

ENTWICKLUNG UND EINSATZ EINES FLAMMENLOSEN BRENNERS IN DER SEKUNDÄRSCHMELZE VON ALUMINIUM

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,

gefördert unter dem Az: 28585-24/0

von

Dipl.-Ing. Herbert Bauer

Juni 2015

ANDRITZ FBB GmbH
Geschäftsführer

Breite Strasse 194
41238 Mönchengladbach
Funghini
Tel.: +49 2166 9700-400
Fax.: +49 2166 9700-444
welcome-fbb@andritz.com
www.andritz.com/fbb

Banken

Commerzbank AG Düsseldorf (BLZ 300 800 00) 105 447 800
IBAN DE 13 3008 0000 0105 4478 00 SWIFT - BIC: DRES DE FF 300

Deutsche Bank AG Düsseldorf (BLZ 310 700 01) 610860900
IBAN DE 08 3107 0001 0610 8609 00 SWIFT - BIC: DEUTDEDD310

Amtsgericht Mönchengladbach

HRB-Nr.: 12531
Ust.-IdNr.: DE 813601179

Finanzamt: Mönchengladbach
121/5702/5392

Cem Erisit
Dott. Augusto

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	28585	Referat	24/0	Fördersumme	391.449 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	------------------

Antragstitel **Entwicklung eines Schmelzverfahrens für die Sekundäraluminiumproduktion unter Einsatz der flammenlosen Verbrennung**

Stichworte Energieeinsparung, NOx-Minderung, Aluminiumabbrand Reduzierung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
12 Monate	01.11.2012	30.06.2015	1

Zwischenberichte	31.01.2013
	30.04.2013
	31.07.2013

Bewilligungsempfänger	FBB Engineering GmbH Breite Straße 194 D-41238 Mönchengladbach	Tel	02166-9700 400
		Fax	02166-9700 444
		Projektleitung	Taets v. Amerongen
		Bearbeiter	H. Bauer

Kooperationspartner Trimet Aluminium AG, Aluminiumallee 1, 45356 Essen
Inotherm Industrieofen- und Wärmetechnik GmbH,
Konstantinstraße 3, 41238 Mönchengladbach

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

- Reduzierung des Energieeinsatzes
- Reduzierung der CO₂- und NO_x-Emissionen
- Reduzierung des Abbrandverlustes des Einsatzmaterials (Aluminium)
- Einsatz von flammenlosen Brennern
- Prozessoptimierung

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

- Auslegung der Armaturen und Geräte für eine 650 kW flammenlose Beheizungseinrichtung an einem 5t Al-Schmelzofen mit 1 t/h Schmelzleistung
- Einplanung der flammenlosen Brenner am Schmelzofen
- Konstruktion der Beheizungseinrichtung
- Bestellung der Armaturen und Geräte
- Erstellung eines Pflichtenheftes für die Bestellung der EMSR-Technik
- Herstellung der Brenner
- Ausgangsversuche an einem bestehenden Ofen mit den Referenzchargen
- Montage der Gesamtanlage
- Inbetriebnahme der Gesamtanlage
- Schmelzversuche in Bezug zu den Referenzchargen
- Eventuell thermische Flammenbetrachtung
- Grenztests wie z.B. Erhöhung der Ofenraumtemperatur, Reduzierung der CO₂- und NO_x-Emissionen
- Optimierung der Anlagensteuerung
- Kontrolle der Gesamtanlage auf den technischen Zustand

Ergebnisse und Diskussion

a) Ergebnisse

- Die NO_x-Emissionen konnten, wie beabsichtigt, um ca. 30% reduziert werden. Die Reduzierung resultiert allerdings nur aus einer Minderung der Konzentration im Abgas, eine weitere Reduzierung über eine Energieeinsparung konnte bisher noch nicht erreicht werden.
- Der Energieeinsatz und damit auch die CO₂-Emissionen lagen zwischenzeitlich in einer ähnlichen Größenordnung wie in der Vergangenheit bereits im großtechnischen Maß erreicht (ca. 595 kWh/t). Mit der zuletzt getesteten Brennergeneration stieg beides jedoch wieder erheblich an. Die Reduzierung des Energieeinsatzes auf die angestrebten 490 kWh/t ist noch nicht absehbar.
- Der Einfluss der flammenlosen Verbrennung auf den Abbrand kann z.Zt. noch nicht näher beziffert werden, insbesondere deshalb, da aus Gründen der Vergleichbarkeit der bisherigen Ergebnisse nur mit sehr „sauberem“ Einsatzmaterial gearbeitet wurde.
- Die Schmelzleistung lag zwar zuletzt bei den o.e. 1 t/h, mit der 1. Brennergeneration lag sie allerdings schon mal bei ca. 1,2 t/h
- Grenztests, bei denen die Ofenvorwärmtemperatur und die max. Ofentemperatur beim Schmelzen erhöht wurden, zeigten einen vordergründig positiven Einfluss. In der Gesamtbilanz des Energieeinsatzes relativieren sich die Ergebnisse allerdings wieder auf ein sonst übliches Maß.

b) Diskussion

Als wesentliches Ziel wurde zum Ende des Projektes eine deutliche Reduzierung der NO_x-Emissionen erreicht. Die weiteren wesentlichen Ziele, insbesondere die Reduzierung des Energieeinsatzes und der CO₂-Emissionen, sind, wenn überhaupt, erst durch weitere gravierende Maßnahmen in der Brennertechnik zu erreichen. In welchem Zeitraum diese Ziele erreichbar sein könnten, ist aus heutiger Sicht noch nicht abschätzbar. Grundsätzlich müssten hierfür zunächst umfangreiche mathematische Betrachtungen durchgeführt werden.

Grundsätzlich kann jedoch aus heutiger Sicht gesagt werden, dass der Einsatz der flammenlosen Verbrennung, allein schon aus Sicht der NO_x-Minderung, sehr sinnvoll ist und seitens Andritz-FBB bereits in die Produktpalette aufgenommen wurde.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Beides wird z.Zt. noch nicht in Erwägung gezogen, da die Ergebnisse insgesamt noch nicht die Erwartungen erfüllen.

Fazit

Allein die Tatsache, dass bei den NO_x-Emissionen bereits eine erhebliche Reduzierung erreicht wurde und vermutlich noch allerhand Potential besteht, ist für Andritz-FBB Anlass genug, in dieser Richtung weitere Anstrengungen zu unternehmen. Darüber hinaus bleiben auch die Ziele einer Reduzierung des Energieeinsatzes und der CO₂-Emissionen im Fokus. Generell zeichnet sich bereits ab, dass die Konkurrenzfähigkeit von Andritz-FBB auf dem Brennermarkt durch den Einsatz der flammenlosen Verbrennung gesteigert werden kann.

Inhaltsverzeichnis

Seite 4 **Verzeichnis von Bildern, Diagrammen und Tabellen**

Seite 5 **Zusammenfassung**

Seite 6 **Einleitung**

Seite 8ff **Hauptteil**

Seite 24 **Fazit**

Seite 25 **Literaturverzeichnis**

Seite 26ff **Anhänge**

Verzeichnis von Bildern, Diagrammen und Tabellen

Seite 26	Tabelle 1:	Übersicht der Auslegungsparameter von bestehenden Öfen sowie der Auslegungsparameter des 5t-Ofens
Seite 27	Tabelle 2:	Ergebnisse der Testchargen am 5t-Ofen
Seite 28	Tabelle 3:	Vergleich der gemessenen Werte vom 5t-Ofen mit den Messwerten von bestehenden Öfen (incl. der Referenzwerte vom Ofen 7 bei Trimet)
Seite 29	Diagramm 1:	typischer Verlauf von NO _x bei Regenerativbrennern während mehrerer Feuerungszyklen
Seite 30	Diagramm 2:	typischer Verlauf von Sauerstoff bei Regenerativbrennern während mehrerer Feuerungszyklen
Seite 31	Diagramm 3:	typischer Verlauf von NO _x während eines Schmelzzyklus
Seite 32	Diagramm 4:	NO _x in Abhängigkeit von der Ofentemperatur
Seite 33	Bild 1:	Ofen, Frontansicht
Seite 34	Bild 2:	Ofen, Brennerseite
Seite 35	Bild 3:	chargierter Ofen
Seite 36	Bild 4:	Ofen mit Flüssigmetall
Seite 37	Bild 5:	Brennerübersicht; Basisausführung für den 5t-Ofen, welche bis Ende 2014 im Einsatz war
Seite 38	Bild 6:	Brennerübersicht; modifizierter Brenner für die Versuche ab Januar 2015
Seite 39	Bild 7:	Klassische Brennerbauform mit Brennerstein
Seite 40	Bild 8:	Brenner der ursprünglichen Ausführungsart mit defekten Keramikrohren
Seite 41	Bild 9:	Abgasanalysator

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Felderprobung wurde der Einsatz von flammenlosen Regenerativbrennern (= Brenner mit regenerativer Luftvorwärmung) an einem Aluminiumschmelzofen untersucht. Im Vorfeld hierzu fanden bereits die Entwicklung und Erprobung ähnlicher Brenner im Labor, allerdings mit rekuperativ vorgewärmter Verbrennungsluft, statt. Die hierbei erzielten Ergebnisse zeigen, dass durch die flammenlose Verbrennung ein erheblicher positiver Einfluss auf die NOx-Emissionen erzielt wurde. Die erhofften Verbesserungen hinsichtlich des Energieverbrauches und damit auch bei den CO₂-Emissionen konnten bisher nicht erzielt werden. Gleiches gilt auch für die Schmelzleistung.

Folgende Aspekte, die im Labor nicht getestet werden konnten, standen bei der Felduntersuchung im Vordergrund:

- erstmaliger Einsatz und Optimierung von flammenlosen Regenerativbrennern an einem Ofen, welcher unter Produktionsbedingungen betrieben wird.
- Untersuchung des Einflusses von Schrotthaufen als Störgröße, die eine ungehinderte Flammenausbreitung unterbinden
- Untersuchung des Einflusses der im Vergleich zu konventionellen Brennern niedrigeren Flammentemperaturen auf Energieverbrauch, Schmelzleistung und Abbrand
- Kontinuierliche Messung der Abgaszusammensetzung während eines kompletten Schmelzyklus, insbesondere der Stickoxide

Wie bereits erwähnt, wurden nicht alle Projektziele erreicht. Mögliche Maßnahmen zum Erreichen der noch ausstehenden Projektziele wären:

- Weitere Modifikationen an der Brennergeometrie, wobei mögliche Maßnahmen im Vorfeld des Einsatzes am 5t-Ofen ausführlich durch mathematische Berechnungen und Laboruntersuchungen geprüft werden müssten
- 1) Eine Änderung der Brenneranordnung am Ofen (z.B. Abstände zu Ofenwänden, anders geartete Neigungen zum Schrotthaufen bzw. zur Badoberfläche usw.)
 - 2) Bessere optische/visuelle Möglichkeiten zur Beurteilung der Verbrennung schaffen, die auch den Übergang zur flammenlosen Verbrennung erkennen lassen (z.B. zusätzliche Schaugläser, Kamera, Geräte für thermografische Aufnahmen)

An dem Projekt waren neben Andritz FBB GmbH auch die Firmen Trimet Aluminium AG sowie Inotherm GmbH beteiligt. Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 28585-24/0 gefördert.

Einleitung

Industrielle Schmelzprozesse sind sehr energie- und kostenintensiv und durch den Einsatz fossiler Brennstoffe mit Umweltbelastungen in Form von Emissionen unterschiedlicher Art verbunden.

Mit dem Einsatz der bereits bekannten Brennertechnik mit regenerativer Luftvorwärmung lässt sich der Energieeinsatz um bis zu 40% gegenüber Kaltluftbrennern reduzieren. Die immer stärkeren Anforderungen zur Senkung der Energiekosten sowie der Emissionen erzwingen aber noch sehr viel weitergehende Schritte. Ziel dieses Projektes war eine Einsparung an Brennstoff in einer Größenordnung von ca. 17% pro Tonne Sekundäraluminium (= Recyclingaluminium) und die dementsprechende Verringerung der Umweltbelastungen.

Vor diesem Hintergrund sollte bei diesem Projekt erstmalig der Einsatz einer neuen Brennergeneration getestet werden, die auf dem seit längerem bekannten Prinzip der flammenlosen Verbrennung basiert. Derartige Brenner wurden, soweit bekannt, bisher noch nie an Aluminiumschmelzöfen eingesetzt, und zwar weder als Warmluftbrenner (= Brenner mit „rekuperativer“ Luftvorwärmung) noch in der beim vorliegenden Projekt realisierten Kombination mit „regenerativer“ Luftvorwärmung.

Der erhoffte Vorteil der flammenlosen Verbrennung soll darin bestehen, dass es im Gegensatz zu konventionellen Brennern keine „gerichtete“ Flamme mit den daraus resultierenden Temperaturspitzen und deren negativen Auswirkungen auf Energieeinsatz, Materialabbrand und Abgasemissionen mehr gibt. Bei der flammenlosen Verbrennung findet die Verbrennung vielmehr weitaus gleichmäßiger im gesamten Ofenraum mit einer entsprechend homogeneren Temperaturverteilung statt. Basierend auf dieser Eigenschaft resultiert das zweite wesentliche Ziel des Projektes, eine deutliche Reduzierung der NO_x-Emissionen.

Brenner, die nach dem Prinzip der flammenlosen Verbrennung arbeiten, werden von Andritz-FBB bereits seit einigen Jahren industriell z.B. an Wiedererwärmungsöfen in der Stahlindustrie eingesetzt. Zu deren Entwicklung wurden umfangreiche Untersuchungen im Labor durchgeführt, wobei Brenner mit rekuperativer Luftvorwärmung und einer Gasanschlussleistung von 500 kW (entsprechend ca. 610 kW Gesamtleistung) getestet wurden.

Die Fortschritte bei der Weiterentwicklung von Brennern mit flammenloser Verbrennung bei Andritz-FBB werden u.a. dadurch deutlich, dass zum Zeitpunkt der Antragstellung für das vorliegende Projekt im Labor NO_x-Emissionen in der Größenordnung von 150 mg/Nm³ erzielt wurden, wobei die Verbrennungsluft-Vorwärmung damals noch ca. 400°C betrug. Im Jahr 2012 wurde bei einem Kunden in Österreich ein Stoßofen auf Brenner mit flammenloser Verbrennung umgerüstet, auch hier wurde der Grenzwert von 150 mg/Nm³ eingehalten, allerdings betrug die Verbrennungsluft-Vorwärmung in diesem Fall bereits 600°C.

Inzwischen, nach der Fertigstellung des für dieses Fördervorhaben gebauten Versuchsofens bei Trimet, werden im Labor bereits NO_x-Werte von deutlich unter 100 mg/Nm³ bei 600°C Luftvorwärmung erzielt. Brenner dieser Generation sind mittlerweile ebenfalls schon im industriellen Einsatz.

Für das vorliegende Projekt wurde als Zielvorgabe für NO_x eine Reduzierung um 15%, ausgehend von 350 mg/m³_N, angestrebt. Der Grund für den deutlich höheren Grenzwert, im Vergleich zu den o.g. < 100 mg/m³_N, liegt in der wesentlich höheren Luftvorwärmung bei Regenerativbrennern. Dies führt zu einem überproportional starken Anstieg der NO_x-Werte.

Eine weitere Zielsetzung des Projektes war auch, durch den Einsatz der flammenlosen Verbrennung den spezifischen Energieverbrauch von derzeit ca. 595 kWh/t (bei Öfen mit einer max. Arbeitstemperatur von 1050-1100°C) auf ca. 490 kWh/t abzusenken. Dadurch würden auch die CO₂-Emissionen deutlich sinken.

Bezüglich der Schmelzleistung gab es keine konkreten Vorgaben, allerdings wäre eine signifikante Steigerung wünschenswert.

Die Aufgabenstellung bestand zunächst im Wesentlichen aus der Recherche von Ergebnissen an Öfen mit ähnlichen Parametern (Geometrie, Arbeitstemperaturen, Art des Einsatzmaterials usw.).

Weiterhin sollten an einem ähnlich gearteten Ofen (Ofen 7 bei Trimet) Referenzchargen gefahren und ausgewertet werden. Dessen Ergebnisse sollten primär zum Vergleich des 5t-Ofens herangezogen werden.

Parallel hierzu erfolgte die detaillierte Auslegung, Planung und Bau des Ofens in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Inotherm GmbH.

Seitens Andritz-FBB erfolgten die Auslegung, Planung und Lieferung der kompletten Beheizungseinrichtung (Brenner + Regeneratoren incl. Armaturen und Geräte) sowie der kompletten Elektrik.

Nach dem Abschluss der Montage (Ofen, Beheizungseinrichtung und Elektrik) erfolgten die Kalt- und Warminbetriebnahme mit anschließender Optimierung der Brennereinstellungen.

Der Hauptteil des Projektes bestand schließlich aus den Schmelzversuchen am 5t-Ofen und deren Auswertung.

Abschließend sollten Strömungsparameter erfasst werden mit dem Ziel, ein Strömungsmodell für die Vorgänge innerhalb des Ofenraumes zu erstellen.

Letztendlich sollte dieses Projekt grundlegende Daten für ein mögliches Folgeprojekt liefern, bei dem die Ergebnisse auf einen Produktionsofen mit einem Fassungsvermögen von 20 t übertragen werden sollen.

Hauptteil

1) Vorarbeiten/Recherchen für die Dimensionierung des 5t-Ofens

Zunächst wurde aus allen verfügbaren Daten eine Übersicht recherchiert, aus der ersichtlich ist, welche Schmelzleistungen, spez. Gasverbräuche und NO_x-Emissionen bisher an regenerativ-beheizten Aluminiumschmelzöfen erzielt wurden. Einige ausgewählte Öfen sind in **Tabelle 1** im Anhang aufgeführt.

Die Erstellung dieser Tabelle bereitete erhebliche Probleme. Aluminiumschmelzöfen haben sich im Laufe der Zeit erheblich bezüglich der Konstruktion und des Zubehörs gewandelt. Daher ist die Anzahl der Öfen, die mit einem, dem 5t-Ofen entsprechenden, Design vergleichbar ist, beschränkt. So gehört es mittlerweile u.a. bereits zum Stand der Technik, dass derartige Öfen mit elektromagnetischen Rührwerken oder mit sogenannten „Spülsteinen“, (Einrichtungen, mit deren Hilfe eine intensive Umwälzung des flüssigen Aluminiums innerhalb des Schmelzbades erfolgt) ausgestattet werden. Solche Einrichtungen haben einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch und die Schmelzleistung und können daher nicht für den Vergleich mit dem 5t-Ofen herangezogen werden.

Die in Tabelle 1 aufgelisteten Öfen lassen jedoch einen guten Vergleich zu. Besonders die Parameter „spezifische Brennerleistung“ und „spezifische Badoberfläche“, wurden beim Versuchsofen so gewählt, dass sie „praxisnah“ an die entsprechenden Parameter von Produktionsöfen heranreichen. D.h. ausgehend vom Fassungsvermögen von 5t wurde die Badoberfläche mit 5,4 m² und die Brennerleistung mit 0,75 MW festgelegt.

Details zur Ofenkonstruktion und zur Anordnung der Brenner können den **Bildern 1 bis 4** im Anhang entnommen werden. Ferner werden im **Abschnitt C)** weitere konstruktive Einzelheiten erläutert.

2) Durchführung von Referenzchargen an bestehenden Anlagen

Zu Beginn des praktischen Teils der Projektarbeiten erfolgte die Ist-Aufnahme an einem der bestehenden 32t-Öfen (Ofen 7) bei Trimet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3 zusammen mit den entsprechenden Messwerten der anderen Öfen, welche gem. **Tabelle 1** den Planungsdaten für den 5t-Ofen zugrunde gelegt wurden, enthalten.

Hierzu wurden insgesamt 3 Chargen geschmolzen, die in Art und Zusammensetzung dem im 5t-Ofen eingesetzten Material sehr ähnlich waren.

Details zur Vorgehensweise bei der Ermittlung der Schmelzleistung, des spez. Energieverbrauches und der NO_x-Werte werden im Abschnitt D: „Leistungstests am 5t-Ofen“ genauer erläutert.

Der **Tabelle 3** ist zu entnehmen, dass die Schmelzleistung 6,0 t/h betrug, der spezifische Energieverbrauch lag bei 588 kWh/t und die NO_x-Werte (gemessen am Ende des Schmelzzyklus bei 1050°C Ofentemperatur) lagen knapp unter dem Garantiewert von 350 mg/m³_N.

Auch wenn die Schmelzleistung gemäß des Projektantrages für den 5t-Ofen von untergeordneter Bedeutung sein sollte, wurde sie in der **Tabelle 3** unter „spezifische Schmelzleistung je m² Badoberfläche“ bzw. „spezifische Schmelzleistung je MW Brennerleistung“ aufgenommen. Diese Darstellung wurde gewählt, um die Schmelzleistung, welche üblicherweise in t/h angegeben wird, bei sehr unterschiedlichen Öfen besser verglichen werden kann. Die Angabe in t/h gem. Spalte 2 der Tabelle hingegen wäre nicht vergleichbar gewesen.

3) Planung, Bau und Inbetriebnahme des 5t-Ofens

a) Ofen:

Obwohl es sich beim 5t-Ofen um einen reinen Versuchsofen handelt, wurde er konstruktiv nach den gleichen Prinzipien gebaut wie ein Produktionsofen.

Je nach Beschaffenheit wird das Rohmaterial entweder in mehreren Schritten oder in einem Schritt chargiert. Bei z.B. bei voluminösen Profilschrotten wird mehrfach Material eingebacht und zwischen den einzelnen Chargiegängen immer wieder eingeschmolzen um Raum für zusätzliches Material zu schaffen. Bei massiven Schrotten (z.B. Barren, Sägestücke, Masseln) kann i.d.R. das gesamte Material in einem einzigen Schritt chargiert werden. Zum Zwecke des Chargierens wurde der Versuchsofen, ähnlich wie Produktionsöfen, mit einer entsprechend großen Chargiertür ausgerüstet, welche auf den **Bildern 1 und 4** gut zu erkennen ist.

Da das flüssige Aluminium nach Abschluss des Schmelzvorganges direkt aus dem Ofen auf die Gießmaschine geleitet wird, wurde der 5t-Ofen als sogen. Kippofen konzipiert. Dies hat zur Folge, dass alle zum Ofen gehörende Komponenten incl. Brenner mit Regeneratoren, Ventilatoren, Armaturen und Geräte usw. seitlich am oder auf dem Ofen platziert werden mussten. Die Brenneranordnung ist auf **Bild 2** zu erkennen. Auffallend ist dabei, dass beide Brenner an einer Seite des Ofens angebracht sind. Aus Gründen der Wärmeverteilung hätte man erwarten können, dass jeweils 1 Brenner auf jeder der beiden Seitenwände angebracht ist. Dies lässt sich i.d.R. kaum verwirklichen, da eine Seite für die Ausgussöffnung und für die Gießrinne freigehalten werden muss. Die Rückseite musste im vorliegenden Fall für eine besondere Einfüllöffnung vorbehalten bleiben, da zu bestimmten Zwecken auch Flüssigmetall aus anderen Anlagen in den Versuchsofen eingebracht wird. Weiterhin werden Brenner nur in Ausnahmefällen an Rückwänden angeordnet damit die Flammen nicht direkt gegen die Ofentür schlagen.

Das gesamte Zubehör für die Brenner, wie Ventilatoren, Armaturen, Mess- und Regeleinrichtungen usw., befindet sich auf der Ofendecke.

a) Brenner:

Wie im Antrag bereits formuliert, sollte bei den hier eingesetzten Brennern erstmals das Prinzip der flammenlosen Verbrennung an Regenerativbrennern erprobt werden. Diese Funktionsweise kann man aus einer Kombination von unterschiedlichen Maßnahmen erreichen,

1. die Verbrennungsluft wird in geeigneter Art und Weise gestuft,
2. Luft und Gas verlässt den Brenner mit derart hohen Geschwindigkeiten, dass eine Injektorwirkung (Rezirkulation von Abgas) erzielt wird und
3. diese Injektorwirkung führt bei gleichzeitigem Verzicht auf den klassischen Brennerstein zu einer stärkeren „internen Abgasrezirkulation“.

Die Abgasrezirkulation wiederum hat zur Folge, dass es zu einer „verlangsamten“ Verbrennung kommt, durch welche die Spitzentemperaturen in der Flamme verringert und damit auch die NOx-Bildung deutlich reduziert wird. Gleichzeitig wird beim FBB-Brenner im Gegensatz zu Brennern von Marktbegleitern bewusst auf eine wie auch immer geartete temperaturabhängige Umschaltung verzichtet, sei es bei Gas oder Luft, wodurch sowohl der gesamte Aufbau als auch das Regelungskonzept stark vereinfacht wird.

Das **Bild 5** verdeutlicht den Aufbau des neuen Brenners, wie er zu Beginn des Projektes gestaltet war. Das **Bild 6** zeigt hingegen den modifizierten Brenner, der erst gegen Ende des Projektes zur Anwendung kam (die Gründe für den Umbau werden später erläutert). Auffällig ist dabei insbesondere die Tatsache, dass beide Varianten keinen Brennerstein haben, wie er bei „klassischen“ Brennern gem. **Bild 7** zum Einsatz kommt. Erst der Verzicht auf den Brennerstein ermöglicht die intensive „interne Abgasrezirkulation“, die, wie erwähnt, für eine flammenlose Verbrennung unverzichtbar ist.

c) Inbetriebnahme:

Entgegen der ursprünglichen Terminplanung gab es während dieser Phase des Projektes einige Verzögerungen, hervorgerufen durch unterschiedliche Ursachen wie z.B. Probleme bei der Absprache zwischen den Projektbeteiligten über deren jeweiligen Tätigkeitsumfang, die benötigte Zeitfenster bei Planung und Bau sowie den genauen Liefergrenzen.

Letztendlich ging der Ofen im Sept. 2013 in Betrieb. Unmittelbar nach den ersten Schmelzversuchen kam es jedoch zu einem Schaden, bei der die, auf Anregung von Fa. Trimet unterhalb der Ofendecke angeordnete, elektrische Beheizung zerstört und danach ersatzlos demontiert wurde. Der Ofen musste hierfür allerdings komplett abgekühlt und nach der Reparatur erneut gezielt aufgeheizt werden. Hieraus entstanden Verzögerungen von mehreren Wochen. Ferner wurden beim Einbau von Mengen-Messstrecken und den dazu gehörenden Messumformern einige Punkte nicht sorgfältig genug beachtet. Durch deren Umbauten entstanden ebenfalls enorme Zeitverluste.

Im Verlauf der nachfolgenden Test-Zyklen, bei noch leerem Ofen, zeigten sich dann weitere Defizite, welche durch entsprechende Umbaumaßnahmen behoben werden mussten. So gab es in der Anfangsphase z.B. sehr häufig Zündbrennerstörungen, deren Beseitigung nur durch den Einbau zusätzlicher Druckregler möglich war.

Ein weiteres erhebliches Manko war die Tatsache, dass die Brennerzykluszeiten (= Brennerlaufzeiten zwischen 2 Umschaltungen) zu Beginn nur auf abnormal kleine Werte eingestellt werden konnten. „Normale“ Zykluszeiten liegen im Bereich zwischen 60 bis 90 Sekunden, im vorliegenden Fall konnten zunächst unter günstigsten Umständen gerade mal 25-30 Sekunden erreicht werden. Derart kurze Zykluszeiten sind völlig inakzeptabel, da jede Umschaltung Zeit- und Leistungsverlust bedeutet sowie eine entsprechend höhere Belastung der Umschaltarmaturen mit sich bringt. Ferner ruft jede Umschaltung Unstetigkeit bei den Emissionen hervor. Insbesondere der Sauerstoffgehalt in der Ofenatmosphäre steigt kurzzeitig rapide an, gefolgt von ähnlich hohen Anstiegen bei den NO_x-Emissionen (s. auch **Diagramme 1** und **2**).

Als Ursache für die zu kurzen Zykluszeiten wurde zunächst vermutet, dass die Masse der Regenerator-Füllungen (= Platten aus Schaumkeramik) zu klein gewählt wurde. Zusätzliche Platten mussten allerdings erst bestellt werden, wodurch erneut ein erheblicher Zeitverlust in der Größenordnung von mehreren Wochen hervorgerufen wurde.

Entgegen allen Erwartungen konnten die Zykluszeiten auch durch die zusätzlichen Platten nicht nennenswert gesteigert werden. Letztendlich führte eine eingehende Überprüfung der Methode zur Berechnung und Regelung der Abgasmengen in der SPS zu dem Ergebnis, dass diesen bisher ein falscher Ansatz zu Grunde lag und gleichzeitig fehlerhaften Mengenmessungen durchgeführt wurden. Nachdem diese Fehler behoben waren, konnten die Zykluszeiten problemlos bis auf 90 Sekunden erhöht werden.

Mitte Januar 2014 konnte der Ofen dann erstmals mit Material beschickt und mit Schmelzversuchen sowie mit der Durchführung von Abgasanalysen begonnen werden. Mittels der hier ermittelten Abgaswerte erfolgte dann auch die Optimierung der Brennerleistung sowie der Luft-Gas-Verhältnisregelung.

Üblicherweise werden die Abgaswerte in der Abgas-Sammelleitung an einer Stelle gemessen, an der die Abgase, die den Ofen über die Brenner/Regeneratoren verlassen (ca. 80-90%) und die Abgase, die den Ofen auf direktem Weg verlassen (10-20%), zusammen geführt sind; kurz vor dem sogenannten Drehgelenk. Hier konnte jedoch der Sauerstoffgehalt nie unter ca. 5% abgesenkt werden, obwohl durch Messungen an anderer Stellen eindeutig nachgewiesen werden konnte, dass der Sauerstoffgehalt im Ofen selbst definitiv deutlich niedriger war. Im Ofen betrug der Sauerstoffgehalt die angestrebten 2-3 % Restsauerstoff. Der Nachteil von Messungen an anderen Stellen ist allerdings, dass entweder nur die Abgaswerte eines einzelnen Brenners (Brenner 1 oder Brenner 2) gemessen werden können oder die Entnahmestelle zu nahe an den Flammen liegt und damit wegen des noch nicht vollständigen Ausbrandes abnormal hohe CO-Werte vorgefunden werden.

Letztendlich wurden die Analysen am Abgaskanal auf der Ofendecke durchgeführt. Dies ist aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit nicht üblich, jedoch kommen die Abgaswerte an dieser Messstelle den Verhältnissen im Ofen sehr nahe.

Ein weiterer Nachteil, welcher sich erst durch die Abgasanalysen feststellen ließ, war die Tatsache, dass die Sauerstoff- und NO_x-Werte der beiden Brenner erheblich voneinander abwichen. Mögliche Gründe können Falschlufteinbrüche im Bereich der Chargiertür sein oder ähnliche Effekte im Bereich der Einfüllöffnung für Flüssigmetall. Beide Öffnungen befinden sich asymmetrisch zu den Brennern und könnten somit tatsächlich unterschiedliche Sauerstoffwerte verursachen. Maßnahmen zur Verbesserung der Abdichtung brachten zwar eine gewisse Verbesserung, allerdings konnte dieses Manko bis zuletzt nicht vollständig eliminiert werden.

Nachteilig könnte auch die Tatsache sein, dass der von der Tür aus gesehen hintere Brenner sehr nahe an der Ofen-Rückwand angeordnet ist, wodurch die Abgasrezirkulation im Ofen beeinträchtigt wird. Dies ist allerdings auch ein Punkt, der immer wieder an Produktionsöfen auftritt: meistens ist es kaum möglich, mehrere Brenner an einem Ofen symmetrisch so anzuordnen, dass sich die Flammen ungehindert nach allen Seiten ausbreiten können.

Im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Sauerstoffwerten wurde auch die Ofendruckregelklappe durch zusätzliche Dichtleisten verbessert. Eine einwandfrei funktionierende Ofendruckregelklappe eine maßgebliche Voraussetzung für einen optimalen Ofendruck, bei welchem u.a. auch der oben beschriebene Falschlufteinbruch in den Ofen weitestgehend unterbunden werden kann.

Die beschriebenen Optimierungsmaßnahmen incl. weiterer Schmelzleistungsversuche sowie Abgasanalysen zur Überprüfung der Maßnahmen dauerten bis Ende April 2014. In Anbetracht der bereits erheblichen Terminüberschreitung für den Abschluss des Projektes (ursprünglich 31.10.2013) wurde zum jetzigen Zeitpunkt auf weitergehende Optimierungsmaßnahmen verzichtet.

Eine Auflistung solcher Maßnahmen, ggf. auch nach Abschluss des Projektes, erfolgte bereits im Abschnitt „Zusammenfassung“.

Die eigentlichen Schmelzleistungsversuche zur Erreichung der Projektziele konnten schließlich im Mai 2014 beginnen.

a) Leistungstests am 5t-Ofen

Analog zu den im Hauptteil/2 beschriebenen „Referenzchargen an einem bestehenden Ofen“ wurden die Versuche am 5t-Ofen gemäß der allgemein üblichen Vorgehensweise zur Durchführung von Schmelzleistungstests gefahren, d.h.:

- 1) als Rohmaterial wurden nur Masseln mit einem Reinheitsgrad von mindestens 99,9% eingesetzt. Diese Masseln sind auch von der Geometrie her einheitlich, so dass unter diesem Gesichtspunkt alle Chargen absolut vergleichbar waren.
- 2) alle Chargen wurden unmittelbar vor dem Chargieren gewogen. Die Gewichte sind für die Auswertung und für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unabdingbar.
- 3) der Chargier Vorgang erfolgte praxisnah mit Hilfe eines Gabelstaplers, so dass das Material letztendlich als lose und ungeordnete Schüttung in den Ofen gelangte (s. **Bild 3**). Dass die Flammenausbreitung zu Beginn des Schmelzprozesses durch die Schüttung nicht ungehindert erfolgen konnte, wurde bewusst in Kauf genommen und ausdrücklich im Antrag formuliert. Mögliche Einflüsse der Schüttung sollten festgestellt und nach Möglichkeit quantifiziert werden.
- 4) unmittelbar zu Beginn und am Ende des Schmelzprozesses wurden die Zählerstände des Gaszählers abgelesen. Der so ermittelte Gasverbrauch wurde mittels dem an der Messstelle herrschenden Druck und der Temperatur auf den Normzustand umgerechnet. Aus dem Gasverbrauch und dem Chargengewicht wurde nach Abschluss des Schmelzvorganges der spezifische Energieverbrauch in kWh/t ermittelt.
- 5) zu Beginn und am Ende jedes Schmelzprozesses wurde die Uhrzeit notiert. (der Endzeitpunkt ist definiert durch die Bad-Endtemperatur, im vorliegenden Fall 760°C). Hieraus wurde, ggf. nach Abzug von Zeiten während der der Schmelzvorgang unterbrochen wurde (z.B. Abkrätzen, Rühren u.ä.), die Netto-Schmelzdauer ermittelt.

- 6) für die Abgasanalyse kam ein Messgerät der Firma Siemens, Ultramat 23, in Verbindung mit einem Datenlogger der Firma Afriso zum Einsatz (s. **Bild 9**). Der Analysator ist für Dauerbetrieb geeignet und zeichnete somit während der gesamten Schmelzdauer jeweils die Werte für Sauerstoff O₂, Kohlenmonoxid CO und Stickstoffmonoxid NO auf.

Der Datenlogger speichert pro Sekunde einen kompletten Satz Messwerte ab und berechnet gleichzeitig die Kohlenmonoxid-Konzentration und die Stickoxid-Konzentration NO_x, beides in mg/m³_N bezogen auf 3% O₂ gemäß den Vorgaben der TA-Luft.

Typische Verläufe an regenerativ-beheizten Öfen sind an den Beispielen Sauerstoff und Stickoxid in den **Diagrammen 1-3** dargestellt. Charakteristisch dabei sind z.B. die sprunghaften Anstiege nach jeder Brennerumschaltung oder der stetige Anstieg an Stickoxiden, wie er im **Diagramm 3** zu erkennen ist, und der auf die stetig steigende Ofentemperatur zurückzuführen ist.

Für die in der **Tabelle 3** eingesetzten NO_x-Werte wurden jeweils die Werte unmittelbar vor dem Erreichen der höchsten Temperatur zeitlich gemittelt.

Die Versuche erstreckten sich im Wesentlichen über 3 Perioden. Nach Abschluss der ersten Periode wurde ein erheblicher Schaden an den Gasdüsen / Kühlluftrohren festgestellt (s. auch die Erläuterungen im nachfolgenden Abschnitt „cc“ zum Thema „NO_x“). Der Schaden war allerdings nicht so gravierend, dass sämtliche bis dahin gewonnene Resultate unbrauchbar waren. Nicht betroffen waren die Tendenzen gemäß den folgenden Abschnitten dd, ff, gg und hh, und zwar in erster Linie deshalb, weil der maximale Energieeintrag schadensunabhängig stets bei 750 kW lag.

Während der zweiten Versuchsperiode, bei der die Brenner quasi baugleich zur ersten Periode waren (die keramischen Rohre wurden durch metallische Rohre ersetzt), wurden deshalb primär nochmal intensiv die NO_x-Emissionen untersucht. Da diese Ergebnisse immer noch höchst unbefriedigend waren, wurden die Brenner dann auf die Version gemäß **Bild 6** umgebaut, mit der nachfolgenden dritten Versuchsperiode.

Bei den diversen Schmelzversuchen während der Optimierungsphase zeigte sich bereits, dass das tatsächliche Fassungsvermögen des Ofens entgegen dem geplanten Fassungsvermögen nur bei maximal 4,5 t lag. Da die hochreinen Masseln zudem nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen und erhebliche Kosten verursachen, wurden überwiegend Chargen mit nur 4 t gefahren, lediglich zu Vergleichszwecken wurden 2 Chargen mit 4,5 t gefahren werden. Dabei zeigte sich, wie nachfolgend noch näher erläutert wird, dass Füllmengen zwischen 80 und 100% keine gravierenden Auswirkungen auf den spezifischen Energieverbrauch und die Schmelzleistung haben, so dass auch die 4t-Chargen durchaus verlässliche Werte lieferten.

Zunächst wurden Chargen gefahren, mit deren Hilfe die Basiswerte für die weiteren Versuche ermittelt wurden. Bei diesen Chargen wurde der noch leere Ofen vor Beginn des Chargierens „normal“ gefahren, die Ofentemperatur wurde auf 850°C eingestellt, was z.B. dem Haltebetrieb an Wochenenden oder während der Nacht entspricht, also zu Zeiten, an denen keine Produktion stattfindet. Diese Chargen wurden während des Schmelzens bis zu einer maximalen Ofentemperatur von 1050°C gefahren. Aus dieser Versuchsreihe stammen auch die Versuche, die in der **Tabelle 2** mit den laufenden Nummern 1 und 2 gekennzeichnet sind.

Zu Beginn der Versuchsreihe 3 wurde zunächst der noch leere Ofen auf eine deutlich höhere Temperatur von 1050°C vorgeheizt. Derart hohe Ausgangstemperaturen, die jedoch eher die Ausnahme sind, kommen in der Praxis z.B. dann vor, wenn es sich um reine Schmelzöfen handelt, bei denen unmittelbar nach Schmelzende das gesamte Flüssigmetall innerhalb kürzester Zeit überführt und der Ofen sofort wieder neu chargiert wird.

Die Versuchsreihe 4 wurde erneut mit einer Ofen-Vorwärmung von 850°C gefahren, diesmal allerdings mit einer Soll-Temperatur von 1150°C während des Schmelzens anstatt der bisherigen 1050°C.

Zu Vergleichszwecken wurden die Versuchsreihen 5 und 6 mit jeweils 4,5 t gefahren, davon während des Schmelzens wiederum einmal bis 1050°C und einmal bis 1150°C.

Die erste Testserie war damit zunächst abgeschlossen. Bei der Auswertung, insbesondere der NO_x-Emissionen (**s. Abschnitt „dd“**), kristallisierte sich dann jedoch der oben beschriebene Schaden an den Gasdüsen/Kühlluftrohren heraus.

Da auch nach der Brennerreparatur und den nachfolgenden Versuchsreihen 7 und 8 das Ziel der flammenlosen Verbrennung mit entsprechend niedrigen NO_x-Emissionen noch nicht zufriedenstellend erreicht war, wurde das Hauptaugenmerk bei den Versuchsreihen 9 bis 11 mit den modifizierten Brennern in erster Linie auf das Erreichen dieser Eigenschaften gerichtet. Selbstverständlich wurde dabei weiterhin auch der spezifische Energieverbrauch berücksichtigt.

Die Ergebnisse sämtlicher Versuchsreihen sind in den **Tabellen 2** und **3** zusammengefasst. Folgende Tendenzen lassen sich hieraus ableiten:

aa) Energieeinsatz (spez. Energieverbrauch)

Zunächst erfolgt an dieser Stelle ein Vergleich der Versuchsreihen 7 und 8 (Versuche mit den reparierten Brennern) mit den Vorgaben gemäß Einleitung bzw. des Projekt-Antrages. Stand der Technik ist demnach ein spezifischer Energieverbrauch von ca. 595 kWh/t. Im Projekt hingegen sollten Verbräuche um 490 kWh/t angestrebt werden.

Die Versuchsreihen 7 und 8 lieferten im Mittel Energieverbräuche von 593 kWh/t und lagen somit praktisch noch exakt auf dem Level bisheriger Verbräuche. Wie jedoch bereits erwähnt wurde, war das Ziel der flammenlosen Verbrennung in diesem Stadium noch nicht erreicht.

Entgegen allen Erwartungen stiegen die Verbräuche in den Versuchsreihen 9-11, mit flammenloser Verbrennung, dann jedoch drastisch an und zwar auf einen Mittelwert von 704 kWh/t. Dieser bis dato noch nicht geklärte Anstieg konnte auch durch „unterstützende“ Maßnahmen, wie sie während der Versuchsreihen 1-5 untersucht wurden, kaum kompensiert werden.

Zu diesem Punkt besteht also noch erheblicher Handlungsbedarf, aus zeitlichen Gründen war dies jedoch im Rahmen des Projektes nicht mehr möglich.

bb) CO₂

Grundsätzlich verhält sich der CO₂-Ausstoß proportional zum Gasverbrauch und ändert sich mit der erzeugten Abgasmenge, vorausgesetzt, dass die Abgaszusammensetzung bei allen Versuchen konstant war. Letzteres wird in erster Näherung angenommen, abgesehen von geringfügigen Reduzierungen bei den Lambda-Werten z.B. durch eine optimierte Ofendruckregelung.

Bezogen auf die Ergebnisse der Versuchsreihen 7 und 8 sowie 9 und 10 heißt das:

	Vers.-reihe 7/8	Vers.-reihe 9/10
Mittl. Gasverbrauch [kWh/t]	593	704
Mittl. Füllgewicht [t]	4,0	4,0
Mittl. Schmelzdauer [h]	3,35	3,98
Gesamt-Abgasmenge [m ³ _N]	3252	3883
CO ₂ -Ausstoß während der ges. Charge [kg]	515,2	615,1
Spezif. CO ₂ -Ausstoß [kg/t _A]	128,8	154,6

Aus den Ergebnissen lässt sich unschwer ablesen, dass der CO₂-Ausstoß als Folge des gestiegenen Gasverbrauches bei den Versuchsreihen 9 und 10 deutlich angestiegen. Die Erwartungen wurden somit auch in diesem Punkt bisher nicht erfüllt.

cc) NO_x

Zu Beginn der Versuche, bei den Versuchsreihen 1-6, lagen die NO_x-Emissionen stets in der Größenordnung von 400- 450 mg/m³_N und somit weit über den Prognosen. Da alle weiteren Überprüfungen und Messungen keine konkreten Hinweise für diese unerwartet hohen Emissionen lieferten, musste zunächst ein Stillstand des Ofens mit der Möglichkeit einer Brennerinspektion vom Ofeninnenraum her abgewartet werden. Diese Möglichkeit ergab sich erst im Juni. Hier war zu erkennen, dass an beiden Brennern sowohl die keramische Gasdüse als auch das keramische Kühltluftrohr mehrfach gebrochen waren (s. **Bild 8**)

Die Konsequenzen aus diesem Schaden: Aus dem ursprünglich Konzept eines mündungsmischenden Brenners wird zwangsläufig eine Art „Vormischbrenner“, d.h. statt das sich Gas und Luft erst im Ofen und dann auch nur relativ langsam vermischen, was generell bei Low-NO_x-Brennern angestrebt wird, kommt es bereits innerhalb des Brennergehäuses zu einer spontanen Mischung und vermutlich auch schon zur Zündung und teilweisen Verbrennung.

Dies hat zwar hohe NO_x-Werte zur Folge, aber keine Nachteile im Hinblick auf die Schmelzleistung und den spezifischen Energieverbrauch, da die max. mögliche Brennerleistung trotzdem stets erreicht wurde und es somit zu keiner Leistungseinbuße kam. Letzteres ist auch der Grund dafür, dass es kaum möglich ist, ein derartiges Problem schon im Vorfeld bei laufendem Schmelzbetrieb eindeutig zu erkennen.

Nebenbei bemerkt kann als Schlussfolgerung aus dem Schadensbild mittlerweile klar gesagt werden, dass keramische Gas- und Kühlluftrohre für den Einsatz an Aluminiumschmelzöfen generell ungeeignet sind. Dies hat u.a. damit zu tun, dass an solchen Öfen z.B. beim Chargiervorgang erhebliche Erschütterungen entstehen können, für die solche Bauteile nicht geeignet sind. Als Konsequenz hieraus wurden neue Gas- und Lufröhre aus hitzebeständigem Stahl eingebaut wie sie vom Prinzip her bereits seit vielen Jahren an Produktionsöfen eingesetzt werden.

Anmerkung: durch den Einsatz von keramischen Rohren war man in der Lage, auf eine Kühlung zu verzichten, wie sie bei metallischen Rohren unverzichtbar ist. Diese Kühlung wird üblicherweise mit Luft realisiert und hat den Nachteil, dass die Luft in den Kern der Flamme gelangt und die NO_x-Werte verschlechtert. Alternativ wäre auch eine Kühlung mittels Abgas möglich und wurde parallel zu diesem Projekt an anderer Stelle erprobt. Diese Art der Kühlung hat wiederum den gravierenden Nachteil, dass das Abgas erhebliche Mengen an Wasserdampf enthält, so dass es zu erheblichen Schäden durch Korrosion kam. Grundsätzlich erfordert Abgaskühlung einen unverhältnismäßig hohen Aufwand an Maßnahmen zur Vermeidung von Korrosion. Die Luftpühlung für den Versuchsofen musste während des laufenden Projektes nachgerüstet werden.

Wie zu erwarten war, zeigte sich nach der Reparatur, dass es hinsichtlich der Schmelzleistung und des spezifischen Energieverbrauches zu keinen nennenswerten Veränderungen kam (Versuchsreihen 7 und 8). Bei den NO_x-Werten hingegen wurde allerdings eine deutliche Verbesserung erzielt. Die erreichten Werte lagen mit 250 mg/m³_N bei 1050°C Ofentemperatur sogar erheblich unter den Erwartungen von 300 mg/m³_N.

Nachteilig bei den Versuchen 7 und 8 war allerdings die Tatsache, dass auch jetzt noch keine richtige flammenlose Verbrennung erzielt wurde. Insofern war man bestrebt, einen weiteren Umbau vorzunehmen, und zwar auf die bereits beschriebene Variante gem.

Bild 6.

Diese Variante wurde zunächst rechnerisch optimiert und zeichnet sich insbesondere durch einen Luftdüsenstein aus, bei dem die Luftöffnungen und die Gasdüse im Gegensatz zu konventionellen Brennerbauarten exzentrisch zueinander angeordnet sind. Der Vorteil dieser Bauart liegt in einer noch weiter verzögerten Durchmischung von Gas und Luft sowie einer intensivierten Abgasrezirkulation in die Flammenwurzel.

Die Auswirkungen dieser Brennerbauart auf die NO_x-Konzentration waren im positiven Sinne erheblich: mit optimierten Kühlluft Einstellungen wurden NO_x-Werte bis herunter auf 150 mg/Nm³ nachgewiesen (Versuchsreihen 9 und 10). Obwohl es beim Energieverbrauch und bei der Schmelzleistung zu erheblichen Verschlechterungen kam, bietet dieses Design durchaus die Grundlage für weitergehende Untersuchungen.

Die neue Brennerbauart arbeitet, wie alle Low-NOx-Brenner, mit einer speziell gestalteten Luftstufung. Um den Einfluss dieser Stufung zu verifizieren, wurde die Versuchsreihe 11 mit einem deutlich geringeren Primärluftanteil gefahren. Entgegen allen Erwartungen stiegen die Emissionen auch in diesem Fall wieder deutlich an. Dieser Effekt ist ebenfalls noch nicht eindeutig geklärt, was aus zeitlichen Gründen im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht mehr machbar war.

Zum besseren Vergleich der NOx-Emissionen bei den unterschiedlichen Brennerbauarten sei an dieser Stelle auch auf das **Diagramm 4** hingewiesen.

In welchem Maße sich die Senkung der NOx-Werte bei den Versuchen 9 und 10 bei der gleichzeitigen Verschlechterung des Energieverbrauches und der damit verbundenen Erhöhung des Abgas-Volumens auf die NOx-Fracht (-Massenstrom) auswirkte, wird nachfolgend noch näher erläutert.

Wie bereits im Projektantrag ausführlich dargelegt wurde, soll sich die Reduzierung des NOx-Massenstromes aus 2 Faktoren zusammensetzen, und zwar zum einen durch die Reduzierung der NOx-Konzentration um 15 % ausgehend von 350 mg/m³_N und zum anderen durch die Energieeinsparung (von 595 kWh/t auf 490 kWh/t, entspr. 17%) bzw. der daraus resultierenden Reduzierung des Abgasvolumens. Die Frage ist nun, ob im vorliegenden Fall die Reduzierung der NOx-Konzentration von 350 auf 150 mg/m³_N (entspr. 57%) ausreicht, um den Anstieg der NOx-Fracht als Folge des deutlich gestiegenen Energieeinsatzes noch zu kompensieren. Hierzu folgender Vergleich:

	Versuchsreihe 7/8	Versuchsreihe 9/10
Mittl. Gasverbrauch [kWh/t]	593	704
Gesamt-Abgasmenge [m ³ _N]	3252	3883
Mittl. Schmelzdauer [h]	3,35	3,98
Mittl. NOx-Konzentration [mg/m ³ _N]	250	150
NOx-Fracht während der ges. Charge [kg]	0,813	0,581

Aus dem Verhältnis der NOx-Frachten gem. der untersten Zeile resultiert eine prozentuale Verbesserung um rund 28,5 %. Dies kommt zwar dem Projektziel von rund 30 % schon sehr nahe, da aber die Verbesserung allein durch die Minderung der Konzentration und nicht durch eine gleichzeitige Energieersparnis zustande kam, kann das Projektziel nur als „teilweise erreicht“ betrachtet werden.

Anmerkung: bei dem beschriebenen Vergleich handelt es sich um eine vereinfachte Form, die zwar die absoluten NO_x-Frachten in kg nicht genau wieder gibt, definitiv jedoch die prozentuale Verbesserung, die ja auch im Antrag so formuliert ist. Ein wesentlicher Grund für die Ungenauigkeiten in den absoluten NO_x-Frachten liegt darin, dass mit Blick auf die Darstellung gem. **Diagramm 3** die NO_x-Konzentration während der gesamten Charge nicht konstant sondern eine Funktion der Ofentemperatur ist. Für die Berechnungen gemäß obiger Tabelle wurde die Konzentration jedoch der Einfachheit halber als konstant erachtet.

Für den prozentualen Unterschied, der während der gesamten Charge konstant bleibt, ist bei sonst gleichen Randbedingungen (Gemischeinstellung usw.) jedoch **nur** die Brennerbauform maßgebend, so dass in diesem Zahlenwert die Auswirkungen der neuen Brennbauart konkret sichtbar werden.

dd) Abbrand (Krätzemengen)

Vergleichende Untersuchungen im Vorfeld der Versuche am 5t-Ofen sowie Hinweise in der einschlägigen **Literatur [4]** lassen an Öfen zum Schmelzen von Aluminiumschrotten in der Regel Krätzemengen in der Größenordnung von 25 kg pro Tonne Einsatzmaterial erwarten.

Bei den Versuchsreihen 7 und 8 am 5t-Ofen hingegen lagen die Krätzemengen lediglich zwischen 6,5 und 9 kg/t und bei den Versuchsreihen 9 und 10 zwischen 8,0 und 8,5 kg/t. Was auf den ersten Blick als überaus positiv erscheint, muss jedoch durch folgende Tatsachen/Überlegungen relativiert werden: beim Einsatzmaterial am 5t-Ofen handelte es sich um Masseln mit einem Reinheitsgrad von 99,9%. Dies hat den Vorteil, dass sich die Versuchsergebnisse bezüglich des Gasverbrauches und der Schmelzleistung bestens miteinander vergleichen lassen. Reine Masselchargen sind an Produktionsöfen jedoch die absolute Ausnahme, vielmehr dienen Masseln i.d.R. nur als Zusatzmaterial. Masseln haben aber im Vergleich zu ihrer Masse bzw. ihres Volumens eine vergleichsweise geringe Oberfläche, wodurch naturgemäß der Sauerstoffangriff während des Schmelzens und damit die Krätzbildung auf ein Minimum reduziert wird. Insofern kann man nicht erwarten, dass die geringe Krätzmenge überwiegend auf die Brenner zurückgeführt werden kann. Um zu diesem Themenkomplex ein abschließendes Urteil bilden zu können, wären deshalb auch Schmelzversuche mit den üblichen Schrottzusammensetzungen erforderlich gewesen, was jedoch aus zeitlichen Gründen nicht mehr machbar war.

ee) Schmelzleistung

Die Schmelzleistung (t/h) bzw. die spez. Schmelzleistung in t/(h x m²) bzw. in t/(h x MW) waren zwar nicht ausdrücklich Gegenstand der Untersuchungen, sie geben allerdings wertvolle Hinweise insbesondere auf die unterschiedliche Wirkung von Brennern der ursprünglichen Bauart sowie der modifizierten Brenner.

Mit Blick auf die **Tabelle 2** wird ersichtlich, dass bei den Versuchen mit der ursprünglichen Brennervariante Schmelzleistungen zwischen 1,1 t/h bis knapp 1,3 t/h erreicht wurden (Ausnahme: Versuchsreihe 3 mit der hohen Ofen-Vorwärmung). Insbesondere die Versuchsreihen 7 und 8 (mit den reparierten Brennern) liegen mit 1,21 und 1,18 t/h genau in diesem Trend.

Ähnlich wie beim Energieeinsatz gem. aa) wurden die Ergebnisse der Schmelzleistung nach dem Umbau auf die Brenner mit flammenloser Verbrennung mit nur noch 1,0 t/h deutlich schlechter.

Ergebnisverschlechterungen in dieser Größenordnung sind für einen Produktionsbetrieb absolut nicht tragbar. Da die flammenlose Verbrennung mittlerweile jedoch in anderen Industriezweigen wegen den niedrigen NO_x-Werte bereits deutlich auf dem Vormarsch ist, erscheint es dringend angeraten, vergleichende Untersuchungen zu den Themenkomplexen Energieverbrauch und Produktionsrate durchzuführen.

ff) Füllmengen

Dieses Thema war nicht primär Gegenstand des Projektes. Allerdings mussten aus praktischen Erwägungen heraus Untersuchungen hierzu angestellt werden, da das Fassungsvermögen des Ofens nicht die ursprünglich geplanten 5 t erreichte. Ferner musste im Laufe der Zeit aus Gründen der Verfügbarkeit auch von der max. möglichen Füllmenge von 4,5 t Abstand genommen werden, i.d.R. wurden die Versuche deshalb mit 4 t durchgeführt.

Zunächst zeigt die Gegenüberstellung der Versuchsreihen 1 und 2 zur Versuchsreihe 5, dass die Ergebnisse mit 4 bzw. 4,5 t Füllmenge bei 1050°C max. Decktemperatur keine signifikanten Unterschiede aufweisen (ca. 1,15 t/h zu 1,19 t/h; ca. 570 kWh/t zu 568 kWh/t). Auch bei 1150°C (Versuchsreihe 4 und 6) sieht die Bilanz kaum besser aus (1,25 t/h zu 1,28 t/h; 553 kWh/t zu 535 kWh/t).

Somit ist auch kaum zu erwarten, dass Füllmengen von 5 t, weitere gravierende Verbesserung hervorrufen würden. Daraus folgt, dass die Ergebnisse, insbesondere der Energieeinsatz [kWh/t], als repräsentativ angesehen werden können.

gg) Ofen-Vorwärmung

Das Thema Ofen-Vorwärmung (Temperatur des noch leeren Ofens unmittelbar vor dem Chargieren) wurde aus praktischen Erwägungen heraus näher untersucht, da es diesbezüglich im Alltagsbetrieb durchaus zu unterschiedlichen Zuständen kommen kann.

Wie die Ergebnisse der Versuchsreihe 3 zu den Ergebnissen der Reihen 1 und 2 zeigen, hat die Erhöhung der Ofen-Vorwärmung einen ganz erheblichen, allerdings vordergründig, positiven Einfluss. Denn müssen diese hohen Temperaturen erst durch eine entsprechende, gezielte Vorwärmung erzeugt werden, was i.d.R. immer der Fall sein wird, muss auch die hierfür erforderliche Energie in die Gesamtbilanz einbezogen werden. Diese zusätzliche Energie wurde im vorliegenden Fall bewusst nicht in die Berechnung der Schmelzleistung und des Energieverbrauches einbezogen, um die Unterschiede zunächst besser zu verdeutlichen. Ohne Berücksichtigung der zusätzlichen Energie sinkt der spezifische Energiebedarf von ca. 570 auf 480 kWh/t, die Schmelzleistung steigt von ca. 1,10-1,15 auf 1,4 t/h.

Um andererseits den zusätzlichen Energiebedarf zu berücksichtigen, müsste man konkret wissen, wie lang die Zeiträume zwischen dem Entleeren des Ofens und dessen neu Befüllung wären. Tendenziell kann man jedoch davon ausgehen, dass aus dieser Vorgehensweise kein nennenswerter Vorteil entsteht.

hh) max. Ofentemperatur während des Schmelzprozesses

Positiver sieht die Bilanz zunächst aus, wenn die Ofen-Solltemperatur von 1050°C auf 1150°C erhöht wird. Bei den Versuchen mit 4t Füllgewicht (Versuchsreihe 1/2 und 4) stieg die Schmelzleistung von ca. 1,15 auf 1,25 t/h (8,8 %), gleichzeitig sank der spez. Energieverbrauch von ca. 570 auf 553 kWh/t (- 3 %).

Bei den Versuchen mit 4,5 t Füllgewicht (Versuchsreihen 5 und 6) verursachte die Anhebung der Deckentemperatur eine Steigerung der Schmelzleistung von 1,19 auf 1,28 t/h hervor (+ 8 %) bei einer gleichzeitigen Reduzierung des spez. Energieverbrauches von 568 auf 535 kWh/t (- 6%).

An dieser Stelle muss allerdings nochmal darauf hingewiesen werden, dass realistisch betrachtet nach Abschluss der Versuchsreihen 1-6 noch keine richtige flammenlose Verbrennung erzielt wurde. Insofern wären ähnliche Verbesserungen allein durch eine Erhöhung der Solltemperatur vermutlich auch an Öfen mit herkömmlichen Brennern erreichbar. Interessant sind in diesem Zusammenhang die Resultate der Versuchsreihen 9-11 mit den modifizierten Brennern.

In diesem Stadium konnte die flammenlose Verbrennung sehr gut dargestellt werden (s. auch Abschnitt ff: NOx). Bemerkenswert ist hierbei allerdings die Tatsache, dass die tatsächlich erreichbaren Ofentemperaturen trotz des Sollwertes von 1150 °C mit nur 1070-1080°C um ca. 50 K niedriger waren, als mit den Brennern in der ursprünglichen Ausführung. Die Schmelzleistung und der Energieverbrauch waren mit 1,0t/h bzw. mehr als 700 kWh/t deutlich schlechter als zuvor. In diesem Zusammenhang wäre es wichtig zu klären, ob die flammenlose Verbrennung grundsätzlich einen Nachteil bezüglich der erreichbaren Temperaturen mit sich bringt, was eine Erklärung für den deutlich schlechteren Energieeinsatz und die schlechtere Schmelzleistung sein könnte und welche deren Einsatz aus wirtschaftlicher Sicht an Aluminiumschmelzöfen u.U. hinfällig werden lässt. Diese Frage konnte allerdings aus zeitlichen Gründen nicht mehr während dieses Projektes geklärt werden und ist somit ein Thema weitergehender Untersuchungen.

ii) Zusammenfassung der Ergebnisse gem. aa-hh

Der Einsatz der flammenlosen Verbrennung an Al-Schmelzöfen hatte auf die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Parameter folgende Einflüsse:

- der Energieeinsatz wurde um knapp 20% schlechter
- die CO₂-Emissionen stiegen in einer ähnlichen Größenordnung
- die NO_x-Emissionen konnten nahezu um die gewünschte Größenordnung von 30% reduziert werden, allerdings nur durch eine gravierende Reduzierung der Konzentration im Abgas bei bis dato noch keiner zusätzlichen Energieeinsparung
- der Einfluss auf den Abbrand kann derzeit nicht näher beziffert werden, da bisher noch keine Erfahrungen mit praxisnahen Chargenzusammensetzungen gesammelt werden konnten
- auch die Schmelzleistung verschlechterte sich durch den Einsatz der flammenlosen Verbrennung um ca. 20%, ähnlich wie der Energieeinsatz und die CO₂-Emissionen
- Die unterschiedlichen Füllmengen von 4, 4,5 und 5 Tonnen haben auf die Schmelzleistung und den Energieverbrauch keinen nennenswerten Einfluss
- Die Ofenvorwärmtemperatur hat einen enormen Einfluss auf die Schmelzleistung und auf den Energieverbrauch, allerdings sind Ofenfahrweisen mit erhöhten Vorwärmtemperaturen (> 850°C) wenig realistisch
- Die maximale Ofentemperatur beim Schmelzbetrieb hatte mit den Brennern der ersten Ausführungsart ebenfalls einen positiven Einfluss. In der Gesamtbilanz eines Produktionsofens muss dieser Aspekt allerdings sehr kritisch betrachtet werden, da höhere Temperaturen z.B. auch deutlich höhere Anforderungen an die Ofenausmauerung stellen und u.U. häufigere Reparaturstillstände erfordert. Grundsätzlich bleibt auch noch zu klären, ob und ggf. welche Maßnahmen an Aluminiumschmelzöfen getroffen werden müssen, um mit der flammenlosen Verbrennung Temperaturen von 1150°C zu erreichen.

jj) Vergleich der Versuchsergebnisse am 5t-Ofen mit denen von Produktionsöfen

Eine vergleichende Übersicht ist in der **Tabelle 3** dargestellt.

Der 5t-Ofen liegt demnach nur bei den NO_x-Emissionen an der Spitze. Beim spezifischen Energieverbrauch und der spezifischen Schmelzleistung hinkt er, insbesondere nach dem Umbau auf die flammenlose Verbrennung, den bestehenden Produktionsöfen durchweg deutlich hinterher. Dass jedoch, nebenbei bemerkt, der Ofen 10 bei Alunorf im Hinblick sowohl auf die spez. Schmelzleistung je m² Badoberfläche als auch im Energieverbrauch Spitzenreiter ist, dürfte in erster Linie auf dessen max. Betriebstemperatur von 1250°C zurück zu führen sein.

Verbesserungen die am 5t-Ofen noch während der 1. Versuchsperiode erzielt wurden, erreichten wir, abgesehen von den NO_x-Werten, primär durch optimierte Ofenfahrweisen (d.h. höhere Ofen-Vorwärmung und höhere Temperaturen während des Schmelzbetriebes) und weniger durch die neue Brennerbauart.

b) Grenztests, Erfassung von Strömungsparametern**1. Grenztests**

Gemäß Definition im Projektantrag ist unter den Grenztests eine vergleichende Betrachtung

unterschiedlicher Brenner-Regelungsmodi zu verstehen. Im Allgemeinen unterscheidet man folgende Regelungsmodi:

- a) Ein-/Aus-Regelung
- b) Groß-Klein-Aus-Regelung
- c) Stetige Regelung

Ein Vergleich dieser unterschiedlichen Regelungsarten konnte am 5t-Ofen aus folgendem Grund nicht durchgeführt werden:

Bei allen Versuchen zeigte sich, dass mit dem Erreichen einer Ofentemperatur von ca. 1050°C das Material bereits zum größten Teil eingeschmolzen war. D.h. im Falle einer stetigen Regelung, die für den 5t-Ofen auch programmiert war, ist es erst gar nicht dazu gekommen, dass die Brenner nennenswert abgeregelt wurden. Vielmehr wurden mit Erreichen von 1050°C die üblichen Prozessschritte „Abkrätzen und Rühren“ eingeleitet, um einer möglichen Überhitzung des Bades entgegen zu wirken. Diese Prozessschritte werden mittels Gabelstapler von außen ausgeführt. Die Ofentür steht während dieser Zeit-Dauer von ca. 10-15 Minuten offen. Direkt im Anschluss wird dann das Bad-Thermoelement eingefahren und die Regelung erfolgt danach über die Badtemperatur bis zum Erreichen des Endwertes von 760°C. Auch dieser letzte Schritt, Regelung über die Badtemperatur, erfolgt fast ausschließlich bei Volllast der Brenner, da die Ofenwandung während des Abkrätzens und Rührens auf unter 900°C abkühlt, das Bad jedoch zuvor schon bei ca. 700°C angelangt war und die Zeit bis zum Erreichen von 760°C recht kurz ist.

Unter diesen Umständen war es am 5t-Ofen nicht möglich, den Einfluss der unterschiedlichen Regelmodi zu untersuchen. Generell müsste dieses Thema im Falle einer Fortsetzung des Projektes nochmal neu angegangen werden.

2. Erfassung von Strömungsparametern, Ableitung von Hypothesen

In Anbetracht der enormen Verzögerungen sowohl in der Bau- und Inbetriebnahmephase als auch durch die Schäden an den Brennern und der Tatsache, dass die Brenner während des Projektes modifiziert werden mussten, war es nicht möglich, im geplanten Projektzeitraum sinnvolle Testreihen zu fahren, welche relevante und verlässliche Strömungsparameter für die Ableitung von Hypothesen hätten liefern können. Insofern muss auch dieser Punkt für weitergehende Untersuchungen zurückgestellt werden.

Fazit

Wie bereits mehrfach im Hauptteil dieses Berichtes geschildert, war es Rahmen der zur Verfügung stehenden Zeit und mit den Brennern in den bisher getesteten Konfigurationen nicht möglich, die im Projektantrag genannten Ziele vollständig zu erreichen. Insbesondere der Energieverbrauch und die Schmelzleistung müssen deutlich verbessert werden. Auch bei den NO_x-Emissionen besteht durchaus noch Verbesserungsbedarf. Zum Vergleich: in der Stahlindustrie werden heutzutage Regenerativbrenner erwartet, deren NO_x-Werte selbst bei 1300°C Ofentemp. unter 350, überwiegend sogar schon unter 250 mg/m³_N liegen. Mit Blick auf das **Diagramm 4** wird jedoch klar, dass mit den zuletzt getesteten Brennern bereits bei 1200°C NO_x-Werte um 270 mg/m³_N zu erwarten sind.

Die bisher erzielten Ergebnisse am 5t-Ofen und auch zwischenzeitlich bereits durchgeführte Simulationsrechnungen geben durchaus Anlass zu der Hoffnung, dass in absehbarer Zeit nennenswerte Verbesserungen der o.g. Parameter möglich sind.

Seitens Andritz-FBB wird deshalb nach dem offiziellen Abschluss dieses Projektes keinesfalls ein Schlusstrich gezogen. Da die im Projektantrag genannten technischen Risiken, soweit bisher erkennbar, nicht nachteilig in Erscheinung getreten sind, weder in Form der „Störgröße Schmelzgutberg als Hinderungsgrund für eine homogene Temperatúrausbreitung“ noch in Form einer übermäßigen Staubentwicklung, welche die Aufrechterhaltung der Flamme und/oder die regenerative Luftvorwärmung beeinträchtigt. Insofern steht dem Einsatz der flammenlosen Brenner auch weiterhin nichts im Wege.

Zunächst wird mit Hilfe mathematischer Modelle an weiteren Verbesserungen des Brennerdesigns gearbeitet werden, welche im Anschluss daran zunächst an einem der Andritz-FBB-eigenen Versuchsofen getestet wird. Ziel wird es sein, in Kooperation mit Trimet Aluminium AG die Brenner am 5t-Ofen weiter zu optimieren und die Gründe für die Verschlechterungen beim Energieverbrauch und bei der Schmelzleistung mit den zuletzt getesteten Brennern zu ergründen.

Ein weiteres Ziel könnte sein, nach einem Umbau der Brenner am Ofen 7 bei Trimet auch dort Versuche mit höheren Ofentemperaturen bis zu 1150°C zu fahren, um den Einfluss der flammenlosen Verbrennung im Vergleich zu konventionellen Brennern unter realen Produktionsbedingungen quantifizieren zu können.

Aufgrund der zuletzt immer noch optimistischen Gesamtsituation besteht somit Grund zu der Annahme, dass auch die im Projektantrag für Andritz-FBB genannten bisherigen und zukünftigen kommerziellen Risiken durchaus überwunden und die Wettbewerbsfähigkeit durch den Einsatz neuer Brennergenerationen gesteigert werden kann.

Literaturverzeichnis

[1] ANDRITZ METALS:

Flammenlose Verbrennung; Möglichkeiten und Vorteile,

PowerPoint-Präsentation 2014

[2] Joachim G. Wüning / Ambrogio Milani:

Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen,

2. Auflage 2011

[3] Katsumi Hazam et al.:

High Temperature Air Combustion,

Ausgabe: keine Angabe

[4] Udo Boin et al.:

Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf die

IPPC-Richtlinie,

Umweltbundesamt FEA-Austria, Wien 2000

[5] Gerhard Flesch:

Konzeption und Auslegung moderner Schmelzöfen für die Aluminiumindustrie

GASWÄRME International (52) Nr. 8/2003

Anhänge

Table 1: Übersicht der Auslegungsparameter von bestehenden Öfen sowie der Auslegungsparameter des 5t-Ofens

Auslegungsparameter					
Betreiber, Ofenbezeichnung	Fassungsvermögen	Brennerleistung	Badoberfläche	spez. Brennerleistung	spez. Badoberfläche
-	t	MW	m ²	MW/t	m ² /t
KUMZ, IST-Ofen	63,4	10	44,4	0,158	0,700
Neuman, 32t-Ofen	32	2,5	28,8	0,078	0,900
Alunorf, Ofen 10	85	14,7	50,3	0,173	0,562
Trimet, Ofen 7	32	3,36	22,8	0,105	0,713
Trimet 5t-Ofen, DBU-Projekt	5	0,75	5,4	0,15	1,080

Tabelle 2: Ergebnisse der Testchargen am 5t-Ofen

Ergebnisse der wichtigsten Testchargen am 5t-Ofen							
Versuchsreihe	Chargengewicht	Ofenvorwärmtemp.	Sollwert Deckentemp.	Schmelzleistung	spez. Energieverbrauch	NOx bei 1050°C	Krätzemenge
-	t	°C	°C	t/h	kWh/t	mg/Nm ³ -3% O ²	kg
1	4,0	850	1050	1,16	576	420	
2	4,0	850	1050	1,10	561	393	
3	4,0	1050	1050	1,42	469	461	
4	4,0	850	1150	1,25	553	453	
5	4,5	850	1050	1,19	568	431	
6	4,5	850	1150	1,28	535	400	
7	4,0	850	1150	1,21	567	ca. 270	35
8	4,0	850	1150	1,18	620	ca. 230	26
9	4,0	850	1150	1,00	708	150	32
10	4,0	850	1150	1,00	717	150	34
11	3,8	850	1150	1,00	686	252	

Tabelle 3: Vergleich der gemessenen Werte vom 5t-Ofen mit den Messwerten von bestehenden Öfen (incl. der Referenzwerte vom Ofen 7 bei Trimet)

Messwerte					
Betreiber, Ofen- bezeichnung	Schmelz- leistung	spez. Energie- verbrauch	spez. Schmelzleistung je m ² Badoberfläche	spez. Schmelzleistung je MW Brennerleistung	NOx bez. auf 3% O ² bei 1050°C
-	t/h	kWh/t	t / [h x m ²]	t / [h x MW]	mg/Nm ³
KUMZ, IST-Ofen	15,0	548	0,34	1,5	< 350
Neuman, 32t-Ofen	4,0	610	0,14	1,6	< 350
Alunorf, Ofen 10	25,9	525	0,51	1,76	< 350
Trimet, Ofen 7	6,0	588	0,26	1,79	< 350
Trimet 5t-Ofen Mittelwerte *	1,2	593	0,22	1,59	~ 250
Trimet 5t-Ofen Mittelwerte **	1,0	704	0,19	1,33	150
*	mit den ursprünglichen Brennern bis Ende 2014				
**	mit modifizierten Brennern Anfang 2015				

Diagramm 1: typischer Verlauf von NOx bei Regenerativbrennern während
mehrerer Feuerungszyklen

Y-Achse = NOx in mg/m³_N bez. 3% O₂

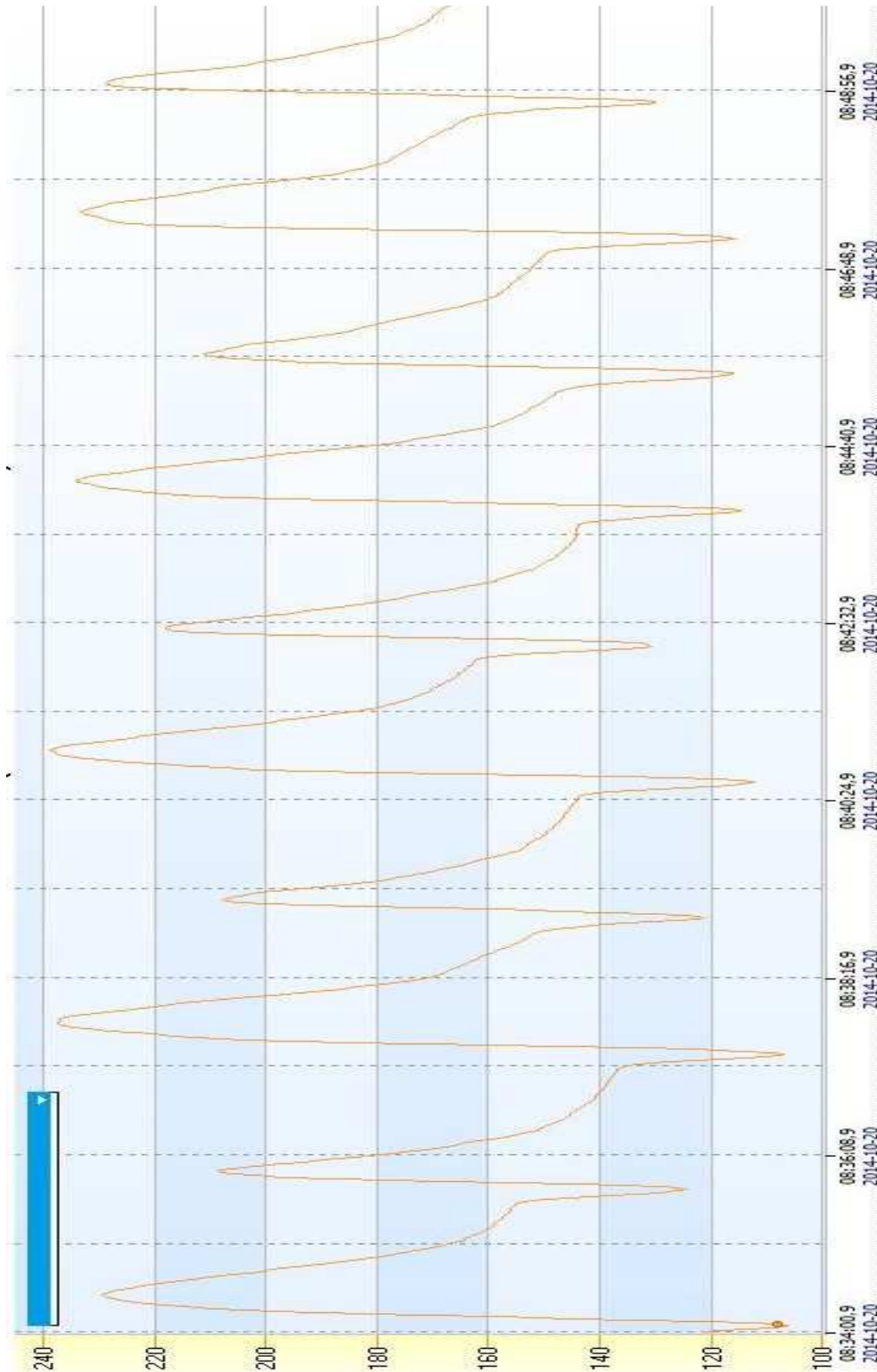


Diagramm 2: typischer Verlauf von Sauerstoff bei Regenerativbrennern während

mehrerer Feuerungszyklen

Y-Achse = Sauerstoff in Vol.-%

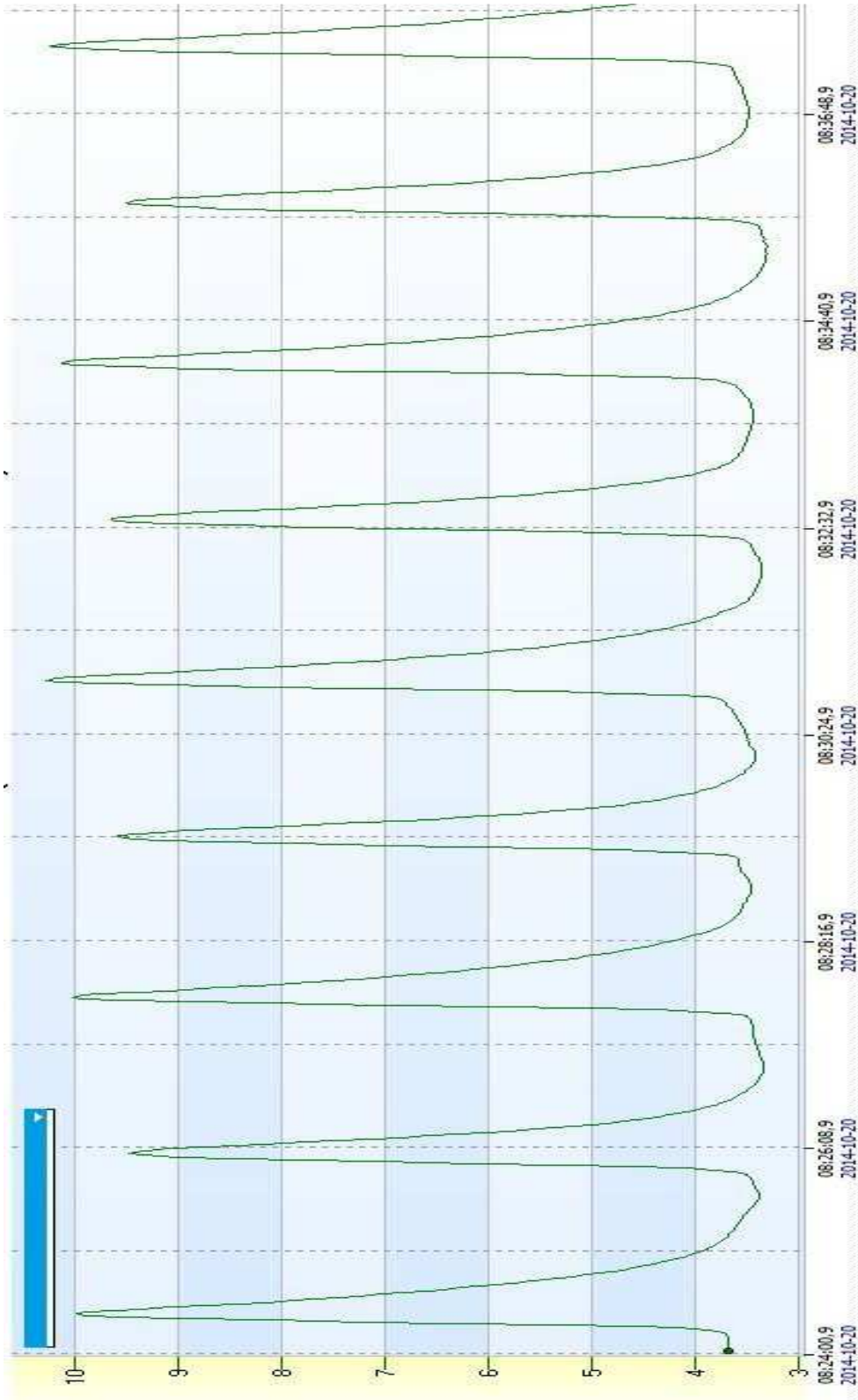


Diagramm 3: typischer Verlauf von NOx während eines Schmelzzyklus, d.h. in

in Abhängigkeit von der Ofentemperatur

Y-Achse = NOx in mg/m³_N bez. auf 3% O₂

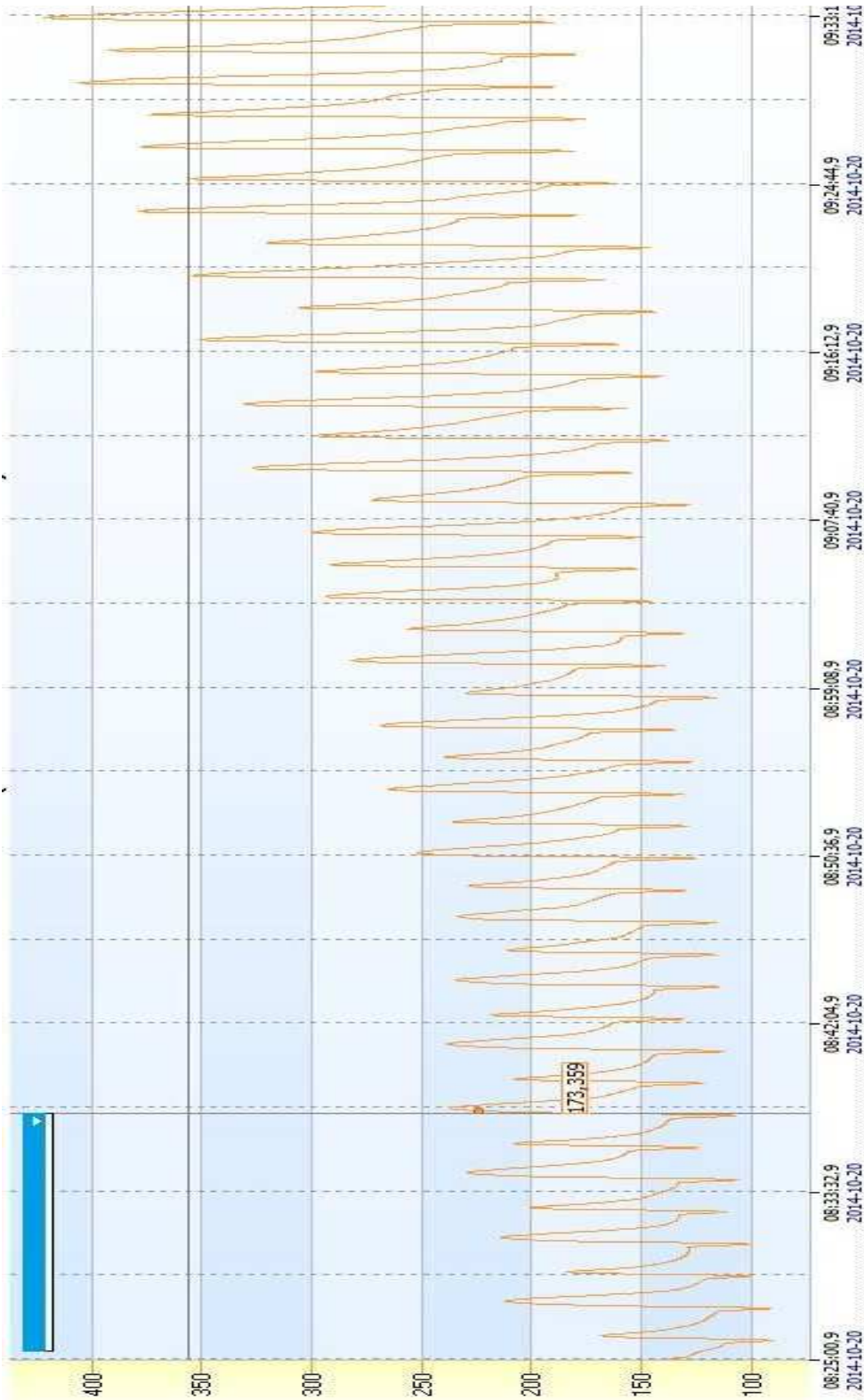


Diagramm 4: mittlere NO_x-Werte in Abhängigkeit von der Ofentemperatur:

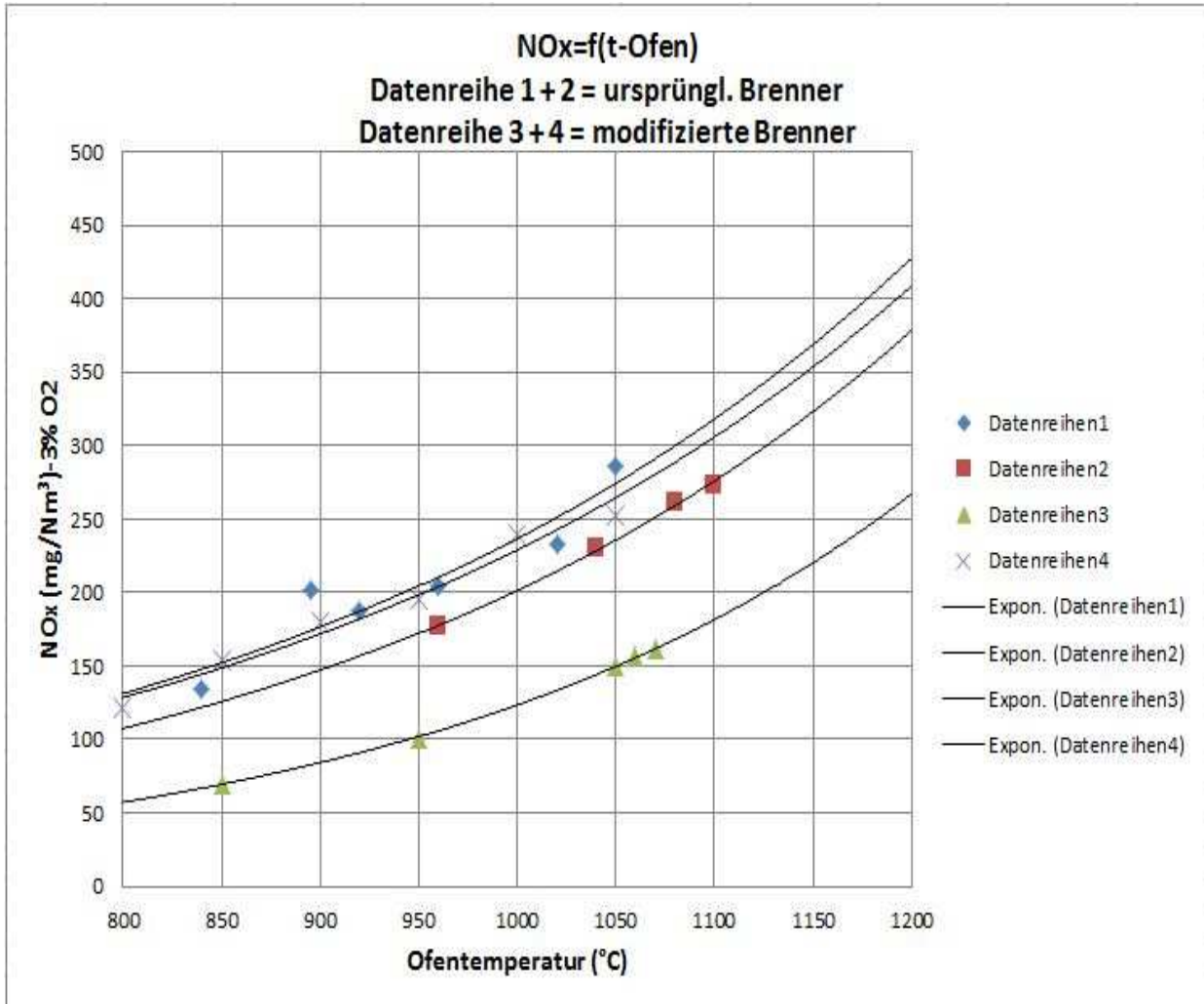


Bild 1: Ofen, Frontansicht



Bild 2: Ofen, Brennerseite



Bild 3: frisch chargierter Ofen



Bild 4: Ofen mit Flüssigmetall



Bild 5: Brennerübersicht;

Basisausführung, welche bis Ende 2014 im Einsatz war

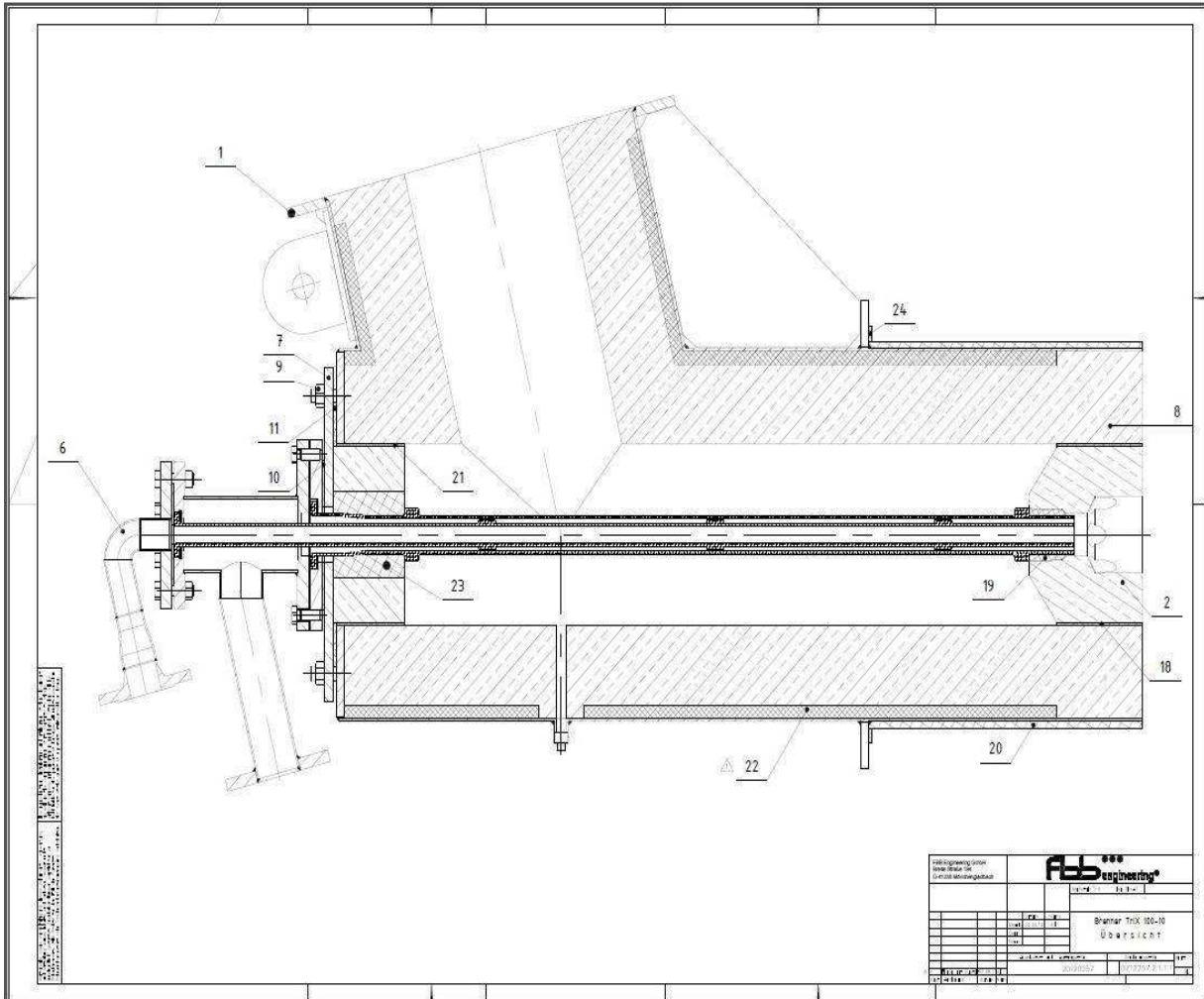
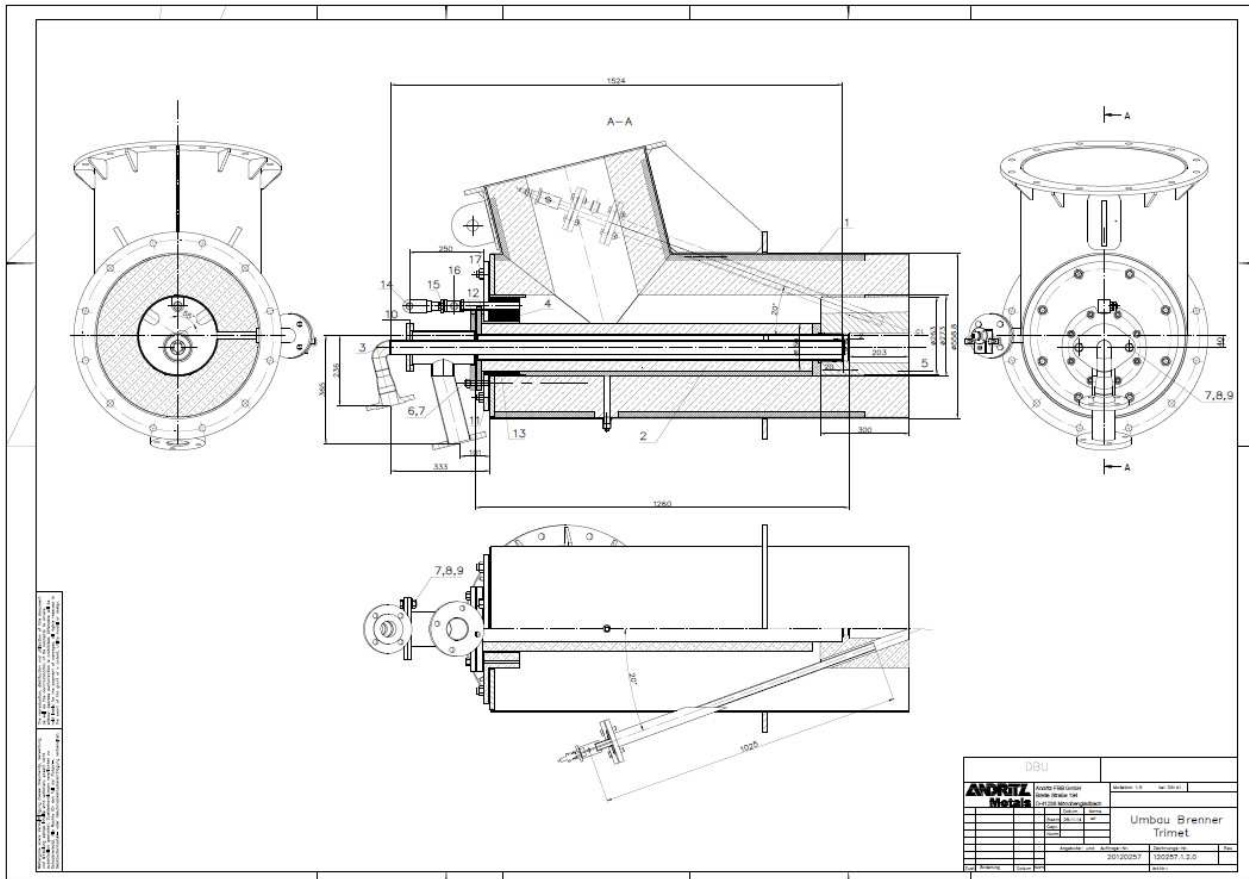


Bild 6: Brennerübersicht;

modifizierter Brenner für die Versuche ab Januar 2015



DBU		Anzahl 1,0		Größe 1020	
ANDRITZ Metals		Anzahl 1,0		Größe 1020	
Umbau Brenner		Anzahl 1,0		Größe 1020	
Trimmet		Anzahl 1,0		Größe 1020	
20120251		100007 13.0			
DBU		Anzahl 1,0		Größe 1020	

Bild 7: klassische Brennerbauform mit Brennerstein Pos. 4

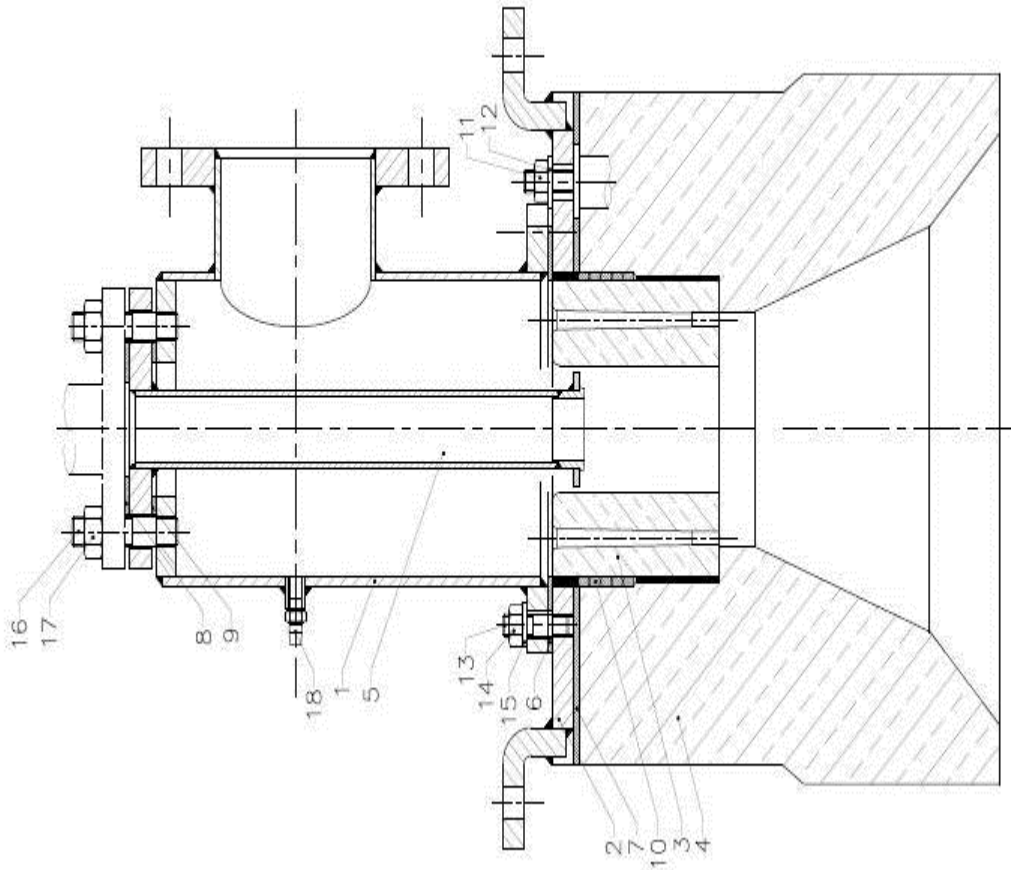


Bild 8: Brenner der ursprünglichen Ausführungsart mit defekten Keramikrohren



Bild 9: Abgasanalysator

