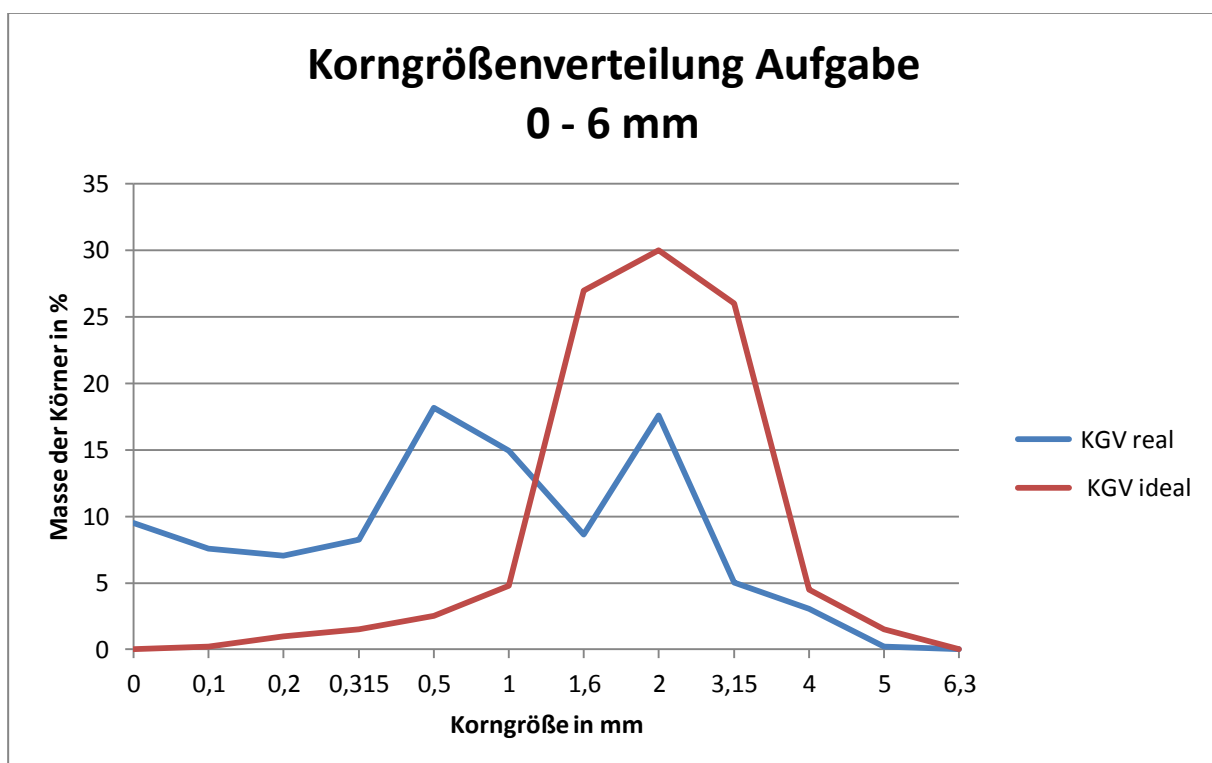


Abbildung 31: Siebanalyse bei direkter Fahrweise

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Anteil von Körnern kleiner 1 mm mehr als die Hälfte der Aufgabe ausmacht. Da beim Kalzinieren und anschließenden Transportieren des Kausters

die Korngröße um 50 bis 60 Prozent abnimmt, werden die ohnehin schon kleinen Aufgabekörner noch feiner.

Ein weiterer interessanter Parameter ist, dass sich der Feinanteil der Aufgabe erfahrungsgemäß schneller durch den Ofen bewegt als der grobe Anteil und somit die Verweilzeit für die kleineren Körner kürzer ist, als jene des Grobguts. Dieser Effekt ist bei der Beobachtung des Ofenaustrags sehr gut zu erkennen, da Grobes und Feines zur selben Zeit aufgegeben wird, aber der produzierte Kauster schwallweise grob oder fein in den Kühler fällt. So kann es zum Beispiel passieren, dass der Feinanteil, ähnlich einer Flüssigkeit, aus dem Ofen herausfließt und der Grobanteil verzögert später aus dem Ofen fällt. Trotz dieses Effekts ist der Glühverlust des Feinkorns nicht höher als der des Grobguts, was auf die größere spezifische Oberfläche, die den Energieeintrag begünstigt, zurückzuführen ist.

3.4 Massen- und Energiebilanz

Die Erstellung der Massen- und Energiebilanz des Drehrohrofens sowie die Ermittlung der Verluste durch Wärmestrahlung und Konvektion ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit. Der Ofen kann durch die Bilanz abgebildet werden und es können etwaige Verbesserungspotentiale schnell abgeschätzt oder nachgerechnet werden. Auch die Überprüfung von Massenströmen und Kreisläufen im Prozess kann problemlos erfolgen.

3.4.1 Erstellung der Massen- und Energiebilanz

Um eine repräsentative und nachvollziehbare Bilanz erstellen zu können, wurden im Vorfeld für alle drei Hauptprodukte die im Kapitel 3.3 beschriebenen Prozessparameter so genau wie möglich bzw. nötig bestimmt. Dadurch ist es möglich die angenommen und geschätzten Werte der Bilanz auf einige wenige zu reduzieren.

An Hand der Produktion von Futtermittelkauster (RKM 83) mit direkter Fahrweise, also Korngröße 0 – 6 mm, wird die Energiebilanz und die Vorgehensweise bei der Erstellung erklärt. Die Eingabeparameter für die Bilanzen von Futtermittelkauster mit Korngröße 0,8 – 6 mm und Baustoffkauster mit Korngröße 0,1 – 0,8 mm sind nach der Vorstellung der Energiebilanz angeführt.

Die Bilanz wurde mit Hilfe von Excel in hauptsächlich englischer Sprache erstellt, damit auch andere internationale Konzernstandorte auf die Tabellen zugreifen und damit arbeiten können. Als Bezugspunkt für sämtliche Enthalpiewerte wurde 0 °C herangezogen, damit alle im Prozess relevanten Energien immer positiv dargestellt werden können. Der Ofenprozess ist in der Bilanz in acht Teilbereiche untergliedert, wobei jeder Abschnitt für sich eine Massen- und Energiebilanz enthält. Für die Rohmagnesitgewinnung im Bergbau und die Zerkleinerung am Steinplatz existiert keine Massen- oder Energiebilanz, da die Materialverluste und der spezifische Energiebedarf im Verhältnis zum Kalzinieren hier relativ klein sind. Der einzige Faktor der nicht vernachlässigt werden darf, ist der Materialverlust

durch das Nassklassieren. Hier wird aus qualitativ nicht so hochwertigem, vorzerkleinerten Rohmagnesit der erhöhte Anteil an Kieselsäure und Kalk ausgewaschen. Dieser Anteil wird gemeinsam mit dem Washwasser auf die großflächigen Klärteiche südwestlich der Firma gepumpt und dort zwischengelagert. Dadurch entsteht ein Materialverlust von sieben bis acht Prozent, je nach aufgebener Qualität des Rohsteins. Ist der Gehalt an Kieselsäure und Kalk relativ hoch, platzen diese verunreinigten Bereiche des Rohsteins bei der vorgeschalteten Zerkleinerung vermehrt vom magnesithaltigen Gestein ab. Daher wird bei der Nassklassierung mehr Material ausgetragen und der sogenannte Klärteichverlust steigt auf acht Massenprozent an.

Zur besseren Visualisierung wurden die Rohmagnesitgewinnung und die Zerkleinerung in das zweigeteilte Flow – Sheet in Abbildung 32 integriert.

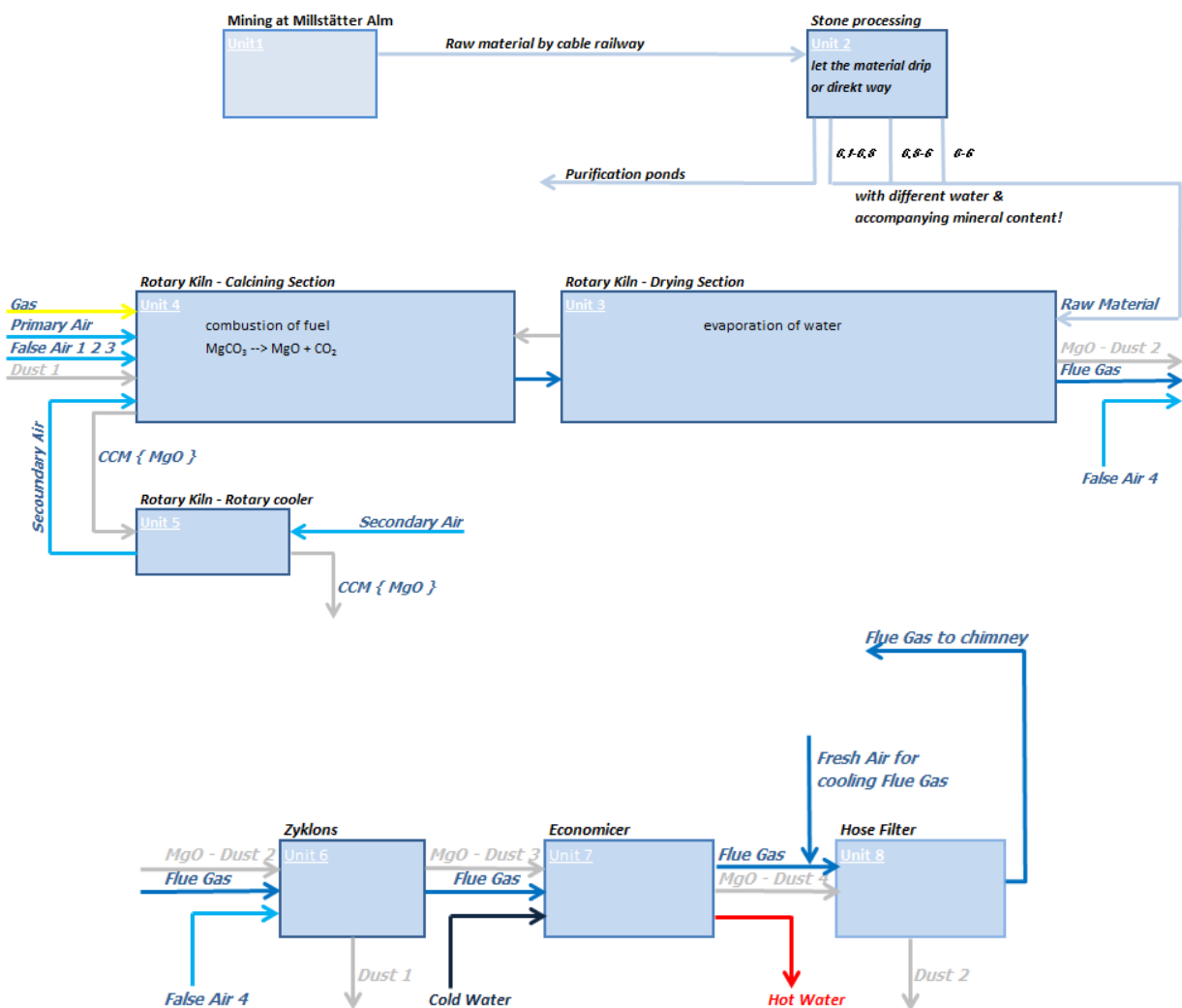


Abbildung 32: Flow – Sheet des Bilanzgebiets

Ein eigenständiges Excel – Datenblatt enthält alle Enthalpiewerte der Verbindungen, die zur Erstellung der Bilanz notwendig sind in einem Bereich von 0 °C bis 2000 °C. Ein weiteres Datenblatt fasst alle benötigten Reaktionsenthalpien bezogen auf $\Delta G = 0$ zusammen. Diese

Daten stammen aus der kostenpflichtigen Software HSC Chemistry 7.14 der Firma Outotec und wurden vom RHI – Forschungszentrum in Leoben zur Verfügung gestellt.

Ein Tabellenkalkulationsblatt mit den bei den Berechnungen am häufigsten verwendeten Molekulargewichten und der Zusammensetzung einiger in der Branche oft angewandten Brennstoffe ist ebenso eingefügt. Damit wird es ermöglicht, dass man bei der Verwendung von anderen Brennstoffen, nur einige wenige Verlinkungen im Berechnungsblatt ändern muss.

Insgesamt besteht die Excel – Datei, inklusive der vier oben erwähnten Blätter, aus fünfzehn einzelnen Kalkulationsseiten die miteinander verknüpft sind. Daher ist es auch möglich, dass man die Eingabeparameter jederzeit ändern oder an neue Betriebszustände anpassen kann. Hierzu dient das in Abbildung 33 gezeigte Excelblatt. Die grün hinterlegten Felder stellen die für den Benutzer veränderlichen Eingabewerte der Bilanz dar. Die weißen Felder dienen zum Anzeigen von Rechenwerten oder Zwischenergebnissen.

Stream values (input values in green fields)

Unit	Stream	T in [°C]	T out [°C]	mass flow [kg/h]	solids [%]
1	Raw Material Mining Plant				
2	Raw Material processed				
3	Raw Material	15	n.d.	7.714,00	Feuchte 1,76%
4	Gas	15	n.d.	800,00	p Erdgas 0,730
4	Primary air	65	n.d.	1.650,00	<-Nm³/h
4	False air 1 2 3	15	n.d.	7.055,96	share 75,00%
5	Secondary air into cooler	15	n.d.	2.351,99	share 25,00%
5	CCM	n.d.	125	3.397,38	LOI: 2,00%
6	False air 4	20	n.d.	1.950,00	Nm³/h
7	Water	80	136	20.500,00	
8	Dust 2		93	640,00	
8	Flue gas	n.d.	93	26.664,23	
8	Fresh Air	15	n.d.	6.500,00	<-Nm³/h

Average Raw Material Components	Content [w-%]
MgCO3	88,00%
Al2O3	0,85%
CaCO3	3,85%
Fe2O3	3,30%
SiO2	4,00%
Total	100,00%

CCM total inkl. Dust	4.037,38
Total flue Gas [Bm³/h]	26.592,02

Process Temperatures

Unit	Stream	T [°C]
3	Raw Material to Cal	304,00
3	Flue gas out to cycle	535,00
4	Flue gas to drying se	800,00
4	CCM to cooler	1.000,00
5	2ndary air to kiln	350,00
6	Dust 1	130,00
6	Dust 3 & Flue Gas	400,00
7	Dust 4 & Flue Gas	115,00

Losses

Unit	type of loss	H [MJ/h]
1		
2		
3	radiation shell	3.400,00
4	radiation shell	2.900,00
5	radiation shell	2.000,00
6	radiation Zyclon	2.200,00
7	losses Eco	500,00
8	losses Filter	50,00

+ ... output higher
- ... output lower

Lambda for combustion

Unit	Stream	Lambda
4	total air	1,15

Amounts of Dust in Process

Unit	Stream	mass flow kg/h	LOI
6	Dust 2 in	2.200,00	4,90%
4 & 6	Dust 1	1.560,00	6,60%
8	Dust 3	640,00	1,70%

Unit	Stream	mass flow kg/h
7	Cold Water	20.500,00

Abbildung 33: Hauptansicht der Energiebilanz

Sollten Eingabeparameter nicht in der Einheit kg/h vorliegen, wie das oft bei gasförmigen Brennstoffen oder Verbrennungs- und Falschlufmengen der Fall ist, rechnet das Excel – Sheet die Mengen bei korrekter Eingabe automatisch von Nm³/h in kg/h um.

Zur besseren Visualisierung der Prozessparameter und deren Auswirkungen auf die Bilanz, wurde auch unmittelbar neben den Eingabefeldern ein Kontrollfeld eingebaut, damit man eventuelle Unregelmäßigkeiten sofort erkennen kann.

Im Folgenden werden alle relevanten Gleichungen und Zusammenhänge zuerst dem Materialstrom folgend, beginnend bei der Materialaufgabe und danach dem Gasstrom folgend, von der Zyklonbatterie zum Kamin, beschrieben.

Unit eins und zwei der Massenbilanz werden, wie bereits erwähnt, nicht in die Kalkulation mit einbezogen. Daher beginnt die Erklärung mit Unit 3.

Unit 3: Rotary Kiln – Drying Section:

In diesem Teil des Ofens wird die Rohsteinaufgabe rechnerisch auf 300 °C aufgewärmt, das enthaltene Wasser verdampft und auf die Abgastemperatur aufgewärmt. Tabelle 11 zeigt die Inputbilanz für die Unit 3.

Tabelle 11: Inputbilanz der Unit 3

INPUT Unit 3					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
Raw Material	H2O(l)	135,77	15,00	0,0624	8,47
	MgCO3	6.668,85	15,00	0,0031	20,67
	Al2O3	64,41	15,00	0,0108	0,70
	CaCO3	291,76	15,00	0,0029	0,83
	Fe2O3	250,08	15,00	0,0093	2,33
	SiO2	303,13	15,00	0,0105	3,19
					Total
Flue Gas	N2(g)	9.086,68	800,00	0,8780	7.978,43
	O2(g)	359,88	800,00	0,8126	292,45
	H2O(g)	1.397,36	800,00	1,6620	2.322,44
	CO2(g)	5.196,14	800,00	0,8710	4.525,76
	SO2(g)	-	800,00	0,6238	-
Dust	MgCO3	2,07	800,00	0,2528	0,52
	MgO	2.197,93	800,00	0,9319	2.048,30
Total		25.954,06			17.204,08

Die Menge an Wasser errechnet sich aus der aufgegebenen feuchten Materialmenge und dem zuvor im Labor bestimmten Wassergehalt der Probe.

Die Rohmaterialaufgabe setzt sich aus den im Eingabeformular aufgelisteten Stoffen zusammen und ist je nach Geologie verschieden. Für die Massenbilanz der Masterarbeit wurde der Mittelwert der Gehalte aus den chemischen Analysen des letzten Jahres herangezogen.

Das mit MgO-Staub beladene Rauchgas strömt von der Kalzinationszone (Unit 4) in die Trocken- und Aufwärmzone des Ofens ein. Die Temperatur wurde auf Grund der hohen Abgastemperatur von 530 °C angenommen und bestätigt sich sehr gut in der Gesamtenergiebilanz. Die Rauchgas- und Staubmengen in der Inputbilanz der Unit 3 sind der Outputbilanz von Unit 4 zu entnehmen.

Die Ermittlung der Enthalpiewerte erfolgt mit der SVerweis – Funktion von Excel. Hierbei sucht sich das Programm selbst aus dem Tabellenblatt „H – Values“ die zum Stoff und der jeweiligen Temperatur zugehörige Enthalpie, bezogen auf Kilogramm.

Am Ende der Inputbilanz wurde für die einfache Kontrolle mit der Outputbilanz je eine Summe der Massen und Energien erstellt.

Die nachfolgende Tabelle 12 listet die Outputparameter der Unit 3 auf. Der Rohstein geht getrocknet und vorgewärmt in die Unit 4 zum Kalzinieren. Rauchgas und Staub gehen abgekühlt und mit Wasser angereichert weiter zu Unit 6 Zyklons.

Tabelle 12: Output Bilanz der Unit 3

OUTPUT Unit 3					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
MgCO3	H2O(l)	-	304,00	1,3670	-
	MgCO3	6.668,85	304,00	0,0787	524,96
	Al2O3	64,41	304,00	0,2890	18,62
	CaCO3	291,76	304,00	0,0707	20,64
	Fe2O3	250,08	304,00	0,2317	57,94
	SiO2	303,13	304,00	0,2749	83,34
	Total	7.578,23			705,50
Flue Gas	N2(g)	9.086,68	535,00	0,5722	5.199,79
	O2(g)	359,88	535,00	0,5264	189,45
	H2O(g)	1.533,13	535,00	1,0646	1.632,19
	CO2(g)	5.196,14	535,00	0,5486	2.850,69
	SO2(g)	-	535,00	0,3968	-
	Total	16.175,83			9.872,11
Dust	MgCO3	2,07	535,00	0,15	0,32
	MgO	2.197,93	535,00	0,60	1.319,57
Heating of Water	H2O(l)	135,77	100,00	0,4186	56,84
Evaporation of Water	H2O(l)-->H2O(g)	135,77	100,00	2,2688	308,03
Losses (Radiation from Kiln Shell)					3.400,00
Total		25.954,06			15.662,36

Der Aufbau der Outbilanz ist dem der Inputbilanz völlig ident. Es wird zusätzlich zu Tabelle 11 allerdings die zum Aufheizen und Verdampfen von Wasser benötigte Energie berücksichtigt. Des Weiteren ist der Wärmeverlust über den Ofenmantel durch Konvektion und Strahlung mit berücksichtigt.

Die Zusammensetzung des Rauchgases beim Austritt aus dem Ofen bzw. beim Eintritt in das Abgassystem ist in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Gaszusammensetzung unmittelbar beim Austritt aus dem Ofen

Zusammensetzung Abgas bei Ofenausritt				
Spezies	wt-%	V [Nm³/h]	vol-%	V [Bm³/h]
N ₂ (g)	56,2%	7.270	60,2%	21.510
O ₂ (g)	2,2%	252	2,1%	746
H ₂ O(g)	9,5%	1.907	15,8%	5.644
CO ₂ (g)	32,1%	2.646	21,9%	7.830
Total	100,0%	12.076	100,0%	35.729

Unit 4: Rotary Kiln – Calcination Section

Das Magnesiumcarbonat und das im Rohstein enthaltene Calciumcarbonat werden hier entsäuert, wodurch der bereits durch die Verbrennung von Erdgas entstandene Anteil von CO₂ im Abgas noch mehr zunimmt. Als Brennstoff dient Erdgas mit einem Brennwert von 40,485 MJ/Nm³[12], das mit Sauerstoff aus vorgewärmter Primär- und Sekundärluft sowie mit nicht erhitzter Falschluff verbrennt. Der Brennwert, die Zusammensetzung und die Dichte des angelieferten Erdgases werden laufend vom Energieversorger bestimmt und bekannt gegeben. Genaue Massenströme und die Energiebilanz sind der Inputbilanz (siehe Tabelle 14) zu entnehmen.

Tabelle 14: Inputbilanz der Unit 4

INPUT Unit 4					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H [MJ/kg]	H [MJ/h]
Mg Carbonate	MgCO ₃	6.668,85	304,00	0,0787	524,96
	Al ₂ O ₃	64,41	304,00	0,2890	18,62
	CaCO ₃	291,76	304,00	0,0707	20,64
	Fe ₂ O ₃	250,08	304,00	0,2317	57,94
	SiO ₂	303,13	304,00	0,2749	83,34
	Total	7.578,23			705,50
MgO -Dust 1	MgO	1.558,03	130,00	0,13	199,18
	MgCO ₃	1,97	130,00	0,03	0,06
Fuel: Gas	C	451,75	15,00	0,0099	4,46
	H ₂ (g)	150,65	15,00	0,2130	32,08
	S				
	N ₂ (g)				
	O ₂ (g)				
	H ₂ O(l)				
	ash				
	Total	602,40			36,55
Primary Air	N ₂ (g)	1.628,25	65,00	0,0676	110,06
	O ₂ (g)	494,40	65,00	0,0597	29,54
	H ₂ O(g)	9,15	65,00	0,1214	1,11
	Total	2.131,80			140,71
Secondary Air	N ₂ (g)	1.864,61	350,00	0,3684	686,96
	O ₂ (g)	566,17	350,00	0,3351	189,72
	H ₂ O(g)	10,47	350,00	0,6767	7,09
	Total	2.441,25			883,76
False Air	N ₂ (g)	5.593,82	15,00	0,0156	87,22
	O ₂ (g)	1.698,51	15,00	0,0137	23,31
	H ₂ O(g)	31,42	15,00	0,0280	0,88
	Total	7.323,76			111,41
Heating value of fuel	Gas	602,40		48,4476	29.184,83
Total		21.637,44			31.262,00

Das vorgewärmte Material aus der Trocken- und Aufwärmzone trägt energetisch gesehen nicht viel zur gesamten Energiebilanz dieses Teils des Ofens bei. Auch die Primärluft macht nur einen geringen Teil der Gesamtenergie aus, da durch die Umsetzung des Brennstoffs sehr viel Energie frei wird. Aus der Massenbilanz lässt sich ableiten, dass fast 75 % der Verbrennungsluft als Falschlufft zugeführt werden. Außerdem ist die Temperatur der Primärluft mit 65 °C ebenfalls relativ niedrig im Vergleich zu anderen Öfen im Konzern oder zu anderen Industrien, wie der Zement- oder Stahlindustrie.

Tabelle 15: Outoutbilanz der Unit 4

OUTPUT Unit 4					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
CCM	MgCO ₃	124,55	1.000,00	0,5035	62,70
	MgO	2488,39	1.000,00	1,1890	2.958,75
	Al ₂ O ₃	64,41	1.000,00	1,1257	72,51
	CaCO ₃	7,59	1.000,00	0,2731	2,07
	CaO	159,22	1.000,00	0,8870	141,23
	Fe ₂ O ₃	250,08	1.000,00	0,8828	220,77
	SiO ₂	303,13	1.000,00	1,1281	341,96
	Total	3.397,38			3.800,00
MgO -Dust 1	MgO	2.197,93	800,00	0,9319	2.048,30
	MgCO ₃	2,07	800,00	0,2528	0,52
	Total	2.200,00			2.048,82
Flue Gas	N ₂ (g)	9.086,68	800,00	0,8780	7.978,43
	O ₂ (g)	359,88	800,00	0,8126	292,45
	H ₂ O(g)	1.397,36	800,00	1,6620	2.322,44
	CO ₂ (g)	5.196,14	800,00	0,8710	4.525,76
	SO ₂ (g)	-	800,00	0,6238	-
	Total	16.040,06			15.119,07
Reaction Enthalpy	MgCO ₃ (s) → MgO(s) + CO ₂ (g)	6.544,21		1,1734	7.678,85
Losses (Radiation from Kiln Shell)					2.900,00
Total		21.637,44			31.546,74

Die größten Energieabnehmer sind eindeutig in Tabelle 15 zu abzulesen. Da das Rauchgas mit 800 °C aus der Kalzinierzone in die Trockenzone strömt, hat es eine große Menge an Energie gespeichert. Eine große Energiesenke stellt natürlich die Reaktionsenthalpie des Prozesses selbst dar, da hier für die Reaktion umgerechnet ungefähr 210 Nm³/h Erdgas verbraucht wird. Die im gebrannten Kauster gespeicherte Energie wird sozusagen zu einem

Teil im Kühler rückgewonnen, da hier die Sekundärluft wie beim Gegenstromprinzip damit erwärmt wird.

Der anfallende MgO – Staub entsteht eigentlich nicht ausschließlich in der Kalzinierzone, sondern ein kleiner Teil fällt auch schon in der Trocken- und Aufwärmzone an. Zur Vereinfachung wurde allerdings angenommen, dass jeglicher Staub in der Kalzinierzone anfällt. Dieser wird ohnehin in den Zyklonen oder im Schlauchfilter abgeschieden und entweder in den Prozess rückgeführt oder dem Fertigprodukt beigemischt.

Die Berechnung der für die Gasmenge notwendigen Verbrennungsluft erfolgt über eine in die Bilanz integrierte Verbrennungsrechnung. Die eingesetzte Menge an Erdgas in Nm³/h wird mit der Erdgaszusammensetzung in kg/h Kohlenstoff und Wasserstoff umgerechnet. Daraus ergibt sich einerseits der Brennwert bzw. Heizwert und andererseits die für die Verbrennung notwendigen Mole an Sauerstoff pro Stunde. Durch die Menge an benötigtem Sauerstoff lässt sich wiederum die Luftmenge errechnen. Der Share-Faktor gibt die Aufteilung der Luft zwischen Falsch- und Sekundärluft an und ist somit ein Wert der entweder geschätzt oder mit Messungen angenähert werden muss. Hier wurde zuerst die Größenordnung des Faktors mit Hilfe von Luftmengenmessungen eingeordnet und die tatsächliche Aufteilung anschließend mit Hilfe der Energiebilanz angenähert.

Unit 5: Rotary Cooler:

Im Rotationskühler wird der aus der Kalzinationszone direkt in den Kühler fallende Kauster von circa 1000 °C (diese hohe Temperatur gilt nur für den Futtermittelkauster) auf 130 °C abgekühlt. Ein Teil der Energie wärmt die durch den Kühler einströmende Sekundärluft vor, was durch im Kühler eingebaute Hubschaufeln (vgl. Abbildung 18) noch zusätzlich begünstigt wird. Abbildung 34 zeigt den Übergang vom Brennrohr zum Kühlrohr. Der zweistufige Stauring verhindert ein Ausfließen des Kausters in Richtung Materialeintrag.



Abbildung 34: Blick vom Einlauf Kühlrohr zum Ofenauslauf bei einem Wartungsstillstand

Beim Einlauf des Kühlers rutscht das noch glühende Material direkt in den ausgemauerten Bereich des Kühlrohrs und gibt dort Wärme ab. Die Abstrahlverluste sind beim Kühlrohr relativ hoch, da nur die ersten sechs Meter des Kühlereinlaufs gemauert sind. Dieser Effekt ist auf Grund der notwendigen Kühlung des Kausters allerdings erwünscht. In der nachfolgenden Tabelle 15 ist die Inputbilanz des Rotationskühlers zusammengefasst.

Tabelle 16: Inputbilanz der Unit 5

INPUT Unit 5					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
CCM	MgO	2.488,39	1.000,00	1,1890	2.958,75
	MgCO ₃	124,55	1.000,00	0,50	62,70
	Al ₂ O ₃	64,41	1.000,00	1,13	72,51
	CaCO ₃	7,59	1.000,00	0,27	2,07
	CaO	159,22	1.000,00	0,89	141,23
	Fe ₂ O ₃	250,08	1.000,00	0,88	220,77
	SiO ₂	303,13	1.000,00	1,13	341,96
	Total		3397,38		
Secondary Air	N ₂ (g)	1.864,61	15,00	0,0156	29,07
	O ₂ (g)	566,17	15,00	0,0137	7,77
	H ₂ O(g)	10,47	15,00	0,0280	0,29
	Total		2.441,25		
Total		5.838,63			3.837,13

Man kann aus der Bilanz herauslesen, dass durch den Eintrag des heißen Kausters aus dem Ofen eine große Wärmemenge in den Kühler eingebracht wird. Diese wird allerdings, wie aus Tabelle 17 zu entnehmen, zu einem großen Teil in die Sekundärluft übertragen, wodurch es möglich ist, dass sich diese von Umgebungstemperatur auf 350 °C aufwärmt.

Tabelle 17: Outbilanz der Unit 5

OUTPUT Unit 5					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
CCM	MgO	2.488,39	125,00	0,1225	304,89
	MgCO ₃	124,55	125,00	0,0289	3,60
	Al ₂ O ₃	64,41	125,00	0,1051	6,77
	CaCO ₃	7,59	125,00	0,0265	0,20
	CaO	159,22	125,00	0,0985	15,69
	Fe ₂ O ₃	250,08	125,00	0,0866	21,66
	SiO ₂	303,13	125,00	0,1002	30,38
	Total	3.397,38			
Secondary Air	N ₂ (g)	1.864,61	350,00	0,3684	686,96
	O ₂ (g)	566,17	350,00	0,3351	89,72
	H ₂ O(g)	10,47	350,00	0,6767	7,09
	Total	2.441,25			883,76
Losses (Radiation from Cooler Shell)					2.000,00
Total		5.838,63			3.266,95

Unit 6: Zyklones

Nachdem das Rauchgas aus dem Ofen Austritt wird es über ein isoliertes Abgasrohr zu drei Rauchgasschiebern geführt, die den Rohgasstrom gleichmäßig auf drei Zyklonbatterien aufteilen. Jede Batterie besteht aus je zwölf kleinen, parallel geschalteten Zyklonen, die die groben Staubpartikel abscheiden. Das teilweise gereinigte Abgas strömt weiter zum Wärmetauscher. In Tabelle 18 ist die Inputbilanz der Unit 6 zusammengefasst.

Tabelle 18: Inputbilanz der Unit 6

INPUT Unit 6					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
MgO -Dust 2	MgCO ₃	2,07	535,00	0,1537	0,32
	MgO	2.197,93	535,00	0,6004	1.319,57
	Total	2.200,00			1.319,89
False Air 4	N ₂ (g)	1.847,99	20,00	0,0208	38,42
	O ₂ (g)	640,96	20,00	0,0183	11,73
	H ₂ O(g)	18,02	20,00	0,0373	0,67
	Total	2.506,97			50,82
Flue Gas	N ₂ (g)	9.086,68	535,00	0,5722	5.199,79
	O ₂ (g)	359,88	535,00	0,5264	189,45
	H ₂ O(g)	1.533,13	535,00	1,0646	1.632,19
	CO ₂ (g)	5.196,14	535,00	0,5486	2.850,69
	SO ₂ (g)	-	535,00	0,3968	-
	Total	16.175,83			9.872,11
Total		20.882,80			11.242,82

Das Abgas strömt direkt mit 535 °C aus dem Drehrohr heraus in den Abgaskopf hinein. Der Ofenkopf ist dort gegen die Umgebung verhältnismäßig gut abgedichtet und wodurch an dieser Stelle relativ wenig Falschlufft eingezogen wird. Bei der Ofenaufgabe hingegen strömt eine große Menge an Falschlufft ein, die nicht nur die Temperatur des Abgases ungewollt kühlt, sondern auch die Zugregelung im Ofen massiv beeinflusst. Wie bereits in 3.3.2 erklärt, strömen hier ungefähr 2000 Nm³/h Frischluft zum Rohgas hinzu. Obwohl die Ofenaufgabe örtlich gesehen nahe beim Ofen ist, wurde die Falschlufft erst bei den Zyklonen mit eingerechnet, da sich erst dort die unmittelbaren Auswirkungen zeigen.

Der aus dem Ofen austretende und in die Zyklone eintretende Staub besteht rechnerisch betrachtet aus einer Mischung von Filter- und Zyklonstaub. Wie in Tabelle 19 ersichtlich, ist die aus den Zyklonen ausgetragene Menge an Staub dieselbe, die Aufteilung allerdings verschieden.

Tabelle 19: Outputbilanz der Unit 6

OUTPUT Unit 6					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
MgO - Dust 1	MgCO ₃	1,97	130,00	0,0301	0,06
	MgO	1.558,03	130,00	0,1278	199,18
MgO - Dust 3	MgCO ₃	0,21	400,00	0,1085	0,02
	MgO	639,79	400,00	0,4366	279,36
	Total	2200,00			478,63
Flue Gas	N ₂ (g)	10.934,67	400,00	0,4227	4.621,91
	O ₂ (g)	1.000,84	400,00	0,3859	386,26
	H ₂ O(g)	1.551,15	400,00	0,7792	1.208,71
	CO ₂ (g)	5.196,14	400,00	0,3942	2.048,47
	SO ₂ (g)	-	400,00	0,2860	
	Total	18.682,80			8265,34
Radiation Losses					2.200,00
Total		20.882,80			10.943,97

Es fällt einerseits Zyklonstaub (Dust 1) an, der wegen seines höheren Glühverlustes wieder zur Brennzone des Ofens rückgeführt wird und andererseits der später als Filterstaub abgeschiedene restliche Staub. Die Temperaturdifferenz der beiden Stäube resultiert aus den unterschiedlichen Messstellen. Für Dust 2 wird dieselbe Temperatur wie für das Abgas angenommen, da der Staub mitgenommen wird. Die 130 °C für Dust 1 wurden unmittelbar nach dem Schneckenförderer gemessen, der den Zyklonstaub zur Blasleitung bringt mit der Staub weiter zum Ofenkopf transportiert wird.

Durch die Wärmeverluste über die Oberfläche der Zykclone und die Falschluff sinkt auch die Austrittstemperatur aus den Zyklonen, was sich in den Enthalpiewerten deutlich zeigt. Ob in diesem Abschnitt der Rauchgasreinigung noch ein weiterer Falschluffeintrag stattfindet, könnte nur über detaillierte Langzeitmessungen der Sauerstoffkonzentration festgestellt werden. In Tabelle 20 ist die rechnerische Zusammensetzung des Abgases nach dem Falschluffeintrag durch die Rutsche bei der Telleraufgabe zusammengefasst.

Tabelle 20: rechnerische Rauchgaszusammensetzung nach den Zyklonen

Zusammensetzung Abgas nach den Zyklonen				
Spezies	wt-%	V [Nm³/h]	vol-%	V [Bm³/h]
N ₂ (g)	58,5%	8.749	62,4%	21.561
O ₂ (g)	5,4%	701	5,0%	1.728
H ₂ O(g)	8,3%	1.930	13,8%	4.756
CO ₂ (g)	27,8%	2.646	18,9%	6.522
Total	100,0%	14.026	100,0%	34.566

Der Unterschied zum Rohgas, das direkt aus dem Ofenkopf austritt, ist deutlich bei der Sauerstoffkonzentration zu sehen. Diese hat sich durch den Falschlufteintrag mehr als verdoppelt, wodurch gleichzeitig auch die Konzentrationen von Wasser und Kohlendioxid gesunken sind. Auch die Summe der Betriebskubikmeter hat, trotz der zusätzlichen Luftmenge, durch die signifikante Temperatursenkung abgenommen.

Unit 7: Economiser

Der Economiser ist ein Wärmetauscher Baujahr 1966 mit ungefähr 1600 m² Wärmeaustauschfläche und einem ungefähren Wasserdurchsatz von 21 m³/h. Das Abreinigen des Eco, wie der Wärmetauscher genannt wird, erfolgt mittels einer Eigenkonstruktion der Instandhaltungsabteilung durch vier Millimeter große Bleikugeln. Die Austauschfläche wird bei jedem Betriebsstillstand kontrolliert und weist kaum Verunreinigungen auf. Darauf ist auch die gute Wärmeübertragungsrate des fast 50 Jahre alten Gerätes erklärbar. Die Tabelle 21 zeigt die Inputströme des Economisers, die dem Output der Unit 6 entsprechen.

Tabelle 21: Inputbilanz der Unit 7

INPUT Unit 7					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
Cold Water	H2O(l)	20.500,00	80,00	0,3345	6.856,32
MgO - Dust 3	MgCO3	0,21	400,00	0,1085	0,02
	MgO	639,79	400,00	0,4366	279,36
	Total	640			279,38
Flue Gas	N2(g)	10.934,67	400,00	0,42	4.621,91
	O2(g)	1.000,84	400,00	0,39	386,26
	H2O(g)	1.551,15	400,00	0,78	1.208,71
	CO2(g)	5.196,14	400,00	0,39	2.048,47
	SO2(g)	-	400,00	0,29	-
	Total	18.682,80			8.265,34
Total		39.822,80			15.401,04

Durch das in den Wärmetauscher eintretende Speisewasser mit einer Temperatur von 80 °C ergibt sich ein großer zusätzlicher Energieeintrag in das System. Dieses Niveau der Eintrittstemperatur des Wassers ist historisch gewachsen und wurde seit Jahren nicht mehr geändert. Der ursprüngliche Hintergrund war, dass bei der Feuerung mit Schweröl der Taupunkt des Abgases nicht unterschritten werden sollte. Nach der Umstellung auf Erdgas wurde die Taupunktsthematik nie mehr hinterfragt. Der Betriebsdruck des Ecco beträgt ungefähr 15 bar.

Aus Tabelle 22 geht hervor, dass der Wärmetauscher mit annähernd 5000 MJ/h eine beachtliche Wärmemenge aus dem Abgas herausholt und es dadurch stark abkühlt. Der Temperaturunterschied von durchschnittlich 285 °C spricht für die große Austauschleistung des alten Aggregats. Die Wärmeverluste halten sich auf Grund der guten Isolierung des Economisers in Grenzen und tragen nur einen kleinen Teil zur gesamten Energiebilanz bei.

Tabelle 22: Outputbilanz der Unit 7

OUTPUT Unit 7					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
Hot Water	H2O(l)	20.500,00	136,00	0,5715	11.714,74
MgO - Dust 3	MgCO3	0,21	115,00	0,0263	0,01
	MgO	639,79	115,00	0,1120	71,63
	Total	640,00			71,64
Flue Gas	N2(g)	10.934,67	115,00	0,1197	1.308,66
	O2(g)	1.000,84	115,00	0,1063	106,39
	H2O(g)	1.551,15	115,00	0,2157	334,52
	CO2(g)	5.196,14	115,00	0,1008	523,77
	SO2(g)	-	115,00	0,0739	
	Total	18.682,80			2.273,35
Radiation Losses					500,00
Total		39.822,80			14.059,73

Unit 8: Hose Filter

Der Schlauchfilter ist die letzte Stufe der Rauchgasreinigung des Drehrohrofens. Das Filtermaterial ist ein Polyester Mischfilz und kann mit einer maximalen Temperatur von 150 °C beaufschlagt werden. Das Abgas wird, wie aus der Tabelle 23 zu entnehmen, mittels einer großen Umgebungsluftmenge auf ungefähr 95 °C abgekühlt, damit das Filtermaterial keinen Schaden nimmt. Diese Eintrittstemperatur ist ebenfalls historisch gewachsen, da die in den 1990er Jahren verwendeten Schläuche nur mit 110 °C belastbar waren und sich bisher noch niemand mit der neuen Abgassituation detailliert auseinandergesetzt hat.

Die Abkühlung erfolgt über eine Frischluftklappe, die mit einer drehbaren Tellerklappe verschlossen werden kann. Je nach produziertem Material strömen hier 6000 – 8000 Nm³/h Frischluft in den Abgasstrom ein.

Tabelle 23: Inputbilanz der Unit 8

INPUT Unit 8					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
MgO - Dust 3	MgCO3	0,21	115,00	0,0263	0,01
	MgO	639,79	115,00	0,1120	71,63
	Total	640,00			71,64
Flue Gas	N2(g)	10.934,67	115,00	0,1197	1.308,66
	O2(g)	1.000,84	115,00	0,1063	106,39
	H2O(g)	1.551,15	115,00	0,2157	334,52
	CO2(g)	5.196,14	115,00	0,1008	523,77
	SO2(g)	-	115,00	0,0739	0,00
	Total	18.682,80			2.273,35
Fresh Air	N2(g)	6.159,97	15,00	0,0156	96,04
	O2(g)	2.136,52	15,00	0,0137	29,32
	H2O(g)	60,08	15,00	0,0280	1,68
	Total	8.356,57			127,05
Total		27.679,37			2.472,03

Abbildung 35 zeigt die Frischluftklappe vor dem Schlauchfilter und unmittelbar nach dem Wärmetauscher. Die Stellung der Klappe wird über eine Temperaturmessung gesteuert, die die Abgastemperatur knapp vor dem Eintritt in den Filter erfasst. Derzeit wird diese auf 95 °C Gastemperatur geregelt. Je heißer das Abgas aus dem Wärmetauscher austritt, desto mehr öffnet sich die Tellerklappe. Derzeit steht diese Klappe fast immer senkrecht oder zumindest zu 60 ° geöffnet. Allerdings unterscheidet sich die eintretende Luftmenge bei vollständig oder nur zu 60 ° geöffneter Klappe fast nicht mehr voneinander.



Abbildung 35: Rauchgasreinigungsanlage

Tabelle 24: Outputbilanz der Unit 8

OUTPUT Unit 8					
Stream	Species	m [kg/h]	T [°C]	H[MJ/kg]	H [MJ/h]
MgO - Dust 3	MgCO ₃	0,21	93,00	0,0209	0,001
	MgO	639,79	93,00	0,0891	56,994
	Total	640,00			57,00
Flue Gas	N ₂ (g)	10.934,67	93,00	0,0967	1.057,92
	O ₂ (g)	1.000,84	93,00	0,0857	85,80
	H ₂ O(g)	1.551,15	93,00	0,1741	269,99
	CO ₂ (g)	5.196,14	93,00	0,0805	418,48
	SO ₂ (g)	-		-	0,00
	Total	18.682,80			1.832,19
Fresh Air	N ₂ (g)	6.159,97	93,00	0,0967	595,97
	O ₂ (g)	2.136,52	93,00	0,0857	183,17
	H ₂ O(g)	60,08	93,00	0,1741	10,46
	Total	27.039,37			2.621,78
Radiation Losses					50,00
Total		27.679,37			5.350,56

Aus Tabelle 24 geht hervor, dass die Austrittstemperatur aus dem Filter im Schnitt 93 °C beträgt. Diese bezieht sich allerdings auf die im Kamin gemessene Temperatur. Das heißt, dass hier zwischen dem Filter und der Messstelle ca. 40 m Rohrleitung sowie ein Abgasventilator zwischengeschaltet sind. Dadurch verliert das gereinigte Gas auf diesem Weg auch ungefähr 1 - 2 °C und die Verluste sind bei diesem Aggregat relativ klein.

Tabelle 25 zeigt die Abgaszusammensetzung beim Austritt aus dem Kamin. Der hohe Sauerstoffgehalt ist auf die Frischluftklappe zurückzuführen, die das Abgas nicht nur abkühlt, sondern auch erheblich verdünnt.

Tabelle 25: Abgaszusammensetzung unmittelbar vorm Kaminaustritt

Zusammensetzung Abgas beim Kaminaustritt				
Spezies	wt-%	V [Nm³/h]	vol-%	V [Bm³/h]
N ₂ (g)	63,2%	13.678	66,6%	18.335
O ₂ (g)	11,6%	2.198	10,7%	2.946
H ₂ O(g)	6,0%	2.005	9,8%	2.687
CO ₂ (g)	19,2%	2.646	12,9%	3.547
Total	100,0%	20.526	100,0%	27.515

Zusammenfassung der Energiebilanz Futtermittelkauster, direkte Fahrweise

Die Massenbilanz ist für das gesamte System schlüssig. Die Annahmen und Messergebnisse stimmen sehr gut mit den verkauften Mengen überein. Beispielsweise rechnet das interne Controlling mit einer Ofenproduktion bei Futtermittelkauster von 4,06 t/h als Jahresmittelwert. Die Massenbilanz ergab inklusive Staubanfall 4,037 t/h Produktion, was einer Abweichung von 0,57 % entspricht.

Die Energiebilanz weist auf Grund des Alters des Aggregats und der vielen Unsicherheiten eine etwas größere Differenz auf. Das ist vor allem auf die Annahmen im Ofenprozess zurückzuführen. Die Bilanzen der dem Ofen nachgeschalteten Aggregate haben nur geringe Abweichungen bei der Energiebilanz. Auch die mit zwei Methoden errechneten Verluste passen gut zusammen, decken aber nicht die gesamte auf einen Ausgleich fehlende Wärmemenge ab.

In den nachfolgenden Abbildung 36 und Abbildung 37 sind jeweils die Eingabewerte für die Bilanz der anderen zwei hauptsächlich produzierten Produkte angeführt. Die grünen Felder stehen wiederum für die Werte die eingegeben werden müssen, weiße Felder sind Rechenwerte oder Zwischenergebnisse. Auch bei diesen beiden Bilanzen zeigt sich, dass die Annahmen, insbesondere bei der Massenbilanz, sehr gut mit der den tatsächlich anfallenden Mengen übereinstimmen.

Stream values (input values in green fields)

Unit	Stream	T in [°C]	T out [°C]	mass flow [kg/h]	solids [%]
1	Raw Material Mining Plant				
2	Raw Material processed				
3	Raw Material	15	n.d.	9.522,00	Feuchte 6,01%
4	Gas	15	n.d.	800,00	p Erdgas 0,753
4	Primary air	65	n.d.	1.650,00	<-Nm³/h
4	False air 1 2 3	15	n.d.	7.323,76	share 75,00%
5	Secondary air	15	n.d.	2.441,25	25,00%
5	CCM	n.d.	150	4.849,92	LOI: 12,00%
6	False air 4	20	n.d.	1.950,00	Nm³/h
7	Water	80	130	20.500,00	
8	Dust 2	92	92	380,00	
8	Flue gas	n.d.	92	28.940,45	
8	Fresh Air	10	n.d.	7.500,00	<-Nm³/h

Average Raw Material Components	Content [%]
MgCO3	88,00%
Al2O3	0,77%
CaCO3	3,76%
Fe2O3	3,65%
SiO2	3,82%
Total	100,00%

CCM total inkl. Dust	5.229,92
Total flue Gas [m³/h]	28.865,18

Process Temperatures

Unit	Stream	T [°C]
3	Raw Material to Calc.	400,00
3	Flue gas out to zyclon	475,00
4	Flue gas to drying sec.	875,00
4	CCM to cooler	750,00
5	2ndary air to kiln	250,00
6	Dust 1	130,00
6	Dust 3 & Flue Gas	370,00
7	Dust 4 & Flue Gas	108,00

Losses

Unit	type of loss	H [MJ/h]
1		
2		
3	radiation shell	2.500,00
4	radiation shell	2.000,00
5	radiation shell	1.500,00
6	radiation Zyclon	1.000,00
7	losses Eco	500,00
8	losses Filter	50,00

+ ... output higher
- ... output lower

Lambda for combustion

Unit	Stream	Lambda
4	total air	1,15

Amounts of Dust in Process

Unit	Stream	mass flow kg/h	LOI
6	Dust 2 in	2.000,00	14,40%
4 & 6	Dust 1	1.620,00	17,70%
8	Dust 3	380,00	7,50%

Unit	Stream	mass flow kg/h
7	Cold Water	20.500,00

Abbildung 36: Eingabeparameter für RKM – H Produktion

Stream values (input values in green fields)

Unit	Stream	T in [°C]	T out [°C]	mass flow [kg/h]	solids [%]	
1	Raw Material Mining Plant					
2	Raw Material processed					
3	Raw Material	15	n.d.	7.714,00	Feuchte	3,63%
4	Gas	15	n.d.	800,00	ρ Erdgas	0,753
4	Primary air	65	n.d.	1.650,00	<-Nm³/h	
4	False air 1 2 3	15	n.d.	7.323,76	share	75,00%
5	Secondary air	15	n.d.	2.441,25		25,00%
5	CCM	n.d.	140	3.499,95	LOI:	2,00%
6	False air 4	20	n.d.	1.950,00	Nm³/h	
7	Water	80	131	20.500,00		
8	Dust 2	n.d.	93	470,00		
8	Flue gas	n.d.	93	26.463,98		
8	Fresh Air	20	n.d.	6.000,00	<-Nm³/h	

Average Raw Material Components	Content [%]
MgCO3	87,00%
Al2O3	0,80%
CaCO3	4,75%
Fe2O3	3,85%
SiO2	3,60%
Total	100,00%

CCM total inkl. Dust
3.969,95
Total flue Gas [m³/h]
26.387,84

Process Temperatures

Unit	Stream	T [°C]
3	Raw Material to Calc.	450,00
3	Flue gas out to cyclon	505,00
4	Flue gas to drying sec.	900,00
4	CCM to cooler	850,00
5	2ndary air to kiln	250,00
6	Dust 1	150,00
6	Dust 3 & Flue Gas	385,00
7	Dust 4 & Flue Gas	112,00

Losses

Unit	type of loss	H [MJ/h]
1		
2		
3	radiation shell	2.800,00
4	radiation shell	2.500,00
5	radiation shell	1.500,00
6	radiation Zyclon	1.000,00
7	losses Eco	500,00
8	losses Filter	50,00

+ ... output higher

- ... output lower

Lambda for combustion

Unit	Stream	Lambda
4	total air	1,15

Amounts of Dust in Process

Unit	Stream	mass flow kg/h	LOI
6	Dust 2 in	1.700,00	5,10%
4 & 6	Dust 1	1.230,00	7,10%
8	Dust 3	470,00	1,90%

Unit	Stream	mass flow kg/h
7	Cold Water	20.500,00

Abbildung 37: Eingabeparameter für RKM – 83 Produktion mit 0,8 – 6 mm Aufgabe

3.4.2 Berechnung der Wärmeverluste

Die in 3.4.1 in der Energiebilanz für Shell Losses eingesetzten Werte wurden für den Ofenmantel auf zwei Arten berechnet. Einerseits wurde dazu ein konzerninternes Paper von 1974 herangezogen, dass empirische Daten vom Drehrohrföfen am Standort Breitenau mit in

die Berechnung einfließen lässt, andererseits wird bei der Berechnung auf Nußelt- und Prandtl – Zahlen zurückgegriffen, um den Wärmeübergangskoeffizient α näherungsweise zu bestimmen.

Für beide Berechnungsmethoden wurde dasselbe Temperaturprofil des Ofenmantels herangezogen, wobei hier wiederum zwischen den hergestellten Produkten unterschieden wird. Eine Auswertung der Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung ist im Anhang I für die Herstellung von Futtermittelkauster mit direkter Fahrweise angefügt. Bei der Berechnung der Verluste mit Nußelt- und Prandtl – Zahlen sind die Formeln zur Berechnung eingebildet. Bei der Berechnung mittels konzerninterner empirischer Daten ist aus Datenschutzgründen kein Lösungsweg angegeben, sondern nur die berechneten Werte.

Zusammenfassend kann man zu den Wärmeverlustberechnungen sagen, dass sich die Ergebnisse der Berechnung mit Hilfe von empirischen Werten und die Ermittlung der Verluste mit errechneten α – Werten im Wesentlichen sehr ähnlich sind. Der Unterschied beträgt, abhängig vom betrachteten Produkt, zwischen 13,4 % und 11,4 % des Wertes. In Abbildung 38 sind die Wärmeverluste nach beiden Berechnungsmethoden gegenüber gestellt.

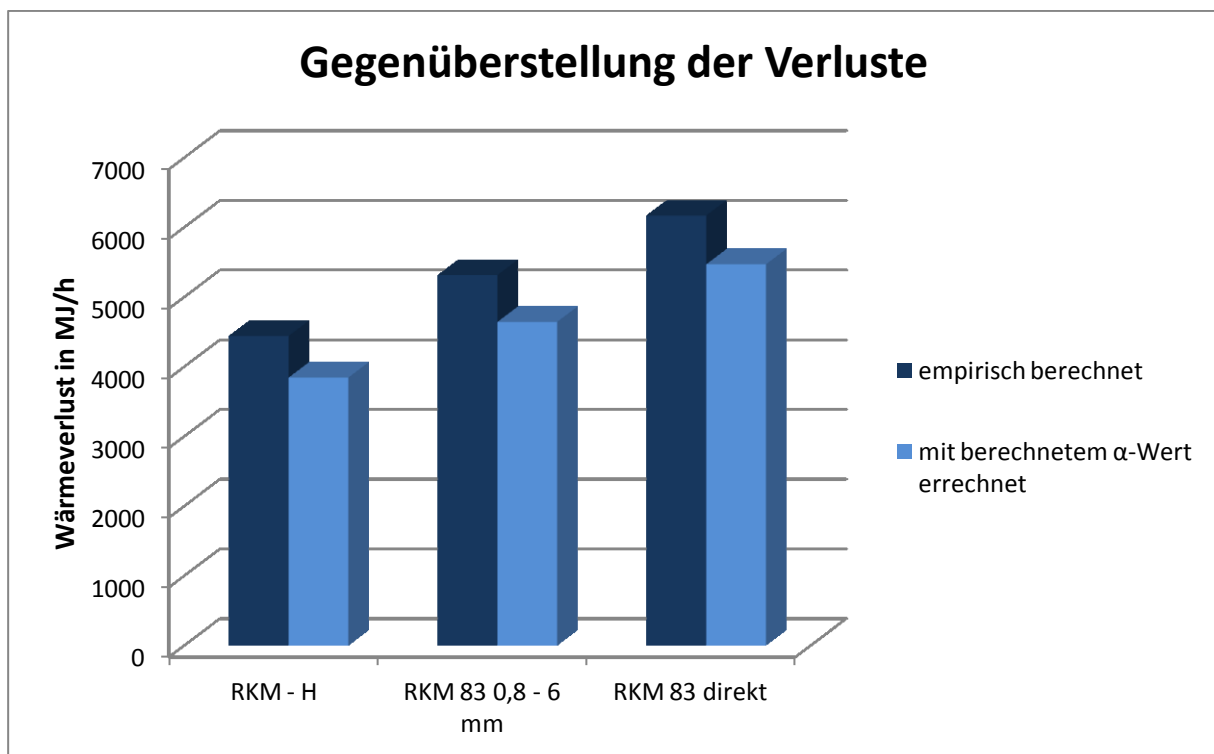


Abbildung 38: Gegenüberstellung der Wärmeverluste

Das Ergebnis der Rechnungen passt auch mit der Annahme zusammen, dass die Wärmeverluste immer mehr ansteigen, je höher die Temperaturdifferenz wird, da der Strahlungsanteil der Wärmeverluste mit höherer Temperatur stärker ansteigt.

3.4.3 Vergleich der hergestellten Produkte

Die bei der Erstellung der Energiebilanz betrachteten Produkte machen mehr als 95 Prozent der gesamten Jahresproduktion aus. Daher kann man sagen, dass durch den Vergleich der drei Produkte RKM – H, RKM 83 0,8 – 6 mm und RKM 83 0 – 6 mm die Gesamtproduktion repräsentativ betrachtet wird.

Durch die unterschiedliche Korngröße der Aufgabe und variierende vorgeschaltete Behandlung des Rohsteins ergeben sich beim Vergleich der drei Produkte untereinander erhebliche Unterschiede, sowohl in der energetischen, als auch in der massebezogenen Betrachtung. Abbildung 39 gibt hierzu einen Überblick.

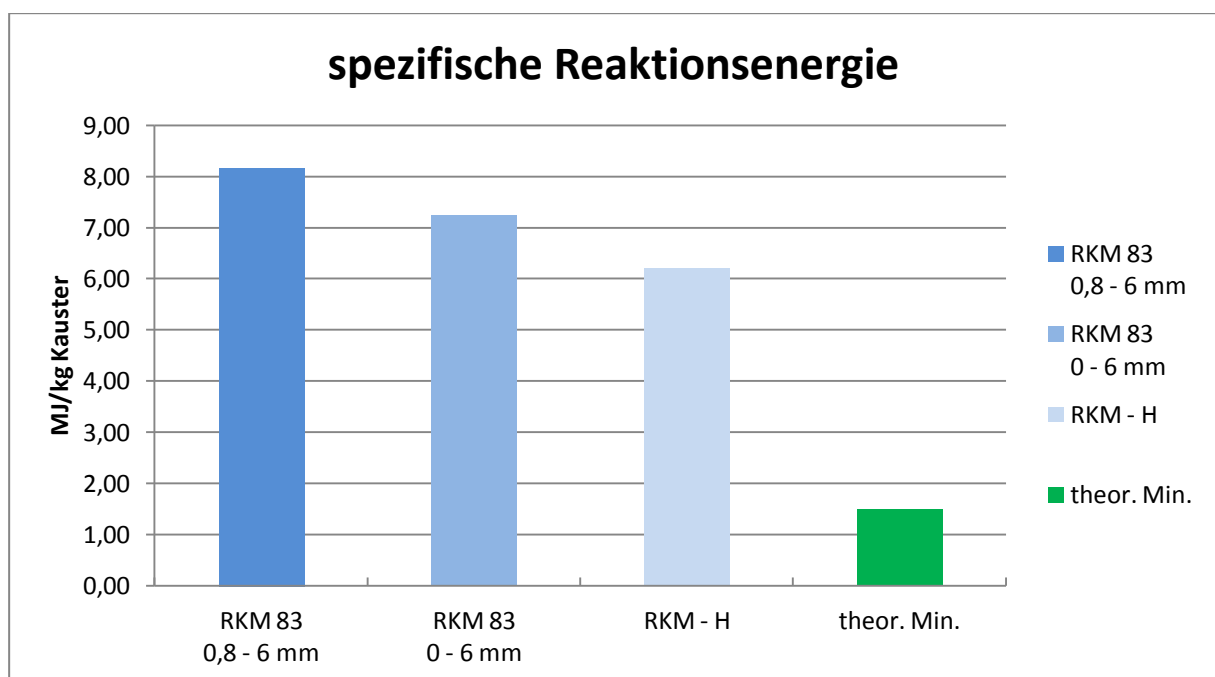


Abbildung 39: spezifischer Energiebedarf der hergestellten Produkte [5]

Das theoretische Minimum spiegelt hier die minimale Energie wieder, die aufgebracht werden muss, damit ein Kilogramm Rohmagnesit getrocknet, auf die minimale Reaktionstemperatur erhitzt und anschließend vollständig entsäuert wird. Die drei hergestellten Produkte liegen hier signifikant über diesem theoretischen Wert, da das Aggregat dementsprechend alt ist, was zu hohen Verlusten im gesamten Prozess führt, und die derzeitigen Prozessbedingungen nicht optimal sind.

Die in der Energiebilanz ermittelten Energieverbräuche stimmen im Großen und Ganzen gut mit den Erfahrungswerten der Produktions-/Prozessverantwortlichen überein und sind schlüssig in Hinsicht auf die ermittelten Wärmeverluste sowie die produzierten Mengen.

3.5 Prozessbetrachtung hinsichtlich Qualität

Die Herstellung von kaustisch gebranntem Magnesit ist schon seit Jahrzehnten ein Geschäftsbereich der RHI – AG, wodurch das Wissen um den Prozess und die Eigenschaften des Ausgangs- und Fertigproduktes sehr detailliert ist. Die Anforderungen aus dem Kundenbereich und die Zusatzanforderungen des Gesetzgebers im Bereich des Futtermittelkausters sind in den letzten Jahren immer weiter gestiegen. Daher wird im Zuge der Masterarbeit auch eine Analyse der Qualitätskriterien und der Qualitätssicherung im Herstellungsprozess durchgeführt.

Die Produktion von Kauster unterliegt, bedingt durch Unregelmäßigkeiten im Gebirge, vielen Einflussfaktoren, die auch nicht alle direkt kontrollierbar oder steuerbar sind. So können die Verantwortlichen im Bergbau nicht immer nur dort abbauen, wo die Qualität gerade zu 100 Prozent passt, sondern müssen sich an den Gegebenheiten orientieren. Daher eignet sich eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse sehr gut für den Prozess der Kausterherstellung, da durch die erstellte Prozessstruktur und die anschließende Fehleranalyse und Bewertung, Optimierungspotentiale sehr gut aufgezeigt werden können.

3.5.1 Organisation und Durchführung der FMEA

Zur Erstellung der FMEA wurde ein Projektteam bestehend aus den Anlagenfahrern vor Ort, dem Fertigungslinienleiter für Rohstoffe, dem Bereichsleiter für Rohstoffe und dem Verantwortlichen für die Qualitätssicherung gegründet. Dieses Team hat sich intensiv mit den möglichen Fehlern im Prozess, den etwaigen Auswirkungen auf den Kunden, der Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers und der Auftretenswahrscheinlichkeit des Fehlers beschäftigt.

Um die Analyse so detailliert und genau als möglich durchzuführen, wurden alle Bereiche und Abschnitte der Kausterherstellung mit allen Beteiligten besichtigt und die Ergebnisse der Begehung immer vor Ort notiert. In den anschließenden Besprechungen wurden die aufgeschriebenen möglichen Fehler nochmals analysiert sowie die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten besprochen und niedergeschrieben. Aus den daraus gewonnenen Daten wurde die FMEA erstellt und nochmals mit dem Projektteam besprochen. Es wurden anschließend Optimierungspotentiale abgeleitet und mit Fristen bzw. Terminen hinterlegt. Nachfolgend ist Erstellung der FMEA im Detail beschrieben.

3.5.2 Prozessstruktur

Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen den Prozess der Kausterherstellung aufgeteilt auf zwei Teile, da eine gemeinsame Darstellung in einer Abbildung auf Grund der vielen einzelnen Prozessschritte nicht möglich ist. Im Anhang ist eine weitere Prozessdarstellung angefügt, bei der nur die übergeordneten Hauptschritte dargestellt sind.

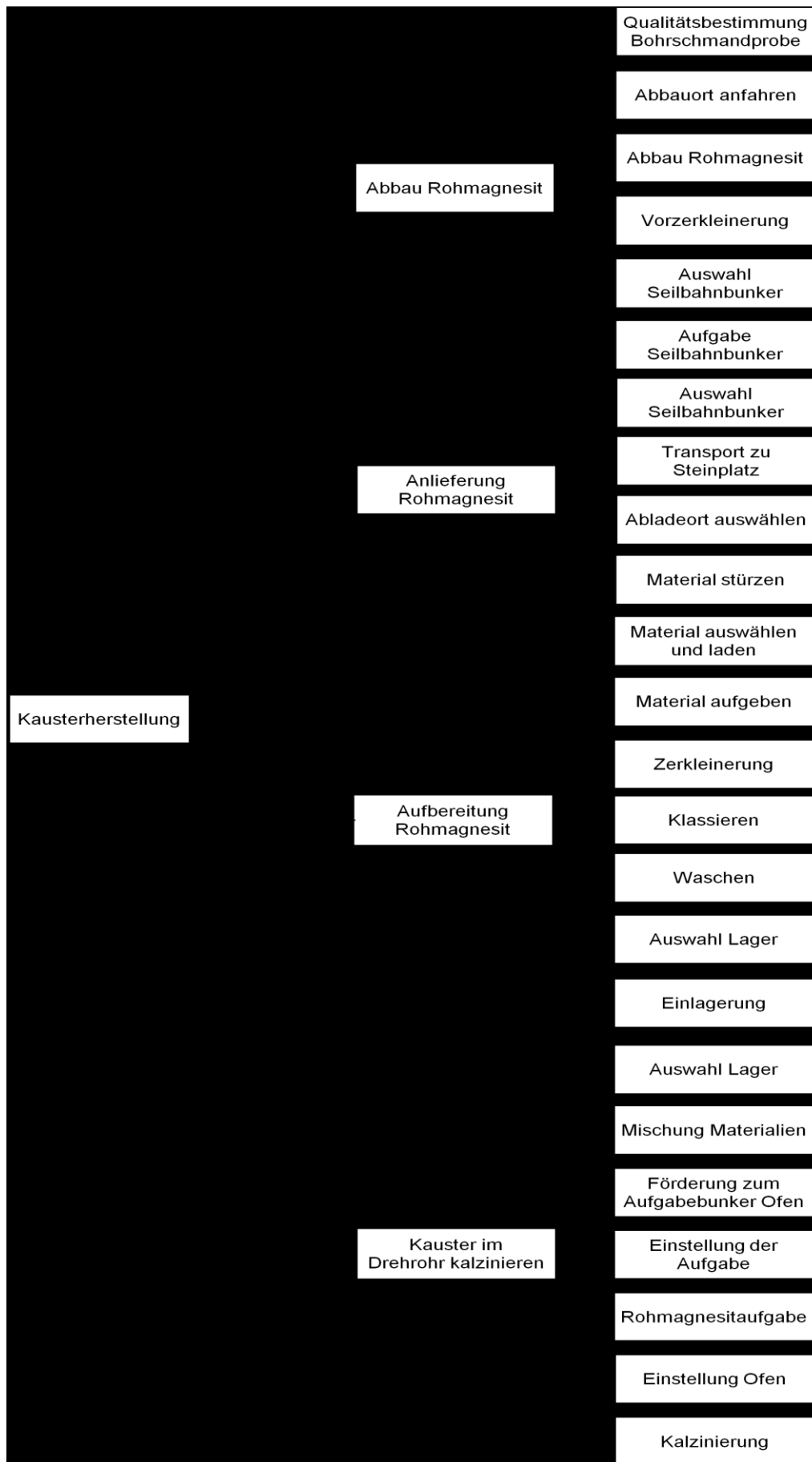


Abbildung 40: Erster Teil der Prozessstruktur der Kausterherstellung

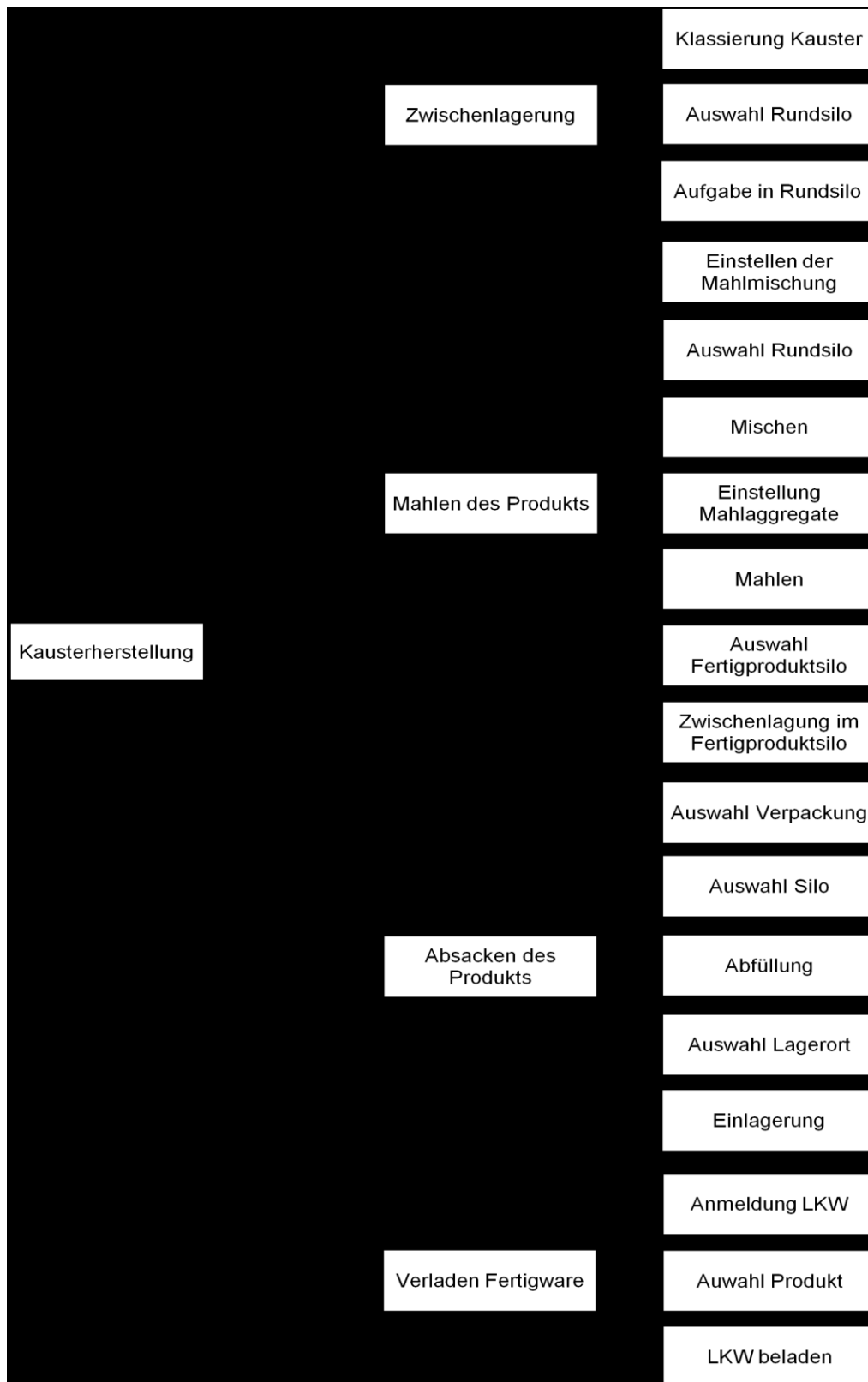


Abbildung 41: Zweiter Teil der Prozessstruktur der Kausterherstellung

Aus den Abbildungen geht hervor, dass der Prozess der Kausterherstellung relativ aufwendig ist und in vielen Einzelschritten durchgeführt wird. Der Verkauf des Kausters wurde in der FMEA nicht berücksichtigt, da die Vermarktung durch eine konzernübergreifende Stelle durchgeführt wird. Deutlich aus der Prozessstruktur

herauszulesen ist, dass bei diesem Prozess sehr viel ein- und ausgelagert wird, was auf der einen Seite auf die gewachsenen Strukturen mit daraus notwendigen Lagerständen zum Aufrechterhalten der Produktion zurückzuführen ist. Andererseits können einige große Aggregate im Prozess nur dann wirtschaftlich und effizient betrieben werden, wenn größere Mengen an Material verarbeitet werden.

Die angeführten Prozessschritte stellen alle Hauptschritte im Prozessablauf dar und fassen mehrere einzelne Arbeitsschritte zusammen. Dies wurde mit dem Projektteam gemeinsam so definiert, um den Prozessablauf übersichtlich zu gestalten.

Am Beispiel „Qualitätsbestimmung Bohrschandprobe“ wird nachfolgend gezeigt, warum sich das Projektteam entschieden hat die einzelnen Arbeitsschritte im Prozess zu Prozessschritten zusammenzufassen:

- Prüfprotokoll für Bohrschandprobe im ERP – System anlegen und überprüfen,
- Prüfprotokoll in die tägliche Arbeitsanweisung des Bergbaus aufnehmen,
- Bohrschandprobe am geplanten Abbauort ziehen,
- Bohrschandprobe mit Abbauort, Datum und Uhrzeit versehen,
- Probe ins Labor nach Radenthein bringen,
- Probe im Labor annehmen und für Analyse vorbereiten,
- Analyse der Probe durchführen,
- Analysenbericht erstellen und ins ERP – System stellen,
- Freigabe des Abbauorts durch den Qualitätsverantwortlichen,
- Bestätigung der Freigabe durch den Betriebsleiter des Bergbaus,
- Abbauort in Abbauplan aufnehmen und Abbau einplanen.

Entsprechend der am Beispiel angeführten Punkte wurden auch die Auftretens- und die Entdeckungswahrscheinlichkeit für die zusammengefassten Prozessschritte bestimmt.

3.5.3 Fehleranalyse

Um die Fehler im Prozess darzustellen wurde jeder Schritt der Prozessstruktur negiert und dadurch eine Fehleranalyse durchgeführt. Als mögliche Fehlerfolge wurde, wie aus den Abbildung 42 und Abbildung 43 zu entnehmen ist, „keine Kausterherstellung“ definiert. Das entspricht auch der Produktion einer fehlerhaften oder qualitativ schlechten Charge, da diese schwer bis gar nicht mehr verkauft werden kann.

Mögliche Fehlerfolge	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursache
	Kein Abbau Rohmagnesit	Keine Qualitätsbestimmung Bohrschmandprobe
		Falschen Abbauort anfahren
		Kein Abbau Rohmagnesit
		Keine Vorzerkleinerung
		Falsche Auswahl Seilbahnbunker
		Keine Aufgabe Seilbahnbunker
		Falsche Auswahl Seilbahnbunker
	Keine Anlieferung Rohmagnesit	Kein Transport zum Steinplatz
		Falschen Abladeort auswählen
		Material nicht stürzen
		Falsches Material auswählen und laden
		Falsches Material aufgeben
		Keine Zerkleinerung
		Keine Klassierung
Keine Kausterherstellung	Falsche Aufbereitung Rohmagnesit	Kein Waschen
		Auswahl falsches Lager
		Keine Einlagerung
		Auswahl falsches Lager
		Keine Mischung Materialien
	Kauster im Drehrohr falsch kalziniert	Keine Förderung zum Aufgabebunker Ofen
		Keine/Falsche Einstellung der Aufgabe
		Keine Rohmagnesitaufgabe
		Keine/Falsche Einstellung Ofen
		Keine/Falsche Kalzinierung

Abbildung 42: Erster Teil der Fehleranalyse für die Kausterherstellung

Mögliche Fehlerfolge	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursache
Keine Kausterherstellung	Falsche Zwischenlagerung	Keine Klassierung Kauster
		Falsche Auswahl Rundsilo
		Keine Förderung in Rundsilo
		Keine/Falsche Einstellung der Mahlmischung
		Falsche Auswahl Rundsilo
		Kein/Falsches Mischen
	Kein Mahlen des Produkts	Falsche Einstellung Mahlaggregate
		Kein Mahlen
		Falsche Auswahl Fertigproduktsilo
	Kein Absacken des Produkts	Keine Zwischenlagerung im Fertigproduktsilo
		Falsche Auswahl Verpackung
		Falsche Auswahl Silo
		Keine Abfüllung
		Falsche Auswahl Lagerort
		Keine/Falsche Einlagerung
		Keine/Falsche Anmeldung LKW
	Kein Verladen Fertigware	Falsche Auswahl Produkt
		LKW nicht beladen

Abbildung 43: Zweiter Teil der Fehleranalyse für die Kausterherstellung

3.5.4 Fehlerbewertung

In diesem Schritt wurde eine Risikobewertung auf Grund der Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, der Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers und der Bedeutung für den Kunden durchgeführt. Diese Bewertung ist an die Zahlenwerte im VDA Band 4 angelehnt. Die tatsächliche Gewichtung und Verteilung der Wahrscheinlichkeiten sowie der Fehlerhäufigkeiten ist auf Grund der Wahrung von Betriebsgeheimnissen nicht in der Arbeit veröffentlicht.

Die Bedeutung der Fehlerfolge „keine Kausterherstellung“ wurde mit 10 Punkten (schwerwiegender Fehler) bewertet, da es besonders am Markt für Futtermittelkauster viele Konkurrenten gibt und sich das Unternehmen keine Qualitätseinbußen oder eine Nichteinhaltung von Lieferterminen leisten kann. Auch bei der Produktion von Baustoffkauster muss auf die Reaktionszeit und –temperatur sowie die Mahlfeinheit besonders geachtet werden, da auch hier die Kunden jederzeit auf Ersatzbindemittel umsteigen könnten.

Bei der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit wurde eine Skala von 1 bis 10 verwendet, wobei bei der Auftretenswahrscheinlichkeit 1 für sehr unwahrscheinlich und 10 für Fehlerauftreten ist fast sicher steht. Bei der Entdeckungswahrscheinlichkeit steht 1 für einen Fehler der offensichtlich ist und 10 für einen Fehler der fast nicht entdeckt werden kann.

Die Fehler „kein Abbau von Rohmagnesit“ und „keine Anlieferung von Rohmagnesit“ wurden mit einer Entdeckungswahrscheinlich von 1 bewertet, da es sich um offensichtliche Fehler handelt, die vom Personal selbst entdeckt werden. Die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Fehlerursachen der beiden möglichen Fehler sind ebenfalls als sehr unwahrscheinlich bzw. unwahrscheinlich eingestuft, da hier bei den kritischen Stellen immer das Vieraugenprinzip angewandt wird.

Der mögliche Fehler „falsche Aufbereitung Rohmagnesit“ wurde mit einer Entdeckungswahrscheinlichkeit von 3 gewichtet, da immer über mehrere Schichten hinweg dasselbe Material aufbereitet wird und dadurch die Möglichkeit einen Fehler zu entdecken groß ist. Dass das Zerkleinern, Klassieren, Waschen, die Auswahl des Lagers oder das Einlagern des Materials in die Hanglager mögliche Fehlerursachen sind, kann auf Grund der Automation des Prozesses und den optischen Unterschieden beim aufbereiteten Material als nicht wahrscheinlich eingestuft werden. Hingegen ist die Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursachen „Auswählen und Aufladen des Materials“ sowie „Aufgeben“ hoch, da hier oft die Lagernummer durch das Material verdeckt wird. Außerdem wird diese Arbeit in der Vormittagsschicht oft nicht direkt von einem Anlagenfahrer, sondern von einem werksübergreifend arbeitenden Baggerfahrer erledigt. Daher wurden die Fehlerursachen „falsches Material wird ausgewählt“ und aufgeladen sowie „falsches Material wird aufgegeben“ mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 5 bewertet.

Dass der Kauster im Ofen falsch kalziniert wird, ist ein möglicher Fehler, der dem Anlagenfahrer binnen ein paar Stunden zwar nicht unmittelbar auffällt, doch die mindestens zweimal pro Schicht durchgeführte Bestimmung des Glühverlustes führt zu einer hohen Entdeckungswahrscheinlichkeit, die daher mit 3 angenommen wurde. Die möglichen Fehlerursachen „Auswahl des falschen Materials“, „keine Mischung der Materialien“, „keine Förderung zum Aufgabebunker“, „keine/falsche Einstellung der Aufgabe“ und „keine Rohmagnesitaufgabe“ sind alle relativ unwahrscheinlich und wurden daher nicht allzu hoch bewertet. Hingegen können die „falsche Einstellung des Ofens“ oder „falsche Kalzinierung des Materials“ sehr wohl häufig auftreten, auch da der Ofen immer verzögert auf Einstellungen der Anlagenfahrer reagiert. Daher kommt es durchaus öfters vor, dass Material, das eigentlich nicht zu heiß gebrannt werden sollte, trotzdem sehr heiß wird und dadurch zu wenig Glühverlust hat. Das ist vor allem beim Baustoffkauster sehr problematisch. Durch die hohe Auftretenswahrscheinlichkeit wurden diese beiden möglichen Fehlerursachen mit 6 gewichtet.

Der Fehler „falsche Zwischenlagerung“ ist auf Grund der gewachsenen Strukturen, die für heutige Standards sehr unübersichtlich sind, relativ wahrscheinlich, wenngleich dieser Fehler noch nicht so oft aufgetreten ist. Das Projektteam ist hier zum Schluss gekommen, dass eine falsche Zwischenlagerung, bedingt durch die ständigen Kontrollgänge der Anlagenfahrer, nicht allzu wahrscheinlich ist und hat die Entdeckungswahrscheinlichkeit dieses Fehlers mit 4 bewertet. Die möglichen Fehlerursachen „keine Klassierung Kauster“ und „keine Förderung in Rundsilos“ sind auf Grund der hohen Zuverlässigkeit und der kurzen Wartungsdauer der Aggregate nicht wahrscheinlich. Dass der Anlagenfahrer den falschen Rundsilos auswählt und das Material dann falsch zwischengelagert wird, ist auf Grund der unübersichtlichen Materialführung und den diversen Stellmöglichkeiten im Prozessfluss möglich und wurde daher mit 4 bewertet.

Die Entdeckungswahrscheinlichkeit für „falsches Mahlen des Produkts“ wurde mit 3 bewertet, da derzeit durch ständige Eigenkontrollen des Anlagenfahrers die Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu entdecken relativ groß ist. Die Fehlerursachen „falsches Mischen der Kauster“ und „falsche Einstellung der Mahlaggregate“ sind mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 5 gewichtet, da hier einerseits die Aufgabe mittels Zellenradschleuse anfällig für Verstopfungen ist und andererseits die Mahlaggregate größtenteils aus den frühen 1970er Jahren stammen.

Beim Fehler „kein/falsches Absacken des Produkts“ ist die Entdeckungswahrscheinlichkeit mit 4 gewichtet, da es sich um einen leicht erkennbaren Fehler handelt, wenn nicht das richtige Produkt abgefüllt wird. Die Fehlerursache „falsche Verpackung“ wird ausgewählt hat eine mäßige Auftretenswahrscheinlichkeit, da es hier auf Grund der verschiedenen etikettierten Säcke zu Verwechslungen kommen kann. „Falsche Auswahl des Silos“, „keine Abfüllung“, „falsche Auswahl des Lagerorts“ und „falsche Einlagerung“ haben eine geringe Wahrscheinlichkeit einzutreten.

Der Fehler „kein Verladen der Fertigware“ ist ein leicht erkennbarer Fehler und wurde daher mit 2 bewertet, denn der LKW – Fahrer fährt nicht vom Werksgelände weg, ohne dass sein Fahrzeug beladen ist. Daher ist die Fehlerursache „LKW wird nicht beladen“ ebenfalls als unwahrscheinlich einzustufen und hat daher eine Auftretenswahrscheinlichkeit von 1. „Keine/Falsche Anmeldung des LKW’s“ und „falsche Auswahl des Produkts“ sind hingegen Fehlerursachen, die auf Grund der mangelnden Deutsch – Kenntnisse der LKW – Fahrer sehr wohl öfters ein Problem darstellen und sind daher mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 8 und 7 bewertet.

Die nachfolgenden Abbildung 44 und Abbildung 45 fassen die oben erläuterten Risikobewertungen zusammen. Die Bedeutung für den Kunden wird mit der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit multipliziert und ergibt die Risikoprioritätszahl (RPZ). Alle Fehler mit einer RPZ größer 125 werden als kritisch angesehen und wurden rot markiert. Hier ist eine weitere genauere Betrachtung notwendig und es müssen Maßnahmen gesetzt werden.

Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ
keine Kausterherstellung	10	kein Abbau Rohmagnesit	Keine Qualitätsbestimmung der Bohrschmandprobe		2		1	20
			Falscher Abbauort	4 Augenprinzip	2	20		
			Rohmagnesit wird nicht abgebaut		1	10		
			Keine Vorzerkleinerung		1	10		
			Falsche Auswahl des Seilbahnbunkers		2	20		
		Keine Aufgabe in Seilbahnbunker		1	10			
		keine Anlieferung Rohmagnesit	Falsche Auswahl des Seilbahnbunkers	4 Augenprinzip	2	20		
			Kein Transport zum Steinplatz	Regelmäßige Wartung Seilbahn	3	30		
			Falscher Abladeort wird ausgewählt		3	30		
			Material wird nicht gestürzt		2	20		
	Falsches Material wird ausgewählt und aufgeladen			5	150			
	falsche Aufbereitung Rohmagnesit	Falsches Material wird aufgeben		5	150			
		Keine Zerkleinerung	regelmäßige Wartung	4	120			
		Kein Klassieren	regelmäßige Wartung	4	120			
		Kein Waschen	regelmäßige Wartung	4	120			
		Auswahl des falschen Lagers		4	120			
		Keine Einlagerung des aufbereiteten Materials		1	30			
		Auswahl des falschen Lagers		4	120			
	Kauster im Drehrohr falsch kalzinieren	Keine Mischung der Materialien	Vorgaben aus dem Labor mittels Anruf weitergegeben	3	90			
		Keine Förderung zum Aufgabebunker des Ofens	regelmäßige Wartung	2	60			
Keine/Falsche Einstellung der Aufgabe			4	120				
Keine Rohmagnesitaufgabe			3	90				
Keine/Falsche Einstellung des Ofens			6	180				
Keine/Falsche Kalzinierung			5	150				

Abbildung 44: Risikobewertung Teil 1

keine Kausterherstellung	10	Falsche Zwischenlagerung	Keine Klassierung Kauster	regelmäßige Wartung Taumelsieb	3	4	120
			Falsche Auswahl des Rundsilos		4		160
			Keine Förderung in Rundsilo	regelmäßige Wartung	3		120
	Kein/Falsches Mahlen des Produkts	Keine/Falsche Einstellung der Mahlmischung	Vorgaben aus dem Labor mittels Anruf weitergegeben	4	120		
		Falsche Auswahl des Rundsilos		4	120		
		Keine/Falsches Mischen der Kauster		5	150		
		Falsche Einstellung der Mahlaggregate		5	150		
		Keine/Unzureichende Mahlung		3	90		
		Falsche Auswahl des Fertigproduktsilos		3	90		
		Keine Zwischenlagerung im Fertigproduktsilo		1	30		
	Kein/Falsches Absacken des Produkts	Falsche Verpackung wird ausgewählt		4	160		
		Falsche Auswahl des Silos		2	80		
		Keine Abfüllung		3	120		
		Falsche Auswahl des Lagerorts		2	80		
	Kein Verladen der Fertigware	Keine/Falsche Einlagerung		2	80		
		Keine/Falsche Anmeldung des LKW's		8	160		
		Falsche Auswahl des Produktes		7	140		
LKW wird nicht beladen			1	20			

Abbildung 45: Risikobewertung Teil 2

Folgende Fehler wurden zusammenfassend als kritisch identifiziert:

- Falsches Material wird ausgewählt und aufgeladen,
- falsches Material wird aufgegeben,
- keine/falsche Einstellung des Ofens,
- keine/falsche Kalzinierung,
- falsche Auswahl des Rundsilos,
- kein/falsches Mischen der Kauster,
- falsche Einstellung der Mahlaggregate,
- falsche Verpackung wird ausgewählt,
- keine/falsche Anmeldung des LKW's und
- falsche Auswahl des Produktes.

3.5.5 Optimierungs- und Verbesserungspotentiale

Nach der Auswertung der Risikobewertung hat sich das Projektteam wieder getroffen und über Maßnahmen beraten, die das Risiko senken könnten.

Die Fehlerursachen „falsches Material wird ausgewählt und aufgeladen“ sowie „falsches Material wird aufgegeben“ kommen meist durch unzureichende Kennzeichnung der Materialien zustande. Das aus dem Bergbau mit der Materialeilbahn angelieferte Material wird oft so lange auf dasselbe Hanglager gestürzt, bis durch den anwachsenden Haufen die Bezeichnung des Lagers nicht mehr erkennbar ist. Dadurch kann es vorkommen, dass vor allem unerfahrene Anlagenfahrer zum falschen Material greifen. Als Vermeidungs- bzw. Optimierungsmaßnahme wurde vereinbart, dass die Kennzeichnung am Steinplatz so platziert wird, dass es eine eindeutige Identifizierung des Materials jederzeit möglich ist, wodurch die Auftretenswahrscheinlichkeit auf 2 gesenkt werden konnte.

„Keine/Falsche Einstellung des Ofens“ und „keine/falsche Kalzinierung“ sind zwei Fehlerursachen, die besonders wichtig für die Qualität des Endprodukts sind. Speziell bei der Produktion von RKM – H darf der Glühverlust des Kausters nicht zu gering sein, da sonst die physikalisch benötigten Eigenschaften beim Abbinden nicht mehr oder in geringerem Ausmaß gegeben sind. Daher hat das Projektteam entschieden, dass für die Kalzination des Kausters und für das Mahlen des Produkts ein Know – How – Book erstellt wird, um einerseits das Wissen der Anlagenfahrer aneinander anzugleichen und andererseits ein Nachschlagwerk zu schaffen, falls sich Anlagenfahrer bei einer Entscheidung nicht sicher sein sollten. Dadurch kann die Auftretenswahrscheinlichkeit von Fehlern deutlich reduziert werden, was zu einer Senkung der Auftretenswahrscheinlichkeit auf 3 führt.

Derzeit ist nur ein Klick mit der Maus notwendig, um den Rundsilo für das Produkt auszuwählen. Dadurch kann es bei einem falschen Klick dazu kommen, dass das Produkt in den falschen Silo gefördert wird. Die Anlagenfahrer sind hier aber sehr gewissenhaft und kontrollieren den Förderweg des Materials immer zweimal. Doch um diesen Fehler fast vollständig ausschließen zu können, wird im Steuerungsprogramm der gewählte Förderweg nun grün markiert und erlaubt dem Anlagenfahrer somit eine schnelle optische Kontrolle, ob der gewählte Rundsilo die richtige Wahl war. Dadurch kann die Entdeckungswahrscheinlichkeit auf 2 gesenkt werden.

Die Fehlerursachen „kein/falsches Mischen der Kauster“ und „falsche Einstellung der Mahlaggregate“ sind, wie bereits erwähnt, entscheidend für die Produktqualität. Die Anlagenfahrer haben hier auch oft das Problem, dass durch die langen Wege, die für die Kontrolle zurückgelegt werden müssen, viel Zeit zwischen der Einstellung der Maschine und der möglichen Kontrolle von, zum Beispiel, Mahlfineinheit liegen. Auf Grund von Erfahrungswerten der Mitarbeiter treten hier nur kleine Schwankungen auf. Die Erfahrungen könnten aber durch das Know – How – Book gut unter den Schichten ausgetauscht und weitergegeben werden. Daher wird hier durch die Erstellung eines Know – How – Books die Auftretenswahrscheinlichkeit auf 3 gesenkt.

Dass die falsche Verpackung zum Absacken ausgewählt wird, ist zwar derzeit nicht unwahrscheinlich, aber da für diesen Prozessschritt zwei Mitarbeiter benötigt werden, herrscht aktuell bereits eine hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit. Als Maßnahme für diese Fehlerursache hat das Projektteam beschlossen, dass das Personal bei den nächsten Unterweisungen nochmals gezielt darauf hingewiesen wird, dass sie die Verpackung vor dem Absacken kontrollieren werden muss. Dadurch können die Auftretenswahrscheinlichkeit auf 2 und die Entdeckungswahrscheinlichkeit auf 3 gesenkt werden.

Beim Fehler „kein Verladen der Fertigware“ treten die Fehlerursachen meist auf der Seite von externen Speditionen auf. Daher hat sich das Projektteam entschlossen die Fahrer und Vertreter der Speditionen vermehrt auf die Laderampen- und Silokennzeichnungen hinzuweisen. Zusätzlich werden vorhandenen Markierungen für die Anmeldung und Verladung noch deutlicher platziert. Die Kombination dieser Maßnahmen kann die Auftretenswahrscheinlichkeit bei beiden Fehlern auf 4 reduzieren.

Die Zusammenfassung der erläuterten Optimierungsmaßnahmen sind Tabelle 26 zu entnehmen.

Tabelle 26: Zusammenfassung der Optimierung

Mögliche Fehlerfolge	B	Mögliche Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Empfohlene Maßnahmen	Verantw.	Durchgef.	B	A	E	RPZ		
keine Kausterherstellung	10	Kein Abbau Rohmagnesit	Keine Qualitätsbestimmung der Bohrschmandprobe									
			Falscher Abbauort									
			Rohmagnesit wird nicht abgebaut									
			Keine Vorzerkleinerung									
			Falsche Auswahl des Seilbahnbunker									
		Keine Anlieferung Rohmagnesit	Keine Aufgabe in Seilbahnbunker									
			Falsche Auswahl des Seilbahnbunkers									
			Kein Transport zum Steinplatz									
			Falscher Abladeort wird ausgewählt									
			Material wird nicht gestürzt									
		Falsche Aufbereitung Rohmagnesit	Falsches Material wird ausgewählt und aufgeladen		Deutlichere Kennzeichnung am Steinplatz	Bereichsleiter	Ja	10	2	3	60	
			Falsches Material wird aufgegeben									
			Keine Zerkleinerung									
			Kein Klassieren									
			Kein Waschen									
			Auswahl des falschen Lagers									
		Kauster im Drehrohr falsch kalzinieren	Keine Einlagerung des aufbereiteten Materials									
			Auswahl des falschen Lagers									
			Keine Mischung der Materialien									
			Keine Förderung zum Aufgabebunker des Ofens									
			Keine/Falsche Einstellung der Aufgabe									
			Keine Rohmagnesitaufgabe		Verfassen eines Know-How-Books Schulung Anlagenfahrer	BL & Diplomand	bis 05.2015	10	3	3	90	
			Keine/Falsche Einstellung des Ofens									
		Keine/Falsche Kalzinierung										
		Falsche Zwischenlagerung	Keine Klassierung Kauster		Markierung des Förderwegs bei Auswahl des Silos	BL & OEERTE	Ja	10	4	2	80	
			Falsche Auswahl des Rundsilos									
			Keine Förderung in Rundsilo									
		Kein/Falsches Mahlen des Produkts	Keine/Falsche Einstellung der Mahlmischung									
			Falsche Auswahl des Rundsilos		Verfassen eines Know-How-Books Schulung Anlagenfahrer	BL & Diplomand	bis 05.2015	10	3	3	90	
			Kein/Falsches Mischen der Kauster									
Falsche Einstellung der Mahlaggregate												
Keine/Unzureichende Mahlung												
Falsche Auswahl des Fertigproduktsilos												
Keine Zwischenlagerung im Fertigproduktsilo												
Kein/Falsches Absacken des Produkts	Falsche Verpackung wird ausgewählt		MA schulen	BL & Verkauf	Ja	10	2	3	60			
	Falsche Auswahl des Silos											
	Keine Abfüllung											
	Falsche Auswahl des Lagerorts											
	Keine/Falsche Einlagerung											
Kein Verladen der Fertigware	Keine/Falsche Anmeldung des LKW's		Unterweisung Speditionen und deutliche Kennzeichnung Anmeldestellen		Ja	10	4	2	80			
	Falsche Auswahl des Produktes		Unterweisung Speditionen und leichte Darstellung am Anzeigepanel der Verladestilos		Ja	10	4	2	80			
	LKW wird nicht beladen											

4 Ergebnisse und Potentiale

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich Potentiale für einzelne Prozessschritte und Komponenten der Anlage ableiten. Mögliche Optimierungspotentiale und Chancen sind nachfolgend aufgelistet:

- Optimierung des Saugzugventilators und des Schlauchfiltermaterials
 - Austausch des Schlauchfiltermaterials
 - Austausch des alten Elektromotors
- Zugoptimierung im Drehrohrföfen und in der Rauchgasreinigung
 - Verschließen diverser Falschluffquellen
 - Umbau der Regelung von Jalousieklappe auf Frequenzumformer
 - Verschluss der Frischluftklappe vor dem Schlauchfilter
- Sekundärluft zu Primärluftverhältnis verbessern
 - Verschließen der Falschluffquellen im Ofenauslauf
 - Optimierung des Brennaggregats
- Zustellung Ofeneinlauf
 - Minimierung der Wärmeverluste durch den Ofenmantel
 - Verbesserung des Wärmeübergangs Rauchgas/Magnesit
- Optimierung Ofenaufgabe
 - Vereinheitlichung des Kornbands
 - Andenken einer Vorwärmung/Trocknung des Rohsteins

Alle diese aufgezählten Faktoren sind auch voneinander abhängig und beeinflussen sich in bestimmten Grenzen immer gegenseitig, wodurch sich durch die Veränderung eines der Faktoren unmittelbar ein neuer Betriebszustand einstellt.

Im Folgenden werden die vorgeschlagenen Maßnahmen entsprechend der Reihenfolge beschrieben, in der sie auch Schritt für Schritt umgesetzt werden sollten.

4.1 Optimierung des Saugzugventilators und des Schlauchfiltermaterials

Derzeit wird im Schlauchfilter als Filtermaterial kalandriertes Polyester eingesetzt, das laut Hersteller für Temperaturen bis 150 °C und Wassergehalte bis ca. 5 – vol% geeignet ist. Da das Abgas aus dem Drehrohrföfen allerdings immer mehr Wasser enthält als 5-vol% muss die Eintrittstemperatur in das Filter derzeit von 115 °C auf 95 °C abgekühlt werden, um das Filtermaterial nicht zu viel zu beanspruchen. Dadurch wird an dieser Stelle im Prozess gezielt Energie vernichtet und gleichzeitig die Abgasmenge erheblich erhöht. Somit muss nicht nur um 20 – 25% mehr Rauchgas über das Filter gezogen werden, was die Filterflächenbelastung erhöht, sondern es muss auch der Abgasventilator mehr Abgas fördern, was zu einem deutlichen Mehrverbrauch an Energie führt.

Die allererste Maßnahme sollte daher der Austausch des Filtermaterials sein. Durch den Einsatz eines temperatur- und feuchtigkeitsbeständigen Materials, wie zum Beispiel kalandrierten Polyacrylfilterschläuchen, die bis zu einem Wassergehalt von 15 vol-% und einer Temperatur von 130 °C beständig sind, könnte die Frischluftklappe für den Dauerbetrieb geschlossen bleiben und sich nur noch im Notfall öffnen. Das heißt, dass sich die Klappe nur bei einer Überschreitung der neuen höchstzulässigen Maximaltemperatur (130 °C) selbsttätig öffnet und das Rauchgas dadurch abkühlt.

Einer der Folgeeffekte daraus wäre, dass sich die zu fördernde Abgasmenge von derzeit ca. 27000 Nm³/h auf ca. 20000 Nm³/h verringern würde. Dadurch entlastet man nicht nur das Filter durch die signifikante Reduktion der Filterflächenbelastung, sondern kann auch die Stromaufnahme des Abgasventilators bzw. des Antriebs des Ventialtors verringern. Vor allem Letztes ist interessant, da es sich beim Antriebsaggregat um einen Elektromotor mit 90 kW Leistung Baujahr 1972 handelt. Tauscht man diesen Elektromotor durch einen Neueren aus und verringert, wie beschrieben, die Abgasmenge, ergeben sich durch die große Anzahl an Betriebsstunden pro Jahr (8500) erhebliche Einsparungspotentiale.

4.2 Zugoptimierung im Drehrohrföfen und in der Rauchgasreinigung

Derzeit wird der Zug im Ofen durch den starr laufenden Abgasventilator und eine Unterdruckmessung am Ofenkopf geregelt. Starr bedeutet, dass der Ventilator ohne Unterbrechung mit konstanter Drehzahl läuft und nicht regelt. Die Regelung des Unterdrucks (Zug) im Ofen wird mit einer Jalousieklappe gesteuert. Diese öffnet und schließt sich entsprechend dem Zugsollwert der am Ofeneinlauf eingestellt wird. Derzeit ist diese Klappe immer deutlich mehr als 50 Prozent geöffnet. Außerdem beeinflusst die dem Filter vorgeschaltete Frischluftklappe die Regelung des Ofenzugs sehr stark, wie aus Abbildung 46 hervorgeht.

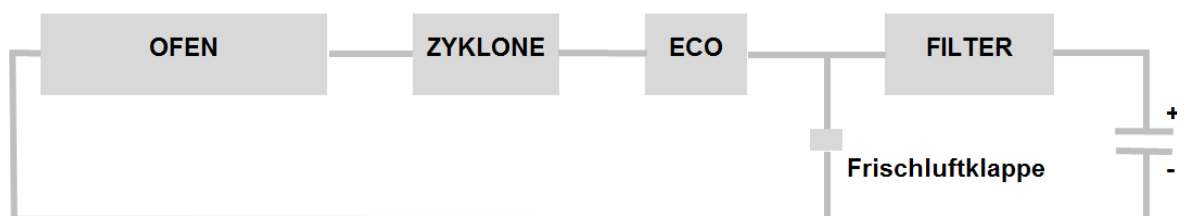


Abbildung 46: Ofenaggregate dargestellt in elektrischen Widerständen

Die Kästchen stehen entsprechen ihrer Größe für den Widerstand des jeweiligen Bauteils. Wie zu erkennen, stellt die Frischluftklappe in dieser Darstellung eine Art Kurzschluss dar, da der elektrische Strom hier weniger Widerstand hätte, würde er den kurzen Weg über die Frischluftklappe gehen und nicht den langen durch alle Einzelaggregate. In ähnlicher Weise

könnte man auch die Falschluffquelle am Ofeneinlauf, an der Ofenabdichtung und am Ofenkopf darstellen.

So wie der elektrische Strom in obiger Abbildung fließen würde, verhält es sich auch mit der Zugregelung im Drehrohrföfen und Abgassystem. Wird am Ofeneinlauf nicht der Sollwert des Unterdrucks erreicht, öffnet oder schließt sich die Jalousieklappe entsprechend. Es ändert sich zwar der Zug im Ofen, aber die tatsächliche Regelwirkung die eintreten sollte ist nicht vorhanden. Wäre der Ofenzug am Ofeneinlauf immer konstant im selben Bereich, würde die Luft immer relativ gleichmäßig durch das Drehrohr strömen und für gute Verbrennungsverhältnisse sorgen. Dadurch würde die Entstehung von Kohlenstoffmonoxid größtenteils vermieden werden und dementsprechend auch der feuerungstechnische Wirkungsgrad der Gasverbrennung steigen.

Die Auswirkungen vom Verschließen nur einer einzigen Falschluffquelle sind in Abbildung 47 gut nachvollziehbar.

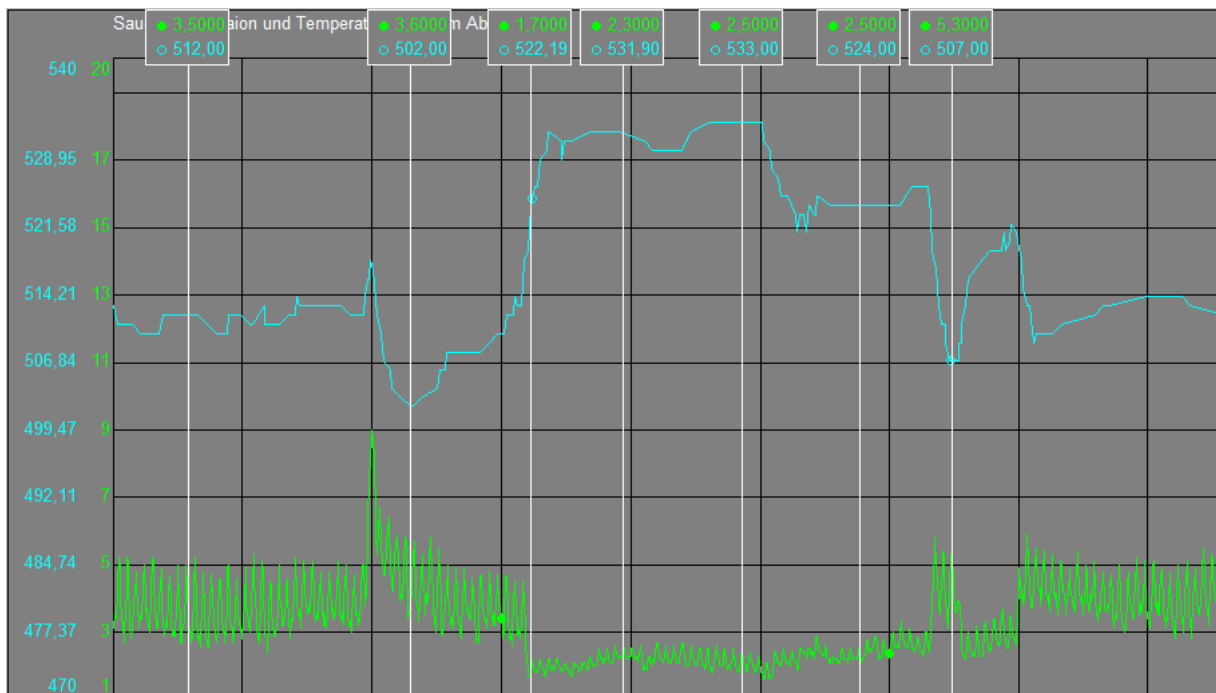


Abbildung 47: Auswertung vom Verschließen der Falschluffquelle am Ofeneinlauf

Die grüne Linie steht für die Sauerstoffkonzentration in Vol-%, die türkise Linie stellt die Austrittstemperatur aus dem Ofen dar. Der zu Beginn und am Ende des Versuchs besonders stark fluktuierende grüne Chart ist auf den schwankenden Falschluffeintrag bei der Ofenaufgabe zurückzuführen. Der hohe Peak am Anfang kommt durch die Frischluft bei der täglichen Reinigung zu Stande. Das signifikante Ansteigen der Abgastemperatur und das Absinken des Sauerstoffgehaltes sind allein auf das provisorische Verschließen der Öffnung der Telleraufgabe zurückzuführen. Abbildung 48 vermittelt einen Eindruck von der Maßnahme.



Abbildung 48: Mit einem Stück Förderband verschlossene Ofenaufgabe

Durch das Einbringen des Förderbands und das Verstopfen der übrigen Löcher mit Steinwolle, konnte der Falschlufteintrag deutlich reduziert werden, wenngleich immer noch Falschluff mit eingesogen wird.

Die Sauerstoffkonzentration ist durch den Einbau des Verschlusses um mehr als 60 Prozent gesunken und die Abgastemperatur um bis zu 30 °C angestiegen, obwohl der Verschluss der Rutsche den Falschlufteintrag nicht vollständig unterbindet. Etwas zeitverzögert steigt auch die Austrittstemperatur aus der Zyklonbatterie an. Um die Wirksamkeit des Einbaus zu beweisen, wurde dieser kurz entfernt, was sofort zum Anstieg des Sauerstoffgehalts und zum Absinken der Abgastemperatur geführt hat.

Durch eine Abdeckung der Ofenaufgabe mit einer abgedichteten Blechplatte könnte der Eintrag von Luft zu einem großen Teil vermieden werden. Noch besser wäre das Anbringen einer Doppelpendelklappe, da hier jeglicher Falschlufteintrag reduziert werden kann. Ob diese Maßnahme umsetzbar ist, wird auf Grund von dazu notwendigen Investitionen noch geprüft. Die Gefahr bei der Aufgabe mittels Pendelklappe besteht immer in der Anbackung des Materials in der Klappe, vor allem bei feuchter, feinkörniger Aufgabe, wie es bei der Produktion von RKM – H der Fall ist. Außerdem ist die bauliche Situation am Ofeneinlauf sehr beengt was zu zusätzlichen Schwierigkeiten bei der Installation einer Doppelpendelklappe führt.

4.3 Sekundärluft zu Falschluffverhältnis

Derzeit setzt sich die mindestens benötigte Verbrennungsluft wie folgt zusammen:

- ca. 20 Prozent Primärluft mit 65 °C,
- ca. 20 Prozent Sekundärluft mit 300 – 500 °C und
- ca. 60 Prozent Falschluff aus Ofenabdichtung und Ofenfenster mit 15 – 20 °C.

Die Menge an Primärluft zu erhöhen wäre prinzipiell möglich, da neben dem Ventilator der derzeit in Betrieb ist ein zweiter Ventilator mit größerer Förderleistung steht. Hier besteht allerdings die Gefahr, dass durch die größere Luftmenge eine höhere Austrittsgeschwindigkeit der Primärluft entsteht, was zum Abheben der Flamme von der Mündung des Brenners führen kann. Dadurch könnte es zum Abreißen der Flamme und daraus folgend zu gefährlichen Betriebszuständen kommen.

Wenn es mit den in 4.1 und 4.2 angeführten Potentialen gelingt den Zug im Ofen soweit zu verbessern, dass gezielt Luft durch das Brennerrohr gezogen wird, kann man das Ofenfenster mit einer Sichtscheibe aus Plexiglas abdecken und zusätzlich die bestehende Abdichtung am Ofenkopf verstärken. Dadurch würde ein Ansaugen der Sekundärluft durch den Kühler begünstigt werden, insbesondere wenn die Abdeckung am Ende des Kühlers entfernt wird.

Führt man diese Maßnahmen durch ist allerdings darauf zu achten, dass sich die Qualität des erzeugten Produktes nicht verschlechtert. Bei ersten Versuchen die Abdeckung am Ende des Kühlrohrs zu entfernen, hat sich nämlich die Zusammensetzung des ausgebrannten Produktes verändert. Der Glühverlust der Mischung war unterhalb der Eingreifgrenze, aber der Feinanteil war ausgebrannt (0 % Glühverlust) und der grobe Anteil der Probe war nahezu nicht kalziniert. Daher ist diese Maßnahme in der Anfangsphase nur mit ständig an die Produktion angepassten Qualitätskontrollen durchzuführen.

Eine weitere Möglichkeit das Nachströmen von Sekundärluft zu begünstigen ist das Optimieren des Brennaggregats. Hier besteht die Möglichkeit, dass man bei verschiedenen Herstellern von Gasbrennern anfragt, ob es für das seit 1972 im Einsatz befindliche Modell einen moderneren Ersatz gibt. Der derzeitige Mündungsmischbrenner ist ein Öl – Gas Kombinationsbrenner und sicherlich nicht mehr Stand der Technik. Allerdings werden sich die hohen Anschaffungskosten für einen neuen Gasbrenner nicht zeitnah mit den aus der Neuanschaffung resultierenden Ersparnissen amortisieren.

Es besteht sicherlich noch Potential den derzeitigen Brenner hinsichtlich axialer und radialer Luftführung zu optimieren. Abbildung 49 sind zwei verschiedene Flammenbilder zu entnehmen.

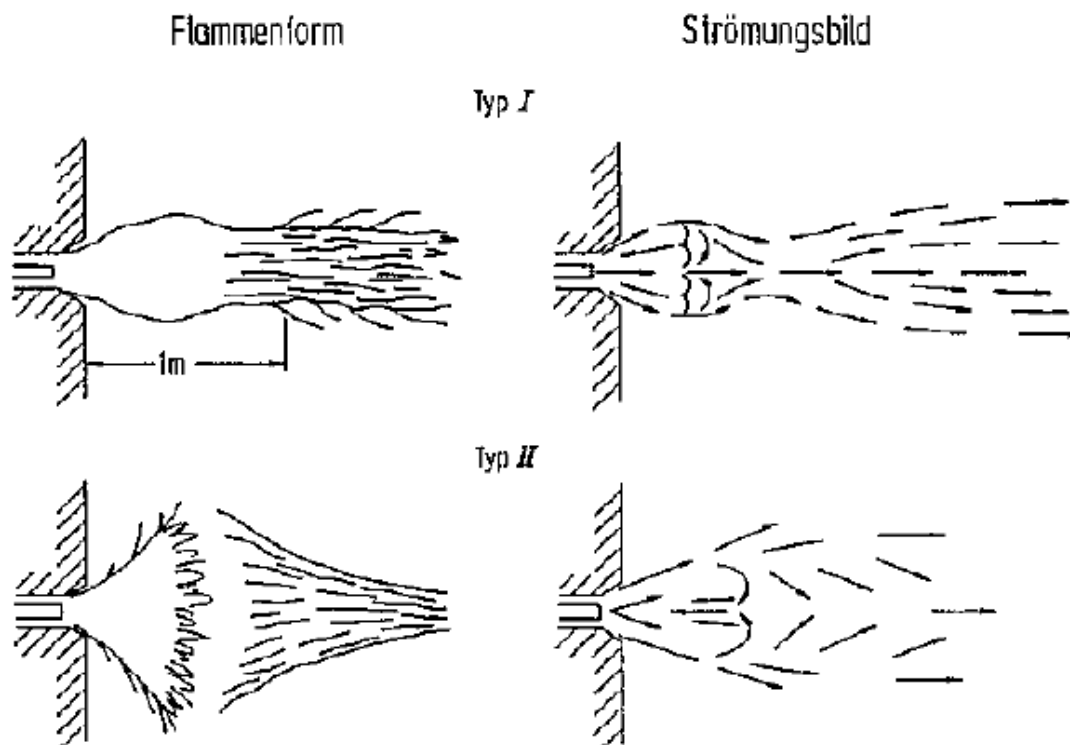


Abbildung 49: Flammenbild einer Gasfeuerung [13, S. 208]

Typ I stellt eine Flamme mit Luftdrall und hohem Gasimpuls dar, Typ II hingegen hat einen niedrigen Gasimpuls. Betrachtet man das zugehörige Strömungsbild, erkennt man, dass sich durch den hohen Gasimpuls eine Art Einschnürung bildet, wodurch bei guten Zugbedingungen das Nachsaugen von Sekundärluft aus dem Kühlerrohr gefördert wird.

4.4 Zustellung Ofeneinlauf

Da allein die Abstrahlverluste im Ofeneinlaufbereich, der derzeit nicht mit Feuerfestauskleidung zugestellt ist, fast 1700 MJ/h ausmachen ist es sicherlich eine sinnvolle Maßnahme den Ofeneinlauf mit feuerfestem Material auszumauern bzw. zu isolieren. Dadurch könnten die Temperatur des Ofenmantels gesenkt und damit die Strahlungsverluste minimiert werden. Als weiterer positiver Effekt würden sich durch die niedrigere Manteltemperatur auch die konvektiven Verluste verkleinern. Die Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die mit dem in 3.3.1.5 erwähnten Programm Simu – Therm berechneten Außenmanteltemperaturen vor und nach der Isolation. Auf der linken Seite der Abbildungen ist jeweils die Temperatur im Inneren des Drehrohrs aufgetragen, rechts die Umgebungstemperatur.

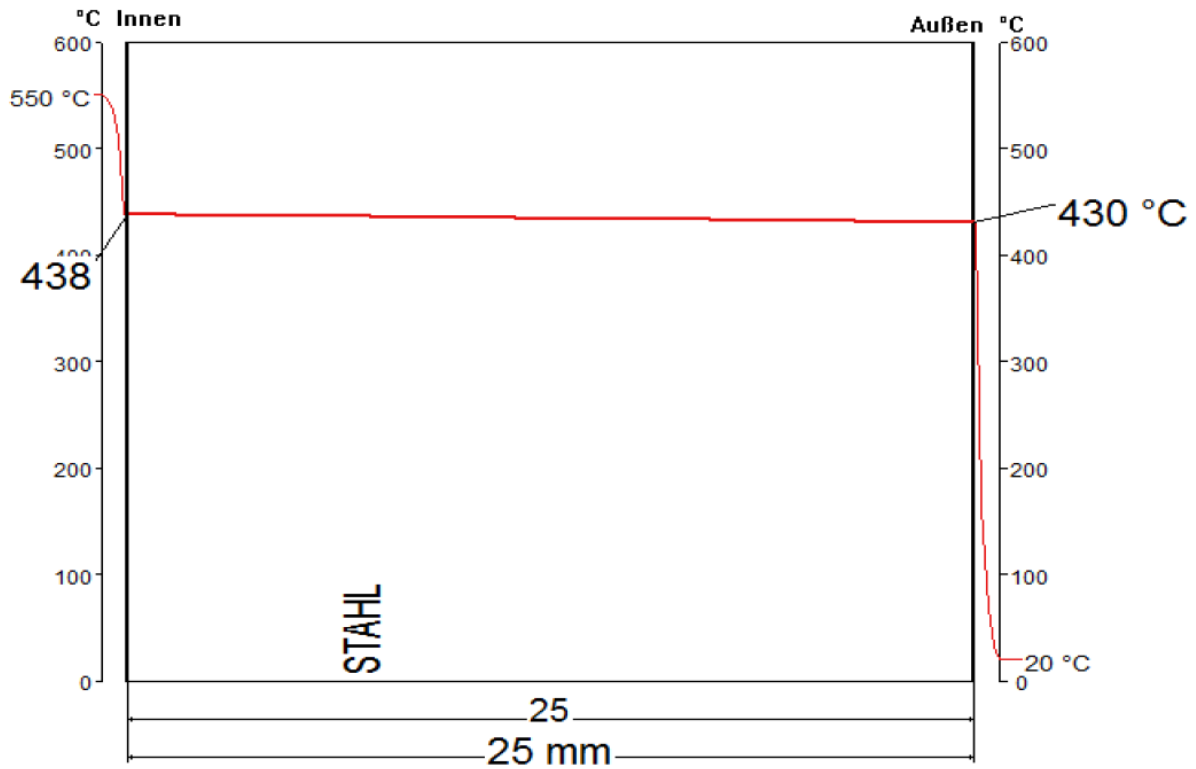


Abbildung 50: Wärmedurchgang Ofenmantel vor der Ausmauerung

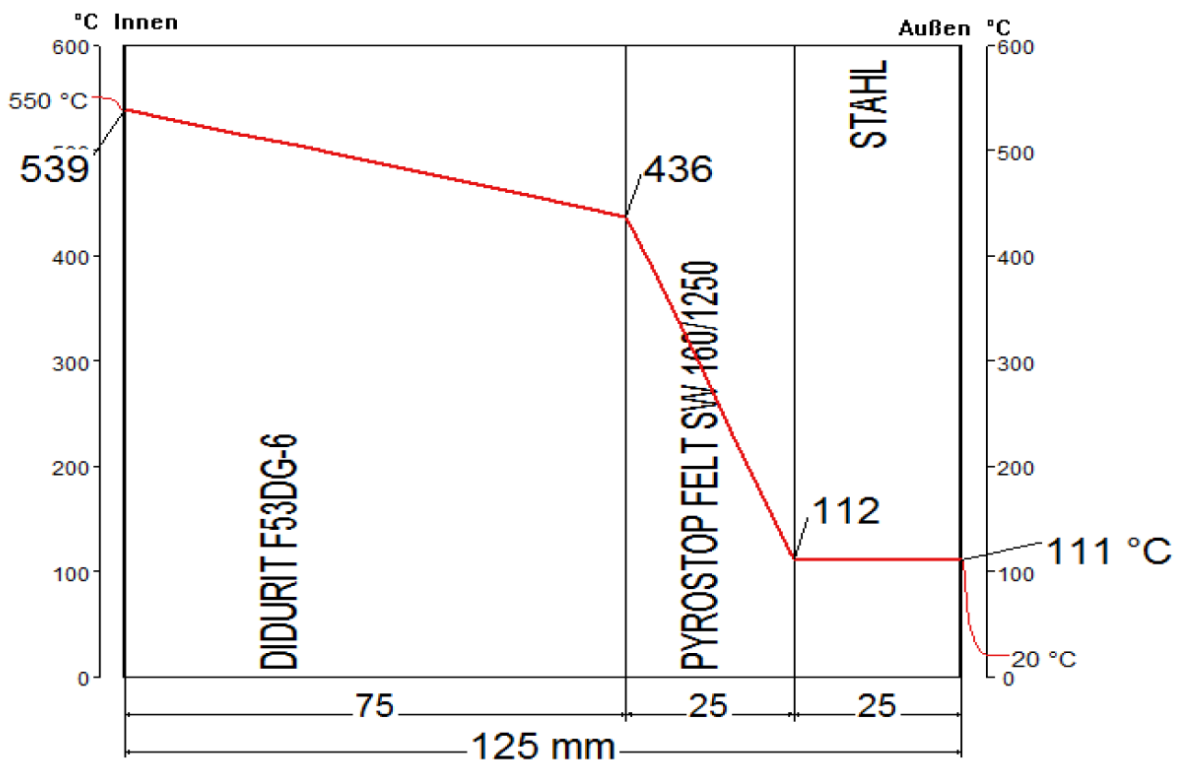


Abbildung 51: Ofenmantel nach der Ausmauerung

Beim ersten Bild zeigt sich deutlich, dass der Stahl nahezu keinen Wärmedurchgangswiderstand besitzt und die Temperatur des Mantels innen und außen fast

ident ist. Legt man das Innere des Ofens jedoch mit einer isolierenden Matte aus und gibt über diese Matte eine Schicht feuerbeständigen Beton, so kann man den Wärmedurchgang maßgeblich senken, was zu einer deutlich niedrigeren Oberflächentemperatur führt.

Dadurch lassen sich sowohl die Strahlungsverluste, als auch die konvektiven Verluste verringern, wobei vor allem der Anteil der Verluste durch Strahlung stark abnimmt, wie aus Abbildung 52 zu entnehmen ist.

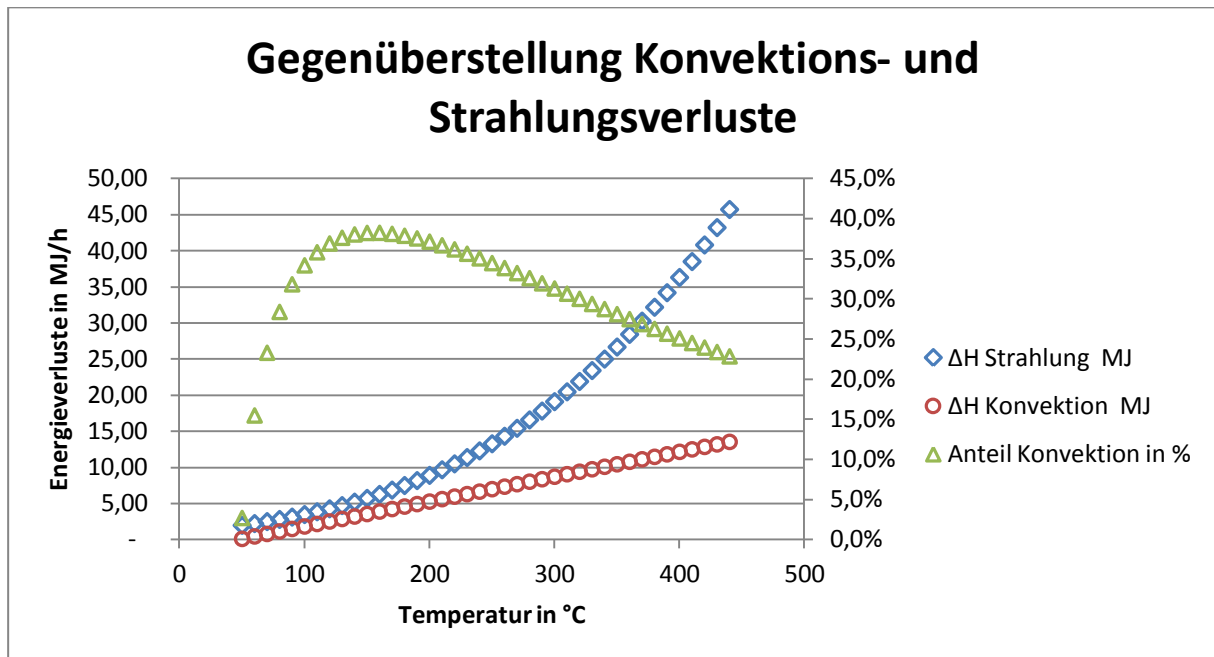


Abbildung 52: Verteilung der Wärmeverluste bei steigender Temperatur

Vorteil einer Zustellung oder Auskleidung wäre zweifellos eine Reduktion der Verluste, doch der große Nachteil dieser Maßnahme ist, dass durch den Einbau der Matten und das Verspritzen mit Feuerfestbeton die vierte Lagerrolle des Ofens mit einem zusätzlichen Gewicht von 8 – 11 Tonnen belastet wird. Hinzu kommt, dass dieser Teil des Ofens noch ein Originalbauteil von 1912 ist und niemand die genaue Zusammensetzung des Stahl kennt.

Der Kosten/Nutzen Faktor und die Risikoabschätzung für die Zustellung werden gerade durch die konzerninternen Fachleute abgewogen und bewertet. Sollte das zusätzliche Gewicht als unproblematisch für die Lagerung und die Stabilität des Ofens eingestuft werden, sollte diese Maßnahme umgesetzt werden.

Im Zuge der Zustellung des Ofeneinlaufs könnte die Mauerung als so genannte Kammmauerung ausgeführt werden. Dabei wird der Steinring, wie der Name schon sagt, als eine Art Kamm ausgeführt, bei dem je zwei kurze Steine gefolgt von einem etwas längeren eingebaut werden. Abbildung 53 zeigt das Prinzip der Mauerung.

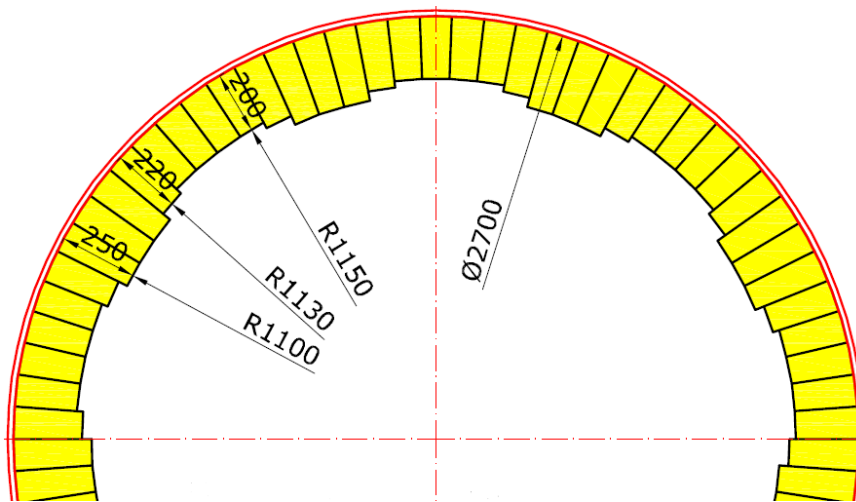


Abbildung 53: Prinzip einer Kammmauerung

Die Kammmauerung fungiert als eine Art Hubblech, die das Material mit nach oben nimmt und anschließend durch den Abgasstrom fallen lässt. Dadurch würde sich auch der Wärmeübergang vom Rauchgas auf das Gut verbessern. Zu beachten ist dabei zusätzlich, dass durch den Einbau von Hubvorrichtungen auch mehr Feinanteil in die Rauchgasreinigung gezogen werden kann, wodurch sich die Belastung der Aggregate deutlich erhöhen könnte.

4.5 Optimierung der Aufgabe

Die Korngröße und der Wassergehalt der Rohsteinaufgabe sind für die Stabilität und Beherrschbarkeit des Prozesses wesentlich. Es sollen vor allem die Schwankungen bei Korngröße relativ gering sein, da Körner größeren Durchmessers eine kleinere spezifische Oberfläche haben und dadurch der Energieeintrag in das Gut verschlechtert wird. Verteilt sich die Rohsteinaufgabe wie in 3.3.5 dargestellt, so brennt der Feinanteil stark aus und hat einen Glühverlust von 0 %, wohingegen die groben Körner nur oberflächlich kalziniert sind.

Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wird im März 2016 im Zuge eines Umbaus am Werksgelände auch der derzeitige Prallbrecher durch einen Kegelbrecher ersetzt. Dieser erzeugt Brechversuchen zufolge um 40 Prozent weniger Feinanteil als der im Augenblick im Einsatz befindliche Brecher. Zusätzlich zu dieser Maßnahme muss man die aus dem Bergbau angelieferten Korngrößen überprüfen, da es möglich ist, dass schon dort ein hoher Feinanteil entsteht, der vermieden werden sollte. Ein optimales Kornband für die Rohsteinaufgabe bei der Produktion von Futtermittelkauster wäre erfahrungsgemäß 1 – 4 mm. Der Feinanteil der beim Brechen entsteht könnte für die Herstellung von RKM – H verwendet werden.

Zur Verbesserung der Aufgabe gehört in diesem Zusammenhang auch eine Vorwärmung und Trocknung des Rohsteins. Vor allem bei der Aufgabe von gewaschenem Magnesit der Korngröße 0,1 – 0,8 mm und 0,8 – 6 mm würde sich auf Grund des mittleren Wassergehalts

von zu 6,1 bzw. 3,63 Prozent ein Trockenaggregat, das mit dem Abgas des Ofens betrieben wird, auszahlen. Man könnte bei der Produktion von RKM – H durch trockenes vorgewärmtes Material Wärmeenergie von ca. 1600 MJ/h einsparen. Bei der Herstellung von Futtermittelkauster relativiert sich dieses Einsparungspotential allerdings, da durch den geringeren Wassergehalt nur mehr 400 MJ/h Energie für die Verdampfung benötigt wird. Bei der Auslegung eines Trockenaggregats muss daher unbedingt das Verhältnis der hergestellten Produkte mit in die Kalkulation einbezogen werden.

Um eine erste Auslegung des Aggregats und die für die Inbetriebnahme notwendigen baulichen Veränderungen wird sich im Zuge eines Basis-Engineerings ein externes Ingenieurbüro kümmern. Dadurch können die Verantwortlichen eine Abschätzung der Investitionskosten vornehmen und auf Basis dessen eine entsprechende Amortisationszeit berechnen.

5 Zusammenfassung

Im Zuge der Masterarbeit wurde der Drehrohrofen im RHI – Standort Radenthein inklusive der vor- und nachgeschalteten Prozesse auf etwaige Optimierungspotentiale und Möglichkeiten der Effizienzsteigerung durchleuchtet. Dabei wurde im Speziellen das im Jahr 1912 gebaute Drehrohr genau untersucht und detaillierte Messungen durchgeführt. Hierbei wurde besonders auf die verschiedenen Betriebsbedingungen bei der Herstellung der drei Hauptprodukte (Futtermittelkauster RKM 83 0 – 6mm, RKM 83 0,8 – 6 mm und Baustoffkauster RKM – H 0,1 – 0,8 mm) geachtet.

Die Erfassung der Ofenaußenmanteltemperatur, der Primärlufttemperatur, der diversen Prozesstemperaturen sowie der Materialtemperaturen wurde mehrmals für die einzelnen Produkte durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass einige Messwerte, die in der Schaltwarte angezeigt werden, nicht mit den tatsächlich herrschenden Bedingungen übereinstimmen. Daher wurden alle Temperatur- und Zugmessungen im Prozess nochmals überprüft. Zwei Temperaturmessungen wichen besonders deutlich vom angezeigten Wert ab. Diese wurden erneuert und neu kalibriert, wodurch der Messwert um 25 % anstieg und nun dem tatsächlichen Ist – Wert entspricht.

Auch die im Prozess anfallenden Staubmengen und die zum jeweiligen Staub zugehörigen Glühverluste wurden mehrmals unabhängig voneinander bestimmt, ebenso der Wassergehalt der Aufgabe. Dabei zeigte sich, dass dieser bedingt durch den Vorprozess des Brechens, Klassierens und optionalen Waschens sehr stark schwankt, was zu instabilen Bedingungen im Prozess führt.

Aus dem gemessenen Werten wurde eine Massen- und Energiebilanz für den Ofen erstellt. Aus dieser Bilanz und den beobachteten Zusammenhängen des Prozesses wurden Potentiale für das weitere Vorgehen zur Effizienzsteigerung abgeleitet, die im Folgenden nochmals kurz angeführt sind.

Im Bergbaubetrieb auf der Millstätter Alm sollten die zwei Brechstufen vor Ort genauer untersucht werden, um den Feinanteil des Rohmagnesits, der vom Bergbau auf den Steinplatz angeliefert wird, möglichst gering zu halten. Dadurch kann die Aufgabe auf den Ofen besser abgestimmt werden, wodurch die Prozesstabilität erhöht wird. An diesem Punkt greift auch die Maßnahme an, den derzeit im Betrieb befindlichen Prallbrecher gegen einen Kegelbrecher zu ersetzen. Durch Brechversuche wurde schon bestätigt, dass der neue Brecher 40 Prozent weniger Feinanteil produziert, wodurch sich das Kornband der Aufgabe wieder mehr dem erfahrungsgemäßen Wunschbereich von 1 – 4 mm nähert.

Eine Optimierung oder Neuanschaffung des Brennaggregats, verbunden mit einer Zustellung des Ofeneinlaufs, ist aus energetischer Sicht sinnvoll, aber wahrscheinlich auf Grund des zusätzlichen Gewichts auf den Lagerrollen und den hohen Investitionskosten für einen neuen Brenner schwer umzusetzen. Die Auswirkungen und möglichen Potentiale werden derzeit noch konzernintern abgeklärt und bewertet.

Weiteres Potential für eine Effizienzsteigerung besteht in der Abgasreinigungsanlage des Drehrohrofens. Hier wurden einige gewachsene Strukturen und Betriebsweisen genauer

hinterfragt und geprüft. Dadurch wurde klar, dass das derzeit eingesetzte Filtermaterial im Schlauchfilter zwar nicht unzureichend ist, aber durch den Tausch des Filtermaterials durchaus Geld gespart werden kann. Zusätzlich würde durch den Wechsel auch der Abgasvolumenstrom um ca. 20 % verringert werden, wodurch sich wiederum Einsparpotential beim Abgasventilator ergibt. Dieser könnte mit einem Frequenzumformer (FU) dem jeweiligen Betriebszustand angepasst betrieben werden und müsste nicht mehr ständig unter voller Last laufen. Im gleichen Schritt kann man die derzeitige Zugregelung ebenfalls auf den FU umbauen und die im Einsatz befindliche Zugregelklappe nur mehr für den Notbetrieb heranziehen.

Diese Maßnahmen können durch die Reduktion des Falschlufteintrags in das System noch effektiver gestaltet werden. Dadurch würde sich die Prozessstabilität erhöhen und gleichzeitig die Energieeffizienz verbessert werden.

Alles in Allem wurden beim RO I in Radenthein viele Potentiale entdeckt, die jetzt noch umgesetzt werden müssen. Dabei ist allerdings immer genauestens darauf zu achten, dass der Prozess jederzeit beherrscht ist und sich die Produktqualität immer innerhalb der Toleranzgrenzen befindet. Das kann nur dadurch gewährleistet werden, dass bei Änderungen im Prozess oder bei der Regelung laufend vor Ort Messungen, angepasst an die gerade geänderten Parameter, durchgeführt werden.

6 Verzeichnisse

6.1 Literatur

- [1] Buchheim, Gisela (Hrsg.): Geschichte der Technikwissenschaften, Springer Basel, 1990.
- [2] Lange, Peter: Herausbildung der Silikattechnik als eine Disziplin der Technikwissenschaften, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1984.
- [3] Stark, Jochen: Geschichte der Baustoffe, Wiesbaden/Berlin, Bauverlag GmbH., 1998.
- [4] Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg (Hrsg.): Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, 23. aktualisierte und erweiterte Auflage; Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [5] Boateng, Akwasi A.: Rotary Kilns – Transport Phenomena and Transport Processes, Elsevier Inc., 2008.
- [6] RHI – AG: Geschäftsbericht 2014, verlegt durch die RHI – AG, 2015.
- [7] RHI – AG Radenthein: Rohstoff- & Produktionsstandort Radenthein, verlegt durch RHI Rohstoff -& Produktionsstandort Radenthein, Veitsch – Radex GmbH & Co OG, 2014.
- [8] Europäischen Union.: Durchführungsbeschluss der Kommission am 26. März 2013 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß Richtlinie 2010/75/EU des europäischen Parlaments und Rates über Industrieöfen in Bezug auf die Herstellung von Zement, Kalk und Magnesiumoxid in : Amtsblatt der europäischen Gemeinschaften Nr. L 100 1728, 9.April 2013.
- [9] Karamarkovic, Vladan, et altera: Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns, Applied Thermal Engineering 54 (2013), Elsevier, 2013
- [10] Hemming, Werner und Wagner, Walter: Verfahrenstechnik, 10. korrigierte Auflage, Vogel Buchverlag, 2008.
- [11] Wischnewsik, Berndt: peace software. Online im WWW unter URL: <http://www.peacesoftware.de/einigewerte/luft.html>. Stand: März 2015.
- [12] KELAG Netz GmbH: Erdgasspezifikation im Kärntner Erdgasnetz. Telefongespräch und Daten per E-Mail vom 15.04.2014.
- [13] Günther, Rudolf: Verbrennung und Feuerungen, unveränderter Nachdruck, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 1984.

6.2 Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
CCM	Causic Calcinated Magnesia, engl. für Kauster
a	Jahr
abh.	abhängig
etc.	et cetera
v.a.	vor allem
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FU	Frequenzumrichter
RKM 83 / H / P	Radentheiner kaustischer Magnesit – verschiedene Produktgruppen

6.3 Tabellen

Tabelle 1: Produkthanforderungen Baustoffkauster	10
Tabelle 2: Produkthanforderungen Futtermittelkauster	11
Tabelle 3: Anwendungsgebiete von Drehrohröfen	14
Tabelle 4: Aufgabemengen und Korngrößen	23
Tabelle 5: Kaustertemperaturen im Vergleich	30
Tabelle 6: Zusammenfassung der Temperaturmessungen	31
Tabelle 7: Zusammenfassung der Kontrollmessungen	33
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Luftmengen	34
Tabelle 9: Staubanfall in der Abgasreinigung	38
Tabelle 10: Zusammenfassung der Wassergehalte und Abgastemperatur	43
Tabelle 11: Inputbilanz der Unit 3	48
Tabelle 12: Output Bilanz der Unit 3	50
Tabelle 13: Gaszusammensetzung unmittelbar beim Austritt aus dem Ofen	51
Tabelle 14: Inputbilanz der Unit 4	52
Tabelle 15: Outoutbilanz der Unit 4	53
Tabelle 16: Inputbilanz der Unit 5	55
Tabelle 17: Outbilanz der Unit 5	56
Tabelle 18: Inputbilanz der Unit 6	57
Tabelle 19: Outputbilanz der Unit 6	58
Tabelle 20: rechnerische Rauchgaszusammensetzung nach den Zyklonen	59

Tabelle 21: Inputbilanz der Unit 7	60
Tabelle 22: Outputbilanz der Unit 7	61
Tabelle 23: Inputbilanz der Unit 8	62
Tabelle 24: Outputbilanz der Unit 8	63
Tabelle 25: Abgaszusammensetzung unmittelbar vorm Kaminaustritt	64
Tabelle 26: Zusammenfassung der Optimierung	80

6.4 Abbildungen

Abbildung 1: Flussdiagramm durch das Werk Radenthein.....	6
Abbildung 2: Kornverkleinerung beim Brand des Korns bei 1025 °C	8
Abbildung 3: Masseverlust beim Kalzinieren	9
Abbildung 4: Änderung der spezifischen Oberfläche von Kauster	10
Abbildung 5: Wärmeübertragungsmechanismen in einem direkt befeuerten Drehrohr.....	12
Abbildung 6: Schema eines direkt befeuerten Drehrohrofens	13
Abbildung 7: unterschiedliche Bettbewegungen	15
Abbildung 8: Teilsohlen-Bruchbau Ablaufschema.....	17
Abbildung 9: Fließbild Rohmagnesitaufbereitung im Bergbau.....	18
Abbildung 10: Steinplatz; links Rohmagnesit, Mitte und rechts aufbereiteter Magnesit	19
Abbildung 11: Ablaufschema der Rohmagnesitzerkleinerung	20
Abbildung 12: Telleraufgabe des Ofens aus zwei Blickwinkeln	21
Abbildung 13: Fließbild Drehrohrföfen, Kühler und Rauchgasreinigung	22
Abbildung 14: Temperaturprofil einer einzelnen Messung	25
Abbildung 15: Zusammenfassendes Temperaturprofil der Korngrößenfraktion 0,8 – 6 mm ..26	
Abbildung 16: Gegenüberstellung Manteltemperaturverlauf der verschiedenen Produkte	27
Abbildung 17: Infrarotbilder des Kühlermantels	28
Abbildung 18: Blick in den Rotationskühler bei einem Wartungsstillstand	29
Abbildung 19: Gefrorenes aufbereiteter Rohstein am Steinplatz und bei der Telleraufgabe .	30
Abbildung 20: Luftvorwärmung Baujahr 1912	32
Abbildung 21: Primärlufttemperatur im Tagesmittel	32
Abbildung 22: Ofenabdichtung und angenommenes Berechnungsschema	35
Abbildung 23: Ofenfenster (am Boden) unterhalb des Brenners	36
Abbildung 24: Messschema beim Ofenfenster mit Längenangaben	36

Abbildung 25: Telleraufgabe im Drehrohrföfen	37
Abbildung 26: Telleraufgabe als Prinzipskizze und in Realität	38
Abbildung 27: Probenahmestelle für die Staubmengenbestimmung	39
Abbildung 28: Auswertung Glühverlust Filterstaub RKM 83 – 0 – 6 mm	40
Abbildung 29: Auswertung Glühverlust Filterstaub RKM 83 – 0,8 – 6 mm	40
Abbildung 30: Auswertung der Wassergehalte	42
Abbildung 31: Siebanalyse bei direkter Fahrweise	43
Abbildung 32: Flow – Sheet des Bilanzgebiets	45
Abbildung 33: Hauptansicht der Energiebilanz	47
Abbildung 34: Blick vom Einlauf Kühlrohr zum Ofenauslauf bei einem Wartungsstillstand ...	55
Abbildung 35: Rauchgasreinigungsanlage.....	63
Abbildung 36: Eingabeparameter für RKM – H Produktion	65
Abbildung 37: Eingabeparameter für RKM – 83 Produktion mit 0,8 – 6 mm Aufgabe	66
Abbildung 38: Gegenüberstellung der Wärmeverluste	67
Abbildung 39: spezifischer Energiebedarf der hergestellten Produkte	68
Abbildung 40: Erster Teil der Prozessstruktur der Kausterherstellung	70
Abbildung 41: Zweiter Teil der Prozessstruktur der Kausterherstellung	71
Abbildung 42: Erster Teil der Fehleranalyse für die Kausterherstellung	73
Abbildung 43: Zweiter Teil der Fehleranalyse für die Kausterherstellung	74
Abbildung 44: Risikobewertung Teil 1	77
Abbildung 45: Risikobewertung Teil 2.....	77
Abbildung 46: Ofenaggregate dargestellt in elektrischen Widerständen	82
Abbildung 47: Auswertung vom Verschließen der Falschluffquelle am Ofeneinlauf	83
Abbildung 48: Mit einem Stück Förderband verschlossene Ofenaufgabe	84
Abbildung 49: Flammenbild einer Gasfeuerung	86
Abbildung 50: Wärmedurchgang Ofenmantel vor der Ausmauerung	87
Abbildung 51: Ofenmantel nach der Ausmauerung	87
Abbildung 52: Verteilung der Wärmeverluste bei steigender Temperatur	88
Abbildung 53: Prinzip einer Kammmauerung.....	89

Anhang

Berechnung der Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion mit Nußeltzahl für die Errechnung des Alpha-Werts. [9] [10, S 131-134]

Die Gleichungen für die thermodynamischen Größen wurden aus einem selbst erstellten Graphen abgeleitet. Die Daten hierfür stammen aus der öffentlich zugänglichen peace software. [11]

$T_0 =$	10	[°C]	$[[Ra]]_i = (g \cdot d^3 \cdot \Delta T \cdot \beta) / (v \cdot a)$
$\varepsilon =$	0,85		$[[Pr]]_i = v/a \quad T_B = (T_i + T_0) / 2$
$\sigma =$	5,76E-08	[W/m ² K ⁴]	$f_3 [[Pr]]_i = [1 + (0,559 / [[Pr]]_i)^{9/16}]^{-16/9}$

$$[[\alpha]]_i = ([[Nu]]_i \cdot \lambda) / d \quad [[Nu]]_i = \{ [0,60 + 0,387 [[Ra]]_i \cdot f_3 ([[Pr]]_i)]^{1/6} \}^2$$

$$Q_{con} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot A_i \cdot (T_i - T_0) \quad Q_{rad} = \sum_{i=1}^n \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot A_i \cdot (T_i^4 - T_0^4)$$

$$\beta(T_B) \approx 0.000000013733 T_B^2 - 0.000010105819 T_B + 0.003579874811 \quad \beta = \text{isobarer Wärmeausdehnungskoeff. (1/K)}$$

$$\lambda(T_B) \approx -0.000000025475 T_B^2 + 0.000073520275 T_B + 0.024264817077 \quad \lambda = \text{Wärmeleitfähigkeit (W/(m·K))}$$

$$v(T_B) \approx 0.00000000009 T_B^2 + 0.000000090981 T_B + 0.00001347385 \quad v = \text{kinematische Viskosität (m}^2/\text{s)}$$

$$a(T_B) \approx 0.000000000114 T_B^2 + 0.000000135918 T_B + 0.000018607095 \quad a = \text{Temperaturleitzahl (m}^2/\text{s)}$$

Laufmeter [m]	T [°C]	d [m]	A _i [m ²]	Ra _i []	Pr _i []	f ₃ (Pr _i) []	Nu _i []	α _i [W/(m ² K)]	Q _{rad}		Q _{con}	
									[kW]	[kW/m ²]	[kW]	[kW/m ²]
1,00	200,0	2,4	7,54	8,39E+10	0,70	0,33	477,11	6,30	16,13	2,14	9,03	1,20
2,00	219,8	2,4	7,54	8,24E+10	0,70	0,33	474,31	6,40	19,42	2,58	10,12	1,34
3,00	222,4	2,4	7,54	8,22E+10	0,70	0,33	473,87	6,41	19,88	2,64	10,26	1,36
4,00	185,5	2,4	7,54	8,46E+10	0,70	0,33	478,44	6,22	13,96	1,85	8,23	1,09
5,00	189,0	2,4	7,54	8,45E+10	0,70	0,33	478,19	6,24	14,47	1,92	8,42	1,12
6,00	193,6	2,4	7,54	8,43E+10	0,70	0,33	477,78	6,27	15,15	2,01	8,68	1,15
7,00	212,0	2,4	7,54	8,31E+10	0,70	0,33	475,53	6,36	18,08	2,40	9,69	1,29
8,00	203,0	2,4	7,54	8,37E+10	0,70	0,33	476,76	6,32	16,60	2,20	9,19	1,22
9,00	201,8	2,4	7,54	8,38E+10	0,70	0,33	476,91	6,31	16,40	2,18	9,13	1,21
10,00	190,5	2,4	7,54	8,44E+10	0,70	0,33	478,07	6,25	14,69	1,95	8,51	1,13
11,00	194,3	2,4	7,54	8,42E+10	0,70	0,33	477,72	6,27	15,25	2,02	8,71	1,16
12,00	199,5	2,4	7,54	8,39E+10	0,70	0,33	477,17	6,30	16,05	2,13	9,00	1,19
13,00	180,9	2,4	7,54	8,47E+10	0,70	0,33	478,71	6,19	13,31	1,77	7,98	1,06
14,00	140,8	2,4	7,54	8,35E+10	0,71	0,33	476,69	5,89	8,46	1,12	5,81	0,77
15,00	152,0	2,4	7,54	8,44E+10	0,71	0,33	478,18	5,99	9,69	1,28	6,41	0,85
16,00	156,6	2	6,28	4,90E+10	0,71	0,33	400,89	6,06	8,52	1,36	5,58	0,89
17,00	276,6	2	6,28	4,40E+10	0,70	0,33	387,10	6,63	26,13	4,16	11,11	1,77
18,00	289,9	2	6,28	4,31E+10	0,70	0,33	384,25	6,67	28,93	4,61	11,73	1,87
19,00	286,8	2	6,28	4,33E+10	0,70	0,33	384,93	6,66	28,25	4,50	11,58	1,84
20,00	275,9	2	6,28	4,41E+10	0,70	0,33	387,26	6,63	25,97	4,13	11,08	1,76
21,00	256,9	2	6,28	4,55E+10	0,70	0,33	391,09	6,57	22,30	3,55	10,20	1,62
22,00	276,6	2	6,28	4,40E+10	0,70	0,33	387,10	6,63	26,13	4,16	11,11	1,77
23,00	285,1	2	6,28	4,34E+10	0,70	0,33	385,29	6,66	27,90	4,44	11,51	1,83
24,00	268,4	2	6,28	4,46E+10	0,70	0,33	388,81	6,61	24,48	3,90	10,73	1,71

25,00	263,3	2	6,28	4,50E+10	0,70	0,33	389,85	6,60	23,49	3,74	10,49	1,67
26,00	260,5	2	6,28	4,52E+10	0,70	0,33	390,39	6,59	22,97	3,66	10,37	1,65
27,00	252,4	2	6,28	4,58E+10	0,70	0,33	391,95	6,56	21,49	3,42	9,99	1,59
28,00	248,8	2	6,28	4,60E+10	0,70	0,33	392,62	6,55	20,85	3,32	9,82	1,56
29,00	254,1	2	6,28	4,56E+10	0,70	0,33	391,62	6,57	21,80	3,47	10,07	1,60
30,00	242,9	2	6,28	4,64E+10	0,70	0,33	393,68	6,53	19,84	3,16	9,55	1,52
31,00	198,8	2	6,28	4,86E+10	0,70	0,33	399,80	6,33	13,28	2,11	7,51	1,19
32,00	198,4	2	6,28	4,86E+10	0,70	0,33	399,83	6,33	13,24	2,11	7,49	1,19
33,00	210,8	2	6,28	4,81E+10	0,70	0,33	398,51	6,39	14,89	2,37	8,06	1,28
34,00	249,6	2	6,28	4,59E+10	0,70	0,33	392,46	6,55	21,00	3,34	9,86	1,57
35,00	360,6	2	6,28	3,76E+10	0,70	0,33	367,72	6,81	47,65	7,58	14,99	2,39
36,00	426,4	2	6,28	3,28E+10	0,70	0,33	351,97	6,88	71,68	11,41	18,00	2,86
37,00	435,1	2	6,28	3,22E+10	0,70	0,33	349,92	6,89	75,44	12,01	18,40	2,93
38,00	425,1	2,4	7,54	5,69E+10	0,70	0,33	420,36	6,84	85,39	11,33	21,41	2,84
39,00	406,6	2,4	7,54	5,91E+10	0,70	0,33	425,62	6,82	76,45	10,14	20,40	2,71
40,00	271,6	2,4	7,54	7,67E+10	0,70	0,33	463,31	6,59	30,14	4,00	12,99	1,72
41,00	252,8	2,4	7,54	7,90E+10	0,70	0,33	467,77	6,53	25,86	3,43	11,94	1,58
42,00	231,3	2,4	7,54	8,14E+10	0,70	0,33	472,26	6,45	21,52	2,85	10,75	1,43
	249 [°C]		289 [m ²]					6,5 [W/(m ² K)]	1073 [kWh]		446 [kWh]	
	Mittelwert Oberfl.- T.		Mantelfl. gesamt				Mittelwert α	3863 [MJ/h]			1605 [MJ/h]	
								Wärmeverlust d. Strahlung			Wärmeverlust d. Konvektion	

Der gesamte Wärmeverlust über die Oberfläche des Ofens beläuft sich hier auf 5.469 MJ/h.

Berechnung der Wärmeverluste durch die konzerninternen empirischen Anhaltspunkte und Formeln.

Epsilon	0,85
---------	------

Laufmeter [m]	T [°C]	d [m]	A [m ²]	ΔH excl. konv. [MJ/h]	ΔH inc. konv. [MJ/h]	Konvektion	
						kcal/m ² h	MJ/m ² h
1	200,00	2,4	7,54	66,72	106,07	1.246,55	5,22
2	219,75	2,4	7,54	78,58	123,06	1.409,03	5,90
3	222,38	2,4	7,54	80,26	125,43	1.430,62	5,99
4	185,50	2,4	7,54	58,91	94,49	1.127,26	4,72
5	189,00	2,4	7,54	60,73	97,22	1.156,06	4,84
6	193,63	2,4	7,54	63,20	100,89	1.194,10	5,00
7	212,00	2,4	7,54	73,75	116,22	1.345,27	5,63
8	203,00	2,4	7,54	68,43	108,56	1.271,23	5,32
9	201,75	2,4	7,54	67,71	107,52	1.260,95	5,28
10	190,50	2,4	7,54	61,52	98,40	1.168,40	4,89
11	194,25	2,4	7,54	63,54	101,39	1.199,25	5,02
12	199,50	2,4	7,54	66,44	105,66	1.242,44	5,20
13	180,88	2,4	7,54	56,57	90,95	1.089,21	4,56
14	140,75	2,4	7,54	39,07	63,03	759,12	3,18
15	152,00	2,4	7,54	43,49	70,38	851,67	3,57
16	156,63	2	6,28	37,85	61,25	889,72	3,73
17	276,63	2	6,28	101,35	150,72	1.876,92	7,86
18	289,88	2	6,28	111,48	163,72	1.985,92	8,31
19	286,75	2	6,28	109,02	160,59	1.960,22	8,21
20	275,88	2	6,28	100,80	150,01	1.870,75	7,83
21	256,88	2	6,28	87,55	132,65	1.714,44	7,18
22	276,63	2	6,28	101,35	150,72	1.876,92	7,86
23	285,13	2	6,28	107,76	158,98	1.946,85	8,15
24	268,38	2	6,28	95,40	142,99	1.809,05	7,57
25	263,25	2	6,28	91,84	138,32	1.766,89	7,40
26	260,50	2	6,28	89,97	135,86	1.744,27	7,30
27	252,38	2	6,28	84,62	128,74	1.677,42	7,02
28	248,75	2	6,28	82,31	125,65	1.647,60	6,90
29	254,13	2	6,28	85,75	130,25	1.691,82	7,08
30	242,88	2	6,28	78,66	120,73	1.599,27	6,70
31	198,75	2	6,28	55,01	87,54	1.236,27	5,18
32	198,44	2	6,28	54,87	87,32	1.233,70	5,17
33	210,75	2	6,28	60,83	95,95	1.334,99	5,59
34	249,63	2	6,28	82,86	126,39	1.654,80	6,93
35	360,63	2	6,28	178,99	246,54	2.567,96	10,75
36	426,38	2	6,28	265,64	347,42	3.108,87	13,02
37	435,13	2	6,28	279,18	362,86	3.180,85	13,32

38	425,13	2,4	7,54	316,49	414,31	3.098,59	12,97
39	406,63	2,4	7,54	284,26	377,27	2.946,39	12,34
40	271,63	2,4	7,54	117,25	175,21	1.835,79	7,69
41	252,75	2,4	7,54	101,83	154,88	1.680,51	7,04
42	231,25	2,4	7,54	86,17	133,64	1.503,63	6,30
				289,03	4.197,99	6.169,78	
				[m ²]	[MJ/h]	[MJ/h]	
				Mantelfl.	Wärmeverlust	Wärmeverlust	
				gesamt	d. Strahlung	Gesamt	

Bei dieser Berechnungsmethode beläuft sich der Wärmeverlust in Summe auf 6169,78 MJ/h.

Darstellung der übergeordneten Prozesse der Kausterherstellung in Form einer Prozesslandkarte

