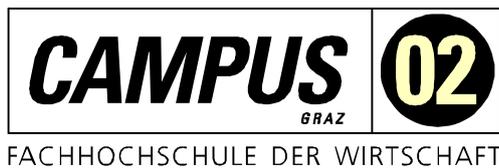


Masterarbeit

ENERGIEREDUKTION AN EINER ERDGASBEHEIZTEN INDUSTRIELLEN THERMOPROZESSANLAGE

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik - Wirtschaft

von

Ing. Daniel Temmel, BSc

1810322014

betreut und begutachtet von
Dipl.-Ing. Andreas Christandl

Graz, im Dezember 2019

.....
Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....
Unterschrift

DANKSAGUNG

Ich möchte mich recht herzlich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Andreas Christandl bedanken, der mir jederzeit mit Rat und Tat beiseite stand. Weiters möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Stefan Steindl bedanken, welcher mich seitens der Mess- und Regeltechnik bei meiner Arbeit unterstützte. Des Weiteren danke ich meiner Familie, die mich in meinem Vorhaben immer unterstützte.

KURZFASSUNG

Die Voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG mit ihrem Stammwerk in Kapfenberg gehört weltweit zu den bedeutendsten Anbietern von Werkzeugstählen, Schnellarbeitsstählen und Sonderwerkstoffen. Mehr als 200 Stahlmarken, eingesetzt in den verschiedensten Bereichen wie in der Luftfahrttechnik und Energiegewinnung, fordern hochbeanspruchbare Spezialstähle.

Höchstpräziser Edelstahl gewinnt heutzutage vermehrt an Bedeutung, so auch die Hilfsaggregate der Voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG, wie zum Beispiel in der Schmiedelinie, die durch kontinuierliche Überwachung der Anlagenprozesse an Bedeutung zunehmen. Besonders bei alttechnologischen Anlagen besteht ein Verbesserungspotential in Hinsicht auf Instandhaltungskosten und Energieverbräuche. Die Thermoprozessanlage fungiert in der Schmiedelinie zur Erwärmung von Stählen, welche in weiterer Folge im Produktionsfluss geschmiedet, gepresst oder gewalzt werden.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine Energie- und Kosteneinsparung durch Eingriff in den Verbrennungsprozess mittels Regelungsänderung der Luftvorwärmkompensation auszuarbeiten. Die Umsetzung findet an einem Herdwagenofen mit Warmluftbrenner statt. Die Verbrennung sollte mittels Sauerstoffmessung im Ofenraum dauerhaft überwacht werden und die Stellung der Luftklappe am Brenner für den gewünschten Sollwert eingreifen.

Das Resultat an der erdgasbeheizten industriellen Thermoprozessanlage ist eine Senkung des Energieverbrauches und Verbesserung des Verbrennungsprozesses.

ABSTRACT

Voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG, located in Kapfenberg, is one of the world's leading providers of tool steel, high-speed steels and specialty materials. More than 200 types of steels, used in the most different areas such as aerospace technology and power production, demand heavy-duty special steels.

Highly accurate special steel has gained increasing importance. This also applies to the auxiliary aggregates of Voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG as, for example, used in the forging line, which is becoming gradually more important through continuous monitoring of the plant processes. Early detection of deviating parameters is particularly important for new systems. A great deal of attention is paid to increasing throughput times and reducing downtimes. The thermal processing plant in the forging line to heat steels, which are subsequently forged, pressed or rolled in the production flow.

The aim of this master's thesis is to develop an energy and cost saving by intervention in the combustion process by means of control change of the air preheating compensation. The implementation takes place on a bogie hearth furnace with hot air burner. The combustion should be permanently monitored by means of oxygen measurement in the furnace chamber and the position of the air flap on the burner should be adjusted for the desired set point.

The result of the natural gas heated industrial thermal process system is a reduction of energy consumption and an improvement of the combustion process.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation.....	1
1.2	Aufgabenstellung.....	1
1.3	Zielsetzung.....	1
1.4	Firmenvorstellung.....	1
2	Thermoprozesstechnik.....	3
2.1	Verbrennungslehre.....	3
2.1.1	Verbrennungsrechnung.....	3
2.1.2	Luftbedarf.....	4
2.1.3	Energieströme im Ofenraum.....	4
2.2	Brennstoffe / Medien.....	6
2.2.1	Erdgas.....	6
2.2.2	Erdatmosphäre.....	8
2.3	Wärmeübertragung.....	9
2.3.1	Wärmestrahlung.....	10
2.3.2	Wärmeleitung.....	13
2.3.3	Konvektion.....	14
3	Thermoprossanlage.....	15
3.1	Brennertechnik.....	15
3.1.1	Grundlagen der Brennertechnik.....	15
3.1.2	Kaltluftbrenner.....	19
3.1.3	Warmluftbrenner.....	22
3.1.4	Rekuperatorbrenner.....	24
3.1.5	Regeneratorbrenner.....	26
3.2	Herdwagenofen mit Warmluftbrenner.....	27
3.3	Energiereduktion an Thermoprossanlagen.....	31
3.3.1	Substitution der Brennertechnik.....	32
3.3.2	Reduzierung der Abgasverluste.....	33
3.3.3	Senkung der Abgastemperatur.....	34
3.3.4	Brennstoffersparnis bei Luftvorwärmung.....	34
3.3.5	Vermeidung der Wandverluste.....	35
4	Analyse des Ist-Zustandes.....	36
5	Theoretische Umsetzung.....	40
6	Messtechnik und Komponenten für die Umsetzung.....	42
6.1	Messung des Sauerstoffgehaltes.....	42
6.1.1	Sauerstoffsonde.....	42
6.1.2	Lambda-Sonde.....	43
6.1.3	Infrarotmessung für die Sauerstoffkonzentration.....	44
6.1.4	Fazit zur Wahl der Sauerstoffmessung an der Thermoprossanlage.....	45

6.2	Messumformer.....	46
6.3	Stellantrieb.....	47
7	Praktische Umsetzung	50
7.1	Einbau der Sauerstoffmessung	50
7.2	Aufbau des Messumformers	52
7.3	Speicherprogrammierbare Steuerung.....	54
7.4	Warmluftkompensation	55
7.5	Sauerstoffregelung.....	59
7.6	Aufnahme der Brenneinstellungen	61
7.7	Inbetriebnahme des Sauerstoffreglers.....	63
7.8	Aufnahme der Brenneinstellungen nach Umstellung für den Sauerstoffregler	65
7.9	Analyse des Zustandes mit der Sauerstoffregelung	66
7.10	Wartung und Instandhaltung	71
8	Energie- und Kostenreduktion	73
9	Ergebnis / Ausblick.....	79
	Literaturverzeichnis.....	81
	Abbildungsverzeichnis	84
	Tabellenverzeichnis	86
	Anhang	87

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangssituation

An der beheizten industriellen Thermoprozessanlage, auch Industrieofen genannt, wird als Energieträger zum Erwärmen der Stückgüter Erdgas verwendet. Diese Art von Beheizungstechnik fällt in das Gebiet der Brennstoffbeheizung. Es handelt sich um Edelstahlwerkstücke, die von Umgebungstemperatur bis auf eine maximale Temperatur von 1250 °C erhitzt werden. Vor allem bei kurzen Ziehzeiten, wo die Ofentür geöffnet wird, benötigt die Anlage viel Energie, um die Solltemperatur zu erreichen. In dieser Arbeit werden ausschließlich Herdwagenöfen behandelt, die eine maximale Heizleistung von 8.000 kW aufweisen. Der hohe Energieverbrauch wurde mittels stationärer Durchflussmessung am Industrieofen gemessen und ausgewertet. Als Vergleich wurden Anlagen der gleichen Baugröße und Heizleistung herangezogen, die einen geringeren Verbrauch vorwiesen.

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabe besteht darin, eine Ist-Aufnahme des Sauerstoffgehaltes an einer Thermoprozessanlage zur Bewertung des Reduktionspotentials an Erdgas durchzuführen. Der optimale Verbrennungsprozess wird mit dem Lambdawert von 1,0 beurteilt. Zur Ermittlung des Sauerstoffgehaltes soll eine geeignete Messung für diesen Anwendungszweck ausgewählt werden. Ein Problem besteht direkt am Brenner an der Brennerdüse, da die Düse der Ofenraumtemperatur ausgesetzt ist. Ständige Temperaturunterschiede lassen die Brennerdüsen wegen des hohen Sauerstoffgehaltes im Ofenraum verzundern und den Durchmesser der Brennerdüsen erweitern. Durch die Vergrößerung des Brennerdüsendurchmessers entspricht der Brennerdruck nicht mehr der Einstellkurve des Herstellers. Die Überprüfung der Brennerdüsen stellt ein großes Problem dar, weil die Anlage nur in sehr großen Zeitabständen nicht in Betrieb ist. Das Hauptproblem besteht jedoch am zu hohen Sauerstoffgehalt im Ofenraum, der den Verbrennungsprozess verschlechtert und die benötigte Energie an Erdgas steigen lässt. Um einerseits den hohen Energieverbrauch und andererseits den Verschleiß an der Brennerdüse zu senken, soll der Energieverbrauch und der Sauerstoffwert gesenkt und der Verbrennungsprozess gesteigert werden.

1.3 Zielsetzung

Ziel ist es, eine Messtechnik für eine dauerhafte Messung des Sauerstoffwertes im Ofenraum des Industrieofens zu finden. Schlussendlich sollte eine Energiereduktion im Gegensatz zur Ist-Aufnahme ersichtlich sein, bei der die Leistung der Thermoprozessanlage nicht abnimmt. Wünschenswert wäre ein Sauerstoffgehalt von 1,5 %.

1.4 Firmenvorstellung

Voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG gehört weltweit zu den bedeutendsten Anbietern von Schnellarbeitsstählen, Werkzeugstählen sowie Sonderwerkstoffen und konzentriert sich dabei auf Werkstofflösungen für höchste Ansprüche.

Böhler hat von jeher die Entwicklung mitbestimmt und setzt weltweit die metallurgischen Maßstäbe. Ein Beweis dafür sind mehr als 200 Stahlmarken. Ihren Einsatz finden diese Stähle bei der Produktion von Gütern, die wir täglich brauchen, wie zum Beispiel als Zerspanungswerkzeug, als Formen für die Kunststoffteile-Fertigung, als Kaltarbeitsstahl für Stanzen, Biegen und Schneiden, als Warmarbeitsstähle für das Druckgießen oder als höchstbeanspruchte Sonderwerkstoffe in Flugzeugen, Turbinen für Energiegewinnung, in der Medizintechnik oder für die Ölförderung am Meer.

Der Beitrag am Wirtschaftsleben wird darin gesehen, den Kunden Werkstoffe zu bieten, die technische Höchstleistungen und die gewünschten beziehungsweise geforderten Leistungssteigerungen ermöglichen, um damit deren Wettbewerbsfähigkeit zu stärken.

Ein dichtes internationales Vertriebsnetz und Serviceeinrichtungen garantieren weltweite Verfügbarkeit der Böhler-Werkstoffe.

voestalpine

ONE STEP AHEAD.

2 THERMOPROZESSTECHNIK

2.1 Verbrennungslehre

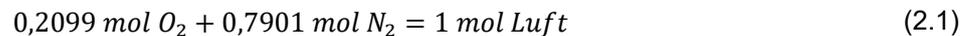
Technische Brennstoffe besitzen neben den inerten Bestandteilen nur drei Elemente, die durch eine Reaktion mit Sauerstoff die benötigte Energie für einen Prozess liefern.

Für den Prozess kann

- Wasserstoff in reiner molekularer Form oder mit Reaktionselementen,
- Kohlenstoff in reiner Form oder mit Wasserstoff und / oder Sauerstoff,
- Schwefel mit den übrigen Reaktionselementen,

in Verbindung gebracht werden.¹

Sauerstoff tritt immer in molekularer Form O_2 auf. Trockene Luft wird vereinfacht zusammengesetzt als:



beschrieben.

Demzufolge wird der Wert des Sauerstoffanteils in Luft von $0,2099 \approx 0,21$ beziehungsweise 21 % angenommen.

Für Industrieöfen werden feste und flüssige Brennstoffe sehr selten eingesetzt. Gasförmige Brennstoffe sind überwiegend im Einsatz, wo die Versorgung durch Gasnetze weit ausgebreitet zur Verfügung steht.

2.1.1 Verbrennungsrechnung

In der technischen Verbrennung wird zwischen zwei Möglichkeiten differenziert:

- Die „vollkommene Verbrennung“
Diese Reaktion hat beim Ablauf der Verbrennung vollkommen stattgefunden. Im Abgas können bei einer Verbrennung unter Luftmangel noch unverbrannte Bestandteile vorhanden sein. Es ist aber nicht möglich, dass unverbrannte Bestandteile und Sauerstoff nebeneinander vorkommen. Kommt es dennoch zu so einem Fall, dann spricht man von einer
- „unvollkommenen Verbrennung“,
bei der die Reaktion nicht vollkommen abgeschlossen wurde. Dies wäre bei der technischen Verbrennung ein ungewollter Vorgang.²

Weiters trifft man in der technischen Verbrennung eine Unterscheidung je nach der zugeführten Luftmenge, die mit jedem Brennstoffmolekül reagieren kann. Wird die dazugehörige Luftmenge für die Verbrennung zugeführt, so spricht man von einem stöchiometrischen Verhältnis und einem Verbrennungsluftverhältnis

¹ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 1.

² Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 4 f.

(Lambda-Wert) von 1,0. Wird eine größere Luftmenge als benötigt zur Verbrennung zugeführt, handelt es sich um eine überstöchiometrische oder luftreiche Verbrennung. Unterstöchiometrisch oder luftarme Verbrennung, bedeutet zu geringe Verbrennungsluft beziehungsweise handelt es sich dabei um einen Luftmangel.

2.1.2 Luftbedarf

Bei einer unvollständigen Verbrennung bleiben neben Bestandteilen wie Kohlendioxid, Wasser und Reaktionsprodukten auch geringe Mengen von Wasserstoff, Kohlenwasserstoff und Kohlenmonoxid im Abgas. Bei der Verbrennungsrechnung wird lediglich Kohlenmonoxid berücksichtigt. In meiner Arbeit wird auf die Berechnung des Luftbedarfs nicht weiter eingegangen.

2.1.3 Energieströme im Ofenraum

Industrieöfen müssen mit Energie versorgt werden, um Energie in anderer Form wieder abgeben zu können. Hierzu ist der Energiestrom erforderlich, was gleich Leistung in Kilowatt oder Energie pro Zeit belegt. Der Energiestrom zeigt die aufgeteilten Leistungen, welche an das Gut, Ofenwände und Abgas übertragen werden. Erdgasbetriebene industrielle Thermoprozessanlagen führen den Brennstoff und die Luft über Rohrleitungen zu, elektrisch betriebene Industrieöfen liefern die Energie über Leitungen zu den Heizwendeln. In diesem Kapitel wird der Zustand der Stoffströme allein vom erdgasbeheizten industriellen Ofen beschrieben.

Bei einem Industrieofen gibt es vier Zustände der Stoffströme, die ihre Abhängigkeit von Temperatur und deren Drücke beim Eintritt in die Rohrleitung bis hin in den Abgastrakt durchfließen. In der Rohrleitung findet der erste Zustand der Stoffströme statt. Ist der Ofen mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet und erhitzt er den Brennstoff und die Verbrennungsluft, so ändert sich die Enthalpie der Anlieferungszustände von Brennstoff und Verbrennungsluft bis zum Brenner. Der zweite Zustand findet bei der Reaktion am Brenner statt, wo der Brennstoff und die Luft im Brennermund zusammengeführt werden. Nach der Verbrennung und Entstehung von Reaktionsprodukten müssen diese über den Abzug abtransportiert werden, der wiederum den Zustand des Abgases ändert. Der letzte und somit vierte Zustand ändert sich je nach Bauweise der Anlage im Abgas, der die Wärme an eine Wärmerückgewinnungsanlage abgibt und das Abgas über den Schornstein schlussendlich verlässt.³

Wie bereits bekannt, benötigt der Industrieofen Brennstoff und Luft als Versorgung. Die chemisch gebundene Energie wird als Brennstoffstrom und Luftstrom oder auch Enthalpie bezeichnet. Zur Anlage werden die Ströme mit unterschiedlichen Temperaturen angeliefert, die zu berücksichtigen sind. Durch die vorgewärmte Luft der Wärmerückgewinnung wird der Luftstrom mittels Wärmekompensation berücksichtigt.

³ Vgl. Blesl/Kessler (2012), S. 195 ff.

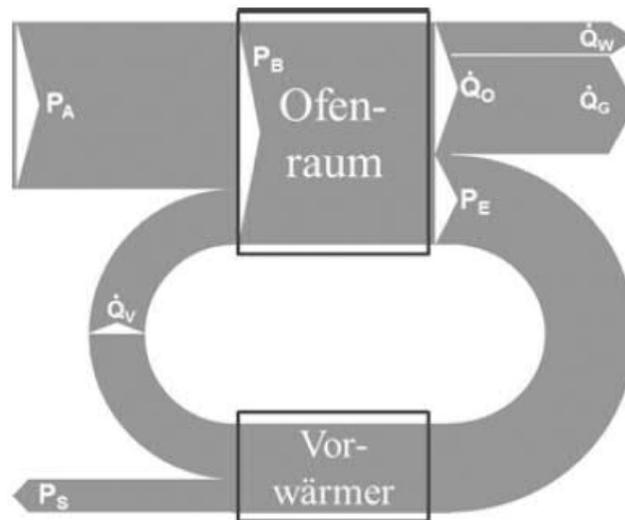


Abbildung 1: Energieflussbild im Ofenraum, Quelle: Blesl/Kessler (2012), S. 197.

P_A/W	Brennstoffleistung
P_B/W	Heizleistung
P_E/W	Abgasverlustleistung
P_S/W	Schornsteinverlustleistung
Q_W/W	Wandwärmestrom
Q_G/W	Nutzwärmestrom im Gut
Q_V/W	Vorwärmstrom
Q_O/W	Ofenwärmestrom

Das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand an Industrieöfen wird als feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_f verstanden. Wie in der Abbildung 1 ersichtlich, müssen die zugeführten und abgeführten Wärmemengen und Stoffmengen oder Stoffströme der Bilanzgrenzen geläufig sein oder festgelegt werden. Der Nutzwärmestrom im Gut \dot{Q}_G ist die Differenz zwischen der Heizleistung P_B und den Abgasverlusten P_E und dem Wandwärmestrom \dot{Q}_W . Abgasverluste können mit einer Wärmerückgewinnung die Effizienz der Luftvorwärmung steigern und so die Schornsteinverluste P_S reduzieren.

$$\eta_f = \frac{P_B - P_E}{P_A} \quad (2.1.3.1)$$

Der Ofenwärmestrom \dot{Q}_O teilt sich einerseits in den Nutzwärmestrom im Gut und andererseits in den Wandwärmestrom auf. Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik lässt darauf schließen, dass eine

Energieaufnahme im Gut zur Erhöhung der Enthalpie und zur Deckung des Energiebedarfes führt, falls benötigte Reaktionen oder sonstige Umwandlungen gefordert werden.⁴

$$P_B = P_E + \dot{Q}_O \quad (2.1.3.2)$$

Den anderen Teil des Wärmestromes nehmen die Wände auf, der die Enthalpie der Ofenwände erhöht. Öffnungen an den Ofenwänden oder eingebaute Ofenkomponenten strahlen nach außen ab. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad kann ebenfalls wie folgt berechnet werden:

$$\eta_f = \frac{\dot{Q}_O}{P_A} \quad (2.1.3.3)$$

Letztendlich will man die Energie in das Gut übertragen und nicht in die Wände des Ofens.

Unterstützend wirkt der Vorwärmstrom \dot{Q}_V von der Wärmerückgewinnung bei der Brennstoffleistung P_A .

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad kann durch andere Techniken mittels Luftvorwärmung der Verbrennungsluft erhöht werden, welche im Kapitel 3.3.4 nähergebracht werden.

Als ofentechnischen Wirkungsgrad versteht man den erbrachten Nutzen Wärmestrom im Gut, der vom Ofenwärmestrom in das Gut übergeht.

$$\eta_o = \frac{\dot{Q}_G}{\dot{Q}_O} \quad (2.1.3.4)$$

2.2 Brennstoffe / Medien

2.2.1 Erdgas

Physikalische Eigenschaften:

Brennstoffe haben durch ihre bei der Herstellung verwendeten Ausgangsstoffe unterschiedliche Klassifizierungen, die in fossil, regenerativ oder chemisch eingeteilt werden. Vor allem hat Erdgas in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung gewonnen. Der Brennstoff Erdgas ist durch seine Leitungsnetze in der Industrie und in den Haushalten gut verbreitet. Vorwiegend besteht es aus Methan CH_4 , welches ein geringes Verhältnis von Kohlenstoff zu Wasserstoff aufweist, als andere

⁴ Vgl. Langeheinecke/Jany/Thieleke (2011), S. 247.

Kohlenwasserstoffe.⁵ In Anbetracht der Umweltausstöße durch Kohlendioxid ist diese Verbrennung sehr vorteilhaft. Das brennbare Gas kommt in der Natur als Hauptbestandteil Erdgas vor, welches farblos und geruchslos ist. Das Ausgangsprodukt wird als Heizgas oder in der chemischen Industrie benutzt. Die weiteren Bestandteile sind hauptsächlich Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Ethan.

Gewinnung von Erdgas:

Das Erdgas wird bei der Aufbereitung in erster Linie von Schwefel und weiteren nicht benötigten Komponenten gereinigt. Durch den Trocknungsprozess wird das enthaltene Wasser und die langkettigen Kohlenwasserstoffe entzogen.⁶ Langkettige Kohlenwasserstoffe sind gesättigte Kohlenwasserstoffe, die als Alkane bezeichnet werden. Das einfachste und bekannteste Alkan, welches aus einer chemischen Verbindung, der C-C-Einfachbindung besteht, ist das Methan CH₄.

Erdgas-Sorten:

Der Aggregatzustand von Erdgas unter seinen Standardbedingungen bei einer Raumtemperatur von 25 °C und dem Normaldruck von 1013,25 hPa ist gasförmig.⁷

Es wird zwischen mehreren Erdgas-Sorten unterschieden. Erdgas der Gruppe H, H-Gas oder High-Gas genannt, kommen aus den zwölf GUS-Staaten wie zum Beispiel aus Russland, Weißrussland, Kasachstan, Armenien oder Aserbaidshan. Der Methan-Anteil dieses Erdgases liegt zwischen 87 bis 99,1 Vol.%. Der Heizwert liegt in der Regel zwischen 10,0 und 11,1 kWh/m³. Der Energiegehalt von einem Kilogramm H-Gas ist vergleichbar mit zirka 1,5 Liter Benzin oder 1,3 Liter Diesel.

Die Gruppe L, L-Gas oder auch Low-Gas genannt, hat einen geringeren Methangehalt als das H-Gas. Dieser Anteil von Methan des Erdgases der Gruppe L liegt bei 79,8 bis 87 Vol.%. In der Regel ist der Heizwert zwischen 8,2 und 8,9 kWh/m³. Ein Kilogramm L-Gas wäre vergleichbar mit einem Energiegehalt von zirka 1,2 Liter Benzin und 1,1 Liter Diesel.

Methanzahl:

Die Methanzahl ist ein Maß der Klopfestigkeit eines Brenngases, die vergleichbar ist mit der Oktanzahl für Benzin. Definiert ist sie mit dem prozentuellen Volumenanteil an Methan, der Auskunft gibt, wie sich das spezifische Methan/Wasserstoffgemisch verhält, wenn ein Klopfverhalten durch spezifische Brenngase definiert ist. Reines Methan hätte in diesem Fall die Methanzahl 100 und reiner Wasserstoff die Methanzahl 0. Die Zahl ist dann von Bedeutung, wenn untersucht werden soll, in wie weit sich bestimmte Austauschgase in einem Verbrennungsmotor einsetzen lassen.⁸

⁵ Vgl. Joos (2006), S. 29.

⁶ Vgl. van Basshuysen (2015), S. 51.

⁷ Vgl. van Basshuysen (2015), S. 53.

⁸ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 207.

Heizwert und Brennwert:

Der Heizwert ist die freigesetzte Wärmemenge, die bei vollkommener Verbrennung eines Kubikmeters Gas im Normalzustand stattfindet. Erst wenn die Anfangs- und Endprodukte eine Temperatur von 25 °C haben und das entstandene Wasser dampfförmig vorliegt, kann der Heizwert bestimmt werden. Er wird größtenteils in kWh/m³ angegeben.⁹

Zur Feststellung des Brennwertes wird gleich wie beim Heizwert vorgegangen nur, dass die Anfangs- und Endprodukte nach der Verbrennung das entstandene Wasser in flüssiger Form vorliegt. Der Brennwert ist höher als der Heizwert, weil die Wärme, die im Wasseranteil des Abgases gebunden ist, berücksichtigt wird. Der Brennwert wird ebenfalls in kWh/m³ angegeben.

2.2.2 Erdatmosphäre

Die Atmosphäre der Erde besteht aus einer gasförmigen Umhüllung der Erdoberfläche, die einen hohen Anteil an Stickstoff und Sauerstoff besitzt. Die Hauptbestandteile der Erdatmosphäre oder auch Luft sind Stickstoff, Sauerstoff, Argon und Kohlenstoffdioxid. Weiters sind noch Gase wie Neon, Helium, Methan oder Krypton in sehr kleinen Spuren vorhanden. In der Abbildung 2 sind die Hauptbestandteile in Prozent ersichtlich.

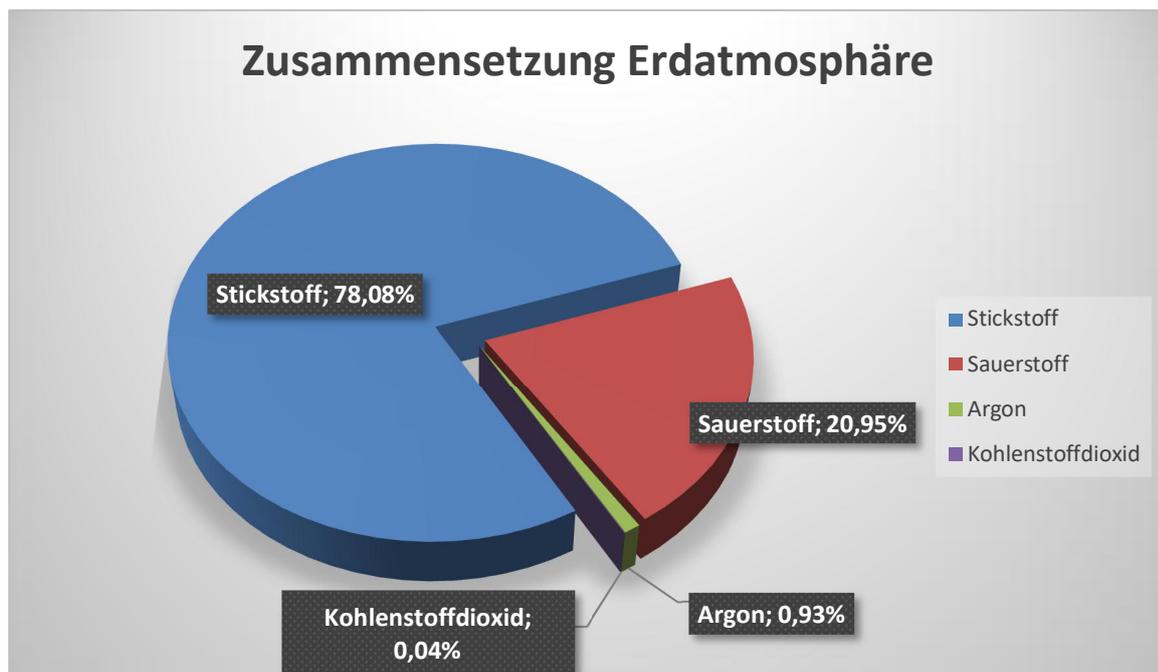


Abbildung 2: Zusammensetzung der Erdatmosphäre, Quelle: Eigene Darstellung.

⁹ Vgl. Pehnt (2010), S. 23.

Physikalische Größen:

Mittlere Molmasse:

Die Summe der Molmassen und Stoffmengenanteile ergibt die mittlere Molmasse, die primär aus Stickstoff, Sauerstoff und Argon besteht. Die molare Masse bei trockener Luft beträgt 28,964 g/mol.¹⁰

Luftdichte:

Bei einer Temperatur von 273,15 K und einem Druck von 1013,25 hPa, was den Normalbedingungen entspricht, liegt die relative Luftdichte bei 1,293 kg/m³.¹¹

Luftdruck:

Der Druck hängt von der barometrischen Höhenformel über Meeresspiegel ab. Die Gewichtskraft der Luftsäule erzeugt einen statischen Druck, der darüber hinaus vom Wetter abhängig ist.¹²

Lufttemperatur:

Je nach Standort der Messung ist die Lufttemperatur unterschiedlich. In der Meteorologie wird die Lufttemperatur am gewünschten Standort in einer Höhe von zwei Metern gemessen. Sie wird weder von der Sonnenstrahlung noch von der Wärmeleitung oder Bodenwärme beeinflusst.

Luftfeuchtigkeit:

Dabei handelt es sich um den Anteil des Wasserdampfes in der Luft. Angegeben wird sie in verschiedenen Feuchtemaßen wie Taupunkt oder Dampfdruck sowie in absoluter, relativer und spezifischer Luftfeuchte.

2.3 Wärmeübertragung

Wärme wird entweder durch feste, flüssige oder gasförmige Medien befördert oder durch ein anderes Medium übertragen. Der Transport der Wärmeübertragung kann in drei Bereiche eingeteilt werden.¹³

- Transport durch Konvektion,
- Transport durch Wärmestrahlung und
- Transport durch Wärmeleitung

Besitzen zwei Körper unterschiedliche Temperaturen, so wird sich im Laufe der Zeit eine Temperaturgleichheit einstellen. Man spricht von der Wärmestrahlung, die den Wärmetransport durch elektromagnetische Wellen ermöglicht.¹⁴ Ideal ist der schwarze Körper, welcher die Strahlung aussendet. Der reale schwarze Körper hat wegen seiner Oberfläche eine Abweichung, die berücksichtigt werden muss. Diese besteht einerseits aus dem Korrekturfaktor F_ϵ , der die Strahlung vom Körper aussendet, und

¹⁰ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 191.

¹¹ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 208.

¹² Vgl. Langeheineke/Jany/Thieleke (2011), S. 24.

¹³ Vgl. von Böckh/Wetzel (2015), S. 3.

¹⁴ Vgl. von Böckh/Wetzel (2015), S. 4.

andererseits vom Korrekturfaktor F_A , der die Fläche am anderen Körper nicht vollständig erreicht.¹⁵ Darüber hinaus kann ein sehr hoher Aufwand zum Herausfinden der Korrekturfaktoren entstehen.

Jeder Stoff besitzt eine Wärmeleitfähigkeit λ die in W/mK angegeben wird. Besteht ein Temperaturgefälle zwischen zwei Körpern, wird die Energie vom wärmeren zum kälteren Körper transportiert. Bezogen auf die Fläche bedeutet dies eine Proportionalität vom Wärmestrom zum Temperaturgefälle. Die Wärmeleitfähigkeit des Körpers muss bekannt sein. Bestimmt wird die Wärmeleitfähigkeit in Gasen mithilfe von Stößen der Gasmoleküle, die in Proportionalität der kinetischen Energie eines Gasmoleküls mit der Temperatur zu setzen sind.¹⁶ Um die Wärmeleitfähigkeit in einfachen Gasen bei mäßigen Temperaturen berechnen zu können, verwendet man die kinetische Gastheorie. Ganz anders ist dies bei flüssigen Medien und Festkörpern. Hier genügt nicht die theoretische Aussage als Genauigkeit, sondern es ist der experimentell ermittelte Wert für die Wärmeleitfähigkeit zu verwenden.

Bekannt ist, dass ein warmer Körper schneller abkühlt, wenn dieser angeblasen wird, als wenn er ruhend an der Luft verbleibt. Der Mechanismus des Wärmetransportes unterstützt sich selbst, indem er den Wärmeleitungsmechanismus zu Hilfe nimmt. Die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche des Körpers und dem Kühlmedium ist proportional der Strömungsgeschwindigkeit. Man spricht hier vom konvektiven Wärmeübergang.

Der Wärmeübergangskoeffizient α ist von vielen Einflussfaktoren abhängig, die nicht außer Betracht gelassen werden dürfen, zum Beispiel wäre dies die Strömungsgeschwindigkeit, die Art des Mediums oder die Oberflächenbeschaffenheit des Bauteiles. Der Wärmeübergangskoeffizient kann auf theoretischem Weg bestimmt werden. Hierfür werden die Grundlagen der Strömungstechnik benötigt. Für eine genaue Bestimmung bleibt nur eine Methode der experimentellen Ermittlung.¹⁷

In erdgasbeheizten industriellen Thermoprozessanlagen treten alle Wärmetransportmechanismen gleichzeitig auf. Die natürliche Konvektion und die Abstrahlung kühlt von außen die Ofenwand. Eine Wärmeleitung geschieht mittels Wärmetransport im Gut. Ein Transport der Wärme erfolgt durch die heißen Verbrennungsgase an das Gut durch Strahlung und Konvektion, wobei in hohen Temperaturen der Strahlungswärme überwiegt.

2.3.1 Wärmestrahlung

Elektromagnetisches Spektrum:

Die Wärmestrahlung basiert auf dem Prinzip der elektromagnetischen Vorgänge und nicht auf dem molekularen Vorgang beziehungsweise auf makroskopischer Bewegung von Fluiden.¹⁸ Eine makroskopische Bewegung ist eine ungeordnete Bewegung von einzelnen Molekülen in Gasen, die durch elastische Stöße erzeugt wird und einen mechanischen Druck an den Wänden verursacht.

¹⁵ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 28.

¹⁶ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 29.

¹⁷ Vgl. Baehr/Stephan (2016), S. 17.

¹⁸ Vgl. Herwig/Moschallski (2014), S. 167.

Der Umgebungszustand hat keinen Einfluss auf die abgegebene Strahlung des Körpers. Die Strahlungsstärke von festen, flüssigen oder gasförmigen Körpern ist von deren Beschaffenheit und Temperatur abhängig. Eine wichtige Rolle spielen jedoch die Art, Temperatur und geometrische Anordnung der umgebenden Körper.

Stefan-Boltzmann`sches Gesetz:

Die emittierte Strahlung an der Körperoberfläche ist von der absoluten Temperatur des Körpers abhängig. Es besteht ein Zusammenhang zwischen der emittierten Strahlung und der absoluten Temperatur. Dies kann mittels eines schwarzen Körpers, der die angekommene Strahlung absorbiert, beschrieben werden.¹⁹

$$\dot{q}_s = \sigma T^4 \tag{2.3.1.1}$$

Der Index s in der Formel 2.3.1.1 steht für den schwarzen Körper. Die Boltzmann Konstante σ hat den Wert $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Der Zusammenhang der emittierten Strahlung σ in W/m^2 und der absoluten Temperatur T in Kelvin ergibt den schwarzen Körper.²⁰

Planck`sches Verteilungsgesetz:

Das aus der Quantentheorie abgeleitete Verteilungsgesetz der Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers, dargestellt über die Wellenlänge der emittierten monochromen oder spektralen Strahlungsintensität, wird das Planck`sche Gesetz hergeleitet.²¹ Werden die Wellenlängen kleiner, steigt die Temperatur und so auch die emittierte Strahlungsenergie.

$$\dot{q}_{s\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}} \tag{2.3.1.2}$$

c_1/Wm^2	$3,741 \cdot 10^{-16}$
c_2/mK	$1,439 \cdot 10^{-2}$
T/K	absolute Temperatur des schwarzen Körpers
λ/m	Wellenlänge der Intensität

Differenziert man die Formel 2.3.1.2, erhält man die Maxima als Funktion der Temperatur. Demzufolge entsteht das Wien`sche Verschiebungsgesetz, was einen Wert von $\lambda_{\text{max}} = 2898 \mu\text{mK/T}$ ergibt.²²

$\lambda_{\text{max}}/\text{m}$	Wellenlänge der maximalen Intensität
---------------------------------	--------------------------------------

¹⁹ Vgl. Wosnitza/Hilger (2012), S. 249.

²⁰ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 31.

²¹ Vgl. Baehr/Stephan (2016), S. 616.

²² Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 32.

T/K absolute Temperatur des schwarzen Körpers

Es besteht nach Integration der spektralen Strahlungsemission ein Zusammenhang zwischen dem Planck'schen Verteilungsgesetz und dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz.

Kirchhoff'sches Gesetz:

Beschrieben wird hierbei der Zusammenhang zwischen dem Absorbieren eines Körpers und der daraus restlich ausgesandten Strahlung. Genau genommen gilt das Kirchhoff'sche Gesetz nur bei monochromer Strahlung. Eine monochrome Strahlung ist nur einer Spektrallinie angehörig.²³

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \tag{2.3.1.3}$$

α Gesamtabsorptionsgrad

ε Gesamtemissionsgrad

Die emittierte Strahlung und spektrale Verteilung ist nicht in allen Bereichen gleich, da es verschiedene Temperaturabhängigkeiten des Gesamtemissionsgrads ε und des Gesamtabsorptionsgrads α gibt.

Bei den Gesamtstrahlungseigenschaften sind zwei Bedingungen immer gültig:

- Der Strahler ist ein grauer oder schwarzer Körper, der die gleiche Temperatur besitzt wie der betrachtete Körper, $T_{Str} = T_K$
- Er hat eine graue Oberfläche, was bedeutet, dass sein Absorptionsgrad unabhängig von der Wellenlänge ist.

Für die Genauigkeit ist es wichtig, die monochrome Strahlung zu kennen.

Reflexion, Absorption, Transmission:

Je nach Art und Weise kann die Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich auf einem nicht schwarzen Körper die Oberfläche treffen. Zu beachten ist der Winkel der ein- und ausfallenden Strahlung welcher vom Körper absorbiert, durchgelassen oder reflektiert wird, sowie die Verteilung der zurückwerfenden Strahlung. Bekannt ist der schwarze Körper mit dem spektralen Absorptionsgrad $\alpha(\lambda)$ von 1, der auch als Emissionsgrad bekannt ist. Ist der Festkörper demnach nicht strahlungsundurchlässig, ist ein Anteil vom spektralen Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ inkludiert. Ein grauer Körper besitzt weiterhin zum spektralen Absorptions- und spektralen Reflexionsgrad noch einen spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$, der die wellenlängenunabhängige Strahlung durcheinander verteilt.²⁴

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \tag{2.3.1.4}$$

$\alpha(\lambda)$ spektraler Absorptionsgrad

²³ Vgl. Wünnig/Milani (2007), S. 33.

²⁴ Vgl. Herwig/Moschallski (2014), S. 177 ff.

$\rho(\lambda)$	spektraler Reflexionsgrad
$\tau(\lambda)$	spektraler Transmissionsgrad

Im Allgemeinen gilt für die Berechnung mit Gasen nur der spektrale Absorptionsgrad und der spektrale Transmissionsgrad, weil sie nicht reflektieren. Da der spektrale Reflexionsgrad reflektiert, wird dieser in die Berechnung im Normalfall nicht miteinbezogen. Grund dafür ist der begrenzte Wellenlängenbereich am Strahlungsaustausch beteiligter Gaskomponenten, die aus dem Verbrennungsprodukt H₂O, CO₂ und verschiedenen Kohlenwasserstoffen resultieren.²⁵

2.3.2 Wärmeleitung

Zu den stationären Wärmeleitungen gehört einerseits die Wärmeleitung durch ebene Wände und andererseits die Wärmeleitung durch Rohrwände. Bei der Wärmeleitung durch eine ebene Wand ist die Dicke δ oder mittels d angegeben, und ist für das zu trennende Medium sowie die Temperaturdifferenz T_1 und T_2 ausschlaggebend. Nicht außer Acht gelassen werden darf die Fläche A , die Wärmeleitfähigkeit λ und die entsprechende Zeit t nach dem Fourierschen Gesetz, wo der Temperatúraustausch stattfindet.²⁶

$$Q = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{\delta} t \quad (2.3.2.1)$$

Q/W	Wärmeleitung
$\lambda/W/mK$	Wärmeleitfähigkeit
A/m^2	Fläche
T_1/K	Temperatur der ersten Fläche
T_2/K	Temperatur der zweiten Fläche
δ/m	Wandstärke
t/s	Zeit

Nach dem Gesetz vom Fourier wird über eine Zylinderfläche ein Wärmestrom \dot{Q} in Abhängigkeit vom Radius r und der Länge l übertragen. Getrennt werden die Medien von der inneren Oberfläche r_i und der äußeren Oberfläche r_a des Zylinders. Wie bei der Wärmeleitung durch zwei ebene Wände wird auch hier von einer inneren Temperatur T_i und äußeren Temperatur T_a der Medien unterschieden. Der sogenannte logarithmische Mittelwert A_m ist durch die äußere und innere Rohroberfläche geprägt.²⁷

²⁵ Vgl. Herwig/Moschallski (2014), S. 189 f.

²⁶ Vgl. Stephan/Stephan (2018), S. D32.

²⁷ Vgl. Stephan/Stephan (2018), S. D32.

$$\dot{Q} = \lambda A_m \frac{T_i - T_a}{\delta} \quad (2.3.2.2)$$

Q/W	Wärmestrom
$\lambda/W/mK$	Wärmeleitfähigkeit
A_m/m^2	Übertragungsfläche Zylinder
T_i/K	innere Temperatur
T_a/K	äußere Temperatur
δ/m	Wandstärke
t/s	Zeit

Bei instationärer Wärmeleitung spricht man von einem Zustand, bei dem das Temperaturgleichgewicht nicht erreicht wurde. Um eine Berechnung durchführen zu können, ist die Erstellung einer Energiebilanz sehr hilfreich. Wichtig dabei ist die Übertragungszeit der inneren Energie und der äußeren Energie der Medien, zum Beispiel ein Rekuperator oder Wärmetauscher, welcher eine doppelwandige Rohrleitung besitzt, um die Energie übertragen zu können.

2.3.3 Konvektion

Neben der Wärmeleitung und Wärmestrahlung entsteht bei der Konvektion ein Transport von thermischer Energie. Bewerkstelligt wird diese Wärmeübertragung durch den Transport von Teilchen.²⁸ Keine Konvektion gibt es in festen Körpern oder im Vakuum. Hervorgerufen wird eine Strömung des Fluides, die mit Hilfe zum Beispiel der Schwerkraft oder durch Kräfte wie Druck, Dichte oder Temperatur verursacht wird.

Man unterscheidet zwischen der natürlichen Konvektion und der erzwungenen Konvektion.

Bei der natürlichen Konvektion entwickelt sich der Teilchentransport ausschließlich durch den Temperaturgradienten.²⁹ Die erzwungene Konvektion entsteht durch äußere Einwirkung von zum Beispiel einem Gebläse oder einer Pumpe, welche den Teilchentransport herbeiführt.³⁰

²⁸ Vgl. Herwig/Moschallski (2014), S. 69 ff.

²⁹ Vgl. von Böckh/Wetzel (2015), S. 133.

³⁰ Vgl. von Böckh/Wetzel (2015), S. 83 ff.

3 THERMOPROZESSANLAGE

Eine Thermoprozessanlage, auch Industrieofen genannt, ist ein von Wänden umschlossener Raum, in dem das Stückgut erwärmt oder gegebenenfalls gekühlt wird. Das Stückgut erfährt durch vorgegebene Temperaturverläufe eine Änderung des Gefüges. Diese Anlagen sind meistens in Bereichen der Metallindustrie oder Nicht-Metallindustrie wie bei der Herstellung von Keramik und Glas oder Kunstkeramik anzutreffen. Ebenso gibt es unterschiedliche Bauarten wie Drehherdöfen, Kammeröfen, Durchlauföfen, Tieföfen, Herdwagenöfen und Haubenöfen. Die Belieferung oder Beladung der Öfen wird mit Kränen, Chargierfahrzeugen, Chargierrobotern oder Fördersystemen durchgeführt. Je nach eingesetztem Brennstoff kann die maximale Temperatur des Industrieofens variieren.

Diese Arbeit bezieht sich auf einen Herdwagenofen mit einer maximalen Temperatur von 1250 °C. Der Brennstoff zum Erwärmen des Stückgutes ist Erdgas der Sorte High-Gas. Bei der Beheizung der Anlage werden vier Brennertechniken unterschieden.

Einfachhalber für den Leser/die Leserin ist in den nächsten Kapiteln die Temperatur³¹ in °C, der Druck³² in bar und die Leistung³³ in W angegeben.

3.1 Brennertechnik

In der Brennertechnik unterscheidet man zwischen zwei Bauarten. Die Kategorie der Niederdruckbrenner bezieht sich auf das L-Gas, welche mit einem Druck von 10 bis 50 mbar arbeiten. Der Hochdruckbrenner arbeitet mit dem H-Gas mit einem Druck bis zu 3000 mbar. Hierfür wird meist Erdgas zur Verbrennung verwendet.³⁴

3.1.1 Grundlagen der Brennertechnik

Verbrennungstechnik:

Die Verbrennungstechnik findet man des Öfteren im täglichen Gebrauch wie zum Beispiel bei der Zubereitung von Nahrungsmitteln, beim Heizen von Gebäuden oder auch für den Einsatz von Verbrennungskraftmaschinen. Aus einer anderen Perspektive betrachtet spielt auch die globale Problematik, wie der Treibhauseffekt, die Luftverschmutzung und Knappheit der fossilen Brennstoffe eine wesentliche Rolle. Wie sich die Brennertechnik in der industriellen Verwendung verändert hat, wird in weiteren Unterkapiteln aufgezeigt.

Bei der chemischen Reaktion einer Verbrennung, gehörend zur Fraktion der Reduktions-Oxidation-Reaktion oder kurz genannt Redox-Reaktion, oxidiert und reduziert sich ein Reaktionspartner. Beispiel

³¹ 0 °C \triangleq 273,15 K

³² 1 bar \triangleq 100000 Pa

³³ 1 W \triangleq 1 kgm²/s³

³⁴ Vgl. Görner (2018), S. L59.

dafür wäre das Rosten von Eisen, welches zur langsam ablaufenden Reaktion gehört. Schnell ablaufende Reaktionen sind Explosionen.³⁵

Feuerung mit Brennern:

Überwiegend werden Brennstoffe mittels Brennern oder Motoren abgegeben. Über den Brenner erfolgt die Brennstoff- und Luftzufuhr sowie auch in den meisten Fällen die Zündung des Brennstoff- und Luftgemisches und die Flammenüberwachung. Hierfür kommen nur fließfähig Brennstoffe in Betracht, wie zum Beispiel Brenngase, Heizöl oder auch fließfähige gemachte feste Brennstoffe wie Kohlenstaub.

Entstehung der Flamme:

Zur Erzeugung von Wärme werden Brenner für die Umwandlung von chemischen Reaktionen benutzt. Je nach Konstruktion des Brenners ist die Form, Geschwindigkeit und Länge der Flamme variierbar.

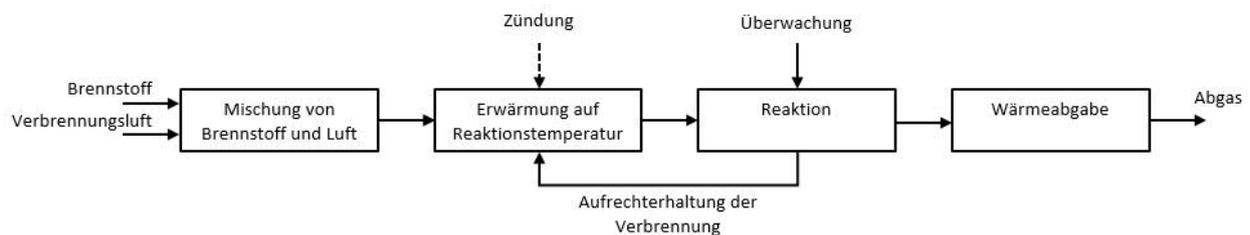


Abbildung 3: Wesentliche Bestandteile eines Brenners, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie in der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ersichtlich ist, wird der Brennstoff und die Verbrennungsluft vermischt und dann auf Reaktionstemperatur durch eine externe Zündung anhand eines Zündfunken oder bei leistungsstärkeren Brennern durch einen Zündbrenner gestartet.

Ist der Brenner in einer stabilen Funktion, übernimmt die Zündenergie die Verbrennung selbst. Eine Flammenüberwachung stellt fest, ob die Verbrennung kontinuierlich den Brennstoff verbrennt. Erlischt die Flamme, muss sichergestellt werden, dass keine Zufuhr des Brennstoffes in den Brennraum erfolgt, was schlussendlich zu einer Verpuffung oder gar zu einer Explosion führen könnte. Um eine Verbrennung sicherzustellen, ist das Brennstoff-Luft-Verhältnis innerhalb der Zündgrenzen zu berücksichtigen.³⁶

Klassen der Flamme:

Flammen gibt es in unterschiedlichen Ausführungen, die nach Mischung und Strömungsform eingeteilt werden:

- laminare Vormischflamme
- turbulente Vormischflamme
- laminare Diffusionsflamme
- turbulente Diffusionsflamme

³⁵ Vgl. Joos (2006), S. 9.

³⁶ Vgl. Joos (2006), S. 218 f.

Kleinbrenner mit einem geringen Austrittsquerschnitt haben eine laminare Diffusionsflamme wie zum Beispiel die Kerzenflamme oder die Flamme eines Feuerzeuges. Beispiel für eine laminare Vormischflamme wäre ein Bunsenbrenner bei geringem Durchsatz, Campingbrenner und die Flamme in Gasthermen.³⁷

Turbulente Flammen kommen bei Industriebrennern vor. An der Grenze der Flammenfront bildet sich die Diffusionsflamme zwischen Luft und Brennstoff. Die Mischung ist bei turbulenter Strömung intensiver, was die Grenzfläche von Luft und Brennstoff größer ausprägt als bei laminarer Strömung.³⁸

Verbrennungen mit einer Vormischflamme sind dadurch bekannt, dass Luft und Brennstoff bereits vor der Verbrennung vermischt sind. Hierfür gibt es keine Luftvorwärmung, da das Risiko für eine Selbstentzündung viel zu hoch ist. Ebenso muss in der Vormischstation ein Rückschlagventil eingebaut sein.

Flammenstabilisierung und Flammengeschwindigkeit:

Die Flammengeschwindigkeit wird an der Front des Luft-Brennstoff-Gemisches gemessen. Der Wert der Flammengeschwindigkeit gibt Auskunft über die Flammenstabilität und über die Gefahr eines Flammenrückschlages in das Vormischsystem. Neben den wichtigen Parametern der Flammengeschwindigkeit wie Temperatur und Strömungsform, beeinflusst die Gaszusammensetzung des Luft-Gas-Gemisches die Flammengeschwindigkeit sehr.

Laminare Flammengeschwindigkeit ist von seiner Gasmischung prozentuell wie zum Beispiel C_2H_2 , C_3H_6 oder H_2 in der Luft abhängig. Die Werte liegen bei einem Meter pro Sekunde, während Wasserstoff einen höheren Wert aufweist als übliche Kohlenwasserstoffe.³⁹ Außerhalb der Zündgrenzen neigt die Flammengeschwindigkeit gegen Null. Je höher die Temperatur ist, desto mehr nimmt die Flammengeschwindigkeit und somit auch die Flammenstabilisierung zu.

Die turbulente Flammengeschwindigkeit hängt außer von der Gasart, Temperatur oder Druck noch sehr von der Strömungsform ab. Dennoch beträgt die turbulente Flammengeschwindigkeit noch ein Vielfaches von laminaren Flammengeschwindigkeiten, was nicht ohne weiteres in Form eines Diagrammes dargestellt werden kann. Beide Kriterien, nämlich Flammengeschwindigkeit und Flammenstabilisierung, sind ausschlaggebend für die Aufrechterhaltung der Reaktion der Flamme. Die Reaktion der Flamme liefert die Zündenergie von der Flamme zurück, die als Ionisationsstrom bekannt ist.

Die Konstruktion eines Brenners muss so ausgelegt sein, dass der Brenner im gewünschten stabilen Flammenbild arbeitet.

Dafür gibt es weitere Stabilisierungshilfen wie den Drallbrenner, die Stauscheibe, den Brennerstein und den Stützflammen stabilisierte Brenner. Als Beispiel wird hier auf den Stauscheiben stabilisierten Brenner

³⁷ Vgl. Joos (2006), S. 277 f.

³⁸ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 52 f.

³⁹ Vgl. Joos (2006), S. 278 ff.

und Brennerstein stabilisierten Brenner näher eingegangen. Die Stauscheibe fungiert als Rückstromhalter für die Flammenstabilität. Vorstellen kann man sich das anhand eines Kanufahrers, der hinter einem Hindernis keine große Kraft benötigt, um an der gleichen Position zu bleiben. Ist die Strömungsgeschwindigkeit gleich der Flammengeschwindigkeit, stabilisiert sich die Flamme. Ebenfalls kann sich die Flamme anhand des Brennersteines stabilisieren. Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass bei einer Querschnittserweiterung die Strömungsgeschwindigkeit sinkt. Darüber hinaus hilft der Brennerstein an den heißen Wänden das Luft-Gas-Gemisch wieder zu entzünden. Die Hauptströmung erzeugt bei einer Drallbeschleunigung eine negative Strömungsgeschwindigkeit. Die Zone des Drallbrenners wird größer. Je nach Art des Dralles hat dies einen Einfluss auf die Flammenform. Die Flammstabilisierung ist nur dann vom Nutzen, wenn es zu einem Taktbetrieb kommt, sozusagen zur Unterbrechung der Brennstoffzufuhr oder wenn die Brennstoffzusammensetzung stark schwankt.⁴⁰

Flammenform:

Teilweise werden Brenner nach ihrer Flammenform bezeichnet. Zu unterscheiden gibt es den Freistrahlbrenner, den Flachflammenbrenner und den Flächenbrenner.⁴¹ Freistrahlbrenner haben durch ihre hohe Austrittsgeschwindigkeit den Vorteil, dass sie die Ofenatmosphäre verwirbeln und keine zusätzlichen Umwälzer benötigen. An der Brennerstrahlaustrittsstelle sollte genügend Platz für die Flamme sein. Am besten ist es, das Gut auf Ofenunterlagen zu legen, um den Brennerstrahl darunter durchzuführen. So werden punktuelle Übertemperaturen an Stellen des Gutes und der Ofenwand vermieden.

Sollte kein konstruktiver Platz zwischen der Flamme und dem Gut vorhanden sein, können Flachflammenbrenner eingesetzt werden. Der starke Drall der Flamme legt sich tangential an der Ofenwand an. Je nach Einsatzort der Thermoprozessanlage sind die Brenner an den Seitenwänden oder auf der Ofendecke eingebaut.

Durch die Bauweise der Flächenbrenner wird die Luft und der Brennstoff so zugeführt, dass sich die Flamme an der Oberfläche der Wände ausbreitet und sich die Wärme an der heißen Oberfläche abstrahlt. Wegen dieser Eigenschaft wird diese Bauweise auch als Strahlungsbrenner bezeichnet.⁴²

Strömungsgeschwindigkeit:

Impulsbrenner, auch Hochgeschwindigkeitsbrenner genannt, haben einen gewünschten Effekt, nämlich die Umwälzung in der Ofenatmosphäre anzutreiben. Sie besitzen eine Austrittsgeschwindigkeit von 100 m/s und mehr darüber hinaus. Wie bereits bekannt, ist dies die Flammenform des Freistrahlbrenners. Um eine bessere Temperaturverteilung im Ofenraum erreichen zu können, nutzt man dennoch eine Umwälzung mit Umwälzkanälen. Bei Niedergeschwindigkeitsbrennern will man eine starke Umwälzung vermeiden, da ansonsten die hohen Strömungsgeschwindigkeiten Partikel verwirbeln. Nieder- und Mittelgeschwindigkeitsbrenner weisen eine längere Flamme auf als Hochgeschwindigkeitsbrenner, was

⁴⁰ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 54.

⁴¹ Vgl. Blesl/Kessler (2017), S. 118.

⁴² Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 55.

sich negativ auf die Rußentwicklung auswirken kann. Es bildet sich eine gelb leuchtende Flamme, die anhand von ablösenden Flammenwirbeln ersichtlich erscheint.⁴³

Beheizungsart:

Je nach Anforderung kann die Beheizung direkt oder indirekt erfolgen. Dies geschieht im herkömmlichen Sinn, dass die Flamme direkt in den Ofenraum feuert und so das Gut ihr ausgesetzt ist. Anders erfolgt dies beim indirekten Beheizen. Der Verbrennungsraum und der Ofenraum sind voneinander getrennt. Die Trennung kann durch Strahlungsheizrohre oder Muffel realisiert werden. Solch eine Situation ist dann erforderlich, wenn der Kohlenstoffgehalt in der Randschicht des Gutes verändert werden soll. Es wird eine mutwillig bestimmte Aufkohlungsatmosphäre in den Ofenraum beigeführt.

Stöchiometrie:

Die meisten Brenner werden mit leichtem Luftüberschuss oder anders gesagt im nahstöchiometrischen Betrieb betrieben. Wie viel Luft der Brenner benötigt, hängt von der Einstellung des Brenners oder der Luft- und Gasmengenregelung ab. Ein zu hoher Luftüberschuss führt zu einem steigenden Abgasverlust. Ursache dafür ist bei leichtem Über- oder Unterschuss eine unvollständige Verbrennung, die zu hohen CO-Emissionen führt.⁴⁴

Nicht in allen Anwendungen werden die Brenner im nahstöchiometrischen Betrieb betrieben. Luftüberschussbrenner finden dort ihre Verwendung, wo bei einer hohen Prozesstemperatur Brennerimpulse die Umwälzung antreiben, aber nur mehr wenig bis gar keine Energie zugeführt werden darf. Der Abgasverlust beträgt dann 100 %, was gerade bei Kaltluftbrennern eine Ineffizienz verursacht. Luftunterschussbrenner sind dann erwünscht, wenn ein zu hoher Sauerstoffgehalt die Zunderung des Gutes dramatisch beschleunigt. Unverbranntes wie Kohlenmonoxid muss dann im Nachhinein verbrannt werden. Erfolgt dies nicht, könnte es zu einer Zerstörung des Wärmetauschers oder Abgastraktes führen.⁴⁵

3.1.2 Kaltluftbrenner

Der Kaltluftbrenner wird mit wie alle anderen weiteren Brennertechnologien in diesem Kapitel mit Luft und Erdgas versorgt. Wie bereits der Name Kaltluftbrenner verrät, bedient sich der Brenner für die Luftversorgung an kalter Luft. Die genannte kalte Luft weist die Temperatur von der Umgebung auf, wo der Brennluftventilator der Thermoprozessanlage verbaut ist. Diese Luft wird dem Brenner als Verbrennungsluft zur Verfügung gestellt.

⁴³ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 56.

⁴⁴ Vgl. Joos (2006), S. 287 ff.

⁴⁵ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 58.



Abbildung 4: Kaltluftbrenner Elster GmbH, Quelle: Eigene Darstellung.

Um das Luft-Gas-Verhältnis zusammensetzen zu können und daraus ein brennbares Gemisch zu erhalten, gibt es unterschiedliche Techniken für die Realisierung. Der Vorgemischbrenner erhält zuvor in den Rohrleitungen ein entzündbares Gemisch. An der Eingangsstrecke von Luft und Gas vermischt sich das Gemisch durch eine eigene Station. Weil das Gemisch bereits in der Rohrleitung entzündbar ist, ist eine Rückschlagsicherung an beiden Eingangsstrecken erforderlich. Auch Zündbrenner sind als Vorgemischbrenner ausgeführt, da die Bauweise es nicht zulässt, die Versorgung getrennt zu führen. Im Zündbrenner ist ebenfalls die Zündelektrode verbaut, welche das Vorgemisch im Zündbrenner zündet.⁴⁶ Der Zündbrenner selbst hat die Aufgabe, den Hauptbrenner kontrolliert und sicherheitsgerichtet zu starten. Er wird dann benötigt, wenn eine gewisse Brennerleistung verbaut ist. Ist eine direkte Zündung des Hauptbrenners vorgesehen, ist auf die Anlaufzeit des Brenners sowie auf langsam öffnende Ventile oder reduzierte Brennerleistung zu achten.

Beim Mündungsmischbrenner wird ebenso der Hauptbrenner mit oder ohne Zündbrenner gestartet. Das charakteristische Bauteil ist der Düsenstein, mit dem die Luft und das Gas vermischt werden.⁴⁷ Der Düsenstein oder auch Brennerkopf ist aus temperaturbeständigem Metall ausgeführt, weil dieser der Ofenraumtemperatur ausgesetzt ist. Die Luft wird über das metallische oder keramische Brennerrohr zugeführt, wodurch das Gas direkt über den Brennerkopf befördert wird. An der Austrittsstelle von Luft und Gas sitzt die Mischscheibe. In der Brennerscheibe sind Bohrungen und Schlitze angebracht, um die Luft mit dem Gas zu vermischen. Hauptsächlich fungiert sie für die Verdrallung der Verbrennungsluft. Die Bohrungen und Schlitze sitzen radial zur Gasdüse. Zwei Aufgaben werden durch die Mischscheibe gleichzeitig erledigt. Einerseits baut sich aufgrund des Strömungswiderstandes ein definierter Staudruck vor der Mischscheibe auf, der sich auf den Brennluftvolumenstrom und die Größe der Öffnung einstellt. Andererseits hat die Anordnung der Bohrungen und Schlitze Auswirkung auf die Verdrallung des Luft-Gas-Gemisches und auf die Flammenform des Brenners.

⁴⁶ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 103.

⁴⁷ Vgl. Günther (1974), S.226.

Die konstruktiven Charakteristiken der Axial-, Radial- und Tangentialkomponenten in der Luft und in der Gasführung haben einen Einfluss auf die Flammgeometrie.⁴⁸ Die Größe der Gasbohrungen ermöglichen die Anpassung des Mischkopfes an die verschiedenen Parametern wie zum Beispiel Dichte und Heizwert. Durch die Ausführung der Mischköpfe können Flammenbilder nach vorne gerichtet, kurz oder flach anliegend sein.

Für eine saubere Verbrennung besteht die Brennerkammer, das heißt das Brennerrohr, in dem der Mischkopf enthalten ist, aus Metall oder Keramik. Um das Brennerrohr ist ein Feuerfestbeton, meistens ein Brennerstein vorhanden. Die Auswahl des jeweiligen Brennerrohres ist vom Prozess abhängig. Niedertemperaturprozesse mit Zwangsumwälzung der Ofenatmosphäre verwenden meist moduliert geregelte Brenner in Kombination mit metallischen Brennerrohren. Hier bieten sich hitzebeständige Stähle als Brennerrohre an. Im Taktbetrieb finden sich überwiegend Hochgeschwindigkeitsbrenner mit keramischen Brennerkammern wieder. Die Ausführung der keramischen Brennerrohre kann gerade oder verjüngt sein. Bei der verjüngten Variante kann auf den Brennerstein verzichtet werden. Weiters sind am Markt unterschiedliche Keramikqualitäten für höhere Temperaturbereiche zu finden. Sind Erschütterungen an der Anlage zu erwarten, ist es vorteilhaft Brennersteine einzusetzen. Die Austrittsgeschwindigkeit eines Hochgeschwindigkeitsbrenners beträgt zwischen 70 bis 130 Meter pro Sekunde in Abhängigkeit des Brennerrohres⁴⁹.

Um dem Gut im Ofenraum nicht zu schaden, werden Flachflammenbrenner eingesetzt. Die starke Drallbeschleunigung wird durch die Verbrennungsluft in Kombination mit dem Brenstein umgesetzt. Wegen ihrer ringförmigen Flamme verwendet man diese Brenner auch als Decken- und Seitenwandbrenner. Die abgegebene Energie von der Flamme verbreitet sich an der Ofenwand und strahlt so auf das Gut.

Zur Überwachung der Brennerflamme haben sich die UV- und die ionische Überwachung durchgesetzt. Die ionische Überwachung ist im Brenner als Elektrode integriert. Sie ragt aus der Mischscheibe direkt in die Flamme, um dort ein Signal der Flamme zu empfangen. Konstruktiv benachteiligt ist die UV-Überwachung, da sie eine eigene Führung und Blickwinkel zur Flamme benötigt. Hauptsächlich wird die UV-Überwachung bei Brennern mit ionisch nicht überwachbaren Gasarten eingesetzt.⁵⁰

Der Einsatzbereich von Kaltluftbrennern liegt bei Wärmebehandlungsprozessen im unteren und mittleren Temperaturspektrum. Auch dort, wo beispielsweise die wirtschaftliche Betriebsweise von Warmluftbrennern oder rekuperative Brenner keinen Einsatz finden, werden Kaltluftbrenner verwendet. Weitere Anwendungs- und Einsatzbereiche sind bei Wärmebehandlungsöfen in der Stahl- und Nichteisenindustrie, bei Schmelzöfen der Nichtmetallindustrie, bei Trocknungsprozessen, in regenerativen Nachverbrennungsanlagen und bei Brennöfen der Grob- und Feinkeramik.

Die Brenner sind im gas/luftseitigen Verbund mit modulierender Regelung ausgestattet. Die Verbundregelung ist aus Sicherheitsgründen vorgeschrieben. Realisiert wird dies mit einer

⁴⁸ Vgl. Günther (1974), S.220 f.

⁴⁹ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 106.

⁵⁰ Vgl. Recknagel/Sprenger/Schramek (2007), S. 784.

Wirkdruckleitung von der Luftseite zum Gasgleichdruckregler oder Gasventil. Verhindert wird, dass kein Erdgas ohne Luft verbrannt werden kann. Ist die Luftversorgung zum Brenner unterbrochen, beispielsweise durch ein defektes Luftventil, wird auch trotz des aktiven Gasventiles kein Erdgas in den Ofenraum geführt. Eine weitere negative Auswirkung hätte dies auf die Verbrennung im Ofenraum und im Abgastrakt zur Umwelt. Dadurch könnte ein Gasüberschuss entstehen und eine Nachverbrennung im Abgassystem. Durch die hohen CO₂-Emissionen schadet dies der Umwelt.

Vorteile der Kaltluftbrenner:

- Option zur vorübergehenden Leistungssteigerung
- Geringe Abgasmenge
- Einsatz auch bei problematischen unsauberen Abgasen
- Gute Lösung, wenn reiner Sauerstoff billig verfügbar ist

Nachteile der Kaltluftbrenner:

- Hohe Betriebskosten
- Hohe Abgastemperatur
- Geringer Brennerimpuls (Taktimpuls)
- Niedriger feuerungstechnischer Wirkungsgrad

3.1.3 Warmluftbrenner

Warmluftbrenner werden gemeinsam mit einem externen oder Zentralwärmetauscher betrieben. Komponenten und Gehäuse der Brenner müssen isoliert sein, um die vorgewärmte Luft in den Rohren halten zu können. Die vorgewärmte Lufttemperatur eines Zentralrekuperators liegt im Bereich zwischen 300 °C und 500 °C je nach Ofenraumtemperatur. Bestens optimierte Thermoprozessanlagen mit Zentralrekuperatoren erreichen auch bis zu 600 °C. Eine höhere Luftvorwärmtemperatur ist bei den Rekuperator- und Regenerativbrennern vorhanden.⁵¹

Mit ansteigender Temperatur nimmt die Dichte der Luft zu und führt zu einem hohen Volumenstrom der Luft. Zum Beispiel beträgt er bei 500 °C warmer Luft etwa das Zweieinhalbfache an Volumenstrom von Kaltluft. Bleibt die Brennleistung gleich, steigt der Luft-Druckverlust im Brenner etwa auf das Sechsfache an.

Der Warmluftbrenner funktioniert gleich wie der Kaltluftbrenner, nur mit vorgewärmter Brennluft. Gegebenenfalls ist die Rohrleitung für die Luft größer ausgelegt wie beim Kaltbrenner. Wie in der Abbildung 5 ersichtlich, wird das Erdgas axial über den Brennerkopf, hier eine Gaslanze, zugeführt. Die Warmluft gelangt radial über das Brennerrohr zum Brennerkopf durch die Bohrungen und Schlitze des keramischen Luftdüsensteines.

⁵¹ Vgl. Wünning/Milani (2007), S. 117.

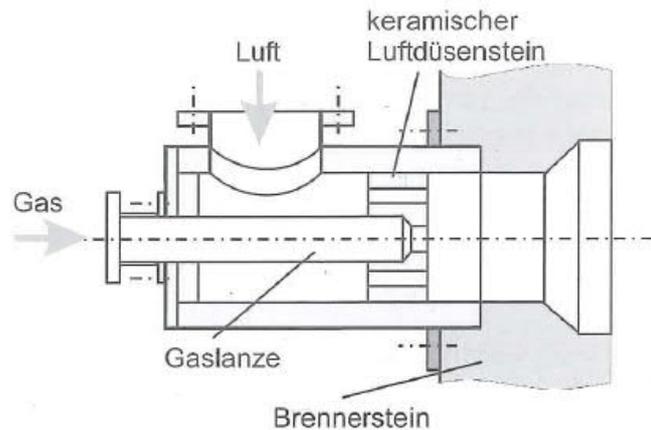


Abbildung 5: Warmluftbrenner, Quelle: Bloom Engineering (2009), Online-Quelle [09.09.2019] (leicht modifiziert).

Die Brennermündung im Brennerstein stabilisiert die Flamme. Der Brennerstein ist ein wesentlicher Bauteil für das Brennverhalten und die Brennerform. Beschleunigt man die Luft, führt dies zu einer Verkürzung der Flamme und Bildung einer Rückströmzone im Brenner, was zusätzlich zur Stabilisierung der Flamme führt⁵².

Ausschlaggebend für die Austrittsgeschwindigkeit des Brenners und die Umwälzung im Ofenraum ist die Form des Brennersteines. Je nach Hersteller wird die Beeinflussung der Austrittsgeschwindigkeit über den Brennerstein oder über das Brennerrohr umgesetzt. Die Form unterscheidet sich nach konisch verjüngt, gerade oder offen. Ein offener Brennerstein bildet eine weiche Flamme mit niedriger Geschwindigkeit. Im Gegenteil dazu verursacht eine Verjüngung eine harte Flamme mit hoher Geschwindigkeit. Nicht nur die Öffnung, sondern auch das Verhältnis von Länge zu Durchmesser des Brennersteines beeinflusst die Stabilität der Flamme.⁵³

Wegen der hohen vorgewärmten Lufttemperatur besteht die Brennerdüse oder Gasdüse aus Keramik. Auch Warmluftbrenner mit Brenndüsen können als Hochgeschwindigkeitsbrenner eingesetzt werden. Zum Starten der Flamme wird eine automatische Zündung und Überwachung verwendet. Auch hier gibt es die unterschiedlichen Varianten eines Zündbrenners oder eine Zündelektrode. Es gibt auch Bauarten, wo der Zündbrenner als Überwachung für die Hauptflamme fungiert. Dabei muss aber sichergestellt sein, dass der Wiederanlauf des Hauptbrenners immer gegeben ist. Ist dies nicht der Fall, muss die Hauptflamme mittels Ionisationselektrode oder UV-Überwachung detektiert werden.

Die Ionisationselektrode ist direkt in der Flamme vorhanden. Die Flamme ist in einem gewissen Maß elektrisch leitend und nutzt diesen Effekt für die Ionisationsüberwachung. Bei einer stabilen Flamme registriert die Flammenüberwachung einen Ionisationsstrom, der fließt. Manchmal ist die Zündelektrode gleichzeitig die Ionisationselektrode.

UV-Überwachungen, die bei anderen Herstellern auch UV-Sonden genannt werden, erkennen anhand der Photozelle die Strahlung im Wellenlängenbereich der ultravioletten Strahlung. Heiße Ofenwände strahlen

⁵² Vgl. Günther (1974), S. 222.

⁵³ Vgl. Elster GmbH (2011), Online Quelle [09.09.2019].

vorrangig im Infrarotbereich, was durch die UV-Sonde nicht als falsche Flammenstrahlung erkannt werden kann.

3.1.4 Rekuperatorbrenner

Der Rekuperatorbrenner oder kurz Rekubrenner ist in der Wärmebehandlung von Stählen weitläufig im Gebrauch. Bei dieser Konstruktion bilden der Brenner und der Wärmetauscher eine Einheit. Man spricht von einer dezentralen Wärmerückgewinnung. Das Abgas wird über den feuernden Brenner abgezogen und als Warmluft verwendet. Isoliermaterialien entfallen außen am Brenner durch die Bauweise des integrierten Wärmetauschers⁵⁴.

Der Wärmetauscher ist im Brennerstein integriert. Das Abgas und die Verbrennungsluft arbeiten anhand eines Gegenstromwärmetauschers. Geführt wird das Abgas zwischen dem Abgasführungsrohr, das außerhalb liegt, und der keramischen Brennkammer, die innen verbaut ist. Das Luftführungsrohr bildet eine Trennkammer und ist zugleich auch das Rohr für die Verbrennungsluft. In der Brennkammer wird das Erdgas über die Gaslanzendüse befördert. Zentral oder seitlich dazu sind die Zünd- und Überwachungselektroden des Brenners angebracht. Der Großteil der Flamme wird in der keramischen Brennkammer entzündet und tritt mit hoher Geschwindigkeit in den Ofenraum aus.⁵⁵

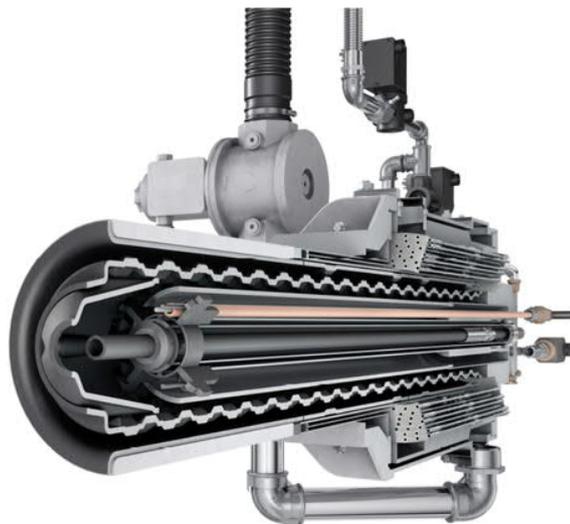


Abbildung 6: Rekuperatorbrenner, Quelle: WS Wärmeprozesstechnik GmbH (2001), Online-Quelle [09.09.2019].

Je nach Gestaltung des Rekuperators kann der feuerungstechnische Wirkungsgrad variieren. Entscheidend ist hier die Wärmetauscherfläche, die zur Verfügung steht. Auch die Struktur der Wärmetauscheroberfläche hat einen Einfluss auf die Wärmeübertragung. Verwendet werden Rekubrenner mit gerippten metallischen Zusatzrekuperatoren oder immer mehr kommend mit keramischen Rekuperatoren. Aufgrund der bautechnischen Größen der Rekuperatoren sind die keramischen und metallischen Rekubrenner in den Leistungsbereichen begrenzt. Ein Rekuperatorbrenner mit keramischem Wärmetauscher liegt im Leistungsbereich zwischen 10 und 100 kW. Der metallische Rekuperatorbrenner

⁵⁴ Vgl. IBS Industrie-Brenner-Systeme GmbH (2011), Online-Quelle [09.09.2019].

⁵⁵ Vgl. Elster GmbH (2017), Online-Quelle [09.09.2019].

wird für höhere Leistungsbereiche von etwa 30 bis 300 kW eingesetzt. Durch unterschiedliche Formen wie Rippen, Wellen, Noppen oder Zacken wird versucht die Wärmetauscherfläche so groß wie möglich zu machen. Keinen Verschleiß haben die keramischen Wärmetauscher, sie können eine Abgastemperatur bis 1300 °C standhalten. Auch eine Kombination der beiden Varianten ist möglich, um höhere Anwendungstemperaturen und einen guten Wirkungsgrad zu erzielen.⁵⁶

Überwiegend werden Rekuperatorbrenner als Hochgeschwindigkeitsbrenner eingesetzt. Wegen der hohen Luftvorwärmung und der daraus resultierenden Zunahme des Volumens wird ein hoher Brennerimpuls erzielt. Vorteilhaft einwirken kann die Anordnung der Brenner im Ofenraum, um die Durchmischung der Temperaturen im Ofen anzutreiben. Wegen der Flammenlänge muss beachtet werden, dass kein Zunder oder eine Ofenaufgabe die Austrittsstelle beeinflusst. Auch dafür gibt es Lösungen wie zum Beispiel der Rekubrenner mit der 4-Lochbrennerdüse. Die Flamme wird an der Gaslanzendüse seitlich wie ein Flachflammenbrenner ausgeführt. So wird verhindert, dass punktuell markante Stellen an der Ofenaufgabe oder am Gut durch Überhitzung auftreten. Ein wesentlicher Vorteil der 4-Lochbrennerdüse ist, dass der Brenner, wenn die Ofenraumtemperatur oberhalb 850 °C erreicht wurde, in den flammenlosen Betrieb übergeht und die Reaktion außerhalb der Brennerdüse erfolgt. Dadurch wird die Brennerdüse thermisch weniger belastet.⁵⁷

Neben dem Abgasweg über den Eduktor ist auch ein Abgastrakt über dem Ofen erforderlich, um einerseits den Ofendruck stabil zu halten und andererseits kein heißes Abgas über den nicht betriebenen Brenner zu führen. Für die Abgasabsaugung gibt es zwei grundlegende Methoden:

Die erste Methode funktioniert mit einem Eduktor, der gleichzeitig mit dem betriebenen Brenner arbeitet. Durch den Treibstrahl, welcher mit einem Teil der Brennluft erzeugt wird, entsteht ein Unterdruck im Eduktor und zieht dem Brenner das Abgas über das metallische oder keramische Brennerrohr ab. Die Abgasleitung ist kurz nach dem Brenner mit einem Zugunterbrecher verbunden. Ein Teil der Verbrennungsluft steht dem Brenner und der andere Teil dem Eduktor zur Verfügung. Bei der Auslegung des Verbrennungsventilators muss dies berücksichtigt werden.

Die andere Variante ist die Verwendung einer Heißgasklappe anstatt des Eduktors. Soll das Abgas nicht mit der Eduktorluft vermischt werden, sondern einem weiteren Zweck dienen wie zum Beispiel der Wärmerückgewinnung, dann bietet sich die Heißgasklappe an. Typische Abgastemperaturen des Rekubrenners liegen bei 400 bis 600 °C. Um einen Unterdruck zu erzeugen, wird die Abgasleitung dazu konstruktiv erzwungen. Bei dieser Variante ist kein Zugunterbrecher vorhanden. Die Heißgasklappe ist in den Brennpausen geschlossen und die Abgasabsaugung inaktiv.

Das Hirn des Brenners ist die Brennersteuerung, die die Beschaltung der Ventile und Klappen sowie die Befehle der Steuerung übernimmt oder zurücksendet. In der Brennersteuerung inkludiert ist die Erfassung der Zündbrenner- und Flammenüberwachung. Sind mehrere Brenner an einem Ofen verbaut, geschieht das heutzutage mit Hilfe einer speicherprogrammierbaren Steuerung, kurz SPS. In der SPS ist eine

⁵⁶ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 130.

⁵⁷ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 130.

Rundumsteuerung programmiert, um die Beschaltung der einzelnen Brenner zyklisch durchführen zu können.

Vorteile gegenüber Zentralrekuperatorsystem / Warmluftbrenner:

- Keine isolierten Warmluftleitungen
- besserer feuerungstechnischer Wirkungsgrad
- gute Temperaturngleichmäßigkeit
- zusätzliche Kosten für Zentralrekuperator und Warmluftleitungen

Nachteile gegenüber Zentralrekuperatorsystem / Warmluftbrenner:

- unterstöchiometrische Verbrennung nicht möglich
- eventuelle Probleme bei unsauberer Ofenatmosphäre (Zunder)
- hohe Brennerkosten bei Instandhaltung
- Abgassammelsystem erforderlich

3.1.5 Regeneratorbrenner

Die neueste Technologie der Beheizungstechnik für Industrieöfen ist die Regenerativbeheizung. Sie bietet das höchste Potential der Luftvorwärmung. Solche Brenner sind mit einer maximalen Leistung von 360 kW im Gebrauch⁵⁸. Bei regenerativer Beheizung ist das Energieeinsparungspotential zwar sehr hoch, jedoch bringt es Nebeneffekte wie hohe NO_x-Emissionen mit sich. Die zulässigen NO_x-Werte überschreiten bei keiner geeigneten Maßnahme drastisch die Grenzwerte. Mittels intensiver technologischer Entwicklung wurde beispielweise die flammenlose Oxidation oder Stufenverbrennung eingeführt und das Problem der hohen NO_x-Werte reduziert.⁵⁹ Das Brennersystem besitzt gleichdruckreglergesteuerte Ventile, die durch Änderung des Brennluftdrucks auch den Gasdruck und als Resultat die Brennerleistung verändern.

Der Regenerator ist das Kernstück des Systems. In diesem Regenerator sitzen Wabenkörper aus Keramik oder Keramikugeln, welche die Wärmeenergie speichern.⁶⁰ Dafür sorgt die Regenerativklappe, die die Ofenraumwärme absaugt. Bei der Zentralrekuperator-Beheizung wird die vorgewärmte Luft je nach Ofentemperatur erwärmt. Schließlich hat der Brenner eine maximale Luftvorwärmung von 400 °C. Jedoch benötigt dies eine erhebliche Menge an Erdgas, weil die Stickoxide aus der Luft miterwärmt werden müssen, um eine Ofenraumtemperatur von zum Beispiel 1200 °C zu erreichen. Die Feuerung erfolgt jedoch immer paarweise. Der erste Brenner feuert im normalen Betrieb, während der zweite Brenner im Aufladezustand für den Regenerator ist.

⁵⁸ Vgl. Elster GmbH (2017), Online Quelle [09.09.2019].

⁵⁹ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 137 ff.

⁶⁰ Vgl. Blesl/Kessler (2017), S. 119.

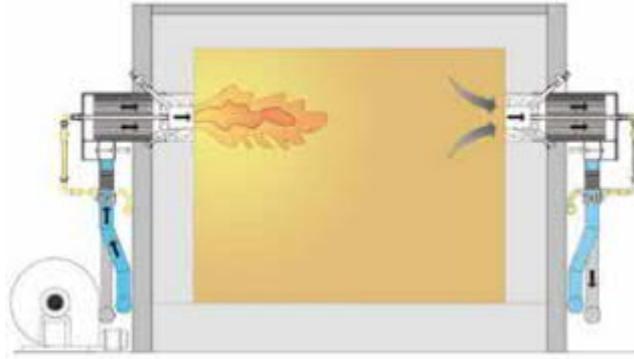


Abbildung 7: Regeneratorbrenner Paar, Quelle: IBS Industrie-Brenner-Systeme GmbH, Online-Quelle [26.08.2019].

Zu den Komponenten des Brenners gehören:

- Antrieb Luftklappe
- Antrieb Regeneratorklappe
- Gaslanze
- Zündbrenner
- UV-Sonde
- Regenerator
- Sämtliche Ventile

Der Regenerator versucht, die Temperatur auf 400 °C aufzuladen. Die Regeneratortemperatur wird vor der Regenerativklappe als Schutz vor Übertemperatur gemessen. Direkt im Regenerator herrschen jedoch Temperaturen, die nahezu der Ofenraumtemperatur entsprechen.

Die Vorwarntemperatur liegt bei 430 °C, wenn diese länger als 30 Sekunden überschritten ist. Die Grenztemperatur am Regenerator liegt bei 450 °C und einer Zeit von 180 Sekunden. Bei Überschreitung der Grenztemperatur wird die Luftklappe geöffnet, um den Regenerator vor Übertemperatur zu schützen. Ist die Kühlung aussichtslos, wird der Abgasventilator auf seine Mindestdrehzahl gedrosselt, um eine Abschaltung der Anlage zu verhindern. Eine Abschaltung der Anlage geschieht erst dann, wenn die oben angeführten Punkte erfolglos waren.

3.2 Herdwagenofen mit Warmluftbrenner

Wie bereits am Anfang des Kapitels 3 erwähnt, wird die Energiereduktion an einem Herdwagen mit Warmluftbrennern umgesetzt.

Genau betrachtet sind es getaktete Warmluftbrenner mit Zentralrekuperator, die über eine Groß- und Kleinmenge an Erdgas verfügen.

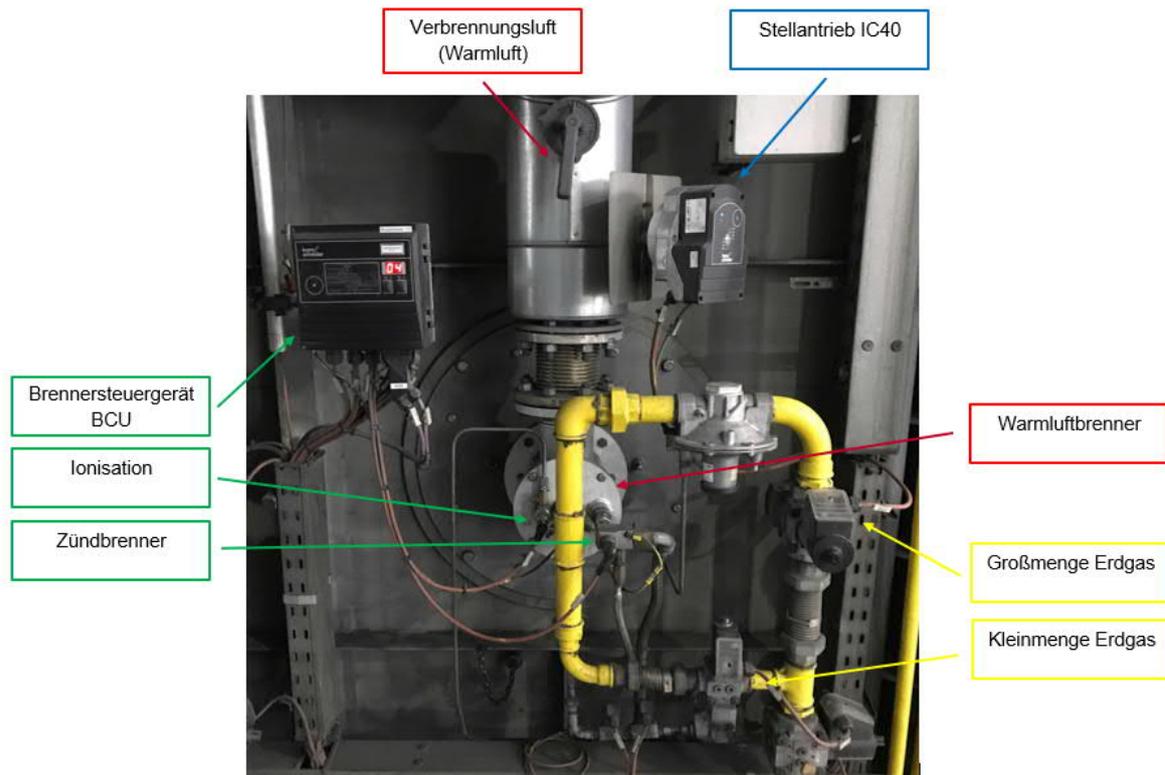


Abbildung 8: Brennerkomponenten Herdwagenofen mit Warmluftbrenner, Quelle: Eigene Darstellung.

Die maximale Erdgasversorgung des Industrieofens ist mit $720 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ausgelegt. Die Normkubikmeter pro Stunde Nm^3/h entsprechen nur dann, wenn die Temperatur des Mediums Erdgas $20 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt. Mit dem Heizwert von $11,1 \text{ kWh}/\text{m}^3$ ergibt dies eine Gesamtenergie von 7992 kWh . Vorgesehen sind Warmluftbrenner für den Einbau in einem Brennerstein oder einem verlängerten, hitzebeständigen Brennerrohr. Ausgelegt ist der Brenner für die Medien wie Erdgas, Stadtgas und Flüssiggas.

Die Taktung der einzelnen Brenner ist mittels Rundumsteuerung realisiert, die in drei Zonen unterteilt ist. Insgesamt weist die Thermoprozessanlage 16 Brenner auf, bei denen die Kleinmengenleistung mit 400 kW sowie die Großmengenleistung mit 630 kW ausgelegt sind. Die zwei unterschiedlichen Brennerleistungen tragen dafür Sorge, dass keine Temperaturschwingungen auftreten, wenn die Ist-Temperatur der Solltemperatur entspricht. Wäre die Brennerleistung zu stark, entspräche die Verteilung der Temperatur nicht mehr der Ofenklasse. Je nach Qualifizierung des Industrieofens ist eine Temperaturverteilung im Ofenraum einzuhalten. Bei dieser Anlage handelt es sich um eine Ofenklassifizierung⁶¹ der Klasse 5 mit $\pm 14 \text{ }^\circ\text{C}$ des Sollwertes im Bereich der Betriebstemperaturen. Die Betriebstemperaturen sind von $950 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $1250 \text{ }^\circ\text{C}$, welche nach Norm AMS 2750 Revision E in drei zu prüfende Temperaturbereiche verfährt.

Der Zentralrekuperator oder auch Strahlungsrekuperator ist wie ein doppelwandiges Rohr aufgebaut, in dem im inneren Rohr das Abgas des Ofenraums abgeführt wird. Im äußeren Rohr wird die anfangs kalte Brennluft vom Brennluftventilator durch den Rekuperator geleitet und aufgrund der heißen Abgase erhitzt.

⁶¹ Vgl. AMS 2750 E Aerospace Material Specification Revision E (2012), S. 16.

Des Weiteren wird diese dann erhitzte Luft, die Warmluft, an die Brenner als Brennluft zur Verfügung gestellt. Hier wird das Gegenstromprinzip verwendet, da die zwei Stoffströme in entgegengesetzte Richtung fließen, was eine höhere Effektivität zur Folge hat. Die maximale Warmlufttemperatur, die dem Brenner zugeführt wird, beträgt 420 °C. Dementsprechend sind die Rohrleitungen nach dem Zentralrekuperator isoliert, um einerseits keine Warmluft zu verlieren und andererseits als Schutz für den Mitarbeiter/in wegen der Verbrennungsgefahr.

Wie bereits bekannt, besteht der Brenner aus der Klein- und Großmenge, die ebenfalls mit zwei getrennten Gasleitungen zum Brenner verbaut sind. Für die Zündung der Mengen wird ein dauerhaft brennender Zündbrenner verwendet. Das Brennersteuergerät bekommt von der speicherprogrammierbaren Steuerung das Signal für die erforderliche Menge. Nach dieser steuert das Brennersteuergerät das benötigte Ventil für Klein- oder Großmenge an. Ist die Großmenge erwünscht, so sind sowohl die Ventile für Kleinmenge als auch für Großmenge aktiv. Als Sicherheitsfunktion hat die Großmenge eine mechanische Verbundregelung mit einem Gas-Gleichdruckregler. Öffnet die Luftklappe nicht, wird kein Wirkdruck über die Wirkdruckleitung freigegeben, was einerseits keine Gaszufuhr der Großmenge ermöglicht und andererseits einen Schutz für die Verbrennung sicherstellt. Eine Luftklappe mit einem Stellantrieb pro Brenner sorgt für die notwendige Zusammensetzung von Luft und Gas. Diese hat ebenfalls zwei markante Positionen, so wie bei der Gasversorgung die Klein- und Großmenge. Die Stellung 1 im Stellantrieb ist für die Kleinmenge zuständig, die Stellung 2 ist für die Großmenge verantwortlich. Der minimale Öffnungswinkel von 0° und der maximale Öffnungswinkel von 90° ist in den Stellantrieben konfiguriert.

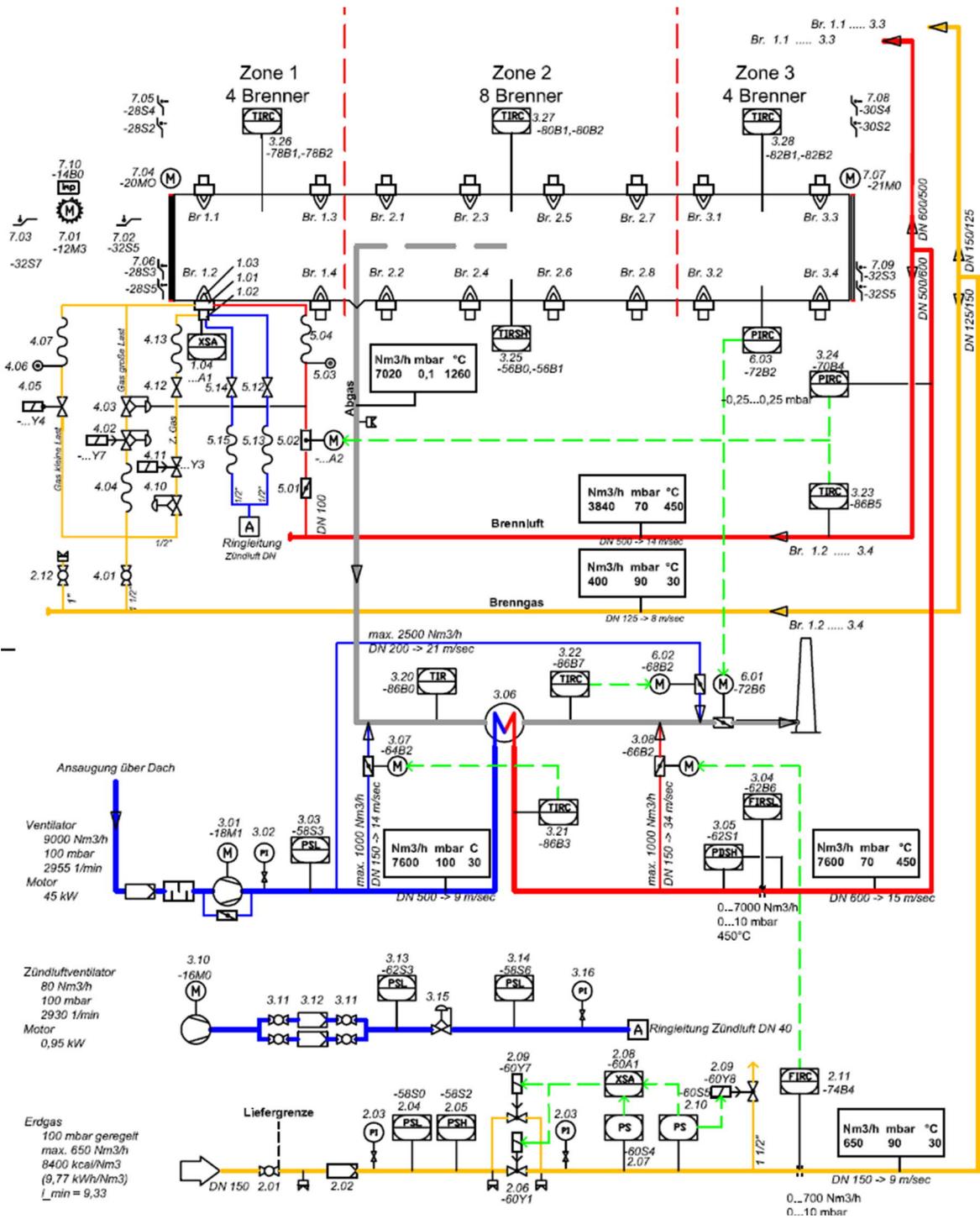


Abbildung 9: Beheizungsschema Herdwagenofen mit Warmluftbrenner, Quelle: voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG intern (leicht modifiziert).

In der speicherprogrammierbaren Steuerung läuft im Hintergrund eine Berechnung der Warmluftkompensation. Wichtige Parameter für diese Berechnung sind die Brennerleistung und der Gasdruck am Brenner laut Herstellerangaben. Das Ergebnis ist eine Gegenüberstellung der Warmlufttemperatur zum linearen Eingangssignal von 4 bis 20 mA. Das Eingangssignal bestimmt wiederum den parametrisierten Öffnungswinkel der zwei Stellungen der Stellantriebe.

Als Flammenüberwachung fungiert eine Ionisationselektrode, die direkt in die Flamme ragt. Bei der Verbrennung werden Gasteilchen ionisiert und sind als positive und negative Ladungen in der Luft

vorhanden. Eine Ionisation ist jener Vorgang, an dem ein Atom oder Molekül ein oder mehrere Elektronen entfernt. Zurück bleibt das Atom oder Molekül als positiv geladenes Ion. Diese positive Ladung kann dann gegen das Potential gemessen und als Flammenüberwachung eingesetzt werden.

Die Einbauvariante ist je nach gewünschtem Flammenbild verschieden. Im Herdwagenofen sind Flachflammenbrenner verbaut, um keine punktuelle Überhitzung am Material zu hinterlassen.

Die Thermoprozessanlage entspricht der DIN EN 746-2⁶² und deren Sicherheitsanforderungen an Feuerungen und Brennstoffführungssysteme.

3.3 Energiereduktion an Thermoprozessanlagen

Die Schlagworte „Energiereduktion“ sowie „Ausstoß von CO₂“ werden in der Politik von Jahr zu Jahr verstärkt thematisiert. Davon stark betroffen ist die Industrie, um einerseits Energie einzusparen und andererseits die Produktkosten zu senken, um am Markt weiterhin mithalten zu können. Österreich ist einer der Spitzenreiter in Technik und Wissenschaft. Um dies weiterhin zu bleiben, wird viel Energie benötigt.

Im darunter folgenden Diagramm sind die Energieverbräuche in Österreich dargestellt.

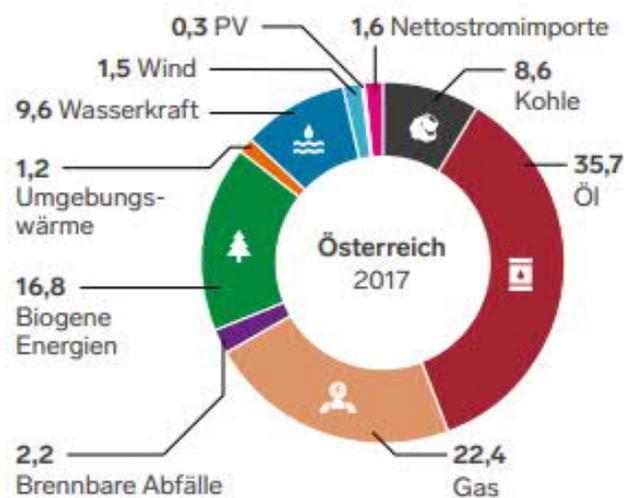


Abbildung 10: Anteile der Energieträger in Österreich in Prozent, Quelle: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2018), Online-Quelle [23.08.2019].

Der Energieverbrauch von Gas mit 22,4 % in Österreich ist knapp ein Viertel des Energiegesamtverbrauches. Führend ist in Österreich dennoch der Ölverbrauch mit 35,7 Prozent.

Die voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG ist einer der führenden Produzenten von Edelstählen. Um den Kundenwünschen zu entsprechen, sei es als Endprodukt Rundstahl, Flachstahl oder ein freigeformtes Werkstück, wird viel Energie benötigt. Hauptsächlich sind Strom und Erdgas die Energieträger für die Produktion. Wie in der Abbildung 11 ersichtlich, werden die Energieträger extern bezogen. Nur ein kleiner Anteil wird durch das betriebliche Kraftwerk zugeführt.

⁶² Vgl. ÖNORM EN 746-2:2010 Industrielle Thermoprozessanlagen (2011), S. 21 ff.

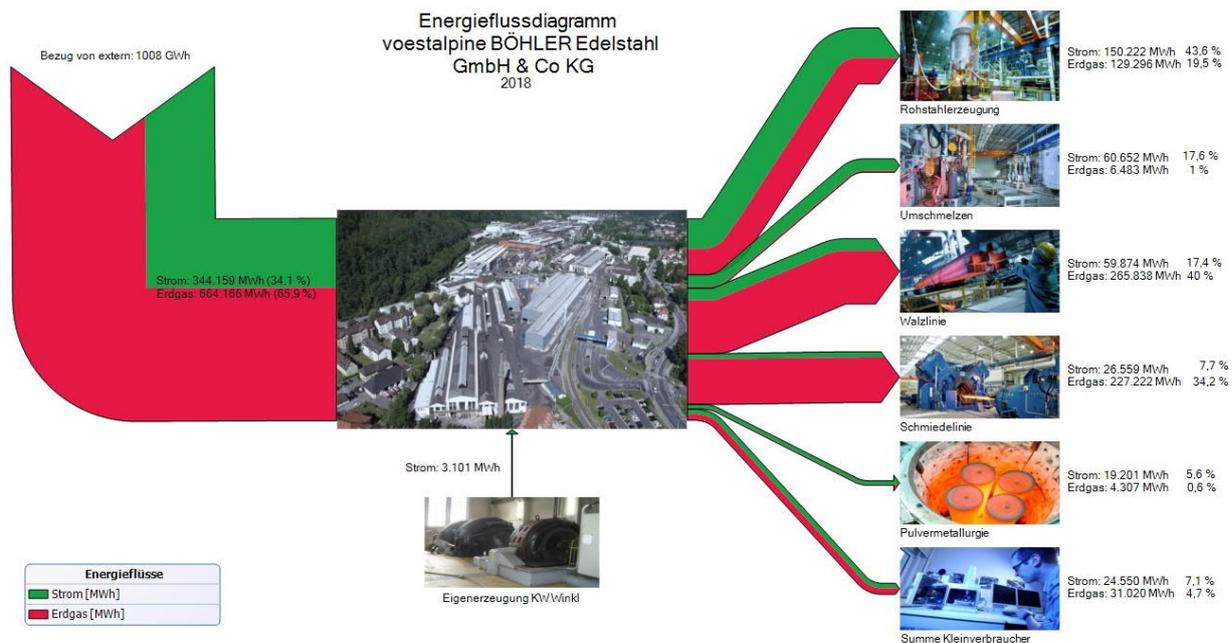


Abbildung 11: Energieflussdiagramm voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG, Quelle: voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG intern.

Der Industrieofen befindet sich in der Schmiedelinie, wo der Erdgasverbrauch in Relation zum Strom am höchsten ist.

3.3.1 Substitution der Brennertechnik

Unter der Substitution der Brennertechnik versteht man eine Maßnahme zur Verbesserung des Verbrennungsprozesses. So werden die nicht effizienten Brenner durch effizientere Brenner dem Prozess angepasst. Die angeführten Substitutionsvarianten wurden mit Hilfe eines Energieeffizienzbuches erläutert.⁶³

Substitution eines Kaltluftbrenners durch einen Warmluft-, Rekuperator- oder Regeneratorbrenner:

Es ist technisch möglich, bereits bestehende Kaltluftbrenner mit gering vorgewärmter Brennluft zu betreiben. Aus den entstandenen Abgasen sollte demnach möglichst viel Energie zurückgewonnen werden. Je nach Einsatzbereich der Anlage und vor allem nach der Betriebsweise ist eine Investition eines effizienten Brenners vorteilhaft. Je höher die vorgewärmte Brennluft zur Ofenraumtemperatur ist, desto höher ist der feuerungstechnische Wirkungsgrad. Natürlich spielt hier auch immer das Budget eine große Rolle. Angenommen wird ein Umbau von einem Kaltluftbrenner auf einen Warmluftbrenner. Bei einem Umbau dieser Größe dürfen neben den Brennerkosten die Kosten für Umbauarbeiten, nämlich mechanischer wie elektrischer Arbeiten auf keinen Fall außer Acht gelassen werden. Die mechanischen Arbeiten beziehen sich auf die Abgasführung, die Verbrennungsluft zum Brenner, die Isolierung und gegebenenfalls noch auf das Brennerrohr mit dem dazugehörigen Brennerstein. Im elektrischen Sinne sind nur geringe Änderungen der Abgastemperatur und die Ansteuerung der Herddruckklappe erforderlich.

⁶³ Vgl. Blesl/Kessler (2017), S. 122 ff.

Diese Beispiele sind je nach aktuellem zum erwünschten Bestand der Brennertechnik abzuändern. Design- und Engineeringkosten sind bei jedem Umbau ebenfalls zu berücksichtigen.

Aus Erfahrung werden Kaltluftbrenner in der Wärmebehandlung meist zu Rekuperatorbrennern umgebaut. Durch die unterschiedlichen Glühkurven besteht immer eine Wärmerückgewinnung für die Verbrennungsluft. Wäre in diesem Fall ein Warmluftbrenner zum Einsatz gekommen, würde die Warmluft mit der Ofenraum- und Abgastemperatur variieren. Vor allem im unteren Betriebsbereich der Solltemperatur kommt kaum Warmluft zustande.

Schmiedeöfen mit Warmluftbrennern werden wegen der hohen Ersparnisse an Energie zu Regeneratorbrennern umgebaut. Vor allem bei ständigem Be- und Entladen wird eine große Menge an Energie durch Erdgas benötigt, um die Solltemperatur zu erreichen.

Substitution eines Warmluft- oder Rekuperatorbrenners durch einen FLOX-Brenner:

Ein FLOX-Brenner, auch bekannt als flammlose Verbrennung, überzeugt mit seiner gleichmäßigen Erwärmung und besseren Effizienz im Ofenraum. Es entsteht eine flammlose Verbrennung, indem sich eine hohe Rezirkulation der Abgase im Ofenraum mit der Verbrennungsluft vermischt.

Die thermischen Stickoxide verringern sich stark aufgrund der weniger hohen Verbrennungstemperatur. Der Brenner schaltet erst ab zirka 850 °C in den flammlosen Betrieb über. Häufigste Brennerbauformen sind die Rekuperator- und Regeneratorbrenner. In Verwendung sind die flammlosen Brenner im Sektor für die Erwärmung von Stahlbrammen, wo eine homogene Temperaturverteilung gewünscht ist.

Substitution eines Rekuperatorbrenners durch einen Regeneratorbrenner:

Der Austausch von einem Rekuperatorbrenner zu einem Regeneratorbrenner erhöht den feuerungstechnischen Wirkungsgrad und senkt den Erdgasverbrauch.

Bei einem Regeneratorbrenner werden zusätzlich ein Absaugventilator und Abgasklappen benötigt. Beim Wechsel von Rekuperatorbrenner auf Regeneratorbrenner ist besonderes Augenmerk auf die Investitionskosten und die Amortisationszeit zu legen. Mit speziellen Berechnungen der Betriebsdauer in Jahren, Investitionskosten, Wartungskosten und Energiekosten kann ein Vor- oder Nachteil daraus resultieren.

3.3.2 Reduzierung der Abgasverluste

Durch eine optimale Verbrennung und Verhinderung des Luftüberschusses kann eine wesentliche Energiereduktion erzielt werden. Mit Verringerung der Abgastemperatur und besserer Wärmeübertragung steigt der feuerungstechnische Wirkungsgrad⁶⁴. Mittels Hochgeschwindigkeitsbrennern und Umwälzventilatoren steigt die Strömung im Ofenraum und so auch der Wärmeübergang durch Konvektion. Die Wärmeübertragung durch Strahlung lässt sich teilweise mit dem Emissionsgrad erhöhen.

Um den feuerungstechnischen Wirkungsgrad beizubehalten, muss die Verbrennung zyklisch kontrolliert werden.

⁶⁴ Vgl. Rebhan (2002), S. 155 ff.

3.3.3 Senkung der Abgastemperatur

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad gibt die Nutzung der aus der Verbrennung eines Brennstoffes entstehenden Wärme bei Nennleistung an und definiert so die Abgasverluste. Mit einer optimal eingestellten Verbrennung sinkt die Abgastemperatur.⁶⁵

In einem offenen System wird ein Teil des Abgases dem Wärmetauscher zugeführt und der andere Teil zur Erhaltung des Ofenraumdruckes verwendet, um etwaige Undichtheiten an Ofentüren und verschiedene Durchführungen aufrecht zu halten. In offenen Systemen hat eine Abgastemperaturmessung wenig Aussagekraft.⁶⁶ Der in dieser Arbeit beschriebene Ofen entspricht einem offenen System. Mit Hilfe der Siegert'schen Formel kann der Abgasverlust aufgrund der Herddruckklappe im Abgassystem berechnet werden.

$$q_A = (\vartheta_a - \vartheta_l) * \left(\frac{A_2}{21 - O_2} + B \right) \quad (3.3.3)$$

$q_A/\%$	Abgasverlust
$\vartheta_a/^\circ\text{C}$	Abgastemperatur
$\vartheta_l/^\circ\text{C}$	Verbrennungslufttemperatur
$O_2/\%$	Sauerstoffgehalt
A_2	0,66 (Erdgas)
B	0,009 (Erdgas)

Bei Strahlheizrohrsystemen, die als geschlossenes System fungieren, kann der Wirkungsgrad von mehreren Messungspunkten der Abgastemperatur und Abgaszusammensetzung gut bestimmt werden.

3.3.4 Brennstoffersparnis bei Luftvorwärmung

Aus den unterschiedlichen Brennertypen ist ersichtlich, dass der feuerungstechnische Wirkungsgrad von der Luftvorwärmung stark abhängig ist⁶⁷. Die Tabelle zeigt in der x-Achse die maximale Luftvorwärmung. In der y-Achse ist der feuerungstechnische Wirkungsgrad dargestellt.

⁶⁵ Vgl. Blesl/Kessler (2017), S. 120.

⁶⁶ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 101.

⁶⁷ Vgl. Wüning/Milani (2007), S. 17.

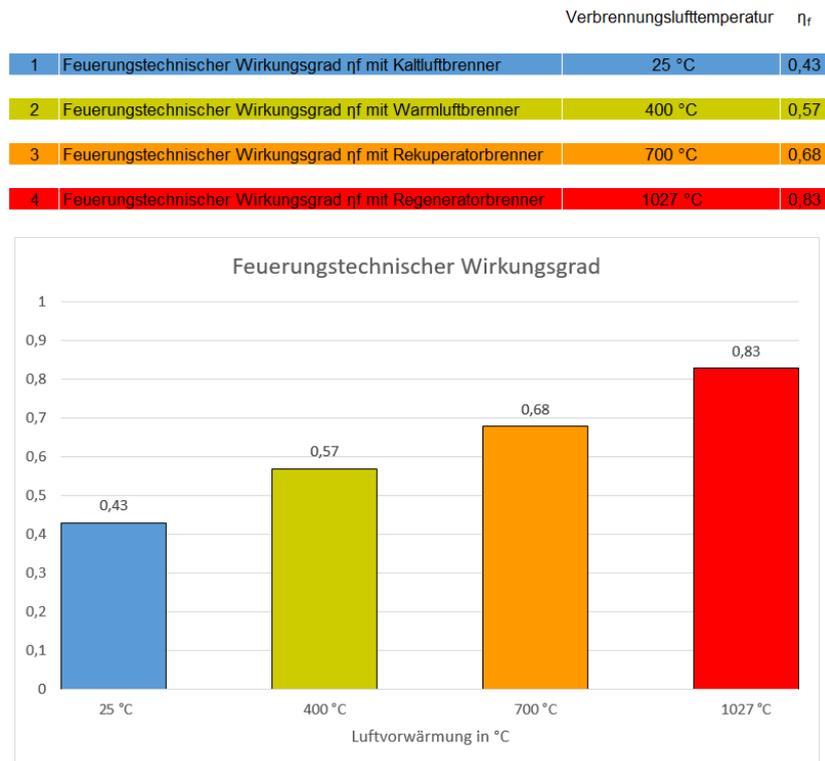


Abbildung 12: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad der Brennertypen, Quelle: Eigene Darstellung.

Je höher die Verbrennungslufttemperatur ist, desto effizienter ist der Brennertyp. Die Ursache für den hohen Energieverbrauch ist die Erwärmung der Stickoxide im Verbrennungsprozess in atomarer Form wie Stickstoff, Kohlenstoff, Wasserstoff und Schwefel.

3.3.5 Vermeidung der Wandverluste

Die Wahl des richtigen Dämmmaterials in Thermoprozessanlagen kann bis zu 20 % an Energieersparnis bringen. Diese können in mehreren Schichten aus Feuerfestmaterial, Wärmedämmstoffen oder aus Feuerfestbeton bestehen. Thermische Eigenschaften hängen von der Kombination der Dämmstoffe ab, um mögliche Energieverluste, Aufheiz- und Abkühlgradienten, Oberflächentemperaturen und die Speicherung der Energie im Ofenraum zu belassen. Wird zum Beispiel ein Feuerfestmaterial aus Keramikfaser eingesetzt, bietet dieser keinen so guten Wärmespeicher wie ein Feuerfestbeton oder Feuerfeststein.⁶⁸

Für eine Thermoprozessanlage wie einen Schmelzofen ist ein Feuerfestbeton vorteilhaft, weil dieser in den Ziehzeiten die Wärmeenergie weiterhin speichert. Anders wäre dies bei einem Wärmebehandlungsofen, welcher nach seiner Glühkurve verfährt und nach Beendigung dieser wieder schnell auf Starttemperatur zum Beispiel auf Umgebungstemperatur sein sollte.

Hohe Temperaturen an der Ofenaußenwand sind ein Indikator für Wärmeverluste eines Ofens. Der Referenzwert dafür ist die maximal zulässige Oberflächentemperatur, um bei Berührung der Oberfläche durch einen Mitarbeiter/in von Verbrennungen zu schützen.

⁶⁸ Vgl. Blesl/Kessler (2017), S. 198.

4 ANALYSE DES IST-ZUSTANDES

Stationäre Gasmengenmessungen ergaben an ähnlich gebauten Thermoprozessanlagen unterschiedliche Erdgasverbräuche. Grund dafür waren die Brennereinstellungen im nicht optimalen Verhältnis von Luft zu Gas und folge dessen ein Mehrverbrauch an Energie.

Da der Brennerkopf der Ofenraumtemperatur ausgesetzt ist, verzundert die Brennerdüse aufgrund des hohen Sauerstoffgehaltes umso schneller. Die Brennerdüsenöffnung entspricht nicht mehr dem vom Hersteller ausgelieferten Durchmesser und auch nicht mehr der Brennerkennlinie. Die Vergrößerung der Brennerdüsendurchmesser verringert am Brenner den Gasdruck. Eine Nachjustierung am Brenner würde der Brennerkennlinie wieder entsprechen, aber nicht mehr der erforderlichen Gasmenge.

Im Laufe der Zeit altern vor allem die verbauten Komponenten am Brenner, die ständig den hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt sind, so auch der Gleichdruckregler für die Großmenge. Im Gleichdruckregler sind Membrane und Federn verbaut, die durch ihre dauerhafte Funktion durch externe Faktoren wie zum Beispiel Temperatur beeinflusst werden. Nach längerer Verwendung funktionieren diese Gleichdruckregler nicht mehr einwandfrei. Dies ist eine weitere Ursache, warum sich die Brennereinstellungen und die Brennerkennlinie verändern.

Nicht nur auf Seite der Gasversorgung am Brenner, sondern auch auf Seite der Brennluftversorgung gibt es Alterungserscheinungen. Die Brennluftklappe weist selbst leichte Undichtheiten auf, die trotz der geschlossenen Position Verbrennungsluft in den Ofenraum führen lässt. Dementsprechend steigt der Sauerstoffgehalt im Ofenraum und es kommt zu einer unvollkommenen Verbrennung.

Ein weiterer Grund für den Mehrbedarf an Energie durch die unvollkommene Verbrennung sind Undichtheiten an der Ofentür oder am Herdwagen. Herrscht im Ofenraum kein Überdruck, auch Herddruck genannt, spielt der Kamineffekt eine wesentliche Rolle. Auf Basis dieses Effektes würde von der Umgebungsluft eine Falschluf in den Ofenraum strömen und den Verbrennungsprozess beeinflussen. Um Falschluf zu vermeiden, ist im Abgastrakt eine Herddruckklappe eingebaut, die dafür sorgt, dass permanent ein leichter Überdruck im Ofenraum existiert.

Zusammenfassend sind die zwei Hauptursachen für den Mehrbedarf an Erdgas einerseits die Brennerkomponenten selbst und der Brenner und andererseits der zu hohe Sauerstoffgehalt im Ofenraum.

Für die Analyse wurde ein vergleichbarer Temperaturverlauf der Thermoprozessanlage herangezogen.

Die Analyse des Sauerstoffgehalts im Ist-Zustandes wurde mittels mobilen Abgasanalysator durchgeführt. Die Erhebung der Temperaturen und Verbräuche erfolgte aus der Datenbank.

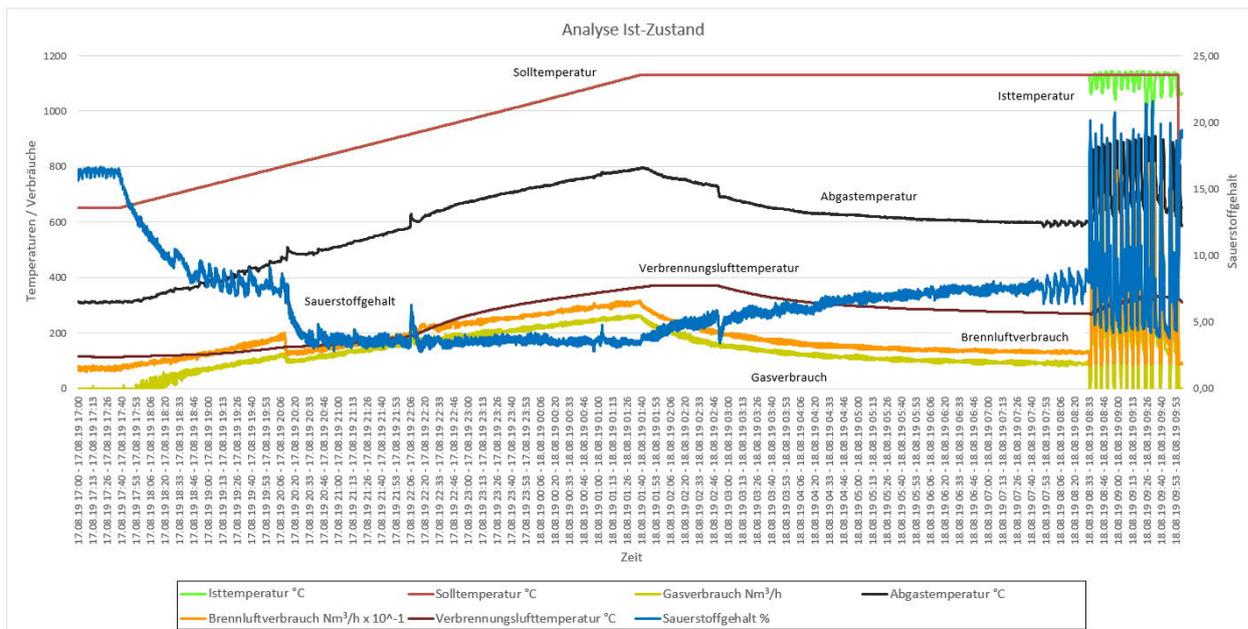


Abbildung 13: Diagramm der Analyse des Ist-Zustandes, Quelle: Eigene Darstellung.

Die angeführten Messwerte in der Tabelle 1 sind Zeitpunkte aus dem Diagramm der Analyse vom Ist-Zustand.

Datum Uhrzeit Zeitpunkt	Ist- Temperatur	Soll- Temperatur	Gas- ver- brauch	Brenn- luftver- brauch	Abgas- temperatur	Sauer- stoff- gehalt	Ver- brennungs- luft- temperatur	Abgas- verlust
	°C	°C	Nm³/h	Nm³/h	°C	%	°C	%
17.08.2019 23:00 Zeitpunkt 1	969	968	191	2293	672	3,40	262	32,85
18.08.2019 01:00 Zeitpunkt 2	1090	1089	244	2938	770	3,57	344	34,95
18.08.2019 07:00 Zeitpunkt 3	1130	1130	100	1394	603	7,73	277	50,09
18.08.2019 08:00 Zeitpunkt 4	1130	1130	87	1326	591	6,91	272	47,92
18.08.2019 09:00 Zeitpunkt 5	1128	1130	373	4261	892	9,19	310	53,12

Tabelle 1: Messwerte der Analyse des Ist-Zustandes, Quelle: Eigene Darstellung.

$$\lambda = \frac{0,21}{0,21 - \left(\frac{O_2}{100}\right)} \tag{4.1}$$

λ Lambda

$O_2/\%$ gemessener Sauerstoffgehalt im Ofenraum

Berechnung Luftzahl

$$\lambda = \frac{0,21}{0,21 - \left(\frac{7,73}{100}\right)} \quad (4.2)$$

$$\lambda = 1,58$$

Die Berechnung des Lambda-Wertes aus dem Ist-Zustand ergab 1,58. Mit dem Mittelwert der Abgastemperatur und dem Lambda-Wert kann, wie in der Abbildung 14 ersichtlich, der Mehrverbrauch eingetragen werden. Der Energiemehrverbrauch liegt bei etwa 21 %. Bei dieser Ermittlung des Energieverbrauches wurde kein Brennersystem sowie deren Luftvorwärmung berücksichtigt. Es wurde nur von der Abgastemperatur und vom Lambda-Wert (Luftzahl) auf den Mehrverbrauch rückgeschlossen.

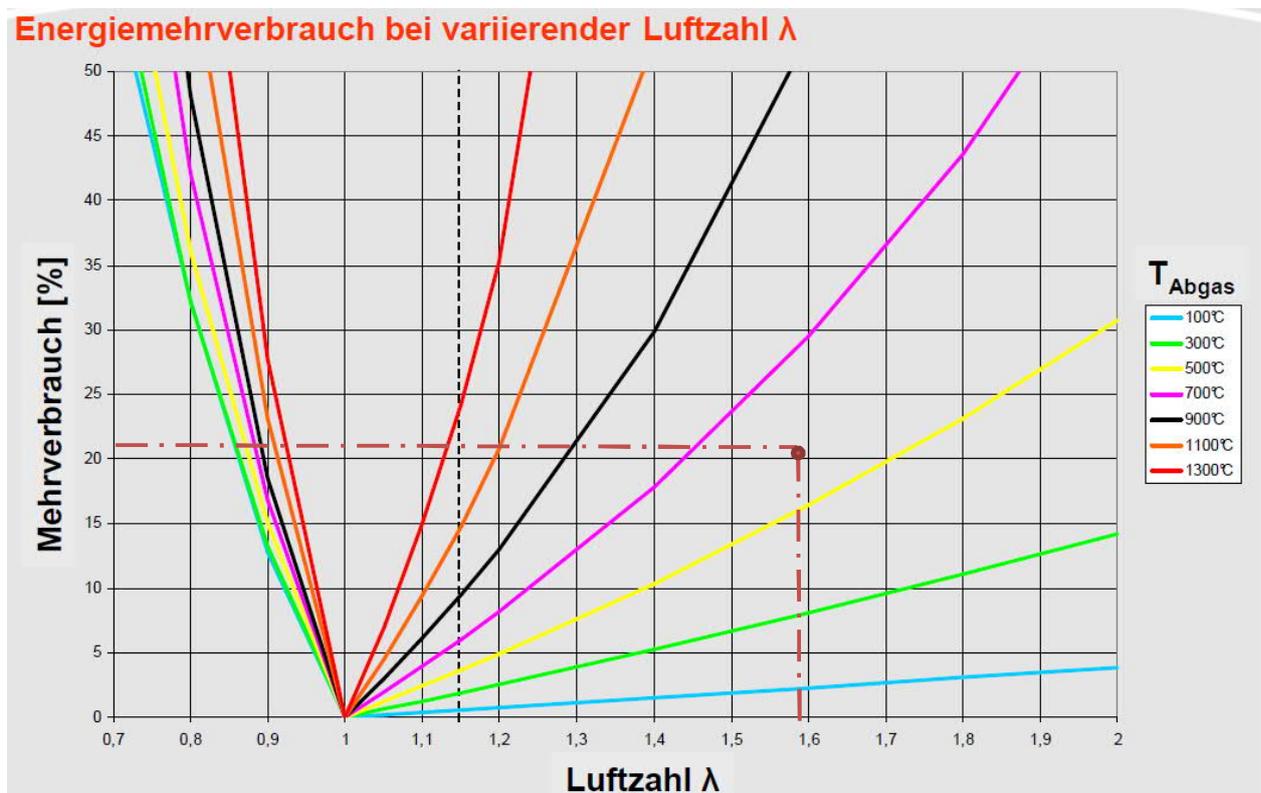


Abbildung 14: Energiemehrverbrauch bei variierender Luftzahl λ, Quelle: Thermoprocess Symposium (2011), S. 8 (leicht modifiziert).

Um die vorgewärmte Verbrennungsluft miteinzubeziehen, hilft man sich mit dem feuerungstechnischen Wirkungsgrad. Die Siegert'sche Formel berücksichtigt die Parameter zur richtigen Berechnung des Abgasverlustes. Die verwendeten Werte stammen aus der Tabelle 1 vom Zeitpunkt 3, wobei die Abgastemperatur der Ist-Temperatur entspricht, weil es im Abgastrakt aufgrund eines Zugunterbrechers zu weiteren Störeinflüssen wie Herddruckklappenkühlung, Warmluftablassklappe und Rekuperatorkühlung kommt, die den Sauerstoffgehalt beeinflussen.

Berechnung Zeitpunkt 3

$$q_{A1} = (\vartheta_{a1} - \vartheta_{l1}) * \left(\frac{A2}{21 - O_2} + B \right) \quad (4.3)$$

$$q_{A1} = (1130 - 277) * \left(\frac{0,66}{21 - 7,73} + 0,009 \right)$$

$$q_{A1} = 50,09 \%$$

$q_{A1}/\%$	Abgasverlust vom Ist-Zustand
$\vartheta_{a1}/^{\circ}\text{C}$	Ist-Temperatur vom Ist-Zustand
$\vartheta_{l1}/^{\circ}\text{C}$	Verbrennungslufttemperatur vom Ist-Zustand
$O_2/\%$	Sauerstoffgehalt vom Ist-Zustand
$A2$	0,66 (Erdgas)
B	0,009 (Erdgas)

Aus dem Ergebnis des Abgasverlustes kann der feuerungstechnische Wirkungsgrad errechnet werden.

Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	$\eta_f = 100\% - q_{A1}$	(4.4)
-----------------------------------	---------------------------	-------

$$\eta_f = 100 \% - 50,09 \%$$

$$\eta_f = 49,91 \%$$

$q_{A1}/\%$	Abgasverlust vom Ist-Zustand
$\eta_f/\%$	feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Bewertung der Analyse:

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad liegt bei diesem Ist-Zustand bei 49,91 %. Für einen Warmluftbrenner ist dieser feuerungstechnische Wirkungsgrad sehr schlecht, da dieser im Normalfall bei 57 % liegen sollte. Die 57 % sind bei einer Verbrennungslufttemperatur von 400 °C berechnet worden. Die Abgastemperatur betrug 1400 °C bei einem Sauerstoffgehalt von 2 %.

In diesem Fall verliert man mehr als die Hälfte der zugeführten Energie durch den Abgastrakt.

Mit Senkung der Abgastemperatur und des Sauerstoffgehalts und Erhöhung der Verbrennungslufttemperatur sinkt der Energiemehrverbrauch deutlich und hebt den feuerungstechnischen Wirkungsgrad an.

5 THEORETISCHE UMSETZUNG

In diesem Kapitel wird der Grundgedanke für die Umsetzung beschrieben. Im Ofenraum soll der Verbrennungsprozess optimal und effizient erfolgen. Um den Sauerstoffgehalt im Ofenraum verändern zu können, ist entweder an der Gasversorgung oder an der Brennluftversorgung eine Wirkung beeinflussbar.

Am Herdwagenofen mit Warmluftbrenner ist es nur an der Verbrennungsluftversorgung möglich, den Volumenstrom zu variieren. Auf Seiten der Gasversorgung kann nur der Volumenstrom der Kleinmenge starr am Ventil eingestellt werden, während bei der Großmenge das Ventil zwar ebenfalls starr eingestellt werden kann, aber noch ein Gleichdruckregler in Serie verbaut ist. Der Gleichdruckregler besitzt eine Membrane und eine Feder, die je nach anstehendem Verbrennungsluftdruck den Volumenstrom der Großmenge verändert. Das bedeutet, verändert sich der Volumenstrom der Verbrennungsluft und ist das Ventil der Großmenge aktiv, so ändert sich auch der Volumenstrom der Großmenge.

Da es sich um Warmluftbrenner handelt und diese je nach Warmluft den Volumenstrom der Verbrennungsluft kompensieren, besitzen sie eine variable Brennluftversorgung. Dadurch kann der Sauerstoffgehalt im Ofenraum auf einen gewünschten Sollwert eingestellt werden.

Zur Messung des Sauerstoffgehaltes im Ofenraum wird eine geeignete Sonde dafür benötigt. Mit dem Messsignal der Sauerstoffmessung ist ein Eingriff in die Brennluftversorgung realisierbar.

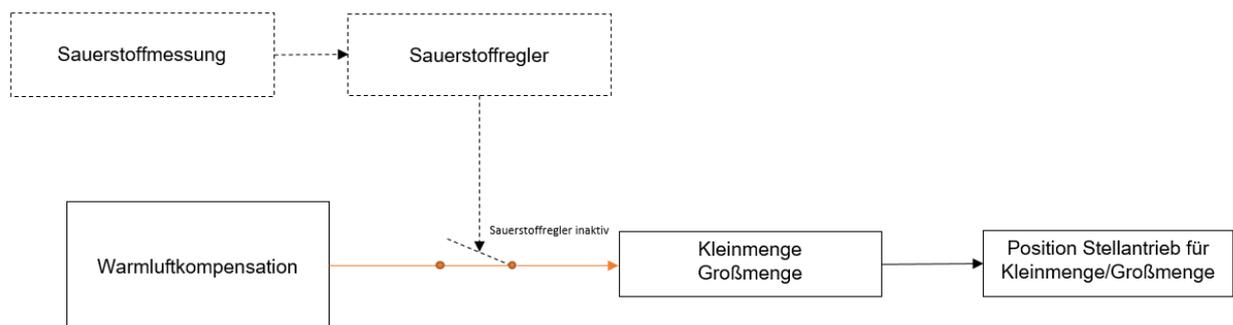


Abbildung 15: Warmluftkompensation ohne Eingriff des Sauerstoffreglers, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Eingriff in die Warmluftkompensation ermöglicht eine Stellungsänderung der Brennluftklappen. Der errechnete Wert der Warmluftkompensation gibt das Normsignal für den Stellantrieb sowohl für die Kleinmenge als auch für die Großmenge gleich aus. Bei inaktiver Sauerstoffregelung greift der Regler nicht in das errechnete Stromsignal ein.

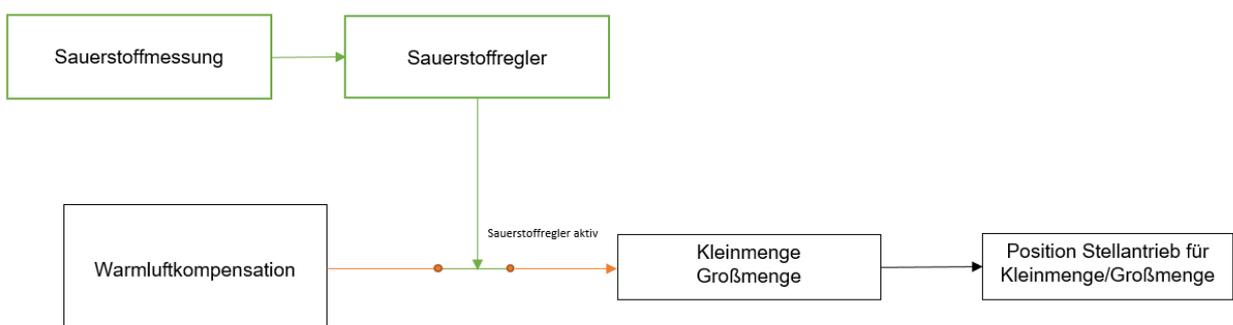


Abbildung 16: Warmluftkompensation mit Eingriff des Sauerstoffreglers, Quelle: Eigene Darstellung.

Ist der Sauerstoffregler aktiv, greift er in das Stromsignal ein und verändert das Stromsignal für den Stellantrieb und so auch die Position der Brennluftklappe. Der maximale Eingriffsbereich des Sauerstoffreglers wird mit ± 3 mA festgelegt. Der minimale Wert des Stromsignales aus der Warmluftkompensation von 4 mA kann nicht unterschritten werden. Bei dem maximalen Wert des Stromsignales von 20 mA gibt es keine Überschreitung.

Es wird explizit nicht auf die übertragenen Messwerte vom Sauerstoffsensoren übertragen eingegangen, da der Eingriff des Sauerstoffreglers nach der Berechnung der Warmluftkompensation erfolgt. Es kann im Vorhinein noch kein Resultat daraus gezogen werden, welcher Sauerstoffgehalt im Ofenraum mit diesem Eingriffsbereich von ± 3 mA erzielt wird.

Ist der Sauerstoff im Ofenraum zu hoch, wird der gelieferte Strom aus der Warmluftkompensation durch den Sauerstoffregler beeinflusst. Wenn zum Beispiel die Warmluftkompensation ein Stromsignal von 10 mA an den Stellantrieb liefert und der Sauerstoffgehalt zu hoch ist, greift der Sauerstoffregler durch Subtraktion seines Eingriffsbereiches mit zum Beispiel minus 2 mA ein, ergibt dies ein letztendlich ein Stromsignal von 8 mA an den Stellantrieb. Deshalb verringert sich das Verbrennungsluftvolumen und auch der Sauerstoffgehalt im Ofenraum. Ist der Sauerstoffgehalt-Istwert unter dem gewünschten Sollwert des Sauerstoffreglers, wird der Stellantrieb mit der Brennluftklappe weiter geöffnet.

6 MESSTECHNIK UND KOMPONENTEN FÜR DIE UMSETZUNG

6.1 Messung des Sauerstoffgehaltes

In der Thermoprozessanlage ist eine Sauerstoffmessung eingebaut, die den Sauerstoffgehalt dauerhaft misst. Die Einsatztemperatur des Gutes in der Anlage liegt im Bereich von 600 °C. In den weiteren Unterkapiteln werden die unterschiedlichen Varianten an Messungen beschrieben.

6.1.1 Sauerstoffsonde

Die InLine Sonde ist konzipiert für Thermoprozessanlagen wie zum Beispiel Schutzgasöfen oder Vakuumöfen. Die Sonde ist ein Sensor, welcher aus zwei verschiedenen Materialien besteht. Das erste Material ist ein Platindraht, der mit dem Zirkoniumoxid an der Spitze der Keramik spiralförmig verbunden ist. Das zweite Material besteht aus Platin und Platin-Rhodium und wird als Thermoelement verwendet, das an der Messspitze verschweißt ist. Durch den Seebeck-Effekt entsteht in Abhängigkeit von der Temperatur eine Spannung.

Aufgrund des Sauerstoffpartialdruckes entsteht in dem Materialpaar ein Spannungssignal. Diese ist auch als elektromotorische Kraft bekannt. Der Partialdruck herrscht in einem Gasgemisch wie zum Beispiel Luft, und kann einem bestimmten Gas zugeordnet werden.⁶⁹

Mit der absoluten Temperatur besteht eine Proportionalität zur Spannung des Festkörperelementes. Dem natürlichen Logarithmus sind die beiden Drücke des Festkörperelektrolyten unterlegen. Die Formel hat keine materialabhängige Konstante, sondern Naturkonstanten wie die Faradaykonstante und die Gaskonstante.⁷⁰

Nernst-Gleichung
$$EMK = \frac{R * T}{4 * F} * \ln \frac{P1}{P2} \quad (6.1.1)$$

<i>EMK</i> /V	Elektromotorische Kraft
<i>R</i> /J/mol K	8,31
<i>T</i> /K	Temperatur
<i>F</i> /As/mol	96493
<i>P1</i> /bar	Sauerstoffpartialdruck auf der Referenzseite mit 0,20946 bar
<i>P2</i> /bar	Sauerstoffpartialdruck auf der Messgasseite

Die Einsatztemperatur der InLine Sonde beginnt bei 600 °C. Sie benötigt eine Referenzluft für den Abgleich von Ofenatmosphäre und der Erdatmosphäre. Da im Ofenraum oder Abgastrakt dauerhaft eine Strömung durch die Brenntaktung existiert, wird keine Pumpe oder ein Umwälzventilator benötigt.

⁶⁹ Vgl. Körtvélyessy (1998), S. 98.

⁷⁰ Vgl. Körtvélyessy (1998), S. 417.



Abbildung 17: Sauerstoffsonde, Quelle: thermo-control Körtvélyessy GmbH (2016), Online-Quelle [22.09.2019].⁷¹

Vorteile:

- kann direkt in die Thermoprozessanlage verbaut werden
- benötigt keine Pumpe für die Messgasführung

Nachteile:

- Aufbau gegen Erschütterungen instabil
- teuer
- funktionsfähig erst ab 600 °C

6.1.2 Lambda-Sonde

Anzufinden sind diese Sonden meist in der Automobilindustrie für die Optimierung der Verbrennung sowie für die Verminderung von Schadstoffen. Die Festelektrolytsensoren sind auch bekannt als Fingerhutsensoren oder planare Breitbandsensoren.⁷²

Die Lambda-Sonde beruht auf dem gleichen Prinzip wie die InLine Sauerstoffsonde. Der Platindraht und ein Zirkoniumoxidrohr erzeugen in der Atmosphäre abhängig vom Sauerstoffpartialdruck eine Spannung. Ein wesentlicher Unterschied zur InLine Sauerstoffsonde ist die im Aufbau bereits vorhandene Widerstandsheizung. Dadurch kann die Sonde schon im Umgebungstemperaturbereich des Messgases eingesetzt werden. Für die Bestimmung der Heizungstemperatur kann mittels Messbrüchen der Heizungs-widerstand bestimmt werden. Im Schnitt liegen diese Heizungstemperaturen um die 600 °C.

⁷¹ Vgl. thermo-control Körtvélyessy GmbH (2016), Online-Quelle [22.09.2019].

⁷² Vgl. Hering/Schönfelder (2012), S. 534.

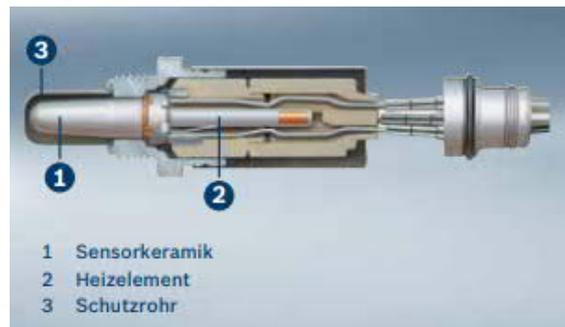


Abbildung 18: Fingersonde, Quelle: Robert Bosch GmbH (2018), Online-Quelle [22.09.2019].⁷³

Mit Hilfe der vereinfachten Nernst-Gleichung ist es möglich, den Restsauerstoffgehalt beziehungsweise den Lambda-Wert zu errechnen.

Die Sonde selbst ist nicht für den Einbau in der Thermoprozessanlage geeignet. Für diese Anwendung werden mehrere Komponenten wie ein Messblock für die richtige Strömung zur Sonde, ein Kühler zur Absenkung der Messgastemperatur, ein Wasserabscheider und eine Pumpe zur Förderung der Messgasströmung eingebaut.

Vorteile:

- leicht austauschbar
- billig
- gegen Erschütterung unempfindlich
- keine Mindesttemperatur notwendig

Nachteile:

- benötigt eine Pumpe für die Messgasführung
- Messprinzip für Sondentemperatur aufwendig

6.1.3 Infrarotmessung für die Sauerstoffkonzentration

Oft kommen auch Infrarot-Transmitter zur Ermittlung der Sauerstoffkonzentration zum Einsatz. Die Moleküle, meist aus C-H-Verbindungen bestehend, absorbieren das infrarote Licht im μm -Wellenbereich. Die Durchdringung des Infrarotlichtes ist abhängig von der Zusammensetzung des Gases. Mittels geschwächerter Intensität kann die Gaskonzentration mit Infrarotdetektoren gemessen werden. Das Messverfahren ist vom atmosphärischen Sauerstoff unabhängig, weil keines Weges ein direkter Kontakt zu den Infrarotdetektoren besteht.⁷⁴

Für die Sauerstoffmessung werden die O_2 -Atome im nahen Infrarotbereich im bestimmten Wellenbereich angeregt. Modulierte Strahlung über der Absorptionsspitze gibt Energie an die O_2 -Atome und schwächt

⁷³ Vgl. Robert Bosch (2018), Online-Quelle [22.09.2019].

⁷⁴ Vgl. Hesse/Schneller (2009), S. 350.

diese. Der Laserstrahl trifft auf die O₂-Atome und wird auf Grund der vorhandenen Sauerstoffkonzentration abgeschwächt. Der Empfänger misst die Intensität der Strahlung und dadurch die Absorption.⁷⁵

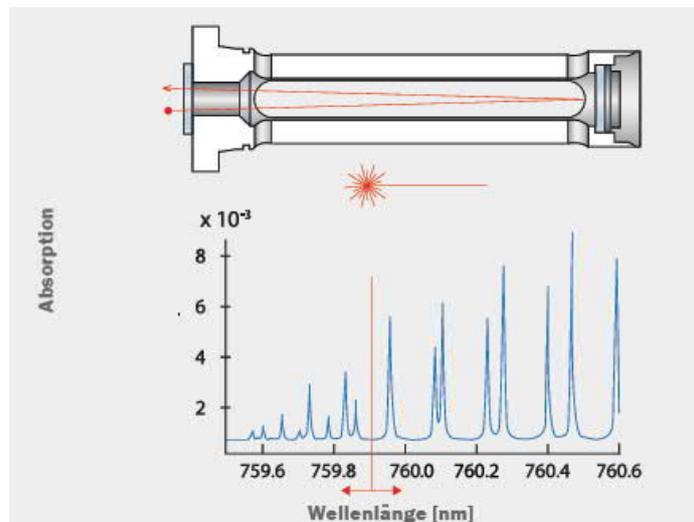


Abbildung 19: Laser-Sauerstofftransmitter TRANSIC100LP, Quelle: Sick AG (2015), Online-Quelle [21.09.2019].⁷⁶

Vorteile:

- wartungsarm
- gegen Erschütterung unempfindlich
- benötigt keine Sondenbeheizung

Nachteile:

- benötigt eine Pumpe für die Messgasführung
- sehr teuer

6.1.4 Fazit zur Wahl der Sauerstoffmessung an der Thermoprozessanlage

Im Anwendungsfall wurde für die Realisierung die Sauerstoffsonde der Firma thermo-control Körtvélyessy GmbH verwendet. Ausschlaggebende Gründe waren die genaue Temperaturmessung und die Funktionsfähigkeit der Sonde ab 600 °C, weil die Anlage den Aufheizvorgang unter 600 °C trotz unterschiedlicher Materialien nicht unterschreitet. Ein positiver Faktor ist die Messgasführung ohne Pumpe oder zusätzlicher Umwälzung zur Aufrechterhaltung der Strömung. Die Strömung im Ofenraum wird durch die Taktung der Brenner selbst durchgeführt.

Bei dieser Messung werden etwaige Komponenten wie Pumpe, Wasserabscheider und Messgaskühler vermieden, die zusätzlich als Fehlerquellen bei der Messung einwirken könnten.

Auch der direkte Einbau der Sonde in den Ofenraum ist von Vorteil, weil es zu keinen langen Messgasführungswegen kommt, die vor allem die Reaktionszeit der Regelung beeinflussen.

⁷⁵ Vgl. Sick AG (2015), Online Quelle [21.09.2019].

⁷⁶ Vgl. Sick AG (2015), Online Quelle [21.09.2019].

Ein wesentlicher Vorteil des Messaufbaues ist die InLine-Sonde, weil sie im Gegensatz zur Lambda-Sonde mit deren Messaufbauten eine größere Totzeit für die Reaktion hat. Die langen Messgasführungen der Lambda-Sonde über den Messgaskühler, Wasserabscheider, Messblock und Pumpe verzögern die aktuelle Messgenauigkeit enorm.

Daraufhin fiel der Entschluss für den Messaufbau der InLine-Sonde.

6.2 Messumformer

Die Sonde liefert zwei getrennte Spannungen. Um diese in ein Normsignal umzuwandeln, benötigt es einen Messumformer. Die erste Spannung von der Zirkoniumoxidsonde liefert ein mV-Signal. Das zweite Signal ist ebenfalls ein mV-Signal als Thermoelement der Type S, welche aus Platin und Platin-Rhodium besteht. Anhand der Nernst-Gleichung werden die zwei Signale im Messumformer eingelesen und berechnet.



Abbildung 20: Messumformer Uniflex CI45, Quelle: PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH (2009), Online-Quelle [23.09.2019].⁷⁷

Als Ausgang des Messumformers wird ein 4-20 mA-Signal verwendet, das einem Sauerstoffgehalt von 0-21 % entspricht.

Für die Zirkoniumoxid-Sonde wird der Input 1 mit dem Spezial-Eingang (-25 bis 1150 mV) verwendet. Das Thermoelement nutzt den Input 2, welcher dem Typ S Thermoelement von 0 bis 1760 °C entspricht. Die Konfiguration und Parametrierung des Messumformers erfolgt entweder manuell am Gerät oder mittels Software „BlueControl⁷⁸“, das Online zum Download frei zur Verfügung steht.

Der Messumformer wird je nach Bestellung mit 24 V Gleichspannung oder mit 230 V Wechselspannung versorgt und stellt damit die Aufrechterhaltung der Messelektronik sicher.

⁷⁷ Vgl. PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH (2009), Online-Quelle [23.09.2019].

⁷⁸ Software BlueControl PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH (2019), Online-Quelle [23.09.2019].

EMK/mV	Temperatur/°C								
	500,0	600,0	700,0	800,0	900,0	1000,0	1100,0	1200,0	1300,0
5,0	15,5	16,1	16,5	16,9	17,2	17,5	17,7	17,9	18,1
10,0	11,5	12,3	13,0	13,6	14,1	14,5	14,9	15,3	15,6
15,0	8,5	9,4	10,2	10,9	11,6	12,1	12,6	13,1	13,5
20,0	6,3	7,2	8,1	8,8	9,5	10,1	10,6	11,1	11,6
25,0	4,7	5,5	6,4	7,1	7,8	8,4	9,0	9,5	10,0
30,0	3,5	4,2	5,0	5,7	6,4	7,0	7,6	8,1	8,6
35,0	2,6	3,3	3,9	4,6	5,2	5,8	6,4	6,9	7,5
40,0	1,9	2,5	3,1	3,7	4,3	4,9	5,4	5,9	6,4
45,0	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5	4,1	4,6	5,1	5,5
50,0	1,0	1,5	1,9	2,4	2,9	3,4	3,9	4,3	4,8
55,0	0,8	1,1	1,5	1,9	2,4	2,8	3,3	3,7	4,1
60,0	0,6	0,9	1,2	1,6	1,9	2,3	2,8	3,2	3,6
65,0	0,4	0,7	0,9	1,3	1,6	2,0	2,3	2,7	3,1
Sauerstoffgehalt/%									

Tabelle 2: Sensorspannung der Sauerstoffsonde, Quelle: Eigene Darstellung.

In der Tabelle 2 ist die Sensorspannung EMK der Zirkoniumoxid-Sonde dargestellt. In Abhängigkeit der Temperatur in °C ergibt es den Sauerstoffgehalt in %.

6.3 Stellantrieb

Der Stellantrieb IC40 ist am Herdwagenofen in der Brennluftleitung verbaut. Je nach Anforderung der Zonenstellgröße wird der Stellantrieb in seine Position verfahren.

Die Drehbewegung des Stellantriebes liegt zwischen 0° und 90° für den Luftvolumenstrom. Der IC40 ist für stufige und stetige Brenner geeignet. Für die Volumenstromregelung ist eine Drosselklappe am Stellantrieb verbaut. Bei der Bestellung des Stellantriebes ist eine Sicherheitsschließfunktion optional auswählbar. Die Sicherheitsschließfunktion schließt die Klappe bei einem Ausfall der Spannungsversorgung oder Defekt des Antriebes. Die Klappe ist für eine Warmlufttemperatur von maximal 450 °C ausgelegt.⁷⁹

⁷⁹ Vgl. Elster GmbH (2018), Online-Quelle [24.09.2019].



Abbildung 21: Stellantrieb IC40 mit Drosselklappe, Quelle: Elster GmbH (2018), Online-Quelle [24.09.2019].⁸⁰

Hier unterscheidet man zwischen der Kleinmenge mit der Stellung 1 und der Großmenge mit der Stellung 2, die durch Anlegen einer Spannung in die positive Logik übergehen. Diese Anfangs- und Endpositionen können im Antrieb parametrierbar werden. Für die vorgewärmte Verbrennungsluft bis 450 °C wird der Stellantrieb mit der Zwei-Punkt-Regelung angesteuert. Wegen der variablen Warmlufttemperatur verfügt die Thermoprozessanlage seitens der Brennluftversorgung über eine Warmluftkompensation.

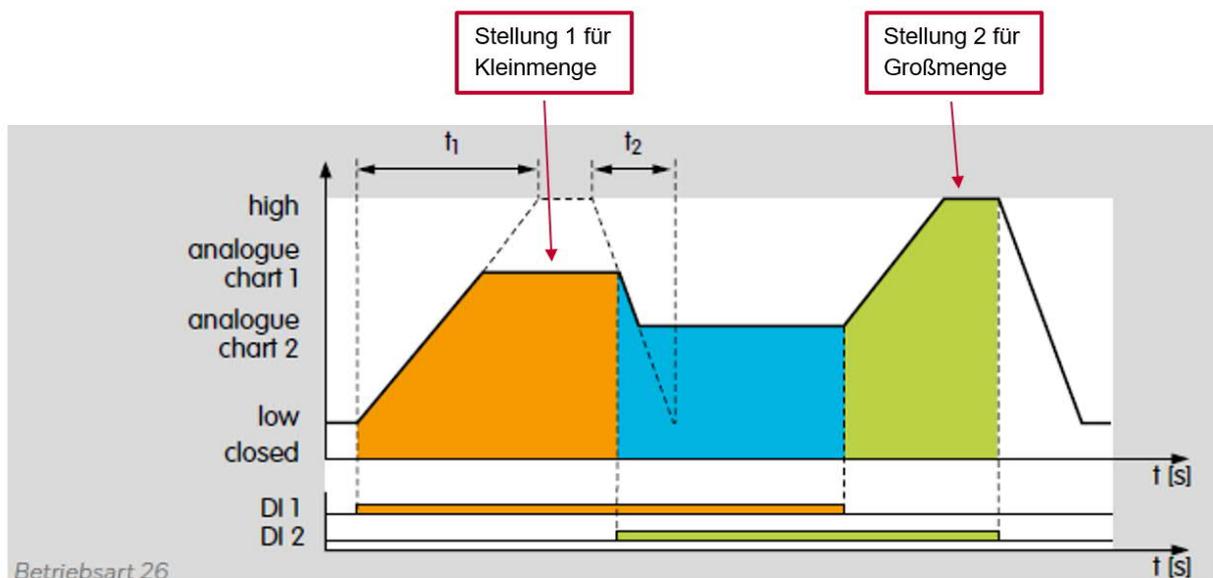


Abbildung 22: Betriebsart 26 von Stellantrieb IC40, Quelle: Elster GmbH (2018), Online-Quelle [24.09.2019] (leicht modifiziert).⁸¹

Anhand der speicherprogrammierbaren Steuerung wird das Stromsignal an den Stellantrieb für die anzufahrende Position übertragen. Der Stellantrieb kann jede Position von 0° bis 90° anfahren, was dem Normsignal von 4-20 mA und einem Prozentsatz von 0-100% entspricht.

⁸⁰ Vgl. Elster GmbH (2018), Online-Quelle [24.09.2019].

⁸¹ Vgl. Elster GmbH (2018), Online-Quelle [24.09.2019].

Die Stellung 1 ist mit dem maximalen Prozentsatz von 40 % begrenzt, was für diesen Bereich der Kleinmenge an Erdgas entspricht.

Weiters überträgt die speicherprogrammierbare Steuerung die Anforderung der Klein- oder Großmenge an das Brennersteuergerät über das Bussystem. Die Ansteuerung an den Stellantrieb, ob Stellung 1 oder 2 erforderlich ist, übernimmt das Brennersteuergerät. Durch Anlegen einer Spannung an den Eingang 1, verfährt der IC40 in die Position. Wird zum Eingang 1 auch der Eingang 2 mit Spannung versorgt, fährt der Stellantrieb in die Stellung 2. Liegt keine Spannung an den Eingängen an, schließt der Stellantrieb.

Die Parametrierung und Konfiguration des Stellantriebs erfolgt über eine Opto-Koppler-Schnittstelle mittels Computer.

7 PRAKTISCHE UMSETZUNG

In der praktischen Umsetzung wird der Einbau und Aufbau der Komponenten an der Thermoprozessanlage beschrieben wie auch die Parameter und Grenzwerte der Regler ausgetestet und festgelegt. Die Einstellungen und Änderungen, die an den Warmluftbrenner vorgenommen wurden, werden kurz erläutert.

7.1 Einbau der Sauerstoffmessung

Für die Sauerstoffmessung wird der geeignete Einbauort für Sonde gesucht und gewählt. Die Zirkoniumoxid-Sonde oder auch InLine-Sonde benötigt in erster Linie eine Heizung die mittels dem Ofenraum oder Abgastrakt ab 600 °C fungiert und eine Strömung für die Messgasführung. Auf jeden Fall ist eine Öffnung für die Sonde an der Thermoprozessanlage notwendig.

Für den richtigen Einbau der InLine-Sonde gibt es zwei Positionen. Die erste Position ist der direkte Einbau in den Ofenraum, hier bei dieser Thermoprozessanlage an der Ofendecke, da die Brenner an der Seitenwand verbaut sind. Die zweite Position ist im Abgastrakt unmittelbar nach dem Verlassen der Abgase in den Kamin, das heißt dort wo noch keine Fehlerquellen vorhanden sind.

Versuche haben gezeigt, dass das Gießpulver der Edelstähle, die im Ofenraum vorhanden sind, die InLine-Sonde an den Messöffnungen verstopfen und der Platindraht stark angegriffen wird, der als Resultat einen falschen Messwert generierte.



Abbildung 23: Befundbericht SN120325 Sauerstoffsonde von Gießpulver angegriffen thermo-control Körtvélyessy GmbH, Quelle: Körtvélyessy GmbH.

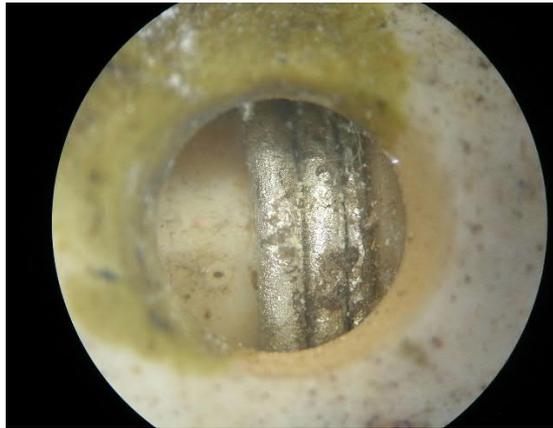


Abbildung 24: Befundbericht SN120325 Platin durch Ablagerung angegriffen thermo-control Körtevényessy GmbH, Quelle: Körtevényessy GmbH.

Ursache für die Verstopfung der InLine-Sonde an der Messgasöffnung oder die starken Ablagerungen am Platindraht, ist die zu hohe Strömungsgeschwindigkeit im Abgastrakt, die das Abgas mitverschleppt und an der Messgasöffnung oder am Platindraht haften lässt.

Die Sonde als Einbauort auf der Ofendecke ist die beste Lösung. Es ist nur darauf zu achten, an welcher Position die Brenner eingebaut sind. Der beste Platz der InLine-Sonde ist der zentrale Punkt an der Ofendecke, um den Verbrennungsprozess nicht punktuell in der Nähe eines Brenners zu messen. Es gibt keine Einschlüsse von Gießpulver in der Messgasführung der Sauerstoffsonde.



Abbildung 25: Eingebaute Sauerstoffsonde mit Spülungen und Hitzeschutzblech, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Sonde besitzt an den Seiten des Anschlusskopfes zwei Luftanschlüsse. Einer ist für die Spülung der Sonde zuständig und der andere als Referenzluft für das Messprinzip. Die Sondenspülung findet keine Verwendung für diesen Aufbau und wird mittels Abdeckung dicht verschlossen. Die Referenzluft ist für das Messprinzip ausschlaggebend und wirkt beim Transport der Sauerstoff-Ionen mit. In diesem Fall wird die benötigte Referenzluft vom Brennluftventilator vor dem Rekuperator entnommen.

Der elektrische Anschluss für die Zirkoniumoxid-Sonde und das Thermoelement befinden sich im Kopf der InLine-Sonde. Die Anbauverschraubung der Elektroleitungen ist dicht zwischen dem Innenleben des Kopfes und der äußeren Umgebung zu verschließen. Es herrscht bei Betrieb der Thermoprozessanlage eine unterschiedliche Temperatur zwischen dem Inneren des Kopfes und der Umgebungsluft. Ist der Decker oder die Anbauverschraubung undicht, entsteht im Kopf Kondenswasser. Dies führt zur Korrosion der elektrischen Kontakte und in weiterer Folge zu Ausfällen der Sauerstoffmessung.

Die Sauerstoffsonde hat eine Länge von 500 mm und ragt nur 30 mm in den Ofenraum. Je nach Dicke des Feuerfestmaterials kann die InLine-Sonde in verschiedenen Längen angekauft werden.

Als Schutz vor Ausfällen der Messung ist unter dem Sondenkopf ein Hitzeschutzblech angebracht. Laut Hersteller verursacht eine Klemmentemperatur ab 200 °C den maximalen thermoelektrischen Anschlussfehler. Weiters verhindert es die Beschleunigung der Alterung der Schläuche im Sondenkopf, die durch die Abstrahlungshitze der Ofendecke entsteht.

7.2 Aufbau des Messumformers

Der Messumformer erfasst die beiden Messsignale der InLine-Sonde und wandelt diese in ein Normsignal um. Der Aufbauort für den Messumformer ist in der Nähe der Sonde anzubringen, um beim Messsignal den Spannungsabfall so gut wie möglich zu vermeiden.

Um den Messumformer vor Staub und Hitze zu schützen, ist dieser in einem Schaltkasten verbaut.

Bei einem Fehler der Sonde wird eine Warnung am Display ausgegeben. Ein wesentlicher Nachteil dieser Variante der Sauerstoffmessung ist ein Gasüberschuss, der am Messumformer mit dem Minimum an Sauerstoffgehalt von 0,0 % angezeigt wird. Es ist nicht möglich einen Gasüberschuss im Ofenraum messen zu können, da die Sonde kein negatives Signal wie die Lambda-Sonde liefern kann.



Abbildung 26: Aufbau Messumformer, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Messsignale werden in separate Eingänge eingelesen. Ein großer Vorteil dieses Messumformers ist die bipolare Eingangsgröße. Für den Eingang der Zirkoniumoxidsonde wird der Messbereich aufgrund des Messsignals von -25 bis 1150 mV gewählt. Der Eingang für das Platin/Platin-Rhodium ist mit dem Thermoelement Typ S konfiguriert. Die O₂-Funktion funktioniert nur mit dem Eingang einer Temperaturmessung. Dieser kann als bekannter Temperaturfixwert oder als variabler Temperaturwert eingestellt werden. Bei dieser Anwendung ist die variable Temperaturmessung wegen der eingebauten Temperaturmessung in der Sonde gewählt worden.

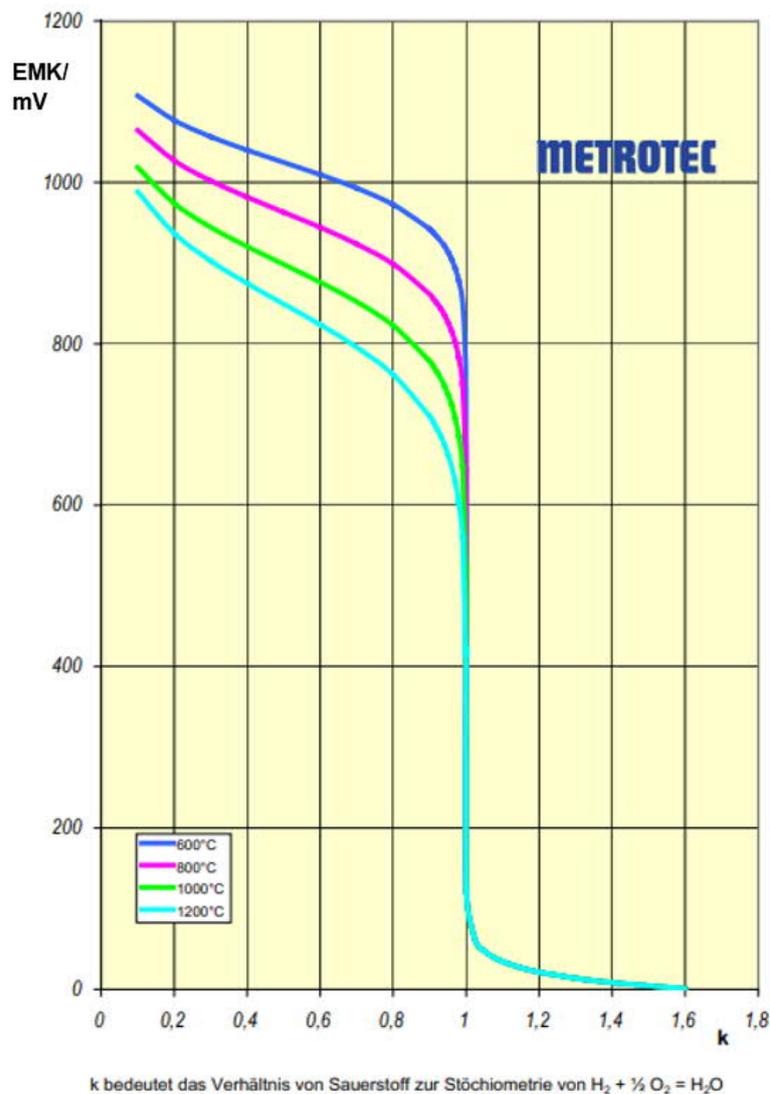


Abbildung 27: Kennlinie des Sauerstoffsensors, Quelle: Metrotec GmbH (2019), Online-Quelle [01.10.2019] (leicht modifiziert).⁸²

Die Abbildung 27 zeigt den Verlauf des Messsignales in Millivolt der Zirkoniumoxid-Sonde im Verhältnis zu Lambda. Der Lambda-Wert ist das Verhältnis zwischen der Luftmenge und der Brennstoffmenge, in diesem Fall die Gasmenge. Eine überstöchiometrische Verbrennung liegt im Bereich von 0 bis 70 mV der Zirkoniumoxid-Sonde vor. Die Emissionskante arbeitet in der Region von 71 bis 600 mV, bei der die Sondentemperatur eine ausschlaggebende Rolle spielt. Spannungen über dem 600 Millivolt-Bereich geben

⁸² Vgl. Metrotec GmbH (2019), Online-Quelle [01.10.2019].

Aufschluss über eine unterstöchiometrische Verbrennung. Für die genaue Berechnung der Nernst-Gleichung ist die Sondentemperatur zu berücksichtigen.

Das Ausgangssignal des Messumformers ist als Stromsignal von 4 bis 20 mA konfiguriert, was einem Sauerstoffgehalt von 0 bis 21 % entspricht.

7.3 Speicherprogrammierbare Steuerung

Die Signalverarbeitung wird mittels der vorhandenen Hardware-speicherprogrammierbaren Steuerung realisiert. Die Hauptbestandteile der speicherprogrammierbaren Steuerung sind die Stromversorgung, die Zentraleinheit (CPU) mit Verarbeitungseinheit und Speicher sowie die benötigten digitalen und analogen Ein- und Ausgabeeinheiten.

Zum Einlesen des Stromsignals vom Messumformer wird eine Analogeingangskarte der speicherprogrammierbaren Steuerung verwendet. Die Analogkarte ist als Zweidraht-Messung eingestellt. Der Messumformer liefert die benötigte Spannung und das Stromsignal der Analogeingangskarte.

Die analoge Größe wie in diesem Fall der Strom wird in einen binären Code umgewandelt. Dies geschieht mittels einem Analog-Digital-Wandler in der speicherprogrammierbaren Steuerung, der das analoge Signal in einen proportionalen digitalen Wert umwandelt. Umgesetzt wird dabei ein zeit- und wertekontinuierliches Eingangssignal in eine zeitdiskrete und wertediskrete Codierung.⁸³

Die digitalen Signale können desgleichen in die analogen Signale zurückumgewandelt werden. Über die Aufnehmer lassen sich die physikalischen Größen wie zum Beispiel die Spannung von 0 bis 10 Volt oder der Strom von 0 bis 20 Milliampere einlesen. Als Beispiel betrachtet geht man von einem 12-Bit Wandler aus, dieser eine Anzahl von 4.096 Digit umwandelt. Bei einem Strombereich von 4 bis 20 Milliampere ist die Differenz 16 Milliampere. Dividiert man die 16 mA durch die 4.096 Digit, errechnet sich ein Wert von 3,91 $\mu\text{A}/\text{Digit}$.

Als Quantisierung bezeichnet man die Anzahl der Stufen und die Breite des Messbereiches. Der treppenförmige Verlauf ist in Quantisierungsstufen eingeteilt.

$$s = \frac{W}{z^n - 1} \quad (7.3)$$

$s/\text{mA}/\text{Digit}$	Quantisierungsstufe
W/mA	analoger Wertebereich
z	Anzahl der diskreten Werte
n	Anzahl der Bit des Wandlers

Das Stromsignal wird in der speicherprogrammierbaren Steuerung verarbeitet und kann dann für die Datenverarbeitung in die Regelung eingebunden werden. Das Offset-Zero von 4 bis 20 mA wurde

⁸³ Vgl. Schmusch (2005), S. 374 ff.

verwendet, um einen Leitungsbruch erfassen zu können. Die Analogbaugruppen wie zum Beispiel die Analogeingangskarte für das Einlesen des Stromsignales wandelt das Stromsignal in ein digitales Signal um.

7.4 Warmluftkompensation

Die Stellung der Stellantriebe IC40 wird mit einer Warmluftkompensation berücksichtigt. Die Berechnung berücksichtigt Druck, Temperatur und Dichte der Brennluft.

Der maximale Anschlusswert der Gasversorgung für die Thermoprozessanlage ergibt sich aus dem notwendigen Gasdurchfluss pro Brenner. Anhand des Datenblattes des Brenner kann der erforderliche Gasdruck ermittelt werden.

$$V_{Luft} = V_{Gas} * L_{min} * Lambda \quad (7.4.1)$$

$V_{Luft}/Nm^3/h$	Luftmenge
$V_{Gas}/Nm^3/h$	Gasmenge
$L_{min}/Nm^3_{Luft}/Nm^3_{Gas}$	Mindestluftmenge für die vollkommene Verbrennung
$Lambda$	Luftzahl

Die bekannte Warmlufttemperatur, der Druck in der Rohrleitung und der benötigte Luftdruck am Brenner geben Aufschluss über den zu vernichtenden Differenzdruck über der Brennluftklappe. Für die Berechnung des Öffnungswinkels der Brennluftklappe ist auf einen Koeffizienten zurückzugreifen, der im Zusammenhang zwischen dem Öffnungswinkel und dem Volumenstrom der Brennluft besteht. Der Koeffizient ist als KV-Wert definiert und wird wie folgt berechnet.

$$KV = \frac{\dot{V}_{LuftBrenner}}{514} * \sqrt{\frac{\rho_{Luft} * (T_{Luft} + 273,15)}{(p_{Rohrleitung} - p_{Brenner}) * (p_{Brenner} + 1013)}} \quad (7.4.2)$$

$KV/Nm^3/h$	Durchflusskoeffizient
$\dot{V}_{Luft}/Nm^3/h$	Luftvolumendurchfluss am Brenner
T_{Luft}/K	Warmlufttemperatur
$\rho/kg/m^3$	Luftdichte
$p_{Rohrleitung}/mbar$	Luftdichte
$p_{Brenner}/mbar$	Druckdifferenz der Luft

Um den KV-Wert in weitere Folge berechnen zu können ist der Volumenstrom ausschlaggebend und nicht der Druck am Brenner. Dafür wird das Durchflussdiagramm des Brennerherstellers benötigt.

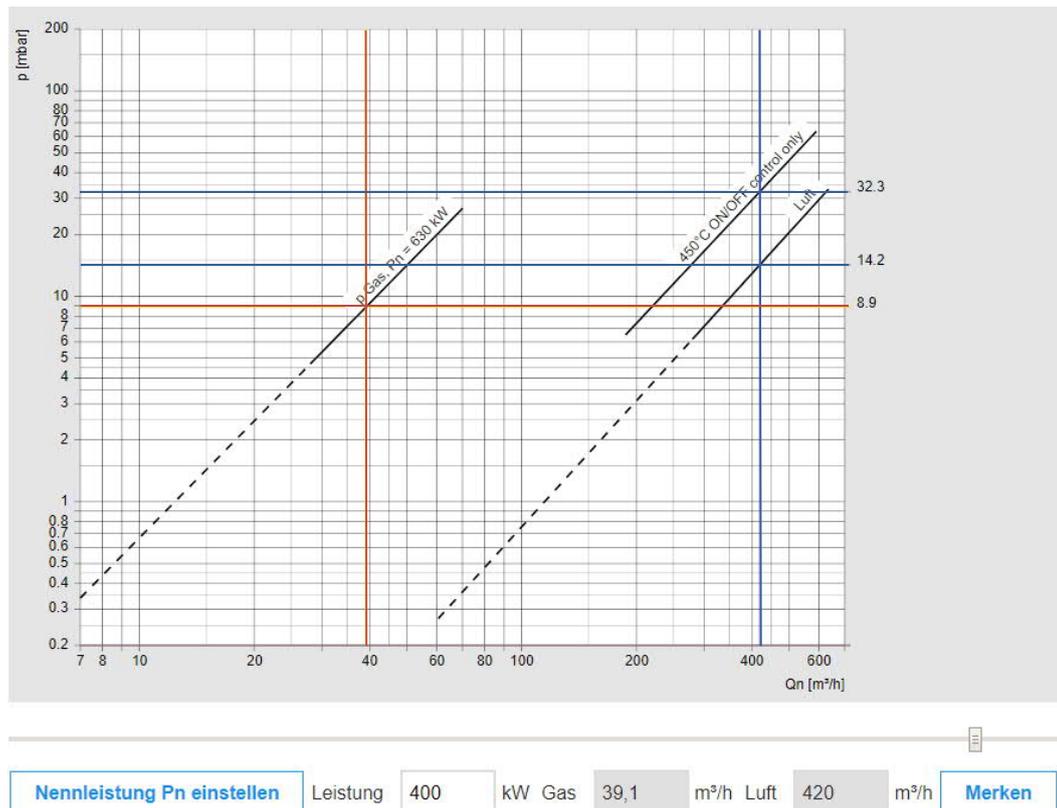


Abbildung 28: Brennerkurve ZIO165KBL, Quelle: Elster GmbH, Online Quelle [03.10.2019].⁸⁴

Die gewählte Leistung von 400 kW ist für diesen Brenner optimal. Dadurch erzeugt beispielweise der Volumenstrom der Brennluft von 420 m³/h einen Druck von 14,4 mbar. Für einen zweiten Punkt kann hier zum Beispiel 90 m³/h verwendet werden, was einen Druck von 0,67 mbar ergibt. Die Steigung in der Brennerkurve laut Abbildung 28 ergibt sich aus der doppelt logarithmischen Darstellung.

$$Exponent = \frac{\log(\Delta p)}{\log(\Delta \dot{V})} = \frac{\log(p_2) - \log(p_1)}{\log(\dot{V}_2) - \log(\dot{V}_1)} \quad (7.4.3)$$

- p_1 /mbar niedriger Druck des Brenners
- p_2 /mbar hoher Druck des Brenners
- \dot{V}_1 /m³/h niedriger Volumenstrom des Brenners
- \dot{V}_2 /m³/h hoher Volumenstrom des Brenners

In diesem Beispiel ergibt der Exponent einen Wert von 1,991. Durch den Exponenten und einen Punkt aus der Brennerkurve ist der Volumenstrom berechenbar. Jedoch sind die meisten Brennerkurven mit einer Umgebungslufttemperatur von 20 °C angegeben und lassen die Warmlufttemperatur in der Rohrleitung außer Acht.

⁸⁴ Vgl. Elster GmbH (2019), Online-Quelle [03.10.2019].

$$\dot{V}_{Luft} = \left(\frac{p_{Brenner}}{p_2} \right)^{\frac{1}{Exponent}} * \dot{V}_2 * \frac{(T_{LuftKurve} + 273,15)}{(T_{Luft} + 273,15)} \quad (7.4.4)$$

- $\dot{V}_{Luft}/Nm^3/h$ Luftvolumendurchfluss am Brenner
- $p_{Brenner}/mbar$ Druckdifferenz der Luft
- $p_2/mbar$ hoher Druck des Brenners
- $\dot{V}_2/m^3/h$ hoher Volumenstrom des Brenners
- $T_{LuftKurve}/K$ Umgebungstemperatur
- T_{Luft}/K Warmlufttemperatur

Für die Berechnung des KV-Wertes wird der Druck am Brenner je nach Öffnungswinkel benötigt. Zu den Drücken am Brenner ist noch die aktuelle Warmlufttemperatur und der Druck in der Rohrleitung wesentlich.

p2	14,4 mbar		
V _{Luft}	420 m ³ /h		
p _{Rohrleitung}	49 mbar		
T _{Luft}	623,15 K		
p _{Brenner} /mbar	Öffnung/%	V _{Luft} /Nm ³ /h	KV-Wert
5,7	20	123,9854728	0,032601392
8,4	25	150,6446249	0,040853112
11,4	30	175,6168485	0,049416265
15,5	35	204,918501	0,060966191
19,6	40	230,5545638	0,073074599
23,6	45	253,0952446	0,086137838
27,9	50	275,2925016	0,102584346
34,2	60	304,9335307	0,135267029
38,5	70	323,6225272	0,170087305
41	80	334,0119951	0,200876535
41,8	90	337,2696364	0,213726502

Tabelle 3: Werte für die Berechnung des KV-Wertes über den Öffnungswinkel, Quelle: Eigene Darstellung.

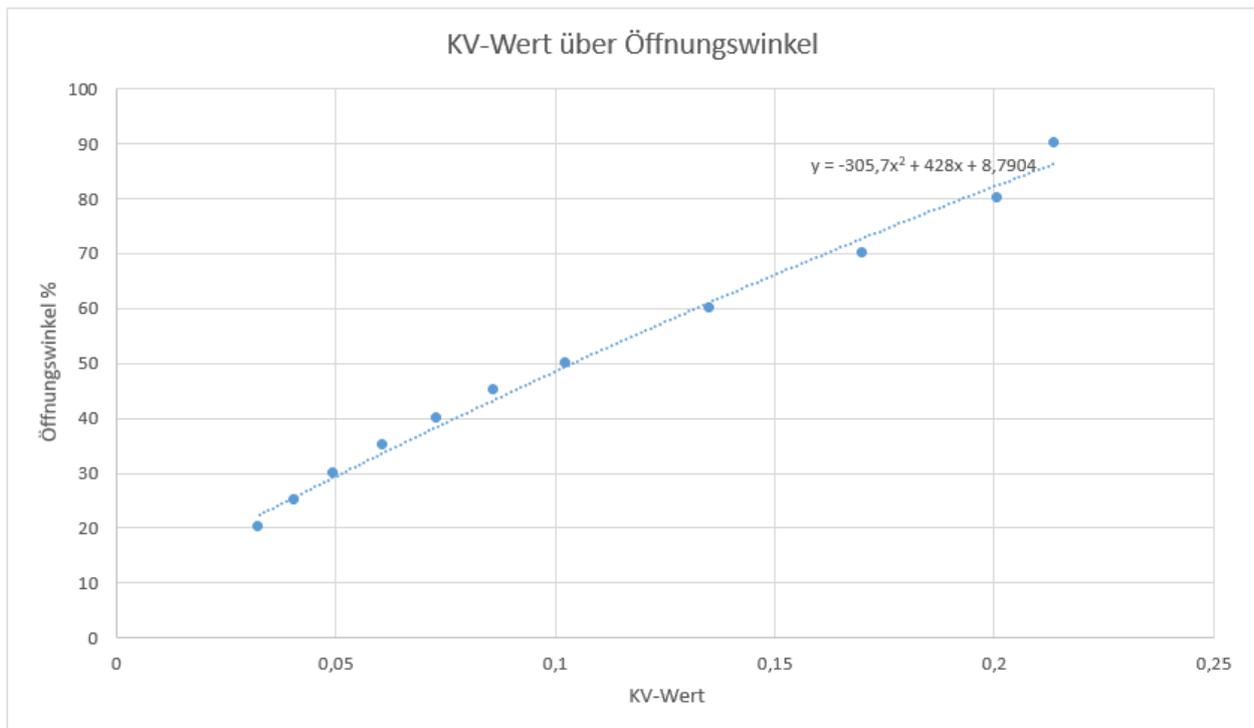


Abbildung 29: KV-Wert über den Öffnungswinkel des Stellantriebes IC40, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Polygon der zweiten Ordnung berechnet den Öffnungswinkel aus folgender Formel.

$$\text{Öffnungswinkel} = a * KV^2 + b * KV \quad (7.4.5)$$

Aus der Abbildung 29 können die Werte für $a = -305,7$ und $b = 428$ entnommen werden.

Berechnet man den Öffnungswinkel von 20 % mit den Parametern des KV-Wertes ergibt dies einen kompensierten Öffnungswinkel von 13,63 %.

In der Visualisierung sind weitere Werte wie Heizwert, Mindestluft, Brennerleistung, Lambda, Volumenstrom von Luft und Gas und die Drücke von Luft und Gas einzugeben.

Für den Stellantrieb, berechnet aus der speicherprogrammierbaren Steuerung durch die Warmluftkompensation, ergibt sich bei einem KV-Wert von 0,03260139 der Ausgangsstrom von 6,18 mA.

$$\text{mA Signal} = \frac{\text{kompensierter Öffnungswinkel}}{100} * 16 + 4 \quad (7.4.6)$$

Zu guter Letzt wird der Öffnungswinkel in ein Milliampere-Signal umgewandelt.

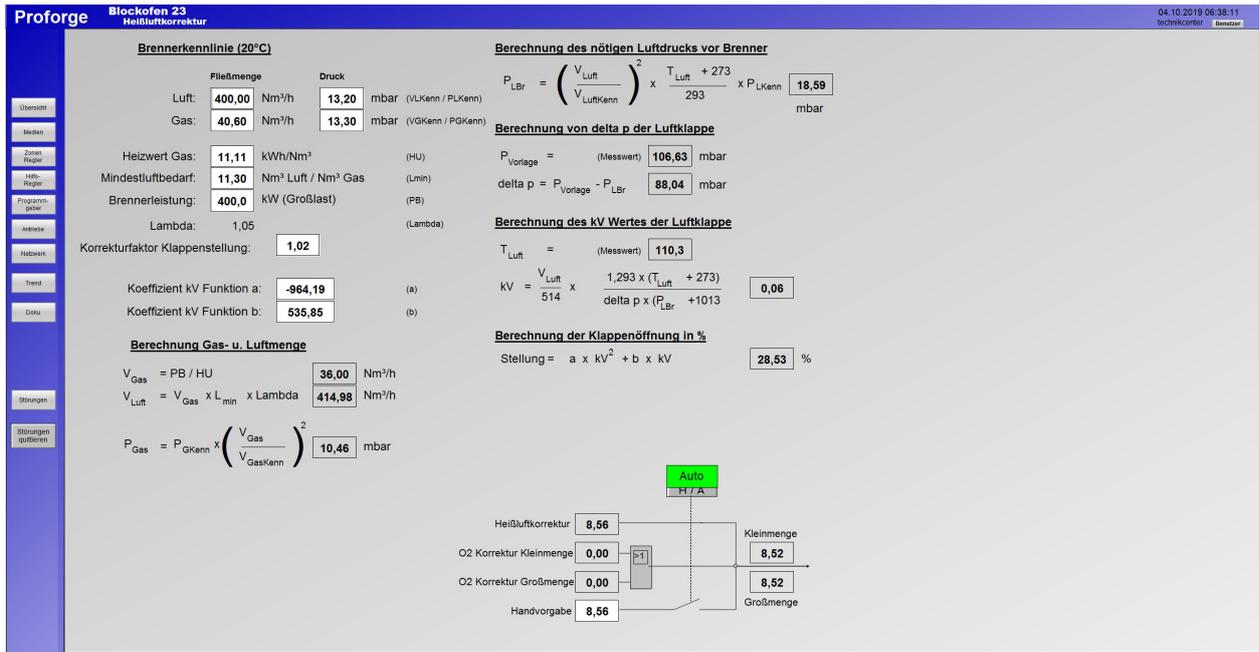


Abbildung 30: Warmluftkompensation Thermoprozessanlage, Quelle: Eigene Darstellung.

7.5 Sauerstoffregelung

Der Sauerstoffregler greift in den Verbrennungsprozess ein, indem er durch seine Bandbreite von +/- 3 mA die Stellung der Brennluftklappe verändert. Der Regler besitzt einen Stellgrößenbereich von -100 % bis +100 %, in dessen Rahmen das Brennluftvolumen verringert oder vergrößert wird.

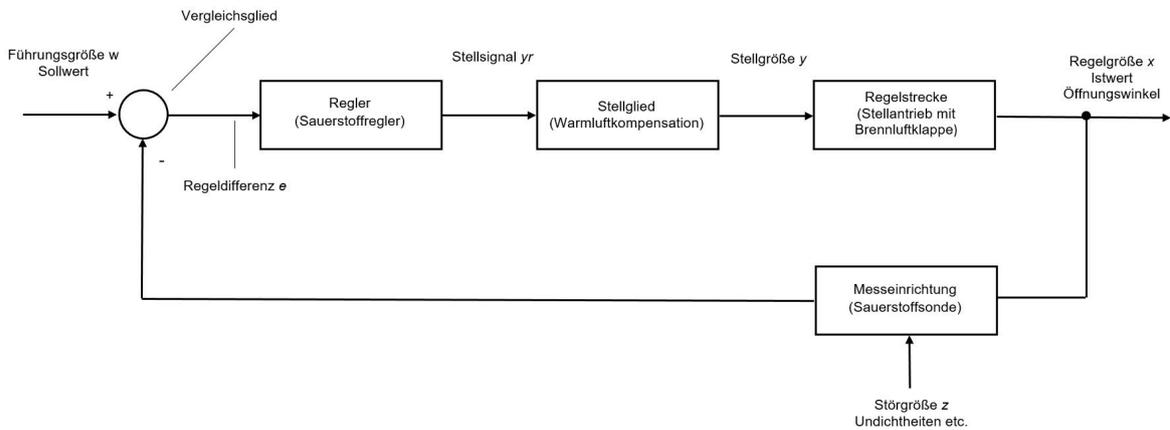


Abbildung 31: Regelkreis Sauerstoffregler der Thermoprozessanlage, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Temperaturgrenzwert ist mit 800 °C fixiert, weil hiermit die Flammenstabilität nicht mehr gegeben ist, die Flamme abhebt und nicht mehr am Brennerstein anliegt. Bei zu hohem Sauerstoffgehalt fährt der Sauerstoffregler in seine Mindeststellgröße und nimmt dem Brenner an Brennluftvolumenstrom ab. Der Verbrennungsprozess kann nicht mehr aufrechterhalten werden. Dies führt zu Brennerausfällen, weil das Flammensignal nicht mehr stabil ist beziehungsweise nicht mehr erreicht werden kann.

Ab 800 °C ist der Hochtemperaturbetrieb am Brennersteuergerät aktiv und schaltet sich in einen Vorgang ein, bei dem die Flammenüberwachung nicht mehr benötigt wird. Das Erdgas in der Strukturformel von CH₄

als Methan hat eine Zündtemperatur von 650 °C⁸⁵. Für die Temperaturmessung zur Aktivierung des Hochtemperaturbetriebes ist ein separates Thermoelement im Ofenraum verbaut.

Um Undichtheiten entgegen zu wirken und keinen falschen Sauerstoff in den Ofenraum durch den Kamineffekt einzubringen, ist ein Ofenraumdruck oder Herddruck von mindestens 0,05 mbar als Grenzwert für den Sauerstoffregler gesetzt.

Daneben ist auch eine Mindestgasmenge einzuhalten, um sicher zu gehen, dass eine Verbrennung stattfindet, die in erste Linie den Herddruck aufbaut und in zweiter Linie den Sauerstoffgehalt im Ofenraum verändert.

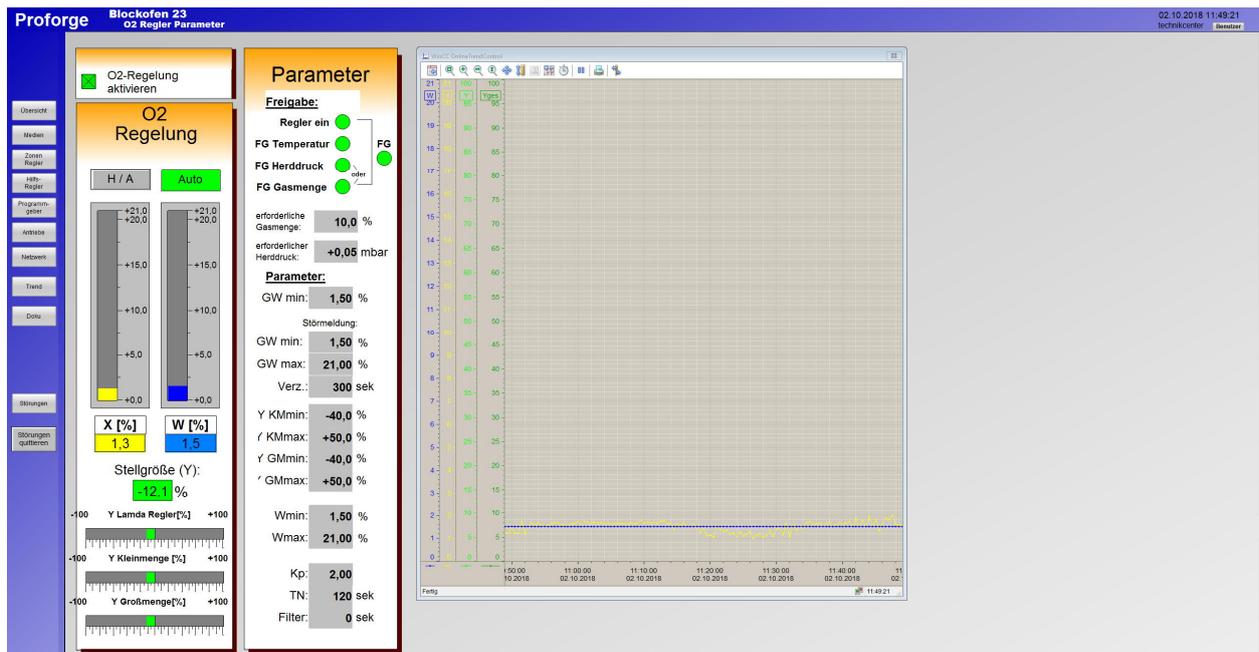


Abbildung 32: Sauerstoffregler Thermoprozessanlage, Quelle: Eigene Darstellung.

Wird eine der Vorbedingungen nicht erreicht oder entspricht etwas nicht den Vorgaben, so ist die Freigabe für den Sauerstoffregler nicht gewährt und greift dieser nicht in die Warmluftkompensation ein.

Inbetriebnahme des Sauerstoffreglers:

Bevor der Sauerstoffregler in Betrieb genommen wird, muss sichergestellt werden, dass die Signale korrekt funktionieren. Nicht nur der Sauerstoffgehalt an sich sollte korrekt sein, sondern auch die eingehenden Signale für die Freigabe. So ist auch der Transmitter für die Gasmenge und den Herddruck zu überprüfen.

Mittels Abgasanalysator TN wird der Sauerstoffgehalt parallel zur InLine-Sonde verglichen. Das kann durchaus zu kurzen Verzögerungen der jeweiligen Messung führen. Am leichtesten behilft man sich, wenn beide Messungen in einem Diagramm übereinandergelegt werden. Eine andere Variante für die Überprüfung der Messeinrichtung für die InLine-Sonde ist es, die Werte anhand von Kalibrationen zu simulieren.

⁸⁵ Vgl. Joos (2006), S. 43.

Sind wegen der langen elektrischen Leitungen zwischen InLine-Sonde und Messumformer bereits Abweichungen vorhanden, können diese im Messumformer oder in der speicherprogrammierbaren Steuerung korrigiert werden.

7.6 Aufnahme der Brenneinstellungen

Von Beginn an werden die Drücke an jedem einzelnen Brenner aufgenommen. Wie bereits bekannt ist, besitzen die Brenner eine Klein- und Großmenge seitens der Gasversorgung, die über die Messnippel mit dem Druckmessgerät erfasst werden. Ebenso ist auch die Aufnahme des Brennluftdruckes am Brenner durchzuführen. Die Aufnahme erfolgt bei Betriebsbedingung und sollte jedenfalls immer bei den gleichen Betriebstemperaturen, konstanter Warmlufttemperatur und konstantem Druck erfolgen. So kann in späterer Folge nach Änderung der Drücke am Brenner ein Vergleich daraus gezogen werden. Die Brennerdrücke sind je nach Brennerleistung vom Hersteller über die Brennerkurve zu entnehmen.

In dieser Arbeit wird nur der Gasdruck für die Klein- und Großmenge angegeben.

Brennereinstellungen								
Aufnahme des Ist-Zustandes								
				Betrieb: EHS Anlage: BLO23				
Datum: 06.08.2019				Dgf. von: Temmel				
Kennwerte lt. Durchflussdiagramm								
	Kleinmenge				Großmenge			
P [KW]				P [KW]				
Q [Nm³/h]				Q [Nm³/h]				
P _{Gas} [mBar]	3,5			P _{Gas} [mBar]	14			
P _{Luft} [mBar]	20°C	450°C		P _{Luft} [mBar]	20°C	450°C		
Brennlufttemperatur		Brennluftdruck GM (visu)		Ofenraumtemperatur		Sauerstoffregelung abschalten!!!		
270°C				1150°C				
Brenner	Gas Klein	Luft Klein		Gas Groß	Luft Groß	Einstellung geändert		Anmerkungen
						JA	NEIN	
1.1	3,4			14,1				
1.2	3,4			14,0				
1.3	3,5			14,0				
1.4	3,5			14,2				
2.1	3,3			14,1				
2.2	3,6			13,8				
2.3	3,4			14,0				
2.4	3,5			14,0				
2.5	3,3			13,9				
2.6	3,2			14,2				
2.7	3,5			14,1				
2.8	3,6			14,1				
3.1	3,4			13,8				
3.2	3,6			14,0				
3.3	3,5			14,2				
3.4	3,3			14,1				

Tabelle 4: Brennereinstellungen Ist-Aufnahme, Quelle: Eigene Darstellung.

Nach Aufnahme der Brennerdrücke wird der Sollwert für den Sauerstoffregler in der Visualisierung eingegeben und aktiviert. Am Anfang lohnt es sich, die Stellgröße vom Sauerstoffregler nur auf 20 % freizugeben, um mögliche Gasüberschüsse zu vermeiden.

7.7 Inbetriebnahme des Sauerstoffreglers

Während der Brennereinstellarbeiten ist der Sauerstoffregler zu deaktivieren.

Je nach Verfahrensweise des Sauerstoffreglers ist die Gasmenge anzuheben oder abzusenken. Dafür gibt es an der von mir verwendeten Thermoprozessanlage zwei fixe Punkte, die mit der Kleinmenge und der Großmenge fixiert sind. Angefangen wird mit der Kleinmenge, die mit 40 % der Zonenregler an der Umschaltswelle in die Großmenge funktioniert.

Schritt 1:

Hier sind alle Brenner bei der Thermoprozessanlage mit der Kleinmenge aktiv. Die Drücke werden schrittweise angehoben, sodass der Sauerstoffregler bei ausgeglichener Betriebstemperatur im 0 % - Bereich der Sauerstoffstellgröße und einem Sauerstoffgehalt von 1,0 % ist, weil bei geringerer Heizleistung der Sauerstoff zu steigen beginnt.

Um den Sauerstoffgehalt im Ofenraum auf den gewünschten Sollwert zu regeln, hat der Sauerstoffregler noch die Möglichkeit, mit dem Verringern des Brennluftvolumens den Istwert in Richtung Sollwert auszugleichen.

Schritt 2:

Bei der sogenannten 40 % Stellgröße des Zonenreglers sinkt oder steigt der Sauerstoffgehalt im Ofenraum. Um dem entgegenzuwirken, ist es am besten, den Stellgrößenbereich des Sauerstoffreglers ebenfalls mit Y von 0 % einzustellen. So kann der Sauerstoffregler in beiden Stellgrößenbereichen dem Sollwert angepasst werden. Die Brennerdrücke werden so im Schritt 1 angepasst, dass die Stellgröße des Sauerstoffreglers den gewünschten Wert erreicht, ohne dass hier die Regelung stark eingreift.

Die Brennerdrücke werden beim Versuch von Schritt 2 nicht geändert, sondern mit dem Grenzwert der Kleinmenge vom Sauerstoffregler begrenzt.

Die Brennerdrücke sollten im Rahmen der Herstellerangaben eingestellt sein. Meist sind diese von der Brennerleistung und dem Lambda-Wert begrenzt.

Resultat Schritte 1 & 2:

In diesem Fall ist der Sauerstoffgehalt beim ausgeglichenen Betriebszustand gestiegen und beim Betrieb Y von 40 % in den unterstöchiometrischen Betrieb übergegangen. Um den steigenden Sauerstoffgehalt auf den gewünschten Sollwert zu regeln, wurde der Brennerdruck und auch die Gasmenge angehoben. Dies führt zu einem schnelleren Gasüberschuss, der mit dem Grenzwert des Sauerstoffreglers begrenzt wurde. So wird zum Beispiel für die 40% der Zonenregler-Stellgröße, der Grenzwert des Sauerstoffreglers von -100 % auf -40 % eingestellt.

Schritt 3:

Nach Absolvierung der Einstellarbeiten für die Kleinmenge wird der gleiche Prozess an der Großmenge durchgeführt. Ab 41 % der Zonenregler-Stellgröße heizt der Brenner in der Zone mit einer höheren Brennleistung. Die maximale Brennleistung der Zonenregler ist mit 95 % begrenzt, weil durch das Brennersteuergerät eine Pausentaktzeit der Brenner erfolgt. Das bedeutet, in der Zone 1 sind 4 Brenner

vorhanden, die mit voller Heizleistung den Ofenraum aufheizen. Durch die Pausenzeit wird aufgrund der Rundumsteuerung ein Brenner kurz ausgeschaltet. So setzt die Rundumsteuerung die Brenner nacheinander in Pausenzeit. Der Sauerstoffregler für die Großmenge sollte wie bei der Kleinmenge bei Y von 0 % sein, und die Heizleistung bei 41 %.

Schritt 4:

Für die volle Heizleistung von 95 % soll die Stellgröße des Sauerstoffreglers auch im Bereich der 0 % arbeiten. Der Zielwert ist ein Sauerstoffgehalt von 1 %, weil der Sauerstoffregler diesen durch Zunahme an Brennluftvolumen auf den gewünschten Sollwert erhöht.

Resultat Schritte 3 & 4:

Wie beim Schritt 2 wird die Entnahme des Brennluftvolumens mit dem Grenzwert für die Großmenge auf - 40 % beschränkt.

Brennerleistung	Zonenregler Stellgröße	Sauerstoffregler Stellgröße	Zielwert durch Einstellung Sauerstoffgehalt	Grenzwert Stellgröße des Sauerstoffreglers	Grenzwert Stellgröße des Sauerstoffreglers
Kleinmenge	5-15 %	0 %	1,0 %	-	
Kleinmenge	40 %	0 %	1,0 %	Grenzwert – 40 %	Grenzwert + 50 %
Großmenge	41 %	0 %	1,0 %	-	
Großmenge	95 %	0 %	1,0 %	Grenzwert – 40 %	Grenzwert + 50 %

Tabelle 5: Orientierungsschritte zur Inbetriebnahme des Sauerstoffreglers, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Zielwert für den Sauerstoffgehalt sollte etwas niedriger gesetzt werden, um den gewünschten Sauerstoffgehalt zu erreichen. In diesem Beispiel wird der Brennerdruck so lange schrittweise angehoben, bis der Sauerstoffgehalt im Ofenraum 1,0 % beträgt. Wird der Sollwert des Sauerstoffreglers mit 1,5 % vorgegeben und ist die Sauerstoffregelung aktiv, wird das Brennluftvolumen angehoben und regelt den Istwert in Richtung des Sollwertes. Bei Überschreiten des Sollwertes durch den Istwert wird beim Verbrennungsprozess Brennluftvolumen entzogen.

Der Grenzwert für die Stellgröße des Sauerstoffreglers hinsichtlich des positiven Wertes ist mit + 50 % eingestellt worden. Ist der Verbrennungsprozess im unterstöchiometrischen Betrieb beziehungsweise nahe den 0 %, fahren die Stellantriebe weiter auf und bringen mehr Brennluftvolumen für die optimale Verbrennung in den Ofenraum. Ist der Grenzwert zu hoch eingestellt, sprich 100 %, steigt der Sauerstoffgehalt rapide an und läuft über den Sollwert hinaus. Die Reaktionszeit der Messeinrichtung ist zwar schnell, verliert aber doch einige Sekunden an Totzeit im Regelkreis.

Um ein Schwanken verhindern zu können, wird der Sauerstoffgehalt als Mittelwert in der speicherprogrammierbaren Steuerung gefiltert und dann an die Warmluftkompensation weitergegeben.

Verhinderung des unterstöchiometrischen Betriebes:

Die Sauerstoffsonde kann einen Gasüberschuss nicht wie bei der Lambda-Sonde auswerten. Der Messumformer ist mit dem minimalen Sauerstoffgehalt begrenzt. Mittels der speicherprogrammierbaren

Steuerung wird der Gasüberschuss überwacht, indem ein Anhalten des Sauerstoffgehaltes von 0 % länger als fünf Minuten zu einer Beheizungssperre führt. Der Gasüberschuss kann im Abgastrakt zu einer Nachverbrennung im Rekuperator führen und diesen beschädigen.

7.8 Aufnahme der Brenneinstellungen nach Umstellung für den Sauerstoffregler

Die Brennerdrücke für diese Thermoprozessanlage ergaben letztendlich für die Kleinmenge 4,0 mbar und für die Großmenge 15,1 mbar. Dadurch konnte der Sauerstoffgehalt vorerst verringert und in Richtung des gewünschten Sollwertes angepasst werden.

Brenneinstellungen Aufnahme nach Brennerumstellung und Anpassung für den Sauerstoffregler								
Betrieb: EHS				Anlage: BLO23				
Datum: 16.09.2019				Dgf. von: Temmel				
Kennwerte lt. Durchflussdiagramm								
Kleinmenge			Großmenge					
P [KW]			P [KW]					
Q [Nm³/h]			Q [Nm³/h]					
P _{Gas} [mBar]	4		P _{Gas} [mBar]	15,1				
P _{Luft} [mBar]	20°C	450°C	P _{Luft} [mBar]	20°C	450°C			
Brennlufttemperatur		Brennluftdruck GM (Visu)		Ofenraumtemperatur		Sauerstoffregelung abschalten!!!		
340°C				1180°C				
Brenner	Gas Klein	Luft Klein		Gas Groß	Luft Groß	Einstellung geändert		Anmerkungen
						JA	NEIN	
1.1	4,0			15,1				
1.2	4,0			15,1				
1.3	4,0			15,1				
1.4	3,9			15,1				
2.1	4,0			15,1				
2.2	4,0			15,1				
2.3	4,0			15,0				
2.4	4,0			15,1				
2.5	4,0			15,1				
2.6	4,1			15,1				
2.7	4,0			15,0				
2.8	4,0			15,1				
3.1	4,0			15,1				
3.2	4,0			15,1				
3.3	4,0			15,1				
3.4	4,0			15,1				

Tabelle 6: Brenneinstellungen nach Umstellung, Quelle: Eigene Darstellung.

Des Weiteren wurde in der Konfiguration des Stellantriebes IC40, die maximale Öffnung für die Kleinmenge von 40 % auf 37 % reduziert. Dies ergab eine weitere Optimierung des Brennluftvolumens im Bereich der Kleinmenge. Es entspricht von nun an das Stromsignal von 4 bis 20 mA einem Öffnungswinkel von 0 % bis 37 %.

7.9 Analyse des Zustandes mit der Sauerstoffregelung

Nach Umstellung der Brennerdrücke auf die gewünschten Ergebnisse erfolgt wieder der gleiche Vorgang der Auswertung. Die Sauerstoffregelung ist für diese Auswertung in Betrieb und regelt den Sauerstoffgehalt ab 800 °C auf einen Sollwert von 1,5 % Sauerstoffgehalt. Die Heizkurve der Thermoprozessanlage ist ähnlich der Heizkurve der Analyse des Ist-Zustandes. Als Vergleich werden wieder Zeitpunkte aus dem Diagramm ausgewertet und in der Tabelle aufgelistet.

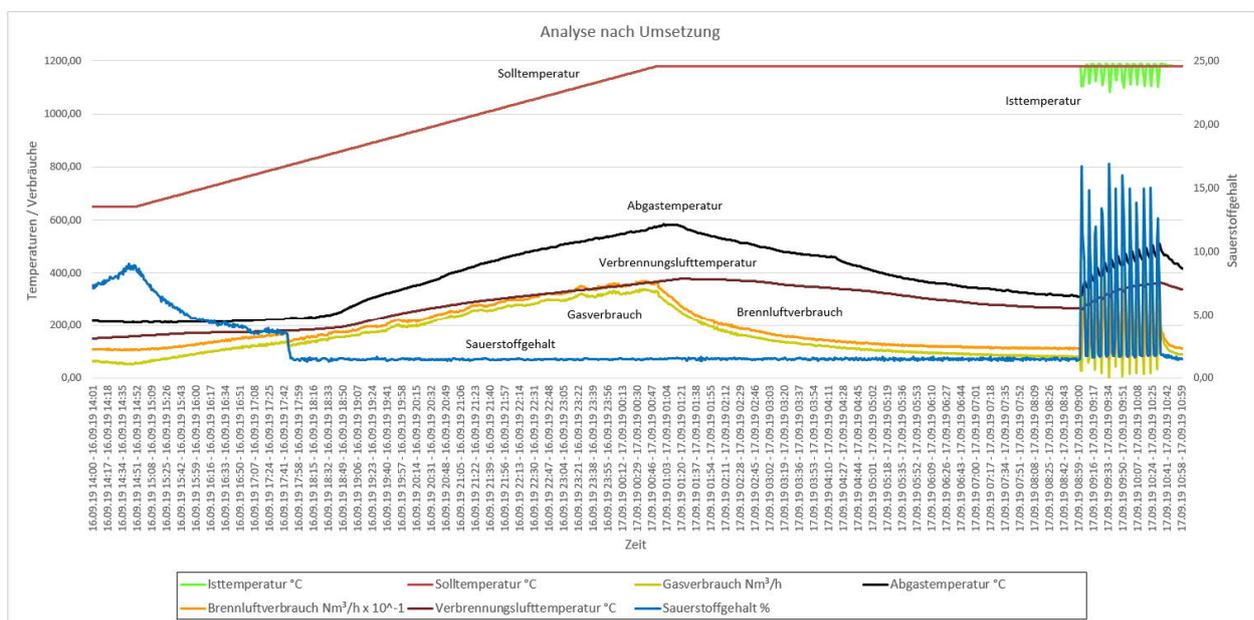


Abbildung 33: Analyse nach Umstellung der Sauerstoffregelung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die aus der Tabelle stammenden Werte sind die jeweiligen Zeitpunkte, die für die Auswertung aus dem Diagramm gewählt wurden. Die gewählten Zeitpunkte 1 und 2 sind in der Aufheizphase der Thermoprozessanlage. Zeitpunkte 3 bis 5 sind im ausgeglichenen Betriebszustand der Anlage.

Datum Uhrzeit Zeitpunkt	Ist- Temperatur	Soll- Temperatur	Gas- ver- brauch	Brenn- luftver- brauch	Abgas- temperatur	Sauer- stoff- gehalt	Ver- brennungs- luft- temperatur	Abgas- verlust
	°C	°C	Nm³/h	Nm³/h	°C	%	°C	%
16.09.2019 18:00 Zeitpunkt 1	816,35	817,08	129,09	1491,92	227,84	1,35	182,00	27,03
16.09.2019 21:00 Zeitpunkt 2	975,55	975,42	236,34	2544,04	403,54	1,50	281,00	29,78
17.09.2019 02:00 Zeitpunkt 3	1180,35	1180,00	185,30	2100,15	537,73	1,56	375,90	34,58
19.09.2019 03:00 Zeitpunkt 4	1180,17	1180,00	144,63	1687,66	495,71	1,51	364,73	34,98
19.09.2019 04:00 Zeitpunkt 5	1180,02	1180,00	123,33	1465,23	464,93	1,47	346,39	35,70

Tabelle 7: Messwerte der Analyse nach Umstellung der Sauerstoffregelung, Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades wird der Zeitpunkt 3 nach Umstellung der Sauerstoffregelung erläutert.

$$\lambda = \frac{0,21}{0,21 - \left(\frac{O_2}{100}\right)} \quad (7.9.1)$$

λ Lambda

$O_2/\%$ gemessener Sauerstoffgehalt im Ofenraum

$$\lambda = \frac{0,21}{0,21 - \left(\frac{1,56}{100}\right)} \quad (7.9.2)$$

$$\lambda = 1,08$$

Die Berechnung des Lambda-Wertes für den Zeitpunkt 3 nach Umsetzung der Sauerstoffregelung ergab 1,08.

Mit den Vorbedingungen zur Aktivierung des Sauerstoffreglers wurde ein Abgasverlust erzielt.

Berechnung Zeitpunkt 3

$$q_{A2} = (\vartheta_{a2} - \vartheta_{l2}) * \left(\frac{A2}{21 - O_2} + B\right) \quad (7.9.3)$$

$$q_{A2} = (1180,35 - 375,9) * \left(\frac{0,66}{21 - 1,56} + 0,009\right)$$

$$q_{A2} = 34,58 \%$$

$q_{A2}/\%$	Abgasverlust zum Zeitpunkt 3 nach Umstellung der Sauerstoffregelung
$\vartheta_{a2}/^{\circ}\text{C}$	Ist-Temperatur zum Zeitpunkt 3 nach Umstellung der Sauerstoffregelung
$\vartheta_{l2}/^{\circ}\text{C}$	Verbrennungslufttemperatur Zeitpunkt 3 nach Umstellung der Sauerstoffregelung
$O_2/\%$	Sauerstoffgehalt zum Zeitpunkt 3 nach Umstellung der Sauerstoffregelung
A_2	0,66 (Erdgas)
B	0,009 (Erdgas)

Aus dem Ergebnis des Abgasverlustes kann der feuerungstechnische Wirkungsgrad errechnet werden.

$$\begin{array}{l} \text{Feuerungstechnischer} \\ \text{Wirkungsgrad} \end{array} \qquad \eta_f = 100\% - q_{A2} \qquad (7.9.4)$$

$$\eta_f = 100\% - 34,58\%$$

$$\eta_f = 65,42\%$$

$q_{A1}/\%$	Abgasverlust zum Zeitpunkt 3 nach Umstellung der Sauerstoffregelung
$\eta_f/\%$	feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Bewertung der Analyse nach Umstellung der Sauerstoffregelung:

Der erreichte feuerungstechnische Wirkungsgrad ergab 65,42 %. So konnte ein feuerungstechnischer Wirkungsgrad von weit über 57 % des Normalzustandes für einen Warmluftbrenner erreicht werden.

Durch die Erhöhung der Warmlufttemperatur und Senkung des Sauerstoffgehalt und der Abgastemperatur wurde die Effizienz der Anlage gesteigert.

Wegen der optimalen Verbrennung ist der Energieverbrauch an Erdgas gesunken und wird in den nachfolgenden Quartalsauswertungen ersichtlich sein. Die Verzunderung an der Brennerdüse wird durch die Instandhaltung begutachtet und bewertet, ob eine Materialabnahme verlangsamt wurde.

Entnahmevorgang von Materialien an einer Thermoprozessanlage mit Herdwagen:

In diesem Abschnitt wird der Ablauf eines Ziehvorganges dargestellt. Die Thermoprozessanlage hat seine Betriebstemperatur und die Liegezeit des Materiales eingehalten und ist für die Produktion bereit. Das Material wird mittels Herdwagen ausgefahren und mit einem Chargierfahrzeug oder Kran abgeladen. Nach Entnahme ist das Material unterwegs zur jeweiligen Weiterbearbeitung durch eine Schmiede-, Press- oder Walzanlage. Wurde das Material vom Herdwagen befördert, fährt der Herdwagen in seine Innen-Position zurück und schließt die Ofentüre. Durch Erreichen des Endschalters für die Position „Ofentüre geschlossen“ ist die Anlage für den Verbrennungsprozess wieder einsatzbereit.

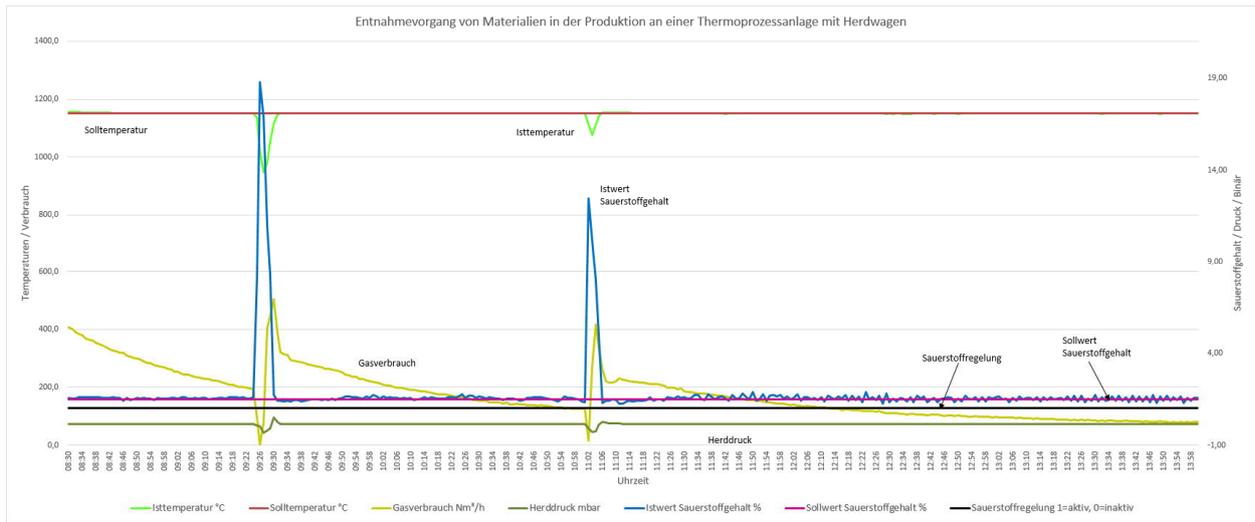


Abbildung 34: Entnahmevorgang von Materialien an einer Thermoprozessanlage mit Herdwagen, Quelle: Eigene Darstellung.

Ziel ist es, die Ist-Temperatur der Thermoprozessanlage wieder der Soll-Temperatur anzugleichen. Je nach Temperaturabfall steigt die Stellgröße der Zonenregler. In diesem Beispiel haben alle drei Zonenregler die maximale Stellgröße erreicht. Die Stellgröße beträgt 95 % und entspricht somit einem Großmengen-Betrieb der Brenner. Mit Verringern der Stellgröße stellt die Großmenge unter 40 % der Stellgröße in den Kleinmengen-Betrieb um.

Der Gasverbrauch der Thermoprozessanlage sinkt mit der Annäherung der Ist-Temperatur zur Soll-Temperatur. Der Sauerstoffgehalt im Ofenraum wird auf 1,5 % geregelt, solange die Vorbedingungen gegeben sind, welche in diesem Beispiel dauerhaft erhalten bleiben.

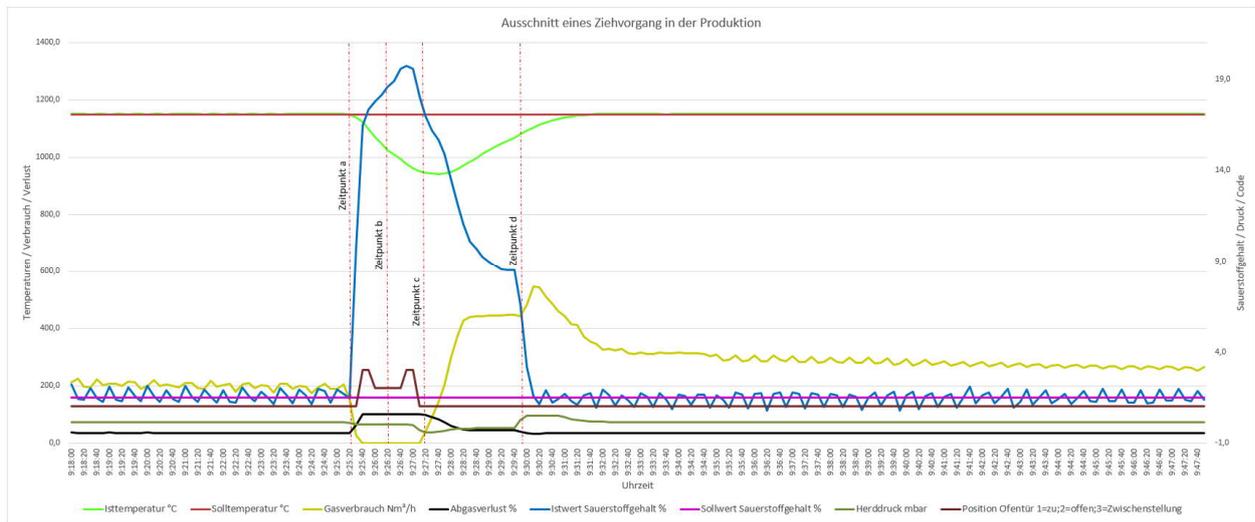


Abbildung 35: Ausschnitt eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.

Zeitpunkt a:

Beim Zeitpunkt a wird die Ofentüre für die Entnahme des Materiales geöffnet. Der Gasverbrauch der Thermoprozessanlage geht gegen null, da die Brenner auf inaktiv geschaltet sind. Die Ist-Temperatur nimmt ab und die Herddruckklappe wird geöffnet, um keine Abgase vom Ofenraum in die Produktionshalle

zu leiten. Der berechnete Abgasverlust steigt aufgrund des steigenden Sauerstoffgehaltes an, der aus der Sievert'schen Formel hervor geht.

Datum Uhrzeit Zeitpunkt	Ist- Temperatur	Soll- Temperatur	Gas- ver- brauch	Istwert Sauer- stoff- gehalt	Sollwert Sauer- stoffgehalt	Herd- druck	Position Ofentür	Abgas- verlust
	°C	°C	Nm³/h	%	%	mbar	1=Zu 2=Offen 3=Zwischen- stellung	%
14.10.2019 09:25:20 Zeitpunkt a	1149,9	1150	150	1,4	1,5	0,11	1	34

Tabelle 8: Messdaten zum Zeitpunkt a des Ausschnittes eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.

Zeitpunkt b:

Die Ofentüre ist offen und der Entnahmeprozess für die Produktion ist im Gange. Die Ist-Temperatur fällt weiterhin ab und lässt weiterhin den Sauerstoffgehalt im Ofenraum in die Nähe des Sauerstoffgehaltes der Atmosphäre steigen. In diesem Zeitpunkt ist die Regelung nicht mehr aktiv, weil die Vorbedingungen Herddruck und Gasverbrauch nicht mehr gegeben sind.

Datum Uhrzeit Zeitpunkt	Ist- Temperatur	Soll- Temperatur	Gas- ver- brauch	Istwert Sauer- stoff- gehalt	Sollwert Sauer- stoffgehalt	Herd- druck	Position Ofentür	Abgas- verlust
	°C	°C	Nm³/h	%	%	mbar	1=Zu 2=Offen 3=Zwischen- stellung	%
14.10.2019 09:26:20 Zeitpunkt b	1025,2	1150	0	18,6	1,5	0,03	2	100

Tabelle 9: Messdaten zum Zeitpunkt b des Ausschnittes eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.

Zeitpunkt c:

Die Position der Ofentüre ist geschlossen und somit sind die Brenner wieder freigegeben. In diesem Zeitpunkt ist die Freigabe für den Sauerstoffregler noch nicht aufrecht. Der Gasverbrauch steigt durch die Vorgabe der Zonenregler-Stellgrößen, um die Differenz zwischen Ist-Temperatur und Soll-Temperatur auszugleichen. Durch den Verbrennungsprozess der Thermopropzessanlage steigt der Herddruck im Ofenraum an und baut einen leichten Überdruck auf, um Fehlerquellen wie Undichtheiten an der Ofentür und dem Herdwagen zu vermeiden.

Datum Uhrzeit Zeitpunkt	Ist- Temperatur	Soll- Temperatur	Gas- ver- brauch	Istwert Sauer- stoff- gehalt	Sollwert Sauer- stoffgehalt	Herd- druck	Position Ofentür	Abgas- verlust
	°C	°C	Nm³/h	%	%	mbar	1=Zu 2=Offen 3=Zwischen- stellung	%
14.10.2019 09:27:20 Zeitpunkt c	945,7	1150	39	17,0	1,5	-0,42	1	99

Tabelle 10: Messdaten zum Zeitpunkt c des Ausschnittes eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.

Zeitpunkt d:

Der Zeitpunkt d ist der Zeitpunkt in dem die Sauerstoffregelung deren Vorbedingungen aktiv werden lässt und in die Warmluftkompensation einschreitet. Der Gasverbrauch steigt weiterhin an und lässt den Sauerstoffgehalt Istwert in Richtung seines vorgegebenen Sollwertes regeln. Der Mindestherddruck von 0,05 mbar, die Zonentemperatur von 800 °C und der Mindestgasverbrauch von 20 % der Gasmenge sind überschritten.

Die Ist-Temperatur steigt in Richtung des Sollwertes der Zonenregler. Durch Sinken des Sauerstoffgehaltes ist der Abgasverlust gesunken.

Der Sauerstoffgehalt regelt sich ein und bleibt in seinem Bereich des Sollwertes.

Datum Uhrzeit Zeitpunkt	Ist- Temperatur	Soll- Temperatur	Gas- ver- brauch	Istwert Sauer- stoff- gehalt	Sollwert Sauer- stoffgehalt	Herd- druck	Position Ofentür	Abgas- verlust
	°C	°C	Nm³/h	%	%	mbar	1=Zu 2=Offen 3=Zwischen- stellung	%
14.10.2019 09:29:50 Zeitpunkt d	1080,8	1150	443	6,6	1,5	0,27	1	41

Tabelle 11: Messdaten zum Zeitpunkt d des Ausschnittes eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.

7.10 Wartung und Instandhaltung

Die Wartung und Instandhaltung des ganzen Messprinzips beschreibt lediglich die Sauerstoffsonde direkt. Die Komponenten wie Messumformer, Signalleistungen sind keine wartungsgebundenen Bauteile und erfordern nur bei einem Defekt einen Reparaturingriff.

Wartung unter Betrieb der Thermoprozessanlage:

Bei Betrieb der Anlage ist die InLine-Sonde in der Thermoprozessanlage eingebaut. Eine Wartung der Sonde ist laut Hersteller nicht vorgesehen, sondern nur eine Kontrolle vom Hersteller zur Überprüfung einer Abweichung. Eine Abweichung der Messsignale führt zu einer falschen Auswertung des Sauerstoffwertes

und in weiterer Folge zu einem unerwünschten Prozess der Verbrennung. Durch die Abweichung des Sauerstoffwertes kann es zu einer unterstöchiometrischen Verbrennung, zum sogenannten Gasüberschuss kommen. Dieser wirkt sich auf die Energiereduktion negativ aus. Im schlimmsten Fall führt dies zu einer Nachverbrennung im Rekuperator und zu einer Zerstörung des Wärmetauschers.

Während des Betriebes kann der Sauerstoffgehalt mittels Abgasanalysator verglichen werden. An dieser Stelle ist nochmals darauf hingewiesen, dass es zu einer Verzögerung der beiden Messwerte von der Sauerstoffsonde und dem Abgasanalysator kommen, weil die Messgasführungen unterschiedliche Erfassungs- und Auswertezeiten des Signales haben. Helfen kann man sich durch die Speicherung der Messwerte und durch das Übereinanderlegen der beiden Kurven in einem Auswerteprogramm.

Wartung bei Stillstand der Thermoprozessanlage:

In den Stillstandszeiten der Anlage, in denen die Thermoprozessanlage für Revisionen, Wartungen oder Inspektionen außer Betrieb ist und die Ofenraumtemperatur in den Bereich der Umgebungstemperatur abgesenkt wurde, kann die Sauerstoffsonde ausgebaut werden. Die elektrischen Anschlüsse müssen für die optische Kontrolle nicht abgeschlossen werden. Bei der optischen Kontrolle der InLine-Sonde wird auf Verlegungen durch Alkalien wie Gießpulver geachtet.

Sind die Ein- und Ausgänge des Zirkoniumoxidrohres verlegt, liefert die Sonde falsche Signale zum Messumformer. Ist die Sonde durch Alkalien verlegt oder das Keramikrohr gebrochen, ist diese zu erneuern.

Kann der Ofenraum betreten werden und ist die Sonde an der Messgasführung ersichtlich, so muss die Sonde nicht zwangsmäßig ausgebaut werden.

Im ausgebauten und elektrisch abgeschlossenen Zustand ist es möglich, die InLine-Sonde an den Hersteller zu senden und überprüfen zu lassen. Ist das Equipment im Unternehmen selbst vorhanden, wie ein Prüfofen, die Auswerteeinheit und der Messumformer, kann dies im Unternehmen selbst auf die korrekte Funktionalität geprüft werden. Demzufolge wird noch ein Prüfgas benötigt, dass entweder in den Prüfofen eingeführt oder direkt an der Sonde, an der Referenzluft angeschlossen wird. Der Prüfofen ist erforderlich, um die Betriebstemperatur der Sonde von mindestens 600 °C zu erreichen.

8 ENERGIE- UND KOSTENREDUKTION

In diesem Kapitel wird die Energiereduzierung von Erdgas vor und nach der Umsetzung der Sauerstoffregelung rechnerisch beschrieben. In weiterer Folge ergibt sich aus der Erdgasreduktion eine Kostensenkung an benötigtem Erdgas für die Thermoprozessanlage. Zu guter letzt wird die Amortisationszeit der Umsetzung und die Realisierung auf Einhaltung des Unternehmens überprüft. Die Amortisationszeit beträgt für solch ein Projekt zwei Jahre, wobei die Realisierungszeit ein Jahr beträgt.

Die Ermittlung der Energiekostenreduktion gestaltet sich aufgrund des unterschiedlichen Produktsortimentes sehr schwierig. In diesem kurzen Zeitraum ist es fast unmöglich, die gleiche Charge an Edelstahl mit der gleichen Tonnage und Heizkurve sowie Betriebstemperatur anzutreffen. In diesem Fall wurden zwei ähnliche Heizkurven für die Gegenüberstellung der Energie- und Kostenreduktion verwendet. Zudem ist man an die Energiereduktion durch zwei unterschiedliche Berechnungen herangetreten. Die erste Berechnung erfolgt zum Zeitpunkt 3 der Ist-Analyse und der Analyse nach Umsetzung. Die zweite Berechnung umfasst beide beschriebenen vollständigen Diagramme, die in der Arbeit vorhanden sind.

Energiereduktion zum Zeitpunkt 3 der Ist-Analyse und der Analyse nach Umsetzung:

Wie bereits erwähnt, wird zu Veranschaulichung ein aktueller Zeitpunkt in den beiden Diagrammen verwendet. Die Werte der beiden Zeitpunkte sind in der Tabelle nochmals ersichtlich.

Analyse Datum Uhrzeit Zeitpunkt	Ist-Temperatur	Soll-Temperatur	Gasverbrauch	Brennluftverbrauch	Abgas-temperatur	Sauerstoffgehalt	Verbrennungslufttemperatur	Abgasverlust
	°C	°C	Nm³/h	Nm³/h	°C	%	°C	%
Ist-Analyse 18.08.2019 07:00 Zeitpunkt 3	1130	1130	100	1394	603	7,73	277	50,09
Analyse nach Umstellung 17.09.2019 02:00 Zeitpunkt 3	1180,35	1180,00	185,30	2100,15	537,73	1,56	375,90	34,58

Tabelle 12: Werte für die Berechnung der Energiereduktion zum Zeitpunkt 3, Quelle: Eigene Darstellung.

$$\begin{aligned} \text{Berechnung der Einsparung} \\ \text{zum Zeitpunkt 3 in \%} \end{aligned} \quad \Delta q_A = \frac{(-Q_{A,0} + Q_A)}{1 - Q_A} \quad (8.1)$$

$$\Delta q_A = \frac{(-34,58 + 50,09)}{1 - 50,09}$$

$$\Delta q_A = 31,07 \%$$

$\Delta q_A/\%$ Differenz Abgasverluste zum Zeitpunkt 3

$Q_{A,0}/\%$ Abgasverlust der Ist-Analyse

$Q_A/\%$ Abgasverlust der Analyse nach Umstellung

Die Einsparung zu diesem Zeitpunkt wird nun mit dem Bezug von Erdgas anhand der Analyse nach Umstellung multipliziert. Dadurch ergibt sich der eingesparte Erdgasverbrauch in Kubikmeter.

Berechnung der Einsparung
zum Zeitpunkt 3 in m^3

$$\Delta Q_B = \Delta q_A * Q_B \tag{8.2}$$

$$\Delta Q_B = 31,07 * \frac{185,3}{60 \text{ min}}$$

$$\Delta Q_B = 0,9595 \text{ m}^3$$

- $\Delta Q_B/m^3$ Einsparung von Erdgas zum Zeitpunkt 3
- $\Delta q_A/\%$ Differenz Abgasverluste zum Zeitpunkt 3
- Q_B/m^3 aktueller Gasverbrauch laut Analyse nach Umstellung

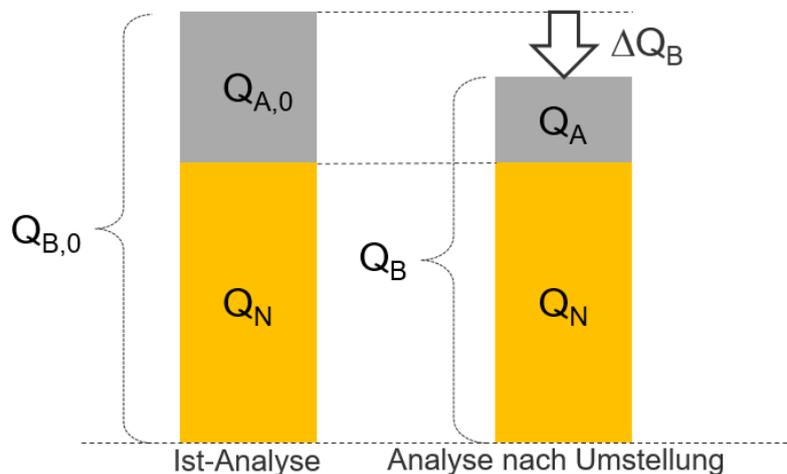


Abbildung 36: Einsparung von Erdgasverbrauch, Quelle: Eigene Darstellung.

Die beiden Säulen zeigen jeweils den gesamt eingesetzten Erdgasverbrauch Q_B . Die verfügbaren Wärmeverluste Q_N wirken durch Konvektion und Strahlung auf das Material, Ofenwände und Herdwagen gleich ein. Die Verlustwärme, hier Abgasverlust genannt, die über den Abgastrakt und anschließend über den Kamin verloren geht, wird als Q_A beschrieben. Die Abgasverluste sind durch die Sauerstoffregelung unterschiedlich, wie bereits die vorherigen Berechnungen gezeigt haben. Die Differenz der beiden Abgasverluste lässt den eingesetzten Erdgasverbrauch um das ΔQ_B sinken. In diesem Fall ist das die Energiereduktion von Erdgas zum Zeitpunkt 3 von $0,9595 \text{ m}^3$.

Energie- und Kostenreduktion der Heizkurven von der Ist-Analyse und der Analyse nach Umsetzung:

Bei dieser Berechnung werden die gesamten Heizkurven der beiden Diagramme verwendet. Es wurde minütlich ausgewertet und zu jedem Zeitpunkt, der Abgasverlust berechnet und daraus wieder der durchschnittliche Abgasverlust als Summe für die Berechnung benutzt.

Analyse Datum Uhrzeit	Ist-Temperatur	Soll-Temperatur	Gasverbrauch	Brennluftverbrauch	Abgas-temperatur	Sauerstoffgehalt	Verbrennungslufttemperatur	Abgasverlust
	°C	°C	Nm³/h	Nm³/h	°C	%	°C	%
Ist-Analyse 17.08.2019 17:00- 18.08.2019 10:00	996,24	996,39	136,98	1838,38	601,79	6,66	255,56	43,40
Analyse nach Umstellung 16.09.2019 14:00- 17.09.2019 11:00	1031,28	1032,43	164,90	1903,25	383,14	2,59	282,21	34,16

Tabelle 13: Werte für die Berechnung der Energiereduktion der beiden gesamten Heizkurven, Quelle: Eigene Darstellung.

Berechnung der Einsparung
der beiden Heizkurven in %

$$\Delta q_A = \frac{(-Q_{A,0} + Q_A)}{1 - Q_A} \quad (8.3)$$

$$\Delta q_A = \frac{(-34,16 + 43,40)}{1 - 43,40}$$

$$\Delta q_A = 16,32 \%$$

$\Delta q_A / \%$ Differenz Abgasverluste der beiden gesamten Heizkurven

$Q_{A,0} / \%$ Abgasverlust der Ist-Analyse

$Q_A / \%$ Abgasverlust der Analyse nach Umstellung

Die Einsparung der gesamten Heizkurve wird nun mit dem Bezug von Erdgas anhand der Analyse nach Umstellung multipliziert. Der Erdgasverbrauch in der Berechnung wird als durchschnittlicher Verbrauch in Nm³/h angegeben. Dadurch ergibt sich der eingesparte Erdgasverbrauch in Normkubikmeter pro Stunde.

Berechnung der Einsparung der
beiden Heizkurven in Nm³/h

$$\Delta Q_B = \Delta q_A * Q_B \quad (8.4)$$

$$\Delta Q_B = 16,32 * 164,90$$

$$\Delta Q_B = 26,91 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$\Delta Q_B/\text{Nm}^3/\text{h}$ Einsparung von Erdgas der beiden gesamten Heizkurven

$\Delta q_A/\%$ Differenz Abgasverluste der beiden gesamten Heizkurven

$Q_B/\text{Nm}^3/\text{h}$ eingesparter Gasverbrauch pro Stunde laut Analyse nach Umstellung

Wegen der ungleichen Heizzeiten der beiden Heizkurven wird für die weitere Berechnung der Kostenreduktion die kürzere Heizdauer von 17 Stunden gewählt. Da der tatsächliche Erdgaspreis aus dem Unternehmen nicht in der Arbeit erscheinen darf, wird für die vereinfachte Berechnung mit einem Preis von 0,5 € pro Kubikmeter Erdgas gerechnet.

$$\begin{array}{l} \text{Kosteneinsparung pro} \\ \text{Heizkurve in €} \end{array} \quad K_{HK} = \Delta Q_B * \text{Erdgaspreis} * \text{Heizdauer} \quad (8.5)$$

$$K_{HK} = 26,91 * 0,5 * 17$$

$$K_{HK} = 228,74 \text{ €}$$

$K_{HK}/\text{€}$ Kosteneinsparung pro Heizkurve

$\Delta Q_B/\text{Nm}^3/\text{h}$ eingesparter Gasverbrauch pro Stunde laut Analyse nach Umstellung

$\text{Erdgaspreis}/\text{€}$ Erdgaspreis pro Kubikmeter

$\text{Heizdauer}/\text{h}$ Heizdauer der Heizkurve

Rechnet man in diesem Fall die Einsparung hoch auf ein Jahr, wobei die Heizdauer 17 Stunden beträgt und sieben Mal in der Woche verfahren wird sowie ausgehend von insgesamt 46 Betriebswochen der Thermoprozessanlage, ergibt dies eine Energie- und Kostenreduktion für das gesamte Jahr. Die Thermoprozessanlage ist in der Sommerzeit 4 Wochen und in der Winterzeit 2 Wochen für Reparaturarbeiten außer Betrieb.

$$\begin{array}{l} \text{Energiereduktion pro} \\ \text{Jahr in Nm}^3/\text{h} \end{array} \quad ER_J = \Delta Q_B * \text{Heizdauer} * \text{Tage} * \text{Betriebswochen} \quad (8.6)$$

$$ER_J = 26,91 * 17 * 7 * 46$$

$$ER_J = 147.305,34 \text{ Nm}^3/\text{a}$$

$ER_J/\text{Nm}^3/\text{a}$ Energiereduktion pro Jahr

$\Delta Q_B/\text{Nm}^3/\text{h}$ eingesparter Gasverbrauch pro Stunde laut Analyse nach Umstellung

$\text{Heizdauer}/\text{h}$ Heizdauer der Heizkurve

Tag/d Anzahl der Tage

$\text{Betriebswochen}/\text{w}$ Anzahl der Wochen

$$\text{Kostenreduktion pro Jahr in €} \quad KR_J = ER_J * \text{Erdgaspreis} \quad (8.7)$$

$$KR_J = 147.305,34 * 0,5$$

$$KR_J = 73.652,67 \text{ €/a}$$

$KR_J/\text{€/a}$	Kostenreduktion pro Jahr
$ER_J/\text{Nm}^3/\text{a}$	Energiereduktion pro Jahr
$\text{Erdgaspreis}/\text{€}$	Erdgaspreis pro Kubikmeter

Amortisationszeit:

Für die Umsetzung der Sauerstoffregelung an der Thermoprozessanlage ist eine maximale Amortisationszeit von zwei Jahren durch das Unternehmen fixiert. Der errechnete Energiereduktionsbetrag von 80.000 € pro Jahr wurde anhand der ersten Berechnungen vor der Umsetzung und Projektierung erstellt. Mit diesem Betrag wird das Budget für die Umsetzung der Sauerstoffregelung errechnet. Somit sind 160.000 € der gesamte Betrag des Amortisationszeitraumes, wobei davon ein Viertel des Betrages als Budget für die Umsetzung herangezogen werden kann. Die Umsetzung ist dennoch in einem Jahr zu realisieren und zwar mit einem Budget von 40.000 €.

Die Kosten für den Aufwand der Sauerstoffregelung ist in annähernd realistischen Preisen angeführt. Der Zeitaufwand für die Umsetzung einer Sauerstoffregelung kann wegen der unterschiedlichen bestehenden Komponenten und Bauweise der Thermoprozessanlage weitläufig abweichen.

Materialkosten				
Stück	Hersteller / Artikel			€
1	Thermo-Control / Sauerstoffsonde Thermo-Control 500mm			2.200
1	PMA / Sauerstoffsonde Thermo-Control 500mm			500
1	Allfälliges / Leitungen, Klemmen, Kleinteile			300
Summe Material				3.000
Arbeitszeitkosten				
Gruppe	Art der Arbeit	Stunden	€/h	€
E-Konstrukteur	elektrische Planung	16	75	1.200
Elektrotechnik	Verdrahtungsarbeiten, Kabelbeschriftung, etc.	32	65	2.080
Mess-Regeltechnik	Konfiguration und Parametrierung PMA CI45, Inbetriebnahme, Signalüberprüfung	16	70	1.120
Mess-Regeltechnik	Vergleichsmessung der Sauerstoffsonde mittels Abgasanalysator	16	70	1.120
Mess-Regeltechnik	Änderung und Aufnahme der Brenneinstellungen, Inbetriebnahme Sauerstoffregelung	160	70	11.200
Mess-Regeltechnik	Projektengineering	30	80	2.400
Automatisierung	Soft-und Hardware (Programmierung Regler, Visualisierung)	24	75	1.800
Maschinenbautechnik	Metallarbeiten, Schweißarbeiten, Öffnung bei FF-Material (Anfertigung Halterung f. Sonde)	16	60	960
Summe Arbeitszeit				21.880
Gesamtsumme				24.880

Tabelle 14: Gesamtkosten für den Umbau einer Sauerstoffregelung an einer Thermoprozessanlage, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus den Kosten für den Umbau zur Sauerstoffregelung und den eingesparten Kosten, ergibt sich die Amortisationszeit für den Umbau der Thermoprozessanlage. Der Schnittpunkt dieser zwei Linien ergibt die Amortisationszeit in Monaten, in der sich der Aufwand in Relation zur Einsparung rentiert. Der Schnittpunkt vom Budget für den Umbau und die errechnete Kostenreduktion ergeben die maximale Amortisationsdauer für die Sauerstoffregelung an der erdgasbeheizten industriellen Thermoprozessanlage.

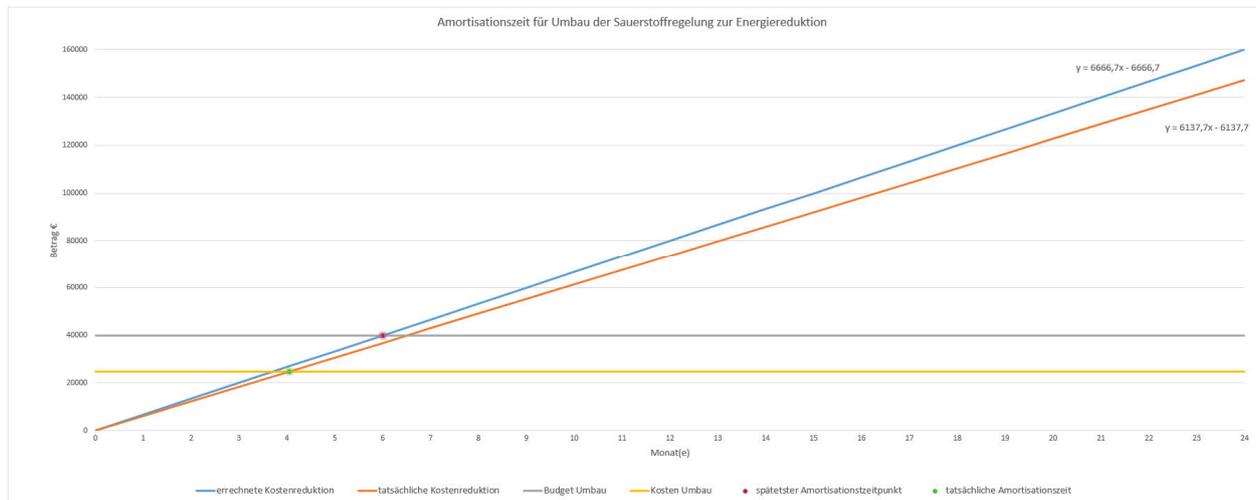


Abbildung 37: Amortisationszeit für den Umbau der Sauerstoffregelung zur Energiereduktion, Quelle: Eigene Darstellung.

Anhand der Faktoren und Werte aus dem Diagramm der Amortisationszeit kann die Steigung der tatsächlichen Kostenreduktion entnommen werden. Dadurch ergibt sich die Dauer der Amortisation.

Tatsächliche Amortisationszeit $AZ_t = \frac{Kosten_U}{k}$ (8.7)

$$AZ_t = \frac{24.880}{6137,7}$$

$$AZ_t = 4,05 \text{ Monate}$$

AZ_t/M Amortisationszeit in Monat

$Kosten_U/€$ Kosten Umbau

$k/€/M$ Steigung der tatsächlichen Kostenreduktion

Kurz nach 4 Monaten hat sich der Umbau für die Sauerstoffregelung an der Thermoprozessanlage amortisiert. Die maximale Zeit für die Amortisation, das ist der Punkt, wo sich die Linien der errechneten Kostenreduktion und das Budget für den Umbau überschneiden, beträgt 6 Monate. Dadurch kann der Schluss gezogen werden, dass durch die entstandenen Kosten für den Umbau und die tatsächliche Kostenreduktion die Amortisationszeit eingehalten wurde.

9 ERGEBNIS / AUSBLICK

Ergebnis:

Wie die Arbeit gezeigt hat, ist durch Eingriff in die Warmluftkompensation eine Änderung der Stellantriebe möglich. Um die Position der Stellantriebe zu ändern, ist eine Sauerstoffregelung der Thermoprozessanlage beigefügt worden. Diese korrigiert den Sauerstoff-Istwert auf den Sauerstoff-Sollwert von 1,5 % und ändert somit die Position des Stellantriebes durch Eingriff in die Warmluftkompensation. Durch die Senkung des Sauerstoff-Istwertes im Ofenraum konnte eine Energie- und Kostenreduktion der Thermoprozessanlage erreicht werden.

Für die Messung des Sauerstoffgehaltes gibt es eine InLine-Sonde aus Zirkoniumoxid mit externer Beheizung, die Lambda-Sonde mit integrierter Beheizung und die Infrarotmessung für die Sauerstoffkonzentration. Für den von mir gewählten Anwendungsfall wurde die InLine-Sonde aufgrund ihrer Eigenschaften und einfachen Verwendung gewählt.

Eine Steigerung der Energieeffizienz an einer erdgasbeheizten industriellen Thermoprozessanlage ist durch eine Substitution der Brennertechnik durchgeführt worden. Dabei musste ein hohes Budget in Anspruch genommen werden. Eine Substitution der Brennertechnik bestand zum Beispiel darin, die Thermoprozessanlage mit einer Kaltluftbrennertechnik, in eine Thermoprozessanlage mit Warmluftbrennertechnik auszustatten. Dadurch wurde die Thermoprozessanlage aufgrund ihres Wärmetauschers im Energieverbrauch effizienter.

Eine Energieeinsparung ist bis auf den Regeneratorbrenner bei jeder Brennertechnik möglich, weil dieser durch den Wärmetauscher aus Keramikwaben bereits auf dem Stand der Technik eine sehr hohe Effizienz besitzt. Nicht nur durch die Technik des Wärmetauschers, sondern auch durch die Brennertechnik ist bei dieser wegen der Gleichdruckregelung von Luft und Erdgas keine Umstellung auf eine Sauerstoffregelung möglich. Die Sauerstoffregelung ist nur an der Kaltluftbrennertechnik, Warmluftbrennertechnik und Rekuperatorbrennertechnik möglich. Je nach Ausstattung und Komponenten der Anlage kann die Herangehensweise für eine Sauerstoffregelung unterschiedlich sein. Für den Rekuperatorbrenner stellt sich die Umsetzung als sehr schwierig dar, weil durch die Zunahme der Rekuperatortemperatur fast keine Effizienzsteigerung mehr möglich ist.

Um eine unterstöchiometrische Verbrennung zu vermeiden, welche in weiterer Folge den Wärmetauscher durch die Nachverbrennung im Abgastrakt zerstört, ist eine Überwachung in der speicherprogrammierbaren Steuerung vorhanden. Tritt eine unterstöchiometrische Verbrennung über eine längere als die vorgegebene Zeit ein, wird die Beheizung gesperrt und eine Störmeldung im Meldepuffer ausgegeben.

Durch diese Sauerstoffregelung kann mit einem geringen Aufwand an der Thermoprozessanlage eine hohe Energie- und Kostenreduktion erzielt werden. Diese ist je nach Ofenbauart und verfügbaren Komponenten entsprechend anzupassen.

Die Kontrolle der Brennerdüse auf deren Verschleiß ist erst im Jahresübergang bei der Revision ersichtlich.

Die Investition der Sauerstoffregelung an der Thermoprozessanlage hat sich auf jeden Fall gerechnet, weil mit einem niedrigen Budget eine hohe Effizienzsteigerung erzielt werden konnte.

Ausblick:

Mit dem Sauerstoffregler kann somit auch auf Kundenwünsche für einen bestimmten Sauerstoffgehalt im Ofenraum eingegangen werden. Je nach Material kann eine Verzunderung aufgrund des Sauerstoffgehaltes schneller oder langsamer erfolgen.

Um an anderen erdgasbeheizten industriellen Thermoprozessanlagen eine Energie- und Kostenreduktion erreichen zu können, ist angedacht, nicht die Brennluftmenge, sondern den Gasdruck oder den Brennluftdruck zu verändern.

Die Sauerstoffregelung wird an den weiteren Thermoprozessanlagen aufgrund der tollen Erkenntnisse und Erfahrung installiert. Das Unternehmen ist aufgrund dieser Energie- und Kosteneinsparung sowie des Erfolgs dieses Projektes sehr zufrieden.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (18)

Baehr, Hans; Stephan, Karl (2016): *Wärme- und Stoffübertragung*, 9. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Blesl, Markus; Kessler, Alois (2017): *Energieeffizienz in der Industrie*, 2. Auflage, Springer-Verlag GmbH Deutschland 2013, 2017, Deutschland

Görner, E. (2018): *Energietechnik und -wirtschaft*, in: Grote, Karl-Heinrich; Bender, Beate; Göhlich, Dietmar (Hrsg.): *Dubbel*, Springer Vieweg, Essen

Günther, Rudolf (1974): *Verbrennung und Feuerung*, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Hering, Eckbert; Schönfelder, Gert (2012): *Sensoren in Wissenschaft und Technik*, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012, Wiesbaden

Herwig, Heinz; Moschallski, Andreas (2014): *Wärmeübertragung*, 3. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden

Hesse, Stefan; Schnell, Gerhard (2009): *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation*, 4. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden

Hoffmann, Jörg (2012): *Handbuch der Messtechnik*, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag München, Osnabrück

Joos, Franz (2006): *Technische Verbrennung*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg

Körtvélyessy, László (1998): *Thermoelement Praxis*, 3. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen - 1998, Essen

Langeheinecke, Klaus; Jany, Peter; Thieleke, Gerd (2011): *Thermodynamik für Ingenieure*, 8. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

Pehnt, Martin (2010): *Energieeffizienz*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Rebhan, Eckhard (2002): *Energiehandbuch*, 1. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Schramek, Ernst-Rudolf (2007): *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik*, 73. Auflage, Oldenburg Industrieverlag GmbH, Oldenburg

Schmusch, Wolfgang (2005): *Elektronische Meßtechnik*, 6. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg

Stephan, K.; Stephan, P. (2018): *Thermodynamik*, in: Grote, Karl-Heinrich; Bender, Beate; Göhlich, Dietmar (Hrsg.): *Dubbel*, Springer Vieweg, Darmstadt, Stuttgart

van Basshuysen, Richard (2015): *Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb*, Springer Vieweg, Wiesbaden

von Böckh, Peter; Wetzel, Thomas (2015): *Wärmeübertragung*, 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Wosnitza, Franz; Hilgers, Hans (2012): *Energieeffizienz und Energiemanagement*, Springer+Teubner Verlag, Wiesbaden

Wünning, Joachim G.; Milani, Ambrogio (2007): *Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen*, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Online-Quellen (14)

Elster GmbH (2017): <https://www.kromschroeder.de/>

<https://docuthek.kromschroeder.com/documents/download.php?lang=de&doc=58168> [Stand: 9.9.2019]

Robert Bosch GmbH (2018): https://de.bosch-automotive.com/de/startpage_1/startpage_1

<https://aa-boschap->

de.resource.bosch.com/media/de/commonly_used_media/common_media/ap_common/parts/de_6/engine_systems__auto_parts_1/gasoline__engine_systems_1/folder_lambdasonden_pruefen_und_wechseln.pdf [Stand: 22.09.2019]

Metrotec GmbH (2019): <https://metrotec.eu/sauerstoffmesssensoren2.html>

<https://metrotec.eu/media/files/diagramme/Kennlinie.pdf> [Stand: 01.10.2019]

Bloom Engineering (2009): <https://www.bloomeng.com/search>

https://www.bloomeng.com/uploads/pdf_files/1029%20%20Catalog.pdf [Stand: 09.09.2019]

IBS Industrie-Brenner-Systeme GmbH; (2011): <https://www.ibs-brenner.de/rekuperatorbrenner-recufire.php>

https://www.ibs-brenner.de/download/IBS_RECUFIRE_M_400-D_GB.pdf [Stand: 09.09.2019]

Elster GmbH (2018): <https://www.kromschroeder.de>

<https://docuthek.kromschroeder.com/documents/index.php?folder=203110&lang=de&menuid=29&selclass=&sellang=&topmenu=0> [Stand: 24.09.2019]

Elster GmbH (2011): <https://www.kromschroeder.de/>

https://www.kromschroeder.de/wp-content/uploads/2017/11/wpr_keramik_de.pdf [Stand: 09.09.2019]

Elster GmbH (2017): <https://www.kromschroeder.de/>

https://www.kromschroeder.de/wp-content/uploads/2017/11/wpr_metall_d.pdf [Stand: 09.09.2019]

WS Wärmeprozessstechnik GmbH (2001):

https://www.newcast.de/vis/v1/de/exhibitors/GMTN2019.2574026#vis__prodinfo_RO00QtuuQAq1ddQIfC7zjg

https://flox.com/documents/de_C150.pdf [Stand: 09.09.2019]

Sick AG (2015): <https://www.sick.com/at/de/>

https://cdn.sick.com/media/docs/0/00/300/Product_information_TRANSIC100LP_de_IM0039300.PDF [Stand: 21.09.2019]

thermo-control Körtvélyessy GmbH (2016): <https://www.thermo-control.com/>

https://www.thermo-control.com/wp-content/uploads/2018/08/Produktkatalog_Sauerstoffsonden_2016.pdf [Stand: 22.09.2019]

PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH (2009): <https://www.west-cs.de>

<https://www.west-cs.de/assets/DE-Manuals/PMA-CI45-Bedienungsanleitung-deutsch-9499-040-71718.pdf> [Stand: 23.09.2019]

PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH (2019): *Software BlueControl*

<https://www.west-cs.de/downloads/software-setup-datenaufzeichnung-und-prozessueberwachung/software-pma-produkte/> [Stand: 23.09.2019]

Elster GmbH; (2019): <https://www.kromschroeder.de/>

<https://www.kromschroeder.de/marketing/adlatus/gasburners/gasburners.html?sprache=0> [Stand: 03.10.2019]

Normen (2)

SAE International Group (Hrsg.) (2012): *AMS 2750 E Aerospace Specification Revision E*

Austrian Standards Institute (Hrsg.) (2011): *Industrielle Thermoprozessanlagen*

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Energieflussbild im Ofenraum, Quelle: Blesl/Kessler (2012), S. 197.....	5
Abbildung 2: Zusammensetzung der Erdatmosphäre, Quelle: Eigene Darstellung.....	8
Abbildung 3: Wesentliche Bestandteile eines Brenners, Quelle: Eigene Darstellung. ... Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Abbildung 4: Kaltluftbrenner Elster GmbH, Quelle: Eigene Darstellung.....	20
Abbildung 5: Warmluftbrenner, Quelle: Bloom Engineering (2009), Online-Quelle [09.09.2019] (leicht modifiziert).....	23
Abbildung 6: Rekuperatorbrenner, Quelle: WS Wärmeprozessestechnik GmbH (2001), Online-Quelle [09.09.2019].....	24
Abbildung 7: Regeneratordbrenner Paar, Quelle: IBS Industrie-Brenner-Systeme GmbH, Online-Quelle [26.08.2019].....	27
Abbildung 8: Brennerkomponenten Herdwagenofen mit Warmluftbrenner, Quelle: Eigene Darstellung. ...	28
Abbildung 9: Beheizungsschema Herdwagenofen mit Warmluftbrenner, Quelle: voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG intern (leicht modifiziert).....	30
Abbildung 10: Anteile der Energieträger in Österreich in Prozent, Quelle: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2018), Online-Quelle [23.08.2019].....	31
Abbildung 11: Energieflussdiagramm voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG, Quelle: voestalpine Böhler Edelstahl GmbH & Co KG intern.....	32
Abbildung 12: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad der Brennertypen, Quelle: Eigene Darstellung.....	35
Abbildung 13: Diagramm der Analyse des Ist-Zustandes, Quelle: Eigene Darstellung.....	37
Abbildung 14: Energiemehrverbrauch bei variierender Luftzahl λ , Quelle: Thermoprocess Symposium (2011), S. 8 (leicht modifiziert).....	38
Abbildung 15: Warmluftkompensation ohne Eingriff des Sauerstoffreglers, Quelle: Eigene Darstellung...	40
Abbildung 16: Warmluftkompensation mit Eingriff des Sauerstoffreglers, Quelle: Eigene Darstellung.....	40
Abbildung 17: Sauerstoffsonde, Quelle: thermo-control Körtvélyessy GmbH (2016), Online-Quelle [22.09.2019].....	43
Abbildung 18: Fingersonde, Quelle: Robert Bosch GmbH (2018), Online-Quelle [22.09.2019].....	44
Abbildung 19: Laser-Sauerstofftransmitter TRANSIC100LP, Quelle: Sick AG (2015), Online-Quelle [21.09.2019].....	45
Abbildung 20: Messumformer Uniflex CI45, Quelle: PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH (2009), Online-Quelle [23.09.2019].....	46
Abbildung 21: Stellantrieb IC40 mit Drosselklappe, Quelle: Elster GmbH (2018), Online-Quelle [24.09.2019].....	48

Abbildung 22: Betriebsart 26 von Stellantrieb IC40, Quelle: Elster GmbH (2018), Online-Quelle [24.09.2019] (leicht modifiziert).....	48
Abbildung 23: Befundbericht SN120325 Sauerstoffsonde von Gießpulver angegriffen thermo-control Körtvélyessy GmbH, Quelle: Körtvélyessy GmbH.....	50
Abbildung 24: Befundbericht SN120325 Platin durch Ablagerung angegriffen thermo-control Körtvélyessy GmbH, Quelle: Körtvélyessy GmbH.	51
Abbildung 25: Eingebaute Sauerstoffsonde mit Spülungen und Hitzeschutzblech, Quelle: Eigene Darstellung.	51
Abbildung 26: Aufbau Messumformer, Quelle: Eigene Darstellung.	52
Abbildung 27: Kennlinie des Sauerstoffsensors, Quelle: Metrotec GmbH (2019), Online-Quelle [01.10.2019].....	53
Abbildung 28: Brennerkurve ZIO165KBL, Quelle: Elster GmbH, Online Quelle [03.10.2019].	56
Abbildung 29: KV-Wert über den Öffnungswinkel des Stellantriebes IC40, Quelle: Eigene Darstellung. ..	58
Abbildung 30: Warmluftkompensation Thermoprozessanlage, Quelle: Eigene Darstellung.....	59
Abbildung 31: Regelkreis Sauerstoffregler der Thermoprozessanlage, Quelle: Eigene Darstellung.	59
Abbildung 32: Sauerstoffregler Thermoprozessanlage, Quelle: Eigene Darstellung.	60
Abbildung 33: Analyse nach Umstellung der Sauerstoffregelung, Quelle: Eigene Darstellung.	66
Abbildung 34: Entnahmevergange von Materialien an einer Thermoprozessanlage mit Herdwagen, Quelle: Eigene Darstellung.....	69
Abbildung 35: Ausschnitt eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.	69
Abbildung 36: Einsparung von Erdgasverbrauch, Quelle: Eigene Darstellung.	74
Abbildung 37: Amortisationszeit für den Umbau der Sauerstoffregelung zur Energiereduktion, Quelle: Eigene Darstellung.....	78

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Messwerte der Analyse des Ist-Zustandes, Quelle: Eigene Darstellung.....	37
Tabelle 2: Sensorspannung der Sauerstoffsonde, Quelle: Eigene Darstellung.....	47
Tabelle 3: Werte für die Berechnung des KV-Wertes über den Öffnungswinkel, Quelle: Eigene Darstellung.	57
Tabelle 4: Brenneinstellungen Ist-Aufnahme, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Tabelle 5: Orientierungsschritte zur Inbetriebnahme des Sauerstoffreglers, Quelle: Eigene Darstellung.....	64
Tabelle 6: Brenneinstellungen nach Umstellung, Quelle: Eigene Darstellung.....	65
Tabelle 7: Messwerte der Analyse nach Umstellung der Sauerstoffregelung, Quelle: Eigene Darstellung.	67
Tabelle 8: Messdaten zum Zeitpunkt a des Ausschnittes eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.....	70
Tabelle 9: Messdaten zum Zeitpunkt b des Ausschnittes eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.....	70
Tabelle 10: Messdaten zum Zeitpunkt c des Ausschnittes eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.....	71
Tabelle 11: Messdaten zum Zeitpunkt d des Ausschnittes eines Ziehvorganges in der Produktion, Quelle: Eigene Darstellung.....	71
Tabelle 12: Werte für die Berechnung der Energiereduktion zum Zeitpunkt 3, Quelle: Eigene Darstellung.	73
Tabelle 13: Werte für die Berechnung der Energiereduktion der beiden gesamten Heizkurven, Quelle: Eigene Darstellung.....	75
Tabelle 14: Gesamtkosten für den Umbau einer Sauerstoffregelung an einer Thermoprozessanlage, Quelle: Eigene Darstellung.....	77

ANHANG

