



**Gemeinsamer Abschlussbericht des Forschungsvorhabens:  
Energieeffizienzsteigerung in der Aluminiumindustrie durch Abwärmenutzung  
mittels innovativer Regenerativbrenner (Akronym: Alu-Reg-Bre)**

**Projektlaufzeit: 01.08.2018 – 31.07.2022**

**Förderkennzeichen und Titel des Teilprojektes des GWI:**

**03ET1601A**

CFD-Simulation und messtechnische Untersuchung

**Förderkennzeichen und Titel des Teilprojektes von FBB:**

**03ET1601B**

Auslegung und Herstellung des Brenners

**Förderkennzeichen und Titel des Teilprojektes von TRIMET:**

**03ET1601C**

Planung der Brennerintegration in die Schmelzöfen

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**Autoren:**

**Marcel Biebl, Bledar Islami, Anne Giese**

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.

**Vasile Jechiu**

ANDRITZ Metals Germany GmbH

**Uwe Kremer, Axel Marquardt**

TRIMET Aluminium SE

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Abschlussberichtes liegt bei den Autoren.

## **Projektpartner**

1. Projektpartner (Koordinierende Forschungsstelle)

**Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)**

Hafenstraße 101

45356 Essen

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Anne Giese

T: 0201 3618-257

E: [anne.giese@gwi-essen.de](mailto:anne.giese@gwi-essen.de)

2. Projektpartner

**ANDRITZ Metals Germany GmbH**

Stephanopeler Str. 22

58675 Hemer

Ansprechpartner:

Vasile Jechiu

T: 49(0) 2372 54-754

E: [Vasile.Jechiu@andritz.com](mailto:Vasile.Jechiu@andritz.com)

3. Antragsteller

**TRIMET Aluminium SE**

Aluminiumallee 1

45356 Essen

Ansprechpartner:

Uwe Kremer

T: +49(0)201 59 213-48

E: [Uwe.Kremer@trimet.de](mailto:Uwe.Kremer@trimet.de)

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	9
2	Ausgangssituation und Hintergründe .....	11
3	Vorgehensweise und erzielte Ergebnisse .....	13
3.1	Entwicklung eines umschaltbaren Regeneratorbrenners .....	13
3.1.1	Konzeptfindung zur Kombination unterschiedlicher Flammenmodi .....	14
3.1.2	Untersuchungen der Brennerkonzepte mittels CFD.....	14
3.1.3	Randbedingungen .....	17
3.1.4	Ergebnisse .....	20
3.1.5	Messtechnische Untersuchungen des entwickelten Brenners .....	22
3.1.6	Versuchsergebnisse .....	24
3.1.7	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Brennerentwicklung, Analyse der Umschaltbarkeit der Flammenmodi .....	27
3.2	Erprobung des umschaltbaren Brennerkonzeptes an Industrieanlagen .....	27
3.2.1	Erläuterung der durchgeführten Modifikationen am Brennersystem .....	28
3.2.2	Erprobung des Brennersystems am 5 t Versuchsschmelzofen.....	33
3.2.3	Erprobung des Brennersystems am 25 t Späneschmelzofen .....	47
3.3	Numerische Simulation der Brenner an Realanlagen .....	54
3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Brennerentwicklung .....	61
3.5	Betrachtung weiterer Abwärmepotenziale und nutzbarer Technologien .....	62
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	63
5	Fortschreibung des Verwertungsplans .....	64
6	Literatur .....	65

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Produktion von Primär- und Sekundäraluminium in Deutschland in den Jahren 2011 bis 2021 [1].....	9
Abbildung 2.1: Geplante Entwicklung eines umschaltbaren regenerativen Brenners (Quelle: GWI).....	11
Abbildung 2.2: Aufbau LOW NOx Flachflammenbrenner (Quelle: ANDRITZ).....	11
Abbildung 3.1: Vorgehensweise.....	13
Abbildung 3.2: Strömungslinien eines Flachflammenbrenners [2].....	14
Abbildung 3.3: Vereinfachtes Schema umschaltbarer Regenerativbrenner (Quelle: ANDRITZ) .....	15
Abbildung 3.4: Aufbau umschaltbarer Regenerativbrenner (Quelle: ANDRITZ) .....	16
Abbildung 3.5: Darstellung der Strömungslinien im Ofenraum (blau: Verbrennungsluft, orange: Brennstoff, rot: Flamme); (Quelle: ANDRITZ) .....	17
Abbildung 3.6: freibrennender Betrieb (a), Betrieb in einem befüllten Ofen (b) (Quelle: ANDRITZ) .....	18
Abbildung 3.7: Jet-Betrieb mit zentral angeordneter Gaslanze (Quelle: ANDRITZ) .....	19
Abbildung 3.8: Jet-Betrieb mit exzentrisch angeordneter Gaslanze (Quelle: ANDRITZ) .....	19
Abbildung 3.9: Temperaturverteilung im Flachflammen-Betrieb (Quelle: ANDRITZ) .....	21
Abbildung 3.10: Temperaturverteilung im Flachflammen-Betrieb (Brennernahbereich); (Quelle: ANDRITZ).....	21
Abbildung 3.11: Temperaturverteilung bei langgestreckter Flamme (Jet-Betrieb); (Quelle: ANDRITZ) .....	22
Abbildung 3.12: Versuchsstand für erste experimentelle Untersuchungen (Quelle: GWI) ....	22
Abbildung 3.13: Versuchsdurchführung am Hochtemperaturversuchsstand des GWIs (Quelle: GWI).....	23
Abbildung 3.14: Ofenraumversperrung durch Schrottbox (li.) und Brenneranschlüsse (re.) (Quelle: GWI).....	24
Abbildung 3.15: Flammenbilder diverser Betriebszustände mit dem Blick auf den Brennermund (li.); Flat-Modus mit Ofenbeladung seitlich fotografiert (re.) (Quelle: GWI) ...	25
Abbildung 3.16: NO <sub>x</sub> - und CO-Emissionen während der Aufheizphase; Flachflammenbetrieb mit Ofenbeladung (Quelle: GWI) .....	26
Abbildung 3.17: Temperatur- und Speziesverlauf im Aufheizprozess, Umschaltung von Flat- auf Jet-Modus (Quelle: GWI).....	26

Abbildung 3.18: Luftdüse mit axialer und radialer Strömungsaustrittsmöglichkeit (Quelle: ANDRITZ) .....	29
Abbildung 3.19: Position der vier neuen Gaslanzen (Quelle: ANDRITZ) .....	29
Abbildung 3.20: Strömungsfeld bei befülltem Verbrennungsraum (a) und Flammenbildung (Temperaturverteilung, b)), (Quelle: ANDRITZ) .....	30
Abbildung 3.21: Temperaturverteilung in [K] des am Materialblock angrenzenden Flammenbereiches a.) Frontansicht, b.) Seitenansicht, (Quelle: ANDRITZ) .....	30
Abbildung 3.22: Brenner im Jet-Betrieb – Strömungsfeld am Brenner in m/s; (Quelle: ANDRITZ) .....	31
Abbildung 3.23: Brenner im Jet-Betrieb – a.) Temperaturverteilung [K]; b.) CO-Verteilung in Vol.-% (Quelle: ANDRITZ) .....	31
Abbildung 3.24: Simulationsgeometrie des Jet-/ Flame- Regenerativbrenners 2 MW (Quelle: ANDRITZ) .....	31
Abbildung 3.25: Simuliertes Flammenbild bei leerem Ofen (Quelle: ANDRITZ).....	32
Abbildung 3.26: Simuliertes Flammenbild bei beladenem Ofen (Quelle: ANDRITZ).....	32
Abbildung 3.27: Versuchsgießanlage der Abteilung F&E (kurz: 5t-Ofen) (Quelle: TRIMET)....	33
Abbildung 3.28: 5 t Ofen mit geöffneter Ofentür und Reinaluminiumblöcken während des Ladevorgangs auf der linken Seite; rechts: Flambild der alten Brenner, die lokale Überhitzung der Schrotte durch die auftreffende „lange“ Brennerflamme ist deutlich sichtbar. (Quelle: Trimet).....	35
Abbildung 3.29: Reinaluminiumblöcke gestapelt im 5 t Versuchsofen mit Brennersteinen auf der linken Seite (Quelle: Trimet).....	36
Abbildung 3.30: SiO <sub>2</sub> Profilschrotte mit geringem Anteil an Verunreinigungen (Quelle: Trimet).....	37
Abbildung 3.32: Schema; Absaugsonde (Quelle: GWI) .....	38
Abbildung 3.33: Ofenzeichnung mit schematischer Darstellung des Messrasters (Quelle: GWI).....	39
Abbildung 3.34: Prinzipschema der regenerativen Schmelzofenbefuerung (Quelle: GWI) ..	40
Abbildung 3.35: Temperatur- und Spezieskonzentrationsverteilung; Brenner 1; Chargierung mit T-Bars (Quelle: GWI) .....	41
Abbildung 3.36: Temperatur- und Spezieskonzentrationsverteilung; Brenner 2; Chargierung mit T-Bars (Quelle: GWI) .....	42
Abbildung 3.37: Definition der Krätzemengenbestimmung (Quelle: TRIMET).....	43

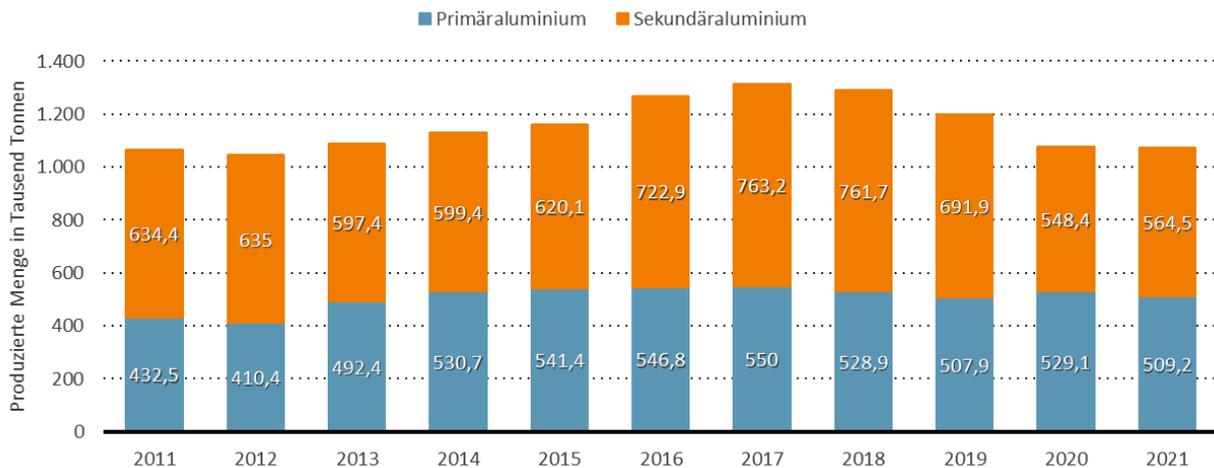
Abbildung 3.38: Bilanz der Krätzebildung (Quelle: TRIMET).....	45
Abbildung 3.39: Bilanz des Metallverlustes (links) und -ertrags (rechts) (Quelle: TRIMET)....	45
Abbildung 3.40: Vergleich der eingesetzten Energie pro kg Aluminium (Quelle: GWI) .....	46
Abbildung 3.41: Flammenausbildung in Abhängigkeit der Beladung des Ofens (Quelle: GWI) .....	47
Abbildung 3.42: Prinzipschema; regelbare Brenngaslanze (Quelle: ANDRITZ).....	48
Abbildung 3.43: Vollständig, mit Schmiederesten aus der Felgenherstellung, befüllter Ofenraum. (Quelle: TRIMET).....	49
Abbildung 3.44: schematisches Anlagenschaltbild mit Messpositionen (Quelle: GWI).....	50
Abbildung 3.45: zeitlicher Temperatur- und O <sub>2</sub> -Konzentrationsverlauf hinter dem Regenerator, neuer Brenner (Quelle: GWI).....	51
Abbildung 3.46: zeitlicher Temperatur- und O <sub>2</sub> -Konzentrationsverlauf in der Abgassammelleitung, Bestandsbrenner (Quelle: GWI) .....	52
Abbildung 3.47: Vergleich der NO <sub>x</sub> -Emissionen mit altem und neuen Brennersystem, 25 t Ofen bei ca. 1.000 °C Ofenraumtemperatur (Quelle: GWI).....	52
Abbildung 3.47: Vergleich der Krätzebildung, 25 t-Ofen (Quelle: TRIMET).....	53
Abbildung 3.48: Modellierung; 5 t -Versuchsofens (li.) und 25 t -Ofen (re.); (Quelle: GWI) ..	55
Abbildung 3.49: Temperaturverteilungen im Ofen (Quelle: GWI).....	57
Abbildung 3.50: CO-Verteilung im Ofen (feucht) (Quelle: GWI).....	58
Abbildung 3.51: Geschwindigkeitsverteilung oberhalb vom Schmelzbad (Quelle: GWI).....	59
Abbildung 3.52: Wärmeeintrag in das Schmelzbad (Quelle: GWI).....	60
Abbildung 4.1: Arbeitsplan zum Forschungsvorhaben .....	63

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Analyse der Al99,7 (P1020) Blockmetalle.....	36
Tabelle 3.2: Analyse der Si0,5 Profilschrotte aus 6000er Produktionsschrotten mit typischer und mittlerer Analyse.....	37
Tabelle 3.3: Versuchskampagne mit altem Brennersystem ohne Luftvorwärmung .....	44
Tabelle 3.4: Versuchskampagne mit neu entwickeltem Brennersystem ohne Luftvorwärmung .....	44
Tabelle 3.5: CFD Setup .....	56

# 1 Einleitung

Die ausgesprochen guten Materialeigenschaften machen Aluminium zu einem unverzichtbaren und zukunftsorientierten Material mit zahllosen Einsatzgebieten, wie der Verkehrs- (Automobil, Zug, Flugzeug, etc.) und der Verpackungsindustrie (Lebensmittel, Medizin, Kosmetik, etc.) oder dem Bauwesen.



**Abbildung 1.1: Produktion von Primär- und Sekundäraluminium in Deutschland in den Jahren 2011 bis 2021 [1]**

Aluminium besitzt gegenüber vielen anderen Produkten den Vorteil, dass es beliebig oft recycelt werden kann, ohne einen Qualitätsverlust zu verzeichnen. Wie in der **Abbildung 1.1** zu erkennen ist, wird mehr als die Hälfte des benötigten Aluminiumbedarfs durch das Recycling von sogenanntem Sekundäraluminium (Schrott) gedeckt. Das Einschmelzen und Wiederaufbereiten von recyceltem Aluminium benötigt nur rund 5 % des Energieeinsatzes, den die Herstellung von Primäraluminium aus Bauxit erfordert. Hochgerechnet auf die Sekundäraluminiumproduktion in D (2021: 564.500 t Sekundäraluminium) liegt in der Steigerung der Energieeffizienz von Aluminiumschmelzöfen ein großes Energieeinsparpotential.

Das Hauptziel des vorliegenden Projektes besteht in der Steigerung der Energieeffizienz bei der Sekundäraluminiumherstellung durch die Entwicklung eines flexiblen, umschaltbaren, regenerativen Low-NO<sub>x</sub>-Brenners bis zu 2 MW thermischer Leistung. Mit dem entwickelten umschaltbaren Brennerkonzept können die Umschmelzverluste z. B. durch Krätzebildung deutlich reduziert werden. Eine Reduktion dieser Umschmelzverluste um 1 % hat den Gegenwert des gesamten Energieeintrages zum Schmelzen von Sekundäraluminium. Hochgerechnet auf die Sekundäraluminiumproduktion in D (2021: 564.500 t Sekundäraluminium) macht dies bei der Reduzierung um 1 % und einem mittleren spezifischen Energieverbrauch von 800 kWh/t immerhin ca. 4,5 GWh/a oder 450.000 m<sup>3</sup> Erdgas/a (Heizwert: 10 kWh/m<sup>3</sup>) bzw. eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 900 t/a aus.

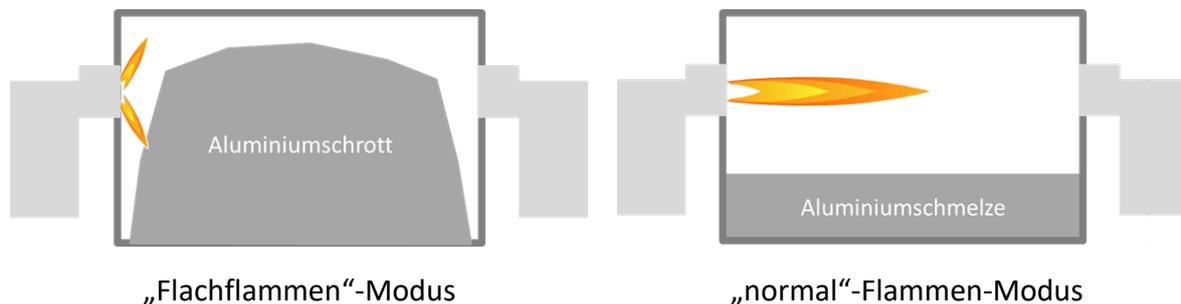
Durch die Verwendung effektiverer regenerativer Brenner mit einer Luftvorwärmung von ca. 1.000 °C im Vergleich zu 600 °C (rekuperativ) ist eine Energieeinsparung von bis 12 % zu erreichen. Dies bedeutet eine rechnerische Verminderung des Erdgaseinsatzes von ca. 24 m<sup>3</sup>/h (bei

einer angenommenen Brennerleistung von ca. 2 MW/pro Brenner) bzw. 2,102 GWh/a und eine Reduzierung der brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. 420,5 t/a und Brenner. In den vorliegenden Betrachtungen wurde von 600 °C Luftvorwärmung ausgegangen, da bei höheren Luftvorwärmtemperaturen ein Einhalten der NO<sub>x</sub>-Grenzwerte von 350 mg/m<sup>3</sup> nicht garantiert werden kann. Innovative Low-NO<sub>x</sub>-Regenerativbrenner der Fa. ANDRITZ können die NO<sub>x</sub>-Grenzwerte auch bei den angestrebten maximalen Luftvorwärmtemperaturen von 1.000 °C einhalten.

Generell wird die Wärme deutlich effizienter in den Ofen eingebracht und so Energie eingespart. In Kombination mit einer regenerativen Luftvorwärmung von 1.000 °C sind somit Energieeinsparungen gegenüber den herkömmlichen Kaltluftbrennersystemen von 30 - 40 % möglich. In Deutschland gibt es zurzeit etwa > 120 Aluminiumschmelzgießereien und Betriebe der NE-Metallindustrie.

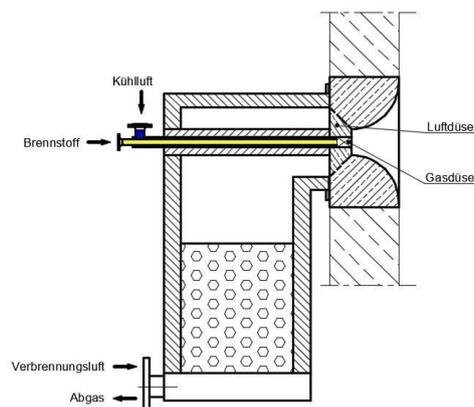
## 2 Ausgangssituation und Hintergründe

Das Hauptziel des Projektes besteht in der Steigerung der Energieeffizienz bei der Sekundäraluminiumherstellung durch die Entwicklung eines flexiblen, umschaltbaren, regenerativen Low-NO<sub>x</sub>-Brenners bis zu 2 MW thermischer Leistung für diskontinuierliche Fahrweisen. Hierbei soll ein Brennerkonzept entwickelt werden, dass aus einer Kombination aus einem Verbrennungssystem mit einer sehr flachen Flamme und einem Brennersystem mit der gewohnten „langen“, das Schmelzbad abdeckenden, Flamme besteht, siehe **Abbildung 2.1**. Dies muss z. B. durch ein einfaches Umschalten der Gas- und/oder Luftzufuhr innerhalb des Brenners realisierbar sein.



**Abbildung 2.1: Geplante Entwicklung eines umschaltbaren regenerativen Brenners (Quelle: GWI)**

Als Basis für die Entwicklung eines regenerativen, umschaltbaren „Flat-Jet Brenners“ soll der bereits von ANDRITZ Metals Germany GmbH (kurz: ANDRITZ) entwickelte regenerative Low-NO<sub>x</sub>-Flachflammenbrenner dienen. Die **Abbildung 2.2** veranschaulicht den Aufbau dieses Brennertyps.



**Abbildung 2.2: Aufbau LOW NO<sub>x</sub> Flachflammenbrenner (Quelle: ANDRITZ)**

Das charakteristische Geometriemerkmal eines Flachflammenbrenners ist der trompetenförmige Brennerstein, der für die Ausbildung einer Flachflamme verantwortlich ist. Im Brennerstein ist eine keramische Luftdüse integriert. Auf diese Weise können die beiden Brennerelemente aus dem gleichen Material gefertigt werden, was einen Vorteil hinsichtlich des Ausdehnungsverhaltens darstellt. Das dafür verwendete Material ist Feuerfestbeton, der für den Einsatz in Aluminiumöfen geeignet ist. Die Gaslanze ist zentrisch angeordnet und außen isoliert.

Die Isolierung dient unter anderen zum Schutz der Lanze gegen aggressive Medien, die die Lanze umströmen, wenn sich der Brenner im Saugbetrieb befindet. Zwischen der Isolierungsschicht und der Gaslanze selbst ist ein Spalt für Kühlluft vorgesehen. Die Kühlluft soll Phänomene wie Verkokung oder eine temperaturbedingte Verformung der Gaslanze verhindern.

Als Speichermasse für den Regenerator sollen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Kugeln verwendet werden, deren Einsatz sich in der aluminiumverarbeitenden Industrie bewährt hat.

Das neu zu entwickelnde Brennerkonzept soll zusätzlich die Möglichkeit der Umschaltung zwischen Flach- und Strahlflamme im laufenden Betrieb vorsehen. Das Umschlagen der Flamme von flach in eine geradeausgerichtete Flamme wird durch Umstellen der Brennstoffführung herbeigeführt. Ein Aufbau aus zwei Gaslanzen jeweils mit Flat und Jet Düsen ausgestattet, soll den Umschaltvorgang ermöglichen.

Hierzu sind entsprechende Entwicklungen bzgl. der Brennergeometrie, der -materialien, der -positionen, der Umschaltmodalitäten, der Einbindung in die Regelungs- und Steuerungstechnik usw. notwendig. Ein weiterer Vorteil eines solchen umschaltbaren Brennersystems besteht in der Möglichkeit auf unterschiedliche Kontaminationsgehalte der Aluminiumschrotte zu reagieren. Der Aluminiumrecyclingmarkt ist hart umkämpft und die „sauberen“ Schrotte werden mit entsprechend hohen Preisen gehandelt. Die Möglichkeit Schrotte mit deutlich höheren Kontaminationsgehalten effizient und flexibel ohne Vorbehandlung zu recyceln, stellt einen deutlichen technischen und wirtschaftlichen Vorteil gegenüber dem Stand der Technik dar.

Die geplante Vorgehensweise ist in **Abbildung 3.1** schematisch dargestellt.

### 3 Vorgehensweise und erzielte Ergebnisse

Die Forschungsarbeiten des Projektes sind größtenteils in zwei Stufen erfolgt, der Entwicklung des Regeneratorbrenners sowie der hinreichenden Erprobung mittels numerischer Simulationen und in experimentellen Untersuchungen an Versuchs- und realen Produktionsanlagen.



**Abbildung 3.1: Vorgehensweise**

Durch die, in der **Abbildung 3.1** ersichtliche Vorgehensweise konnte das, zu Beginn des Vorhabens entwickelte Brennerkonzept in mehreren Schritten modifiziert und für die jeweilige Schmelzanlage optimiert werden. Die numerischen Untersuchungen stellten hierbei einen essenziellen Baustein dar, der sich von der Konzepterstellung bis hin zur Simulation der Ofenversuche durch das Projekt zog. Für die Bewertung der Ergebnisse der Simulationen ist ein regelmäßig, im Vorfeld durchzuführender Abgleich mit der Realität von größter Bedeutung. Hierzu wurden hinreichende Messkampagnen an insgesamt drei Hochtemperaturanlagen durchgeführt. Hinzu kamen detaillierte metallurgische Laboruntersuchungen, die Aufschluss über Metall- und Abbrandverluste ermöglichen.

Analog zur schematisch dargestellten Vorgehensweise (siehe **Abbildung 3.1**) wird im weiteren Verlauf des Berichts chronologisch auf jeden Entwicklungs- und Untersuchungsschritt des Vorhabens eingegangen und die erzielten Ergebnisse dargestellt.

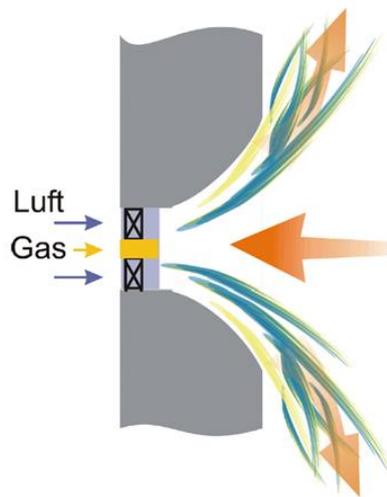
#### 3.1 Entwicklung eines umschaltbaren Regeneratorbrenners

Wie oben erwähnt, liegt das Ziel der Entwicklung in einem Regeneratorbrenner, der in Abhängigkeit der Ofenbeladung seine Flammenform moduliert. Hierzu wurde zunächst ein Konzept eines Flachflammenbrenners mit umschaltbaren Brenngaslanzen verfolgt. Im weiteren Verlauf wurden anhand erster numerischer und experimenteller Arbeiten das Konzept in mehreren Schritten modifiziert. In den nachfolgenden Ausführungen werden die Entwicklungsschritte im Einzelnen beschrieben.

### 3.1.1 Konzeptfindung zur Kombination unterschiedlicher Flammenmodi

Als Grundlage der Entwicklung wurde ein sogenannter Flachflammenbrenner der Firma ANDRITZ gewählt, da dieser bereits eine der gewünschten Flammenformen ausbildet. Die Flachflamme soll nach Ofenbeladung das stückige Aluminium ohne direkten Kontakt auf Schmelztemperatur bringen. Zur Erläuterung der Änderung in Bezug zum Stand der Technik wird das Flachflammenprinzip nachfolgend kurz beschrieben.

Die typischen Merkmale eines Flachflambrenners sind eine stark verdrallte Lufteindüsung in Kombination mit einem weit geöffneten Brennerstein. In der Regel handelt es sich um eine trompetenförmige Ausführung des Brennersteins, was dazu führt, dass der Luftstrom der Kontur des Brennersteins folgt. Im zentralen Bereich des Brennersteins entsteht gleichzeitig eine Rückstromzone, die zusätzlich dazu beiträgt, dass die Flamme stets an der Wand anliegt. Die **Abbildung 3.2** zeigt die Strömungsführung eines Flachflammenbrenners.



**Abbildung 3.2: Strömungslinien eines Flachflammenbrenners [2]**

Die strömungstechnischen Zustände, die zur Ausbildung einer Flachflamme führen, bringen im Hinblick auf einen Einsatz im Aluminiumschmelzofen einige Herausforderungen mit sich. Diese wurden einer näheren Untersuchung unterzogen.

### 3.1.2 Untersuchungen der Brennerkonzepte mittels CFD

Zur ersten Überprüfung des entwickelten Brenner- und Umschaltkonzeptes wurde eine Brennergeometrie erzeugt und vorab numerisch hinreichend untersucht. Ein wichtiger Faktor hierbei lag in den unterschiedlichen Bedingungen im Ofenraum. D. h., dass das Brennerkonzept sowohl in einem „leeren“ als auch in einem versperrten Ofenraum numerisch untersucht wurde. Nachfolgend wird auf die weiteren Randbedingungen für die ersten Simulationen eingegangen.

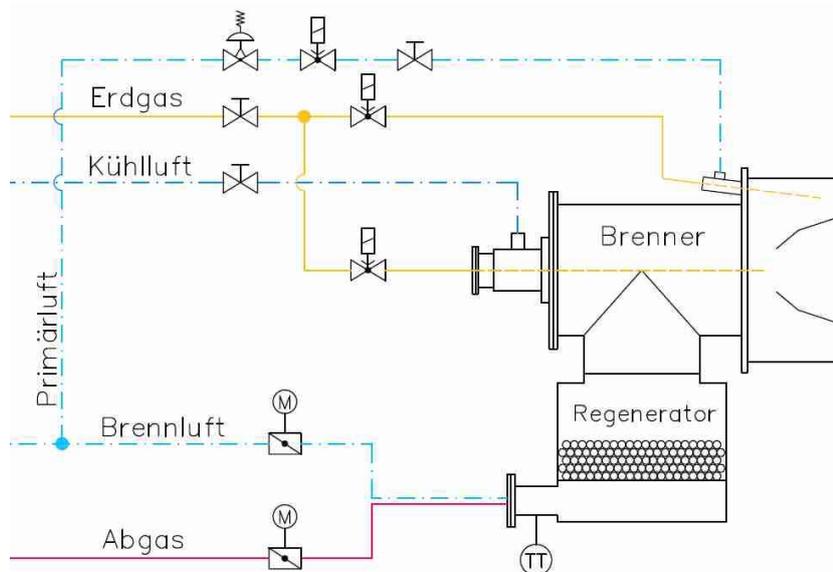
### Konzept: Umschaltbarer Regenerativbrenner für Aluminiumschmelzöfen

In der Entwicklung eines regenerativen Brenners für die Anwendung in einem Aluminiumschmelzofen sind neben den oben beschriebenen Aspekten auch andere prozessspezifische Faktoren zu berücksichtigen:

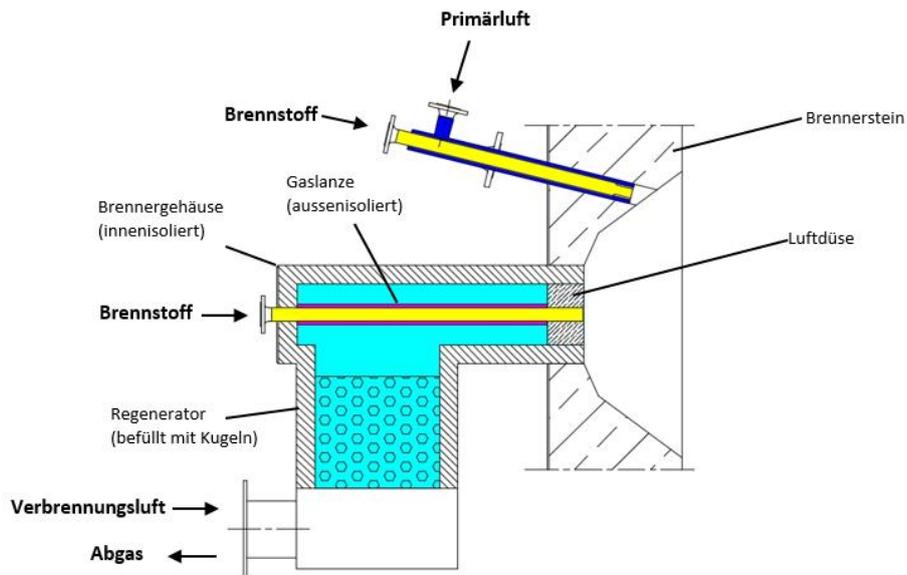
- Die Gestaltung der Gas- und Luftdüse muss die häufig sehr verschmutzte Ofenatmosphäre berücksichtigen. Die Position dieser Bauteile muss darüber hinaus so gewählt werden, dass diese vor Spritzern, die z. B. beim Nachchargieren entstehen, geschützt sind.
- Die gewählten Materialien müssen für eine hohe thermische Belastung ausgelegt werden. Darüber hinaus werden Schmelzöfen häufig als Kippöfen ausgeführt. Die sich ändernde Ofenlage und die damit entstehenden Vibrationen führen zu zusätzlichen mechanischen Kräften, die auf die Brennerbauteile wirken.
- Die Brenner müssen ein konstantes Emissionsverhalten aufweisen, unabhängig vom Beladungszustand des Ofens.

Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen das Konzept für einen umschaltbaren Regenerativbrenner (**Abbildung 3.3** und **Abbildung 3.4**). Folgende Hauptmerkmale zeichnen dieses Konzept aus:

1. Die exzentrisch angeordnete Gaslanze zur Erzeugung einer emissionsarmen langgestreckten Flamme.
2. Die speziell angepasste Form des Brennersteins, die eine direkte Anströmung der Ofenwände und des Schmelzbads durch die Verbrennungsluft verhindert.
3. Die Speichermasse des Regenerators ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kugeln), die zu ruhigeren Strömungszuständen im Inneren des Brennergehäuses beitragen.



**Abbildung 3.3: Vereinfachtes Schema umschaltbarer Regenerativbrenner (Quelle: ANDRITZ)**



**Abbildung 3.4: Aufbau umschaltbarer Regenerativbrenner (Quelle: ANDRITZ)**

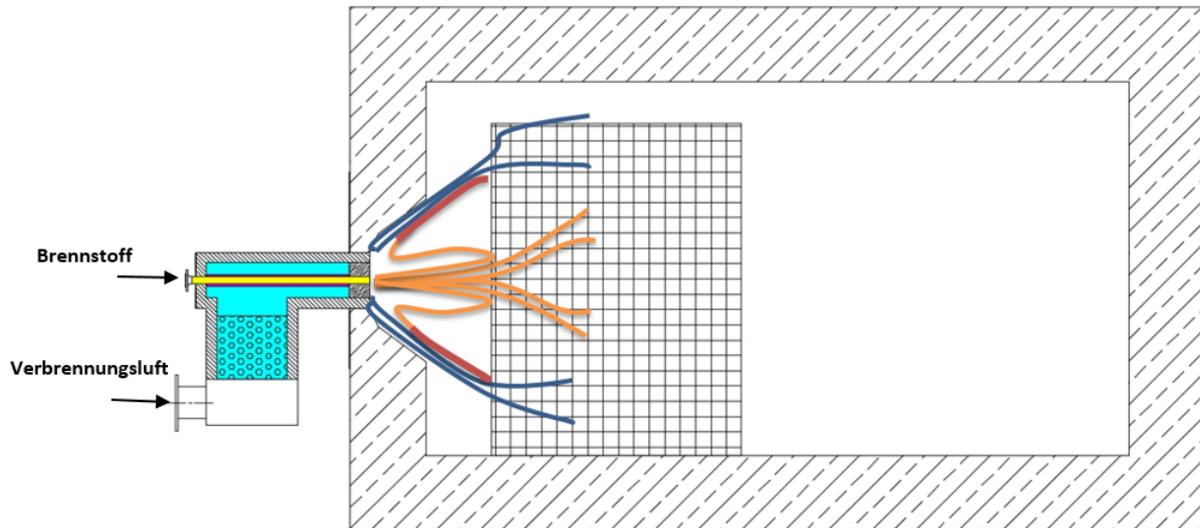
### Flachflammen-Betrieb

Zum besseren Verständnis wird nachfolgend nochmals kurz auf den Grundgedanken zur Verwendung eines Flachflammenbrenners im Aluminiumschmelzofen eingegangen.

Beim Beladen von Aluminiumschmelzöfen kommt es häufig zu Situationen, in denen das Schmelzgut sehr nah am Brenner platziert wird. Je nach Art und Volumen des Schmelzgutes lassen sich diese Lagen in der Praxis nicht vermeiden. In diesem Fall bleibt zwischen Brenner und Material lediglich ein sehr begrenzter Zwischenraum, was zu negativen Folgen wie vermehrter Krätzebildung und thermischer Überbeanspruchung des Brenners (Lebensdauermin- derung) führt. Darüber hinaus kommt es bei vollbeladenen Aluminiumschmelzöfen häufig zu einer ungünstigen Umlenkung der Flamme in Richtung Decke. Dies führt zu einem erhöhten Verschleiß der Ofenauskleidung.

Bei der Gestaltung der Strömungsführung des Brenners im beladenen Ofenzustand lag das Augenmerk auf dem Strecken der Verbrennungszone (Flamme) auf einen möglichst breiten Bereich, mit dem Ziel die lokale Verbrennungstemperatur abzusenken. Das nachfolgend beschriebene Konzept einer schonenden Verbrennung bei beladenem Ofen stützt sich auf dem Wissen, dass das Schmelzgut in der Aluminiumindustrie kein massiver Block ist, sondern mit Zwischenräumen versehen ist. Wie diese Kenntnis zur Gestaltung einer schonenden Verbrennung genutzt werden kann, veranschaulicht die **Abbildung 3.5**. Beim Umschalten des Brennstoffes auf die zentrale Gasdüse, wird das Gas axial stark beschleunigt. Die hohe Austrittsgeschwindigkeit soll dafür sorgen, dass der Gasstrahl das Wärmegut erreichen kann. Ein Teil des Gastroms kann beim Erreichen des Wärmeguts in die Zwischenräume entweichen, wo es sich verteilt. Der andere Teil wird durch die Rückstromzonen am Brenner zurückbefördert und beteiligt sich an der Zündung und Stabilisierung der Flamme. Luftseitig bildet sich eine Strömung aus, die zunächst entlang des Brennersteins verläuft, dann aber im Ofen verteilt wird. Die

großräumige Verteilung von Brennstoff und Verbrennungsluft führt zu einer Ausdehnung der Verbrennungszone, Senkung der lokalen Verbrennungstemperatur und zu einem gleichmäßigeren Energieeintrag in das Wärmegut.



**Abbildung 3.5: Darstellung der Strömungslinien im Ofenraum (blau: Verbrennungsluft, orange: Brennstoff, rot: Flamme); (Quelle: ANDRITZ)**

### 3.1.3 Randbedingungen

#### **Szenario 1: Flachflammenmodus - Brennverhalten im befüllten Ofen**

Wie bereits beschrieben, spielen die rückströmenden Abgase bzw. die Rückstromzone hinsichtlich der Funktionalität eines Flachflammenbrenners eine wichtige Rolle. Dies beeinflusst sowohl die Flammenform als auch das Emissionsverhalten.

Ein Positionieren des Schmelzgutes vor dem Brenner, kann dazu führen, dass sich die Strömungsverhältnisse vor dem Brenner ändern. Die Abgase können nicht mehr frei angesaugt werden, was theoretisch Auswirkungen auf das Brennerverhalten haben kann.

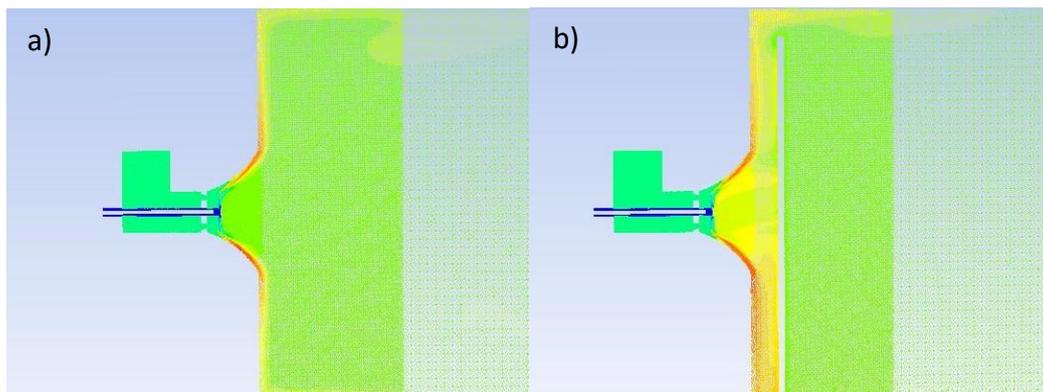
Dieser Aspekt wurde mittels CFD-Verbrennungssimulationen untersucht, wofür zwei Fälle behandelt wurden:

- *freibrennender Betrieb (Abbildung 3.6, a)*
- *Betrieb in einem befüllten Ofen (Abbildung 3.6, b)*

Im ersten Fall wird der Flachflammenbetrieb ohne Ofenbeladung untersucht. Im zweiten Simulationsfall wurde vor dem Brenner, in einem Abstand von 300 mm, eine Wand platziert, die die Materialladung des Ofens darstellt. Für die Beurteilung der Flammenform wurde bei der Auswertung der Simulationsergebnisse die Darstellung als Temperaturverteilung gewählt. In den **Abbildung 3.6 a** und **b** ist der Querschnitt der Simulationsgeometrie dargestellt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass im beladenen Ofenzustand keine nennenswerte Beeinträchtigung der Flachflammenform zu erwarten ist. Trotz begrenzter Raumverhältnisse liegt die Flamme an der Wand, so dass es zu keiner intensiven Berührung mit dem Material

kommt. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass aufgrund der begrenzten Raumverhältnisse die lokale Temperatur vor dem Brenner höher ist als im freibrennenden Betrieb. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Wärme aus der Verbrennung teilweise eingeschlossen wird, was sich in einem lokalen Temperaturanstieg niederschlägt. Das führt in der Regel zu höheren Stickoxidemissionen. Die Simulationsbilder liefern darüber hinaus Erkenntnisse, die für die Regelung der Ofenraumtemperatur relevant sein können. Im Flachflammenmodus fließen die heißen Abgase teilweise an der Decke entlang und können bei einer ungünstigen Positionierung der Thermoelemente zu verfälschter Temperaturmessung führen.

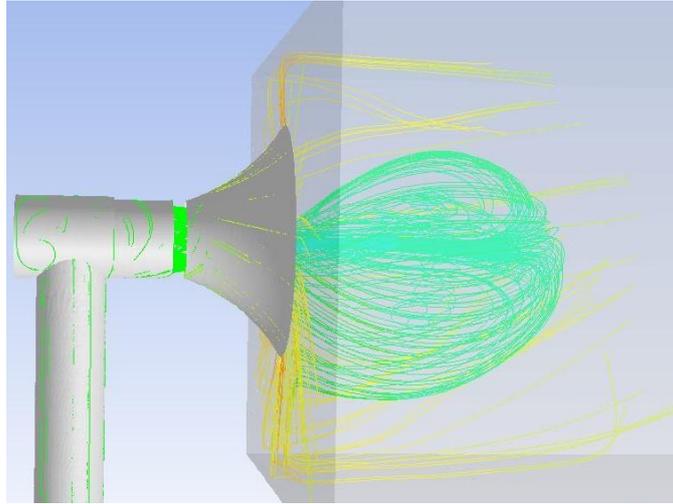


**Abbildung 3.6: freibrennender Betrieb (a), Betrieb in einem befüllten Ofen (b) (Quelle: ANDRITZ)**

### **Szenario 2: Jet-Modus - Das Schmelzgut liegt im flüssigen Zustand vor**

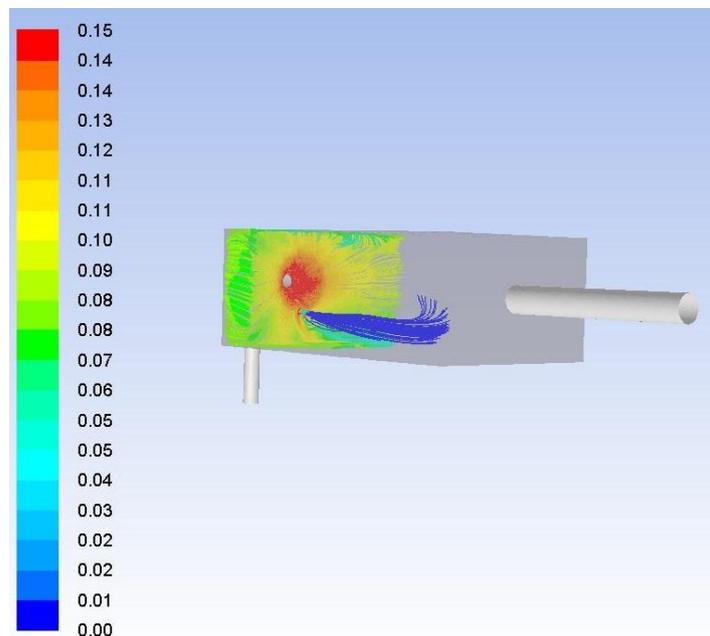
In diesem Szenario wird der Betrieb untersucht, in dem das Aluminium bereits geschmolzen ist, die gewünschte Temperatur (ca. 740 °C) jedoch noch nicht erreicht ist. In diesem Fall wird der Brenner im Jet-Modus betrieben. Anlass für die Überprüfung dieses Falls ist die Geometrie des Brennersteins. Das Konzept eines umschaltbaren Flachflammen-/Jet-Brenners legt praktisch die Form des Brennersteins fest. Der Brennerstein muss weit geöffnet sein, um im Flachflammenbetrieb die gewünschte Flammenform erzeugen zu können.

Versuche die Gaslanze zur Erzeugung einer Jet-Flamme zentral zu platzieren sind gescheitert. Aufgrund seines hohen Heizwertes und der geringen Dichte hat Erdgas einen geringen Austrittsimpuls. Beim Zusammentreffen auf den entgegenströmenden Abgasstrom wird der Gasstrahl rasch abgebremst und zurück Richtung Brennerdüse befördert. Trotz hoher Austrittsgeschwindigkeiten von 300 m/s, erzeugt durch einen Vordruck 500 mbar, wird der Gasstrahl bereits in 1 m Entfernung komplett abgebremst (**Abbildung 3.7**). Die Erzeugung einer langgestreckten Flamme in Kombination mit einer zentralen Gaslanze, einem weitgeöffneten Brennerstein und einer verdrallten Lufteindüsung ist aus diesem Grund nicht möglich (gültig für Erdgasbetrieb).



**Abbildung 3.7: Jet-Betrieb mit zentral angeordneter Gaslanze (Quelle: ANDRITZ)**

Der Gasstrahl muss dementsprechend abseits der Rückstromzone platziert werden. Das Strömungsbild bei einer exzentrisch angeordneten Gaslanze zeigt **Abbildung 3.8**. Darin stellen die Strömungslinien den lokalen Sauerstoffgehalt der Medien dar. Der Gasstrahl erscheint in blauer Farbe ( $O_2 = 0$  Vol.-%). Die an der Wand entlang verlaufende (farbige) Strömung ist die Verbrennungsluft, die an dem hohen Sauerstoffgehalt zu erkennen ist. Für eine bessere Differenzierung wurde die Sauerstoffskala auf max. 15 Vol.-%  $O_2$  begrenzt.



**Abbildung 3.8: Jet-Betrieb mit exzentrisch angeordneter Gaslanze (Quelle: ANDRITZ)**

Der Verlauf der Luftströmung stellt mit Blick auf das Energiemanagement und die Materialqualität einen unerwünschten Zustand dar. Die Verbrennungslufttemperatur ist bei regenerativen Brennern um ca. 200 K niedriger als die Ofenraumtemperatur. Im Warmhaltebetrieb beträgt die Ofenraumtemperatur in der Regel 800 °C – 850 °C. Somit strömt die Verbrennungs-

luft, die eine Temperatur von etwa 600 °C hat, direkt auf das 740 °C heiße Schmelzbad, was naturgemäß zur Abkühlung der Schmelze führt. Darüber hinaus enthält die Verbrennungsluft beim Auftreffen auf das Bad noch einen hohen Sauerstoffgehalt, ein Zustand, der mit Blick auf die Materialqualität unerwünscht ist.

### **Szenario 3: Aufheizen eines Schmelzofens nach Erneuerung der Innenausmauerung**

Dieser Aspekt ist insofern wichtig, da die Innenausmauerung bei Aluminiumschmelzöfen aufgrund des hohen Verschleißes in der Regel häufig erneuert werden muss. Nach jeder Erneuerung muss die frische Betonmasse getrocknet werden, was nach einer definierten Aufheizkurve erfolgt. Diese Aufheizkurve sieht in der Regel einen langsamen Temperaturanstieg von ca. 25 K/h vor. Bis 800 °C Ofenraumtemperatur wird das Aufheizen mittels externer Brenner (Trocknungsstation) durchgeführt. Ab 800 °C übernehmen die Regenerativbrenner den Trocknungsvorgang. In diesem Zusammenhang ist das Trocknen eines Ofens mittels Flachflammenbrennern nicht erwünscht, da sich die Flamme an die Ofenwände anlegt und es durch den Kontakt mit der heißen Flamme zu Schäden der noch frischen Ausmauerung kommen kann. Das Aufheizen des Ofens während der Trocknungsphase muss dementsprechend im Jet-Modus (langgestreckte Flamme) erfolgen.

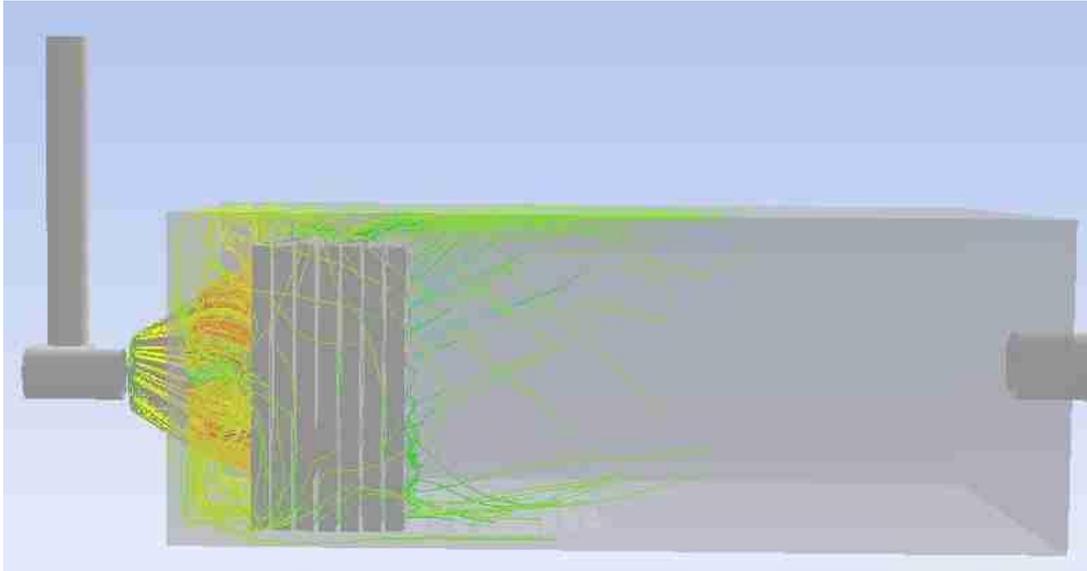
Die **Abbildung 3.8** zeigt, dass die Verbrennungsluft im Jet-Modus die umliegenden Wände direkt anströmt. Wie bereits beschrieben, besitzt die Verbrennungsluft zu jedem Zeitpunkt eine 200 K niedrigere Temperatur als der Verbrennungsraum. Mit Blick auf die gewünschte Temperaturgleichmäßigkeit der Ofenwände während der Trocknungsphase, ist dies ein Zustand, der vermieden werden muss.

#### 3.1.4 Ergebnisse

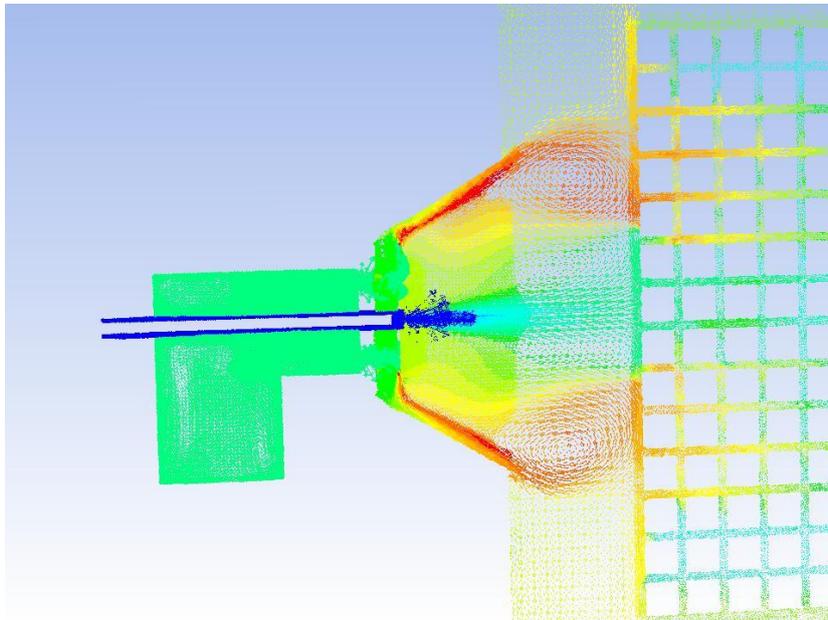
Die Funktionalität des Konzeptes wurde mittels der Verbrennungssimulation überprüft. Hierfür wurde der Betrieb bei maximaler Ofenraumtemperatur bzw. maximaler Luftvorwärmung von 950 °C simuliert, da dieser Fall im Hinblick auf die Flammentemperatur den kritischen Betriebspunkt darstellt. Die **Abbildung 3.9** und **Abbildung 3.10** zeigen die Ergebnisse der Simulation.

Es ist erkennbar, dass ein großer Teil des Brennstoffes in die Zwischenräume des Wärmegutes gelangt. Lediglich ein geringer Teil wird durch die Rückstromzonen zurückbefördert. Dies führt dazu, dass die Temperaturentwicklung im Inneren des Brennersteins geringer ausfällt, was zur „Schonung“ des Brennersteins und des Wärmegutes führt. Die Kontur der Temperaturverteilung lässt darauf schließen, dass die Flamme kaum aus dem Brennerstein herausragt, was mit Blick auf die Krätzebildung ein positiver Effekt ist.

Positiv zu beurteilen ist außerdem die Tatsache, dass der Bereich, in dem der Brennstoff auf das Wärmegut trifft, nicht überhitzt. Das ist insofern wichtig, dass höhere Temperaturen zu einem lokalen Aufschmelzen des Aluminiums und zum Verschließen der Zwischenräume führen würden.



**Abbildung 3.9: Temperaturverteilung im Flachflammen-Betrieb (Quelle: ANDRITZ)**



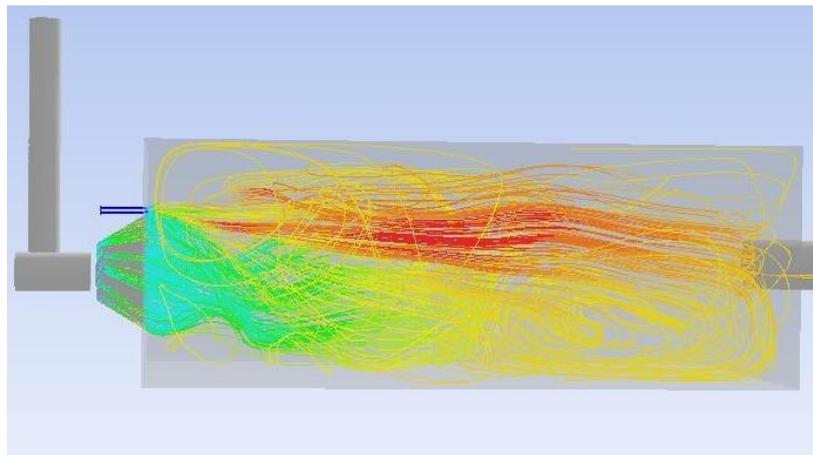
**Abbildung 3.10: Temperaturverteilung im Flachflammen-Betrieb (Brennernahbereich); (Quelle: ANDRITZ)**

### **Jet-Betrieb:**

Um eine langgestreckte Flamme zu erzeugen, wird der Brennstoff auf die Gaslanze geleitet, die außerhalb der Luftdüse platziert ist. Im Niedertemperaturbetrieb (Ofentemperatur < 800 °C) wird die sogenannte Primärluft zugeschaltet. Dadurch ist es möglich, auch in einer sauerstoffarmen Ofenatmosphäre zuverlässig zu starten und einen Betrieb mit einer stabilen Flamme zu gewährleisten.

Die **Abbildung 3.11** zeigt die Simulationsergebnisse des Brenners mit langgestreckter Flamme (Jet-Betrieb). Es ist erkennbar, dass die gesetzten Ziele an die Strömungsführung erreicht worden sind. Das Simulationsbild zeigt eine langgestreckte Flamme, die sich fast über das gesamte

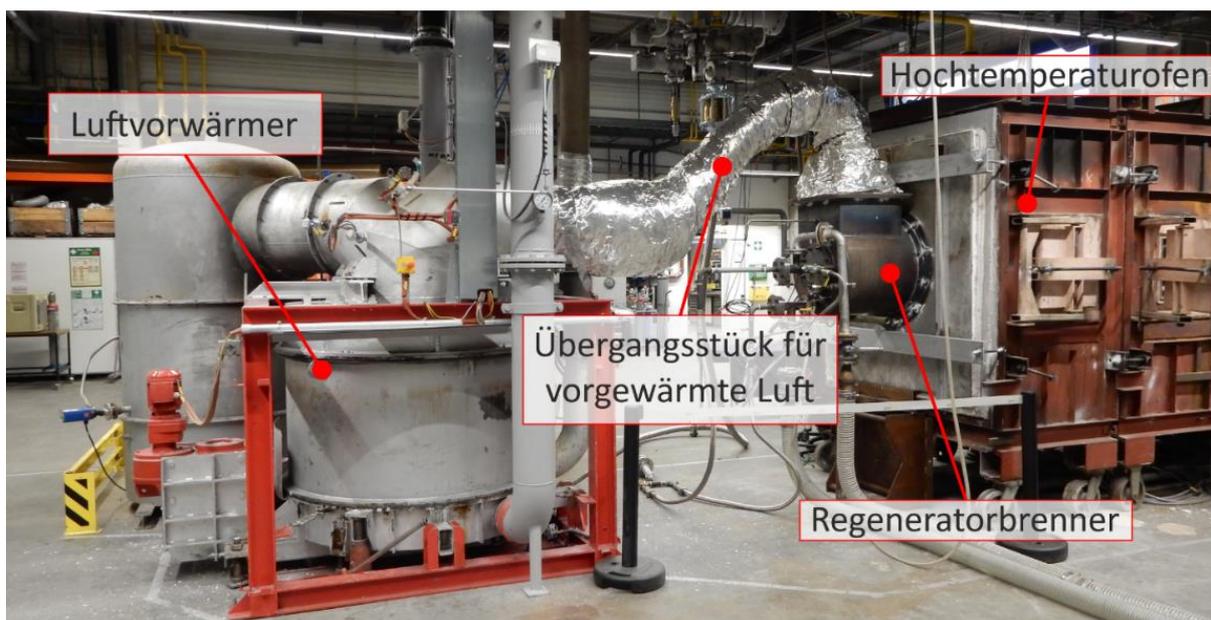
Aluminiumbad ausstreckt. Die bislang bei ANDRITZ gesammelten Erfahrungen mit den CFD-Simulationen und der Praxis lassen die Interpretation zu, dass es sich um eine „weiche“ und überdurchschnittlich lange Flamme handelt. Diese Art der Flamme zeichnet sich durch einen niedrigen Stickoxidausstoß und einen gleichmäßigen Energieeintrag in das Aluminiumbad aus. Die Ziele im Hinblick auf die Strömungsführung der Verbrennungsluft innerhalb des Ofens wurden ebenfalls erreicht. Die Luft strömt in den Verbrennungsraum, ohne das Bad und die umliegenden Wände zu berühren. Die in Szenario 2 (siehe oben) beschriebene Problematik konnte somit gelöst werden.



**Abbildung 3.11: Temperaturverteilung bei langgestreckter Flamme (Jet-Betrieb); (Quelle: ANDRITZ)**

### 3.1.5 Messtechnische Untersuchungen des entwickelten Brenners

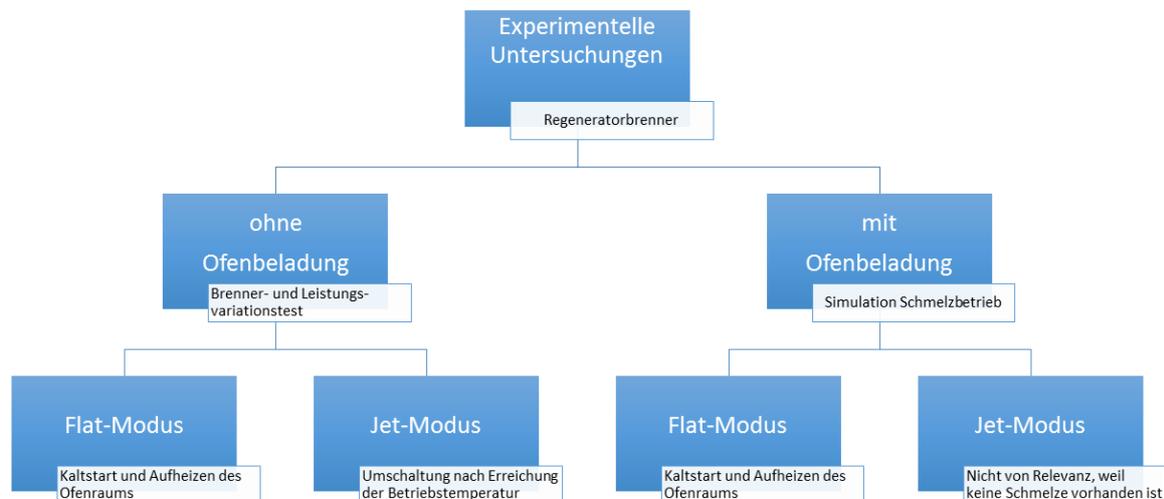
Zur ersten experimentellen Überprüfung des neu entwickelten Brenners wurde der Hochtemperaturversuchsstand am Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. verwendet.



**Abbildung 3.12: Versuchsstand für erste experimentelle Untersuchungen (Quelle: GWI)**

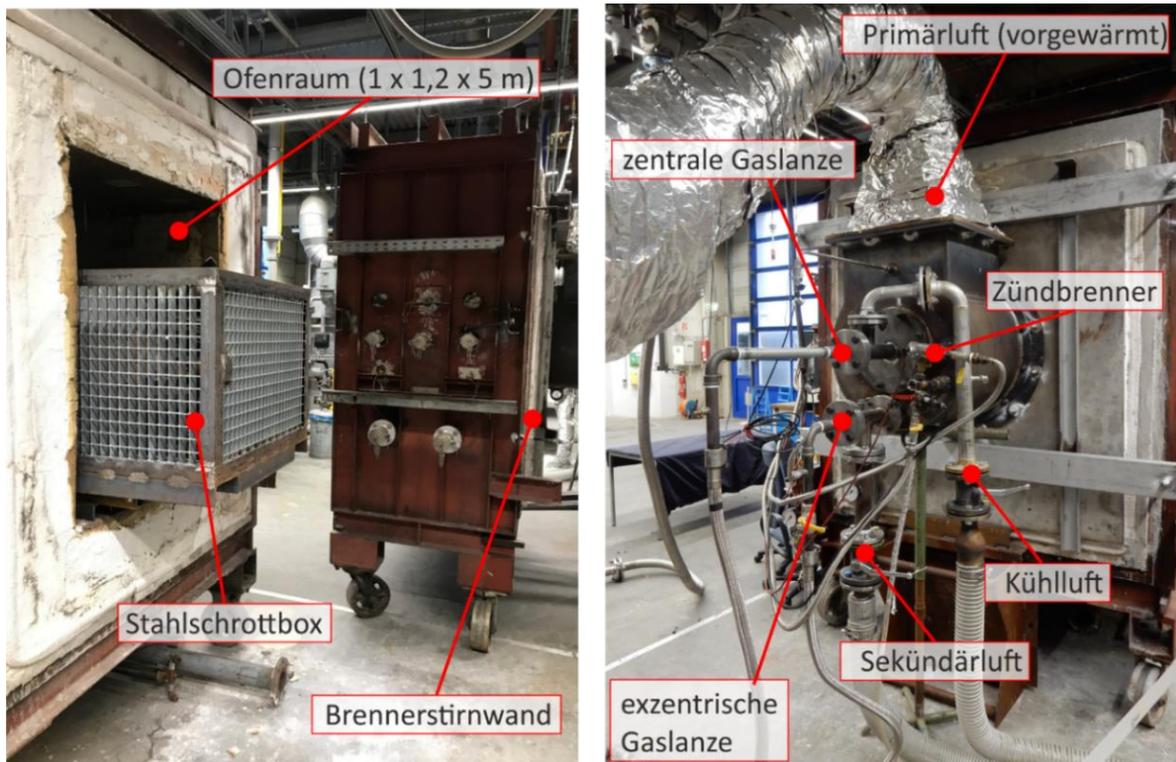
Der Vorteil lag hierbei darin, dass Brenner durch die Verwendung eines Luftvorwärmers getrennt von dem zugehörigen Regenerator experimentell untersucht werden konnte. Die nachfolgende **Abbildung 3.12** zeigt den, für die Versuche angepassten Hochtemperaturversuchsstand.

Wie bereits erwähnt, konnte aufgrund der vorhandenen Versuchsinfrastruktur des GWIs auf den Einsatz einer Brenner-/Regeneratorkombination verzichtet werden. Die Verbrennungsluft wurde über einen Drehbettregenerator vorgewärmt und dem Brenner zugeführt. Dies hatte den Vorteil, dass die Verbrennungsluftvorwärmtemperatur unabhängig von der Ofenraumtemperatur frei wählbar war. Gemäß dem Schema der **Abbildung 3.13** bestand die Versuchsdurchführung aus zwei unabhängigen Versuchskampagnen: im ersten Schritt wurde der Brenner im Hochtemperaturofen hinsichtlich des Verbrennungs-, Stabilitäts- und Schadstoffverhaltens in beiden Betriebsmodi (Flat-Modus und Jet-Modus) untersucht. Im Anschluss wurde der Ofenraum mit Hilfe einer von TRIMET angefertigten Stahlschrottbox versperrt (siehe **Abbildung 3.14**). Die Box wurde, in Anlehnung an eine Ofenchargierung mit Aluminiumschrotten, mit verschiedensten Stahlprofilen gefüllt. Durch die Schrottbox konnte so mehr als Zweidrittel der Querschnittsfläche (1.000 mm x 1.200 mm) des Ofenraums versperrt werden. Die Box wurde mit einem Abstand von 300 mm an den Brennerstein positioniert. Diese Anordnung entspricht in etwa den Verhältnissen an einem voll beladenen Aluminiumschmelzofen.



**Abbildung 3.13: Versuchsdurchführung am Hochtemperaturversuchsstand des GWIs (Quelle: GWI)**

Die **Abbildung 3.14** zeigt neben der Positionierung der Schrottbox, die Installation des Brenners sowie die Brenneranschlüsse auf der rechten Bildhälfte. Der Brenner wurde abweichend von der Einbausituation am Schmelzofen um 180 ° verdreht eingebaut. Als Grund ist die Primärluftzuführung zu nennen, die durch die vorhandene Versuchsinfrastruktur zwangsweise von oben zugeführt werden musste. Da der Jet-Modus (Betrieb der exzentrischen Gaslanze) in Kombination mit der „nicht schmelzbaren“ Ofenbeladung keinen Sinn ergab, wurde die veränderte Einbaulage akzeptiert.



**Abbildung 3.14: Ofenraumversperrung durch Schrottbox (li.) und Brenneranschlüsse (re.) (Quelle: GWI)**

Im Fokus der Untersuchung mit Ofenbeladung stand der Betrieb im Flat-Modus, der aufgrund der zentral angeordneten Gaslanze unabhängig von der Einbaulage des Brenners durchführbar war.

### 3.1.6 Versuchsergebnisse

Die **Abbildung 3.15** zeigt auf der linken Bildhälfte Flammenbilder der untersuchten Betriebsmodi. Im Jet-Modus ist deutlich erkennbar, dass sich aufgrund der veränderten Einbausituation die resultierende Flamme unterhalb der Brennermitte etabliert. Im Flat-Betrieb ohne Ofenbeladung ist hingegen eine gleichmäßige Flammenverteilung erkennbar. Das rechte Bild der **Abbildung 3.15** zeigt den Flat-Modus (Flachflammenmodus) mit Ofenbeladung. Wie zu erkennen ist, wurde der Abstand zwischen Brennerstein und der Gitterbox geringgehalten. Aufgrund des gebündelten Freistrahls der zentralen Gaslanze strömt im Flat-Modus ein Großteil des austretenden Gases in die Stahlschrottbox und führt dort zu einer homogenen Erwärmung unter reduzierten Bedingungen. Der Verbrennungsprozess wird in die Länge gezogen und Temperaturspitzen dadurch reduziert. Zudem war zu beobachten, dass sich oberhalb der Schrottbox eine Flamme bildete (siehe **Abbildung 3.15**, links).



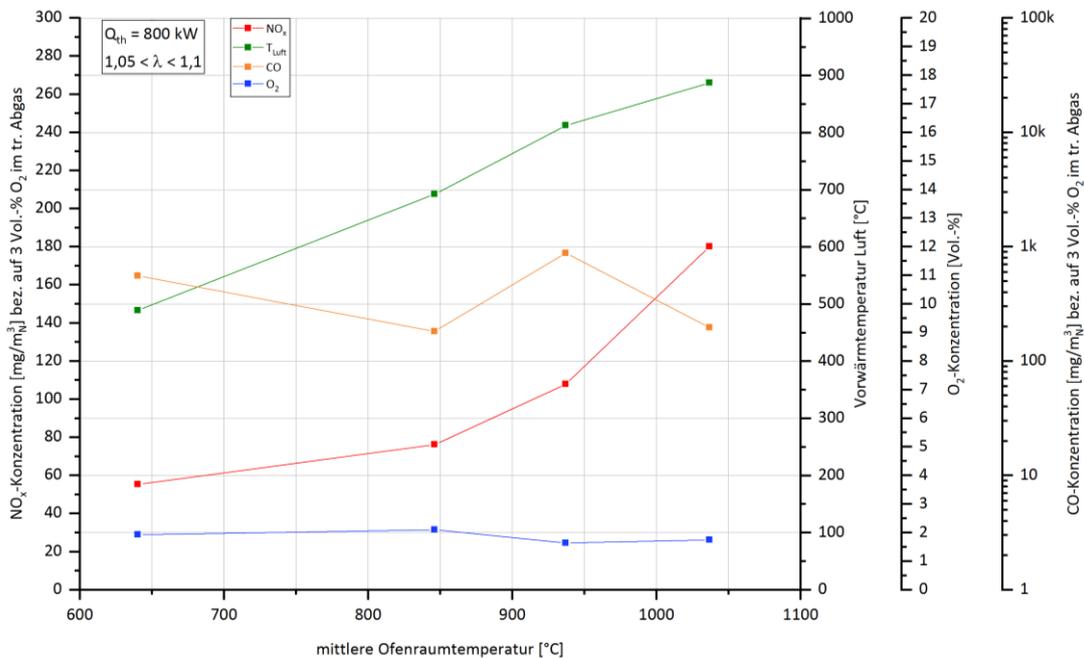
**Abbildung 3.15** :Flammenbilder diverser Betriebszustände mit dem Blick auf den Brennermund (li.); Flat-Modus mit Ofenbeladung seitlich fotografiert (re.) (Quelle: GWI)

Die **Abbildung 3.16** zeigt die Messwerte der Untersuchung des oben genannten Flat-Modus in Kombination mit der Ofenbeladung. In dieser Messreihe wurde ein typischer Schmelzbetrieb nachgestellt. Die Ofenraumtemperatur wurde schrittweise von ca. 25 °C auf ca. 1.040 °C erhöht. Im Rahmen dieser Messreihe wurde die Verbrennungsluftvorwärmtemperatur so eingestellt, dass sie in einem Bereich von 100 - 150 K unterhalb der jeweiligen Ofenraumtemperatur liegt. Diese Temperaturdifferenz sollte den Betrieb unter Einsatz eines Regenerators in einer realen Ofenanlage nachbilden. In der **Abbildung 3.16** ist neben den Konzentrationsverläufen von NO<sub>x</sub> und CO, der Temperaturverlauf der Verbrennungsluft über der mittleren Ofenraumtemperatur aufgetragen. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen unter Berücksichtigung der Ofen- und Luftvorwärmtemperatur auf einem guten Niveau. Die nicht unwesentliche CO-Konzentration ist im Rahmen der dargestellten experimentellen Untersuchungen der Versperrung des Ofenraums geschuldet und weist an dieser Stelle auf einen Modifikationsbedarf hin.

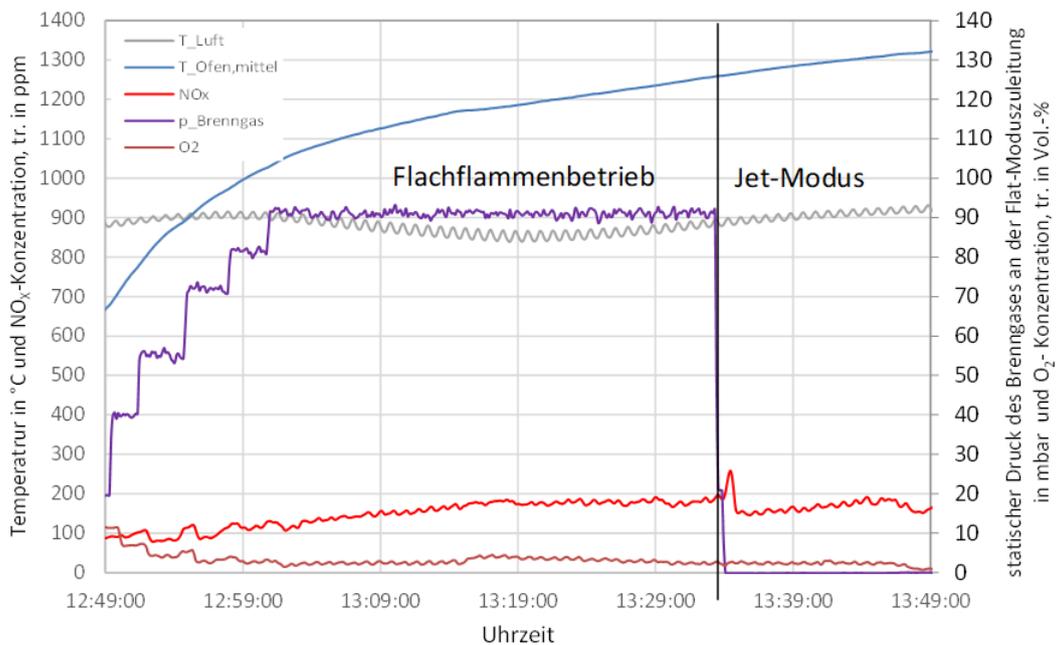
Eine zusätzliche Versuchsreihe sollte Aufschluss über die Auswirkungen der Umschaltung des Flachflammenbetriebs auf den Jet-Modus geben. Hierzu wurde, wie bereits erwähnt, die Gitterbox aus dem Ofen entfernt und der Brenner im Flammenmodus gestartet.

Die **Abbildung 3.17** zeigt den Zeitraum der Versuchsreihe. Wie anhand des Druckverlaufes zu erkennen ist, wurde zur Steigerung der Ofenraumtemperatur die Brennerleistung sukzessive erhöht. Es sei hierbei erwähnt, dass der dargestellte Druckverlauf ausschließlich den Brenngasdruck der Zuleitung für den Flachflammenbetrieb anzeigt. Dementsprechend ist zudem der Zeitpunkt der Umschaltung auf den Jetbetrieb durch den Druckabfall im Diagramm markiert. Ferner ist erkennbar, dass im Rahmen dieser Versuchsreihe die Verbrennungsluftvorwärmtemperatur bewusst konstant gehalten wurde. Dies hat den Vorteil, dass die Konzentration von NO<sub>x</sub> unter gleichen Bedingungen seitens der Verbrennungslufttemperatur betrachtet werden kann. Neben der Ofenraumtemperatur und der lokalen Sauerstoffkonzentration spielt

die adiabate Verbrennungstemperatur hinsichtlich der Bildung von thermischen NO eine wichtige Rolle (siehe **Abbildung 3.16**). Aus einer Anhebung der Verbrennungslufttemperatur folgt direkt eine Steigerung der adiabaten Flammentemperatur und fördert damit zusätzlich die thermische NO-Bildung.



**Abbildung 3.16: NO<sub>x</sub>- und CO-Emissionen während der Aufheizphase; Flachflammenbetrieb mit Ofenbelastung (Quelle: GWI)**



**Abbildung 3.17: Temperatur- und Speziesverlauf im Aufheizprozess, Umschaltung von Flat- auf Jet-Modus (Quelle: GWI)**

Bei konstanter Verbrennungsluftvorwärmung zeichnet sich eine Korrelation der Ofenraumtemperatur und der NO<sub>x</sub>-Konzentration ab. Die Sauerstoffkonzentration stellt einen weiteren Einflussfaktor auf die resultierenden NO<sub>x</sub>-Emissionen dar. Hinsichtlich der NO<sub>x</sub>-Konzentration ist zudem die Umschaltung auf den Jetbetrieb interessant. Wie die **Abbildung 3.17** zeigt, sinkt das NO<sub>x</sub>-Niveau unmittelbar nach der Umschaltung und erreicht das vorherige Niveau erst bei einer deutlichen Steigerung der Ofenraumtemperatur. Dies weist darauf hin, dass sich der Jetbetrieb positiv auf das Emissionsverhalten hinsichtlich NO<sub>x</sub> auswirkt.

### 3.1.7 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Brennerentwicklung, Analyse der Umschaltbarkeit der Flammenmodi

Das Ziel der Brennerentwicklung lag in der Entwicklung eines Brenners, der die Möglichkeit bietet, bedarfsorientiert die Flammenart umzuschalten. Im realen Schmelzbetrieb soll ein Flachflammenbetrieb vorgesehen werden, solange noch feste Aluminiumbestandteile im Ofenraum vorliegen. Im Anschluss sollte die Umschaltung auf eine lange Jetflamme erfolgen. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde ein solcher Prozessverlauf simuliert. Es konnte festgestellt werden, dass der Brenner sowohl bezüglich der Umschaltbarkeit der Flammenart als auch hinsichtlich der Einhaltung von NO<sub>x</sub>-Grenzwerten ein positives Ergebnis erzielte. In dem dargestellten Zeitraum (siehe **Abbildung 3.17**) liegt das arithmetische Mittel der NO<sub>x</sub>-Emission bei **313 mg / m<sup>3</sup><sub>N</sub>** bezogen auf 3 Vol.-% Sauerstoff im trockenen Abgas. Unter Berücksichtigung der hohen Temperatur seitens Ofenraum und Luftvorwärmung sowie der geringeren Rezirkulationsmöglichkeiten des Versuchsofens ist dieser Wert positiv zu bewerten. Die dargestellten Betriebsparameter wurden deutlich über der Betriebsweise eines realen Aluminiumschmelzofens eingestellt. Dies war zum Erkenntnisgewinn sinnvoll und hatte den Vorteil, das gravierende Defizite in der Brennerkonstruktion oder Betriebsweise frühzeitig hätten erkannt werden können.

Neben den Erkenntnissen hinsichtlich des Emissionsverhaltens und der Funktionalität der Umschaltung der Feuerungsart wurde im Rahmen der Versuche festgestellt, dass die Positionierung des Zündbrenners optimiert werden muss. Eine direkte Zündung der exzentrisch angeordneten Gaslanze blieb ohne Erfolg. Die Zündung musste daher über die zentrale Gaslanze erfolgen. Das Zünden der zentralen Gaslanze war über den Zündbrenner zuverlässig möglich. Weiterhin muss die Anordnung der UV-Sonde verändert werden. Ein stabiles Flammensignal konnte in beinahe keinem Betriebszustand erfasst werden.

Durch diese ersten experimentellen Untersuchungen des entwickelten Brennersystems konnte sowohl die grundsätzliche Funktion bestätigt als auch Modifikationsbedarf aufgedeckt werden.

## **3.2 Erprobung des umschaltbaren Brennerkonzeptes an Industrieanlagen**

Auf Basis der detaillierten experimentellen Untersuchung des neu entwickelten Brenners konnten im Einzelversuch verwertbare Informationen zum Brennerkonzept erzielt und weiterer Modifikationsbedarf ermittelt werden. Wie bereits oben erwähnt, wurde sich im Rahmen

der Versuche am GWI-Hochtemperaturofen ausschließlich auf die Untersuchung eines Brenners mit externer Luftvorwärmung fokussiert. In der realen Anwendung eines regenerativen Brennersystems sind jedoch noch weitere Aspekte verfahrenstechnisch von Relevanz. Zum einen ist in diesem Kontext die paarweise Anordnung des Brennersystems und der damit verbundene alternierende Betrieb zu nennen. Dies hat zur Folge, dass die Luftvorwärmtemperatur des jeweils betriebenen Brenners zwangsläufig einer Temperatur-Zeitkurve folgt.

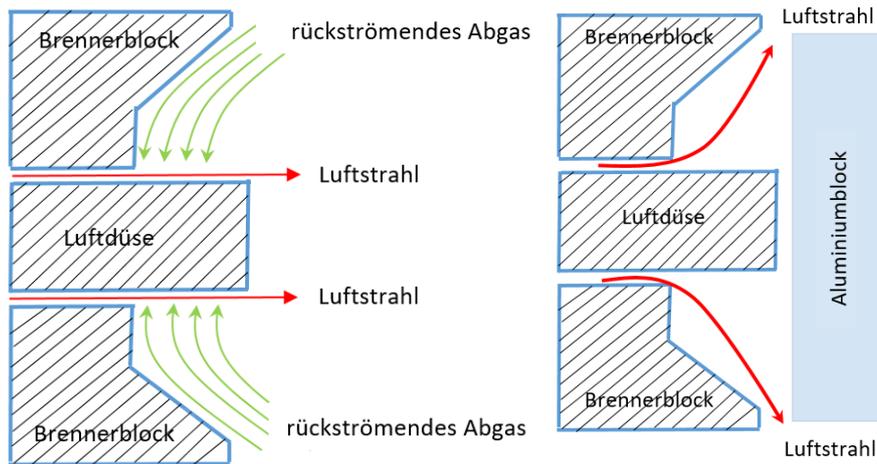
Einen weiteren relevanten Aspekt stellt das eigentliche verfahrenstechnische Ziel des Brennersystems dar. Mit Hilfe des Brennersystems soll festes Aluminiummaterial auf seine Schmelztemperatur erwärmt und in die flüssige Phase überführt werden. Dies birgt sowohl hinsichtlich des Verbrennungsprozesses als auch der im Zuge der metallurgischen Eigenschaften Risiken, die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens durch die Brennerkonzeptionierung gemindert werden sollen. Zum einen sollen die Abbrandverluste (Krätze), die durch die direkte Einwirkung der Flamme auf das feste Aluminium entstehen, reduziert werden. Zum anderen soll sich eine homogene Reaktionszone am Brenner etablieren. Da die genannten Ofenraumbedingungen inklusive der Möglichkeit, Aluminium zu schmelzen, am Hochtemperaturversuchsstand nicht gegeben sind, wurden im Rahmen des Vorhabens weitere experimentelle Untersuchungen an realen Schmelzöfen im Essener Werk der TRIMET SE durchgeführt. Der Vorteil bestand darin, dass sowohl ein Versuchsschmelzofen (5 t-Ofen) als auch ein Produktionsofen (25 t-Ofen) für die Experimente genutzt werden konnten. Ferner ergab sich hierbei die Möglichkeit, einen Vergleich zwischen den Bestandsbrennersystemen und dem neu entwickelten Brennersystem messtechnisch zu ermitteln.

Im weiteren Verlauf wird chronologisch auf die durchgeführten Arbeitsschritte eingegangen.

### 3.2.1 Erläuterung der durchgeführten Modifikationen am Brennersystem

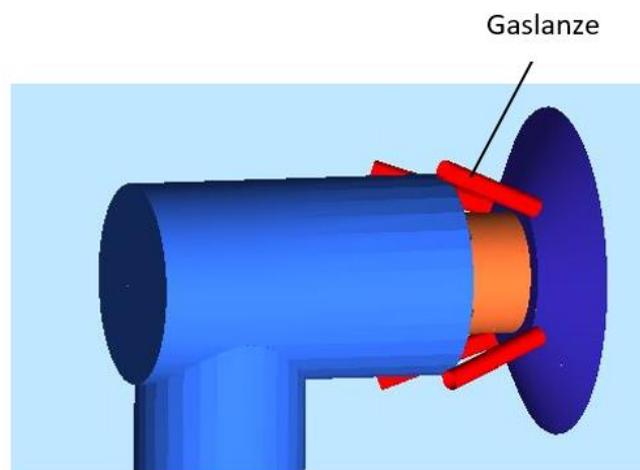
Im Rahmen der Modifikationen wurde eine Lösung erarbeitet, die eine Umschaltung bzw. zwei Betriebsmodi überflüssig macht. Das Ziel dabei war die Entwicklung einer Luftdüsengeometrie, die sowohl eine axiale als auch die radiale Strömungsaustrittsmöglichkeit besitzt. Sobald das Wärmegut die Luftausströmung über die axialen Austrittsflächen beeinträchtigt oder blockiert (z. B. bei Beladung des Ofens mit Profilen), findet die Luftausströmung über die freien Radialflächen statt, was dann dem Strömungsverhalten einer Flachflammdüse entspricht. Die nachfolgende Skizze (siehe **Abbildung 3.18**) veranschaulicht das Funktionsprinzip der Luftdüse.

Die durchgeführten CFD-Untersuchungen haben gezeigt, dass sich eine zentrische Positionierung der Gaslanze bei dieser Luftdüsenausführung nachteilig insbesondere bei der Zündung des Brenners verhält. Bessere Ergebnisse im Hinblick auf die Funktion des Brenners ergaben die Simulationen bei Positionierung von insgesamt vier Gaslanzen gemäß **Abbildung 3.19**.



**Abbildung 3.18: Luftdüse mit axialer und radialer Strömungsausstrittsmöglichkeit (Quelle: ANDRITZ)**

Hierbei wurden vier Gaslanzen außerhalb des Brennergehäuses angeordnet. Bei dieser Anordnung der Gaslanzen kann gemäß den Simulationsergebnissen von einem hinreichenden Misch- und zuverlässigen Zündverhalten des Brenners ausgegangen werden. Im Jet-Betrieb ist hierbei die Verwendung von Primärluft nicht erforderlich. Des Weiteren bietet die Anordnung der Gaslanzen außerhalb des Brennergehäuse einen Vorteil hinsichtlich des Verschleißverhaltens. Die Gaslanzen werden thermisch nicht stark belastet.

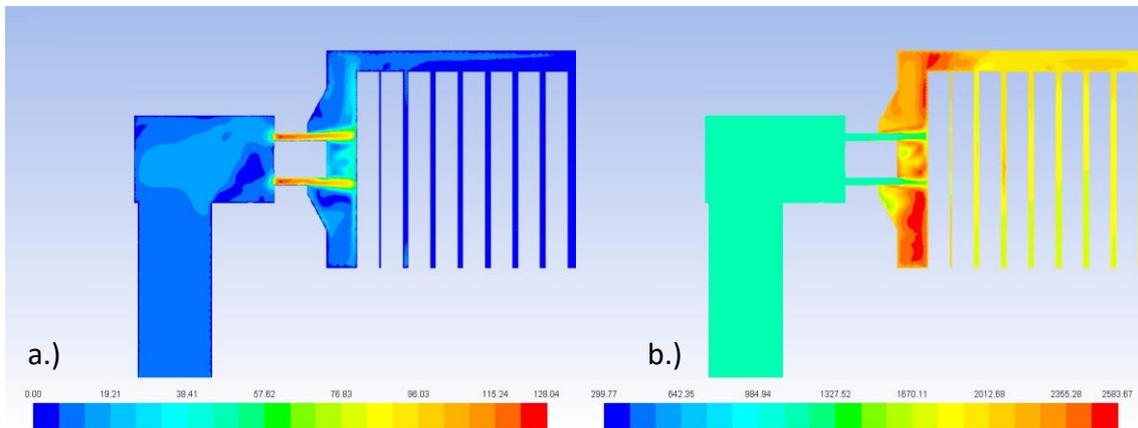


**Abbildung 3.19: Position der vier neuen Gaslanzen (Quelle: ANDRITZ)**

### Flachflammen-Modus

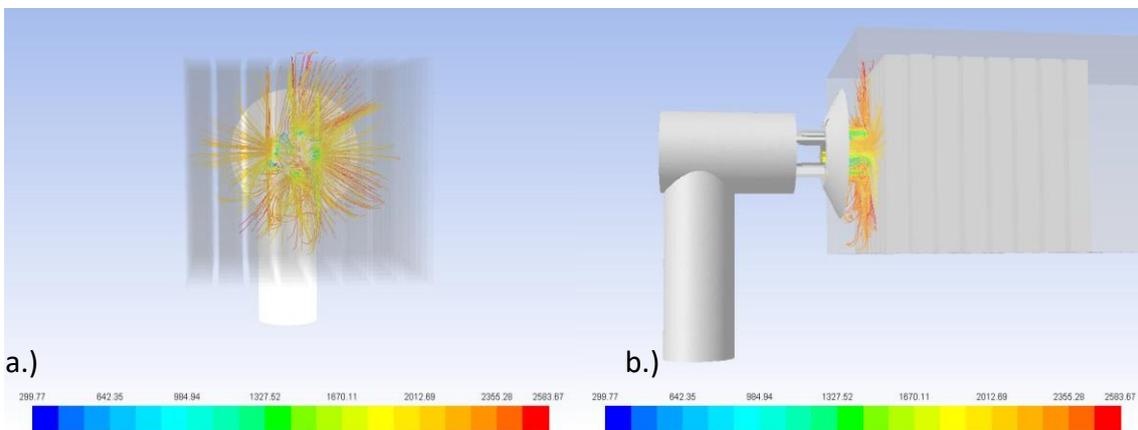
Die gewünschte Flachflamme soll sich bei befülltem Ofen von selbst einstellen. Da dem Luftstrahl kein Raum in die axiale Richtung angeboten wird, muss dieser in radialer Richtung ausweichen (siehe **Abbildung 3.20, a**). Die umgelenkte Luft bildet nun eine Art Vorhang und somit zwischen Brennermund und Wärmegut einen in gewissermaßen geschlossenen Bereich. Da der Brennstoff nicht entweichen kann, wird er in dem zur Verfügung stehenden Raum verteilt.

Das führt dazu, dass die Wärmeentwicklung nicht lokal gebündelt, sondern räumlich verteilt stattfindet (siehe **Abbildung 3.21, b**).



**Abbildung 3.20: Strömungsfeld bei befülltem Verbrennungsraum (a) und Flammenbildung (Temperaturverteilung, b)), (Quelle: ANDRITZ)**

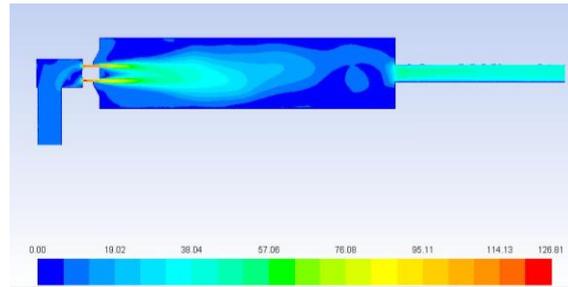
Anhand der Strömungslinien in Kombination mit der Temperaturverteilung können erste Aussagen über eine mögliche Flammenposition getroffen werden (siehe **Abbildung 3.21**). Wie zu erkennen ist, weist die Flamme eine relative homogene Temperaturverteilung auf. Rotdominierende Bereiche, die auf Hotspot hinweisen würden, sind nicht erkennbar.



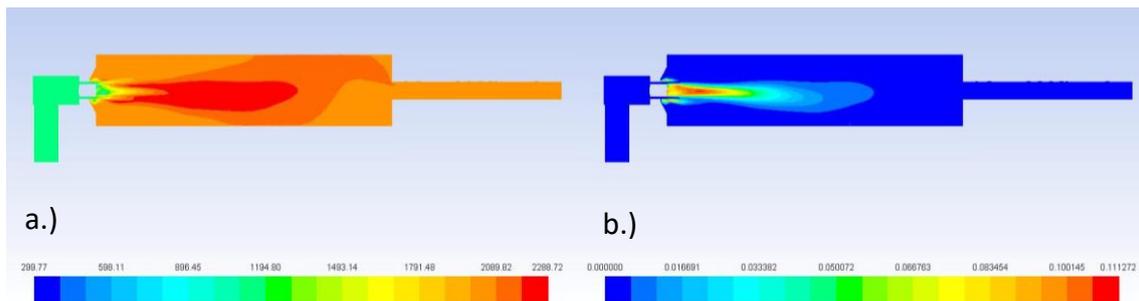
**Abbildung 3.21: Temperaturverteilung in [K] des am Materialblock angrenzenden Flammenbereiches a.) Frontansicht, b.) Seitenansicht, (Quelle: ANDRITZ)**

### Freistrah – Modus / Jet-Betrieb

Des Weiteren wurden CFD-Simulationen bei freiem Verbrennungsraum (ohne Beladung des Ofenraums) durchgeführt. Die **Abbildung 3.22** und **Abbildung 3.23** zeigen ein für einen Freistrahlebrenner typisches Strömungs- und Mischungsverhalten. Wie im Antrag als Ziel definiert, bildet sich im Rahmen der numerischen Untersuchungen eine lange, das Schmelzbad überdeckende Flamme aus.

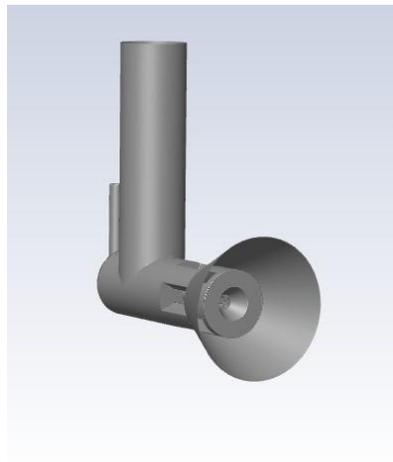


**Abbildung 3.22: Brenner im Jet-Betrieb – Strömungsfeld am Brenner in m/s; (Quelle: ANDRITZ)**



**Abbildung 3.23: Brenner im Jet-Betrieb – a.) Temperaturverteilung [K]; b.) CO-Verteilung in Vol.-% (Quelle: ANDRITZ)**

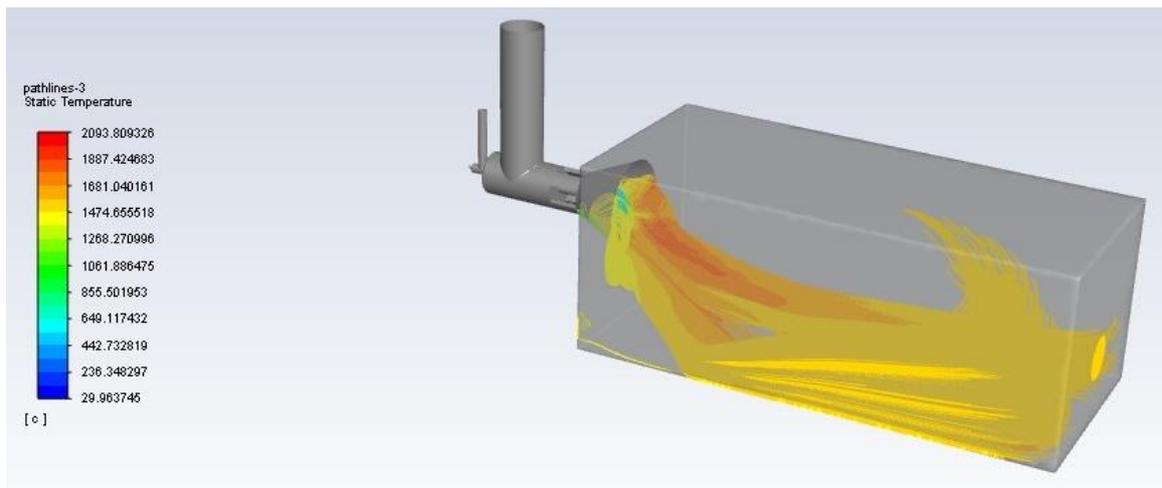
Der untersuchte Prototyp von 800 kW wurde auf 2 MW hochskaliert bzw. neu ausgelegt (siehe **Abbildung 3.24**). Die entsprechenden CFD-Untersuchungen sind durchgeführt und das Brennverhalten des Brenners bei verschiedenen Schmelzofenzuständen (leer und befüllt) simuliert worden.



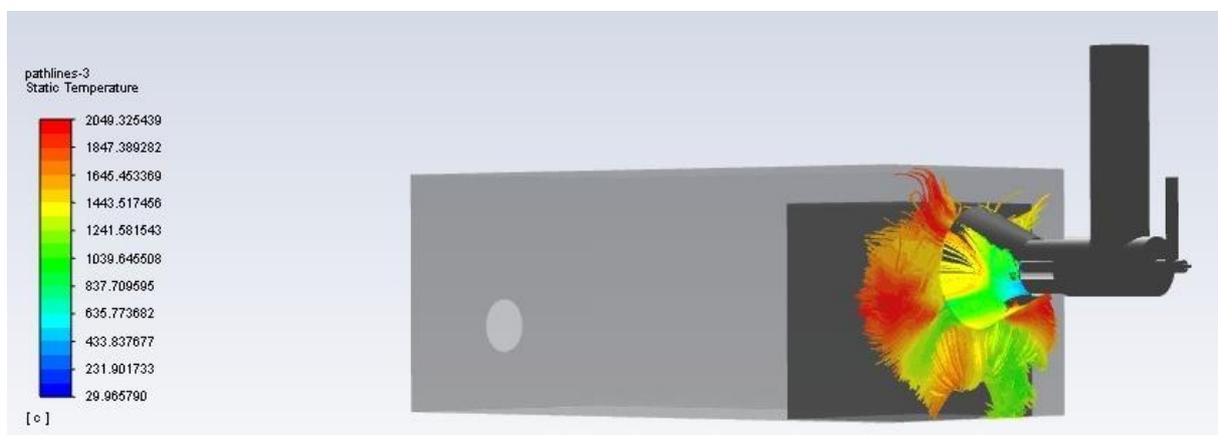
**Abbildung 3.24: Simulationsgeometrie des Jet-/ Flame- Regenerativbrenners 2 MW (Quelle: ANDRITZ)**

Durch die Reduzierung des Krätzeanteils, welches ein Teilziel des Forschungsvorhabens darstellt, wird am Material eine Verschlechterung der Wärmeaufnahme über die Strahlung erwartet. Dies ist bedingt durch die Tatsache, dass die Reduzierung der Krätze auf der Schmelzbadoberfläche die Emissivität des Schmelzbades verschlechtert, da die Reflektion erhöht wird. Bei der Neuauslegung des Brenners wurden gegenüber dem Prototyp geringfügige

Geometrieänderungen vorgenommen, um die Wärmeübertragung auf das Schmelzbad zu verbessern. Angestrebt war hierbei eine breit gefächerte Flamme, die eine größere Oberfläche des Schmelzbades abdeckt. Gleichzeitig soll die Flamme bei der Berührung des Schmelzbades möglichst niedrige Temperaturen aufweisen, um Krätzebildung nicht zu begünstigen. Die **Abbildung 3.25** zeigt die Ergebnisse der numerischen Simulation bei leerem Ofen. Demnach bildet sich eine breite Flamme aus, die eine große Oberfläche des Bodens abdeckt. Die Temperaturverteilung der Flamme zeigt, dass der heißeste Bereich vor der Berührung mit dem Boden auftritt und im Vergleich dazu das Temperaturniveau der Flamme entlang des Bodens niedrig ist.



**Abbildung 3.25: Simuliertes Flammenbild bei leerem Ofen (Quelle: ANDRITZ)**



**Abbildung 3.26: Simuliertes Flammenbild bei beladenem Ofen (Quelle: ANDRITZ)**

Im nächsten Schritt wurde das Verbrennungsverhalten des Brenners bei beladenem Ofen simuliert (siehe **Abbildung 3.26**). Dafür wurde ein Hindernis in einer Entfernung von 300 mm von Brennermund platziert. Gewünscht war eine Flamme, die sich außerhalb des Brennersteines ausbildet, um die thermische Belastung des Brennersteins und angrenzender Brennerkomponenten zu senken. Zum anderen ist eine gleichmäßig an der Stirnwand verteilte Flachflamme zu bevorzugen, weil auf diese Weise eine lokale Überhitzung des davorliegenden

Materials am besten vermieden werden kann. Überhitzung des Materials in Kombination mit hohem Sauerstoffgehalt wirkt sich stark begünstigend auf die Krätzebildung aus. Gemäß der CFD-Simulation sind im inneren Bereich des Brennersteins keine hohen Flammentemperaturen zu erwarten. Außerhalb des Brennersteins entsteht eine Temperaturverteilung, die für eine Flachflamme typisch ist.

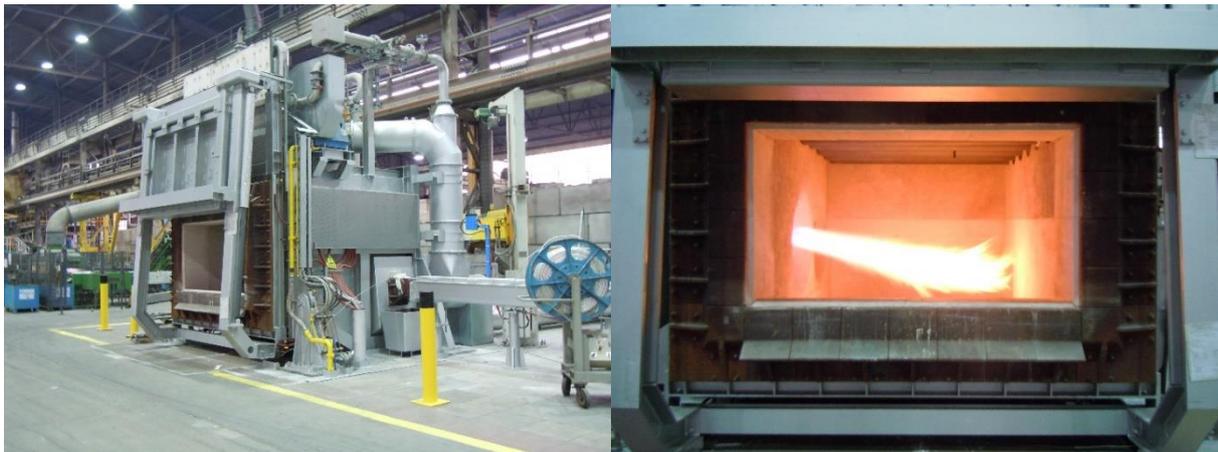
### 3.2.2 Erprobung des Brennersystems am 5 t Versuchsschmelzofen

Die erste industriennahe Erprobung des modifizierten Brennersystems fand am Versuchsschmelzofen der Abteilung Forschung und Entwicklung der TRIMET SE statt. Im Rahmen von insgesamt drei Messkampagnen wurden sowohl metallurgische als auch verfahrenstechnische Ergebnisse dokumentiert.

Das Ziel der Untersuchungen lag in dem direkten Vergleich des Bestandsbrennersystems mit den neu entwickelten Brennern. Neben metallurgischen Schwerpunkten wie der Krätzebildung wurden auch energetische und verfahrenstechnische Aspekte, wie eingesetzte Schmelzenergiemengen und Emissionswerte mit betrachtet. Ferner wurden durch detaillierte Vermessungen des Ofenraums Messdaten zur Validierung späterer CFD-Simulationen ermittelt. Nachfolgend werden sowohl die Versuchsanlage als auch die Durchführung der jeweiligen Messreihen beschrieben. Eine Ergebnisdarstellung bildet den Abschluss des Kapitels 3.2.2.

#### Beschreibung der Anlage:

Die Versuchsgießanlage der Abteilung Forschung und Entwicklung am Essener Standort der Firma TRIMET Aluminium SE ist ein Schmelzaggregat mit einer Gesamtkapazität von 5 t flüssigem Metall. Die, von Inotherm (Industrieofen- und Wärmetechnik GmbH, Mönchengladbach) im Jahr 2013 gebaute Anlage (siehe **Abbildung 3.27**) ist hydraulisch kippbar und verfügt über eine Gesamtbrennerleistung von 800 kW. Als Brennstoff kommt Erdgas zum Einsatz.



**Abbildung 3.27: Versuchsgießanlage der Abteilung F&E (kurz: 5t-Ofen) (Quelle: TRIMET)**

Die Zuführung des Einsatzmaterials erfolgt über eine frontseitige Chargiertür. Es kann sowohl flüssiges Metall als auch festes Aluminium über die Chargiertür in den Ofen eingebracht

werden. Die Entnahme des flüssigen Aluminiums erfolgt über eine angeflanschte Gießschнауze mit Gießgelenk. Daran schließt sich eine stationäre Gießrinne an. Durch Kippen des Ofens fließt das flüssige Aluminium über das Gießgelenk in die Gießrinne und eine dahinter angeordnete Gießanlage.

Der Einsatz der neuen Brennertechnologie soll neben einem reduzierten Abbrand von Legierungselemente und verminderter Krätzebildung auch die üblichen Gas-Verbrauchswerte zum Einschmelzen von Aluminium senken. Des Weiteren will man die Emissionswerte durch die neue Brennertechnologie reduzieren. In entsprechenden Schmelzversuchen soll dies nachgewiesen und zur Produktionsreife erprobt werden.

Die **Abbildung 3.27, links** zeigt die Flammenform eines konventionellen Brenners. Im Fall eines vollständig befüllten Ofens kommt es zu einer sehr starken lokalen Überhitzung, die zu Abbrand und damit zu Metallverlust führt.

#### Versuchsdurchführung:

Wie zuvor bereits erwähnt, wurden insgesamt drei Messkampagnen an dem 5t-Versuchsofen wie folgt chronologisch durchgeführt:

Untersuchung mit Bestandsbrennern (mit Verbrennungsluftvorwärmung)

Untersuchung mit neuen Brennern (ohne Verbrennungsluftvorwärmung)

Untersuchung mit neuen Brennern (mit Verbrennungsluftvorwärmung)

Nach Abschluss der ersten Kampagne wurde das alte Brennersystem durch das neue System ersetzt. Der bauliche Unterschied ist von außen am Ofen kaum zu erkennen, was positiv für die Umrüstung industrieller Öfen zu bewerten ist. Die Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. vergleicht die Brennersteine des alten und neuen Brennersystems.

Leider wurde nach dem Umrüsten festgestellt, dass ein Defekt an der Ofendruckregelklappe vorlag. Die Ofenregelklappe reguliert im Regelbetrieb den Ofendruck, indem eine definierte Abgasmenge direkt zum Kamin geleitet wird. Der Hauptanteil der Abgasmenge wird über den im Brenner integrierten Regenerator geleitet und damit eine Verbrennungsluftvorwärmung realisiert. Durch den oben genannten Defekt verließ der Großteil der Abgasmenge energetisch ungenutzt den Ofen. Ein Luftvorwärmung konnte dementsprechend in diesem Anlagenzustand nicht realisiert werden. Dieser Umstand wurde als Mehrwert erkannt und für eine zusätzliche Messkampagne (2) genutzt. Dementsprechend konnte das neue Brennersystem sowohl ohne als auch mit Verbrennungsluftvorwärmung untersucht werden.

Der Ofen wurde vor jedem Versuch im Stand-by-Betrieb bei ca. 600 °C Ofenraumtemperatur leer gehalten. Die Starttemperatur von max. 600 °C wurde bewusst unterhalb der Selbstzündtemperatur von Methan bzw. Erdgas gewählt, um Defizite der Brenner im Rahmen des Zündvorgangs und der Flammenstabilität frühzeitig zu erkennen.

Für den Versuchsstart wurde der Ofen geöffnet und das Einsatzmaterial in den Ofen geladen. Als Einsatzmaterial wurden Reinaluminiumblöcke oder handelsübliche 6000er Profilschrotte

ohne signifikante Anteile organischer Verunreinigung verwendet. Die eingesetzten Schrotte werden unter dem Punkt „Einsatzmetall“ näher beschrieben. Aufgrund der verschiedenen Ladezeiten für das Einsatzmetall wurde der Ofen in jedem Versuch mit geladenem Schrott bis auf ca. 600 °C abgekühlt und erst dann geschlossen. Anschließend wurde der Einschmelzvorgang mit einer Brennerleistung von maximal 800 kW gestartet und bis zum vollständigen Aufschmelzen des Metalls und Erreichen der Zieltemperatur von 770 °C gehalten.

- *Bei den Versuchen mit dem neu entwickelten Brennersystem wurde der Einschmelzvorgang im Flachflammenmodus durchgeführt bis zum Erreichen der Schmelztemperatur von 770 °C.*
- *Die Überwachung der Badtemperatur erfolgt über ein Thermoelement, welches nach Einschmelzen der Schrotte in die flüssige Schmelze abgesenkt wird.*

Nach dem Erreichen der Zieltemperatur wurde der Ofen geöffnet und mit einem Gabelstapler abgekrätzt. Aus der noch flüssigen Krätze wurden auf der Ofenbank an mindestens vier Stellen mit einer Kelle Proben genommen. Die repräsentative 5 bis 10 kg Stichprobe wurde in einem Blecheimer abgekühlt. Anschließend wurde die gesamte Krätzemenge verwogen. Jede Stichprobe wird anschließend durch Umschmelzversuche unter Schmelzsalz auf ihren Metallgehalt hin analysiert. Schließlich wird die Schmelze aus dem Ofen abgegossen und der Ofen für den nächsten Versuch gereinigt.

Die **Abbildung 3.28** zeigt den 5 t Versuchsofen mit aufgebautem Messequipment auf der linken Seite sowie die unerwünschte lokale Überhitzung der Blockschrotte beim Einschmelzvorgang mit dem alten Brennersystem (rechte Abbildung).



**Abbildung 3.28:** 5 t Ofen mit geöffneter Ofentür und Reinaluminiumblöcken während des Ladevorgangs auf der linken Seite; rechts: Flambild der alten Brenner, die lokale Überhitzung der Schrotte durch die auftreffende „lange“ Brennerflamme ist deutlich sichtbar. (Quelle: Trimet)

### Materialbeschreibung

Damit eine Vergleichbarkeit zwischen altem und neu entwickeltem Brennersystem gegeben ist, werden alle Versuche mit zwei Schrottsorten durchgeführt. Die erste Sorte sind

Reinaluminiumblöcke, die als Referenzmaterial in der Versuchsreihe eingesetzt werden. Die Blöcke werden im Ofen aufeinandergestapelt und blockieren die Brennerflamme bis auf einen Abstand von 30 - 50 cm vor dem Brennerstein. Die **Abbildung 3.29** zeigt die Blöcke kurz vor Versuchsstart im Ofen. Die Dichte des Haufwerks liegt bei ca. 2,2 bis 2,4 t/m<sup>3</sup>, wobei die Dichte von Reinaluminium 2,7 t/m<sup>3</sup> beträgt. Aufgrund der geringen spezifischen Oberfläche und der Abwesenheit von stark oxidierenden Elementen, wie Magnesium, wird hier eine geringe Krätzbildung und wenig Metallabbrand erwartet.



**Abbildung 3.29: Reinaluminiumblöcke gestapelt im 5 t Versuchsofen mit Brennersteinen auf der linken Seite (Quelle: Trimet)**

Die Analyse des Werkstoffs Al99,7 (P1020) ist in **Tabelle 3.1** gezeigt, Einzelwerte bedeuten Maximalwerte. Die zweite Sorte sind lose Profile, sogenannter Primärschrott oder Produktionsschrott, ohne große Anteile von anhaftenden Kunststoffen und nichtmetallischen Verunreinigungen. Die Dichte der Schrotte als Haufwerk liegt bei ca. 250 - 380 kg/m<sup>3</sup>, wodurch die Oberfläche zur Reaktion mit der heißen Ofenatmosphäre deutlich größer ist.

**Tabelle 3.1: Analyse der Al99,7 (P1020) Blockmetalle**

Element	Anteil in Gew.-%
	typische Analyse
Si	0,01 - 0,03
Fe	0,20
Cu	0,001
Mn	0,002
Mg	0,004
Cr	-
Zn	0,002
Ti	0,006
Rest	Aluminium und übliche Begleitelemente

Die **Abbildung 3.30** zeigt die Schrotte vor dem Verladen und beim Verladen über eine Rutsche in den Ofen. Die Schrotte werden über die Höhe der Brennersteine in den Ofenraum geladen, so dass die Brennerflamme in dem Haufwerk brennen muss.



**Abbildung 3.30: Si<sub>0,5</sub> Profilschrotte mit geringem Anteil an Verunreinigungen (Quelle: Trimet)**

Die Si<sub>0,5</sub> Profilschrotte enthalten neben Silizium auch Magnesium als Legierungselement, wodurch von einer verstärkten Krätzbildung und mehr Metallverlust durch Oxidation auszugehen ist. Eine typische Analyse der am Markt verfügbaren Schrotte und eine mittlere Analyse des Haufwerks ist in **Tabelle 3.2** dargestellt.

**Tabelle 3.2: Analyse der Si<sub>0,5</sub> Profilschrotte aus 6000er Produktionsschrotten mit typischer und mittlerer Analyse**

Element	Anteil in Gew.-%	
	typische Analyse max.	mittlere Analyse
Si	0,6	0,493
Fe	0,3	0,218
Cu	0,1	0,012
Mn	0,1	0,035
Mg	0,6	0,454
Cr	0,05	0,003
Zn	0,15	0,016
Ti	-	0,013
Rest	Aluminium und übliche Begleitelemente	

Leider sind selbst sortenreine Produktionsschrotte nie homogen, wodurch die Analyse, der Gehalt an Verunreinigungen und die Schrottoberfläche schwankt. Diese inhomogene Zusammensetzung erklärt die schwankenden Ergebnisse der Krätzbildung im weiteren Verlauf des

Kapitels. Aus diesem Grund sind selbst im Industriemaßstab Wiederholungsversuche immer notwendig.



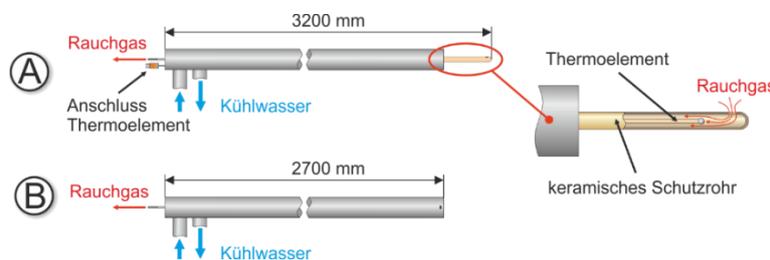
**Abbildung 3.31: links: alter Brennerstein (nur vorderer Brenner) und rechts: neue Brennerstein (vorne und hinten) des regenerativen Systems im 5 t Versuchsofen (Quelle: TRIMET)**

Emissionsmessung:

Die Messung der Rauchgasspezieskonzentration erfolgte über eine festmontierte Abgassonde, die neben der Rauchgasproben auch eine lokale Rauchgastemperatur lieferte. Messtechnisch wurden standardmäßig folgende Konzentrationen ermittelt: O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO und NO<sub>2</sub>.

Neben der Messung im Rauchgaskanal wurden zudem jeweils eine Vermessung der horizontalen Ebene des Ofenraums durchgeführt. Diese sogenannten Feldmessungen bilden eine Validierungsgrundlage für die numerische Simulation der Ofenanlage. Nachfolgend wird diese Messmethode inklusive der verwendeten Messtechnik kurz beschrieben:

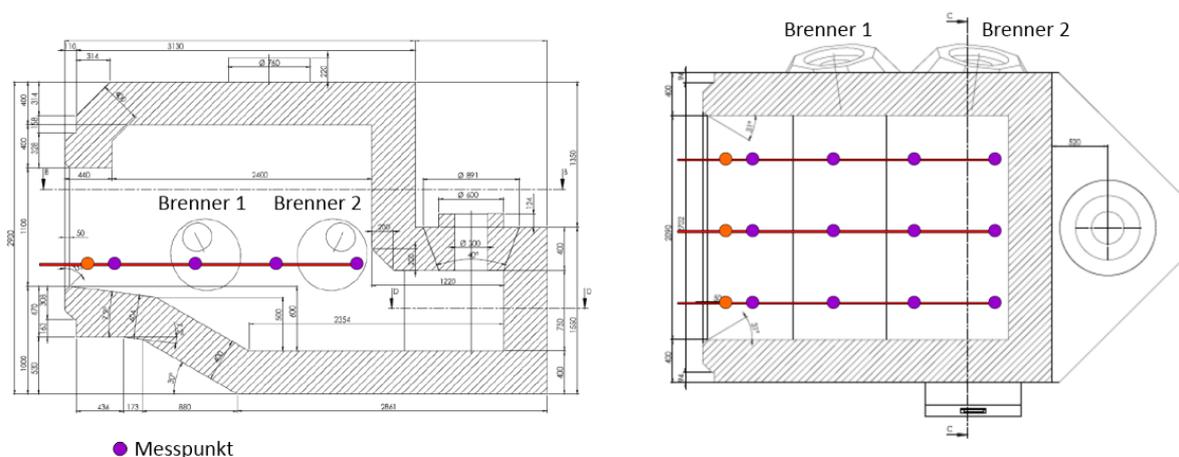
Zur Temperaturmessung und Probenentnahme für die Analyse der Rauchgasbestandteile in dem Aluminiumschmelzofen wurden Messungen unter Verwendung einer Absaugpyrometer-sonde (siehe **Abbildung 3.31, A**) durchgeführt.



**Abbildung 3.31: Schema; Absaugsonde (Quelle: GWI)**

Zudem liefert die Ofenzeichnung in der **Abbildung 3.32** einen Überblick über das Messraster und die Eindringtiefen der Absaugpyrometersonden. Nachfolgend wird jeweils der Brenner, der auf der Beladungsseite positioniert ist als Brenner 1 definiert.

An den dargestellten Positionen wurden mit Hilfe von Absaugpyrometersonden Rauchgasproben entnommen. Der schematische Aufbau der Absaugsonde wird in der **Abbildung 3.31** gezeigt. Die dargestellte Absaugpyrometersonde verfügt zusätzlich über ein Thermoelement Typ B, bestehend aus der Materialpaarung Pt 30 % Rh-Pt 6 % Rh. Zur Minderung der Einflüsse durch Wärmestrahlung aus der Umgebung (z. B. Wandstrahlung, Flamme, etc.) auf die Messstelle des Thermoelements ist dieses mit einem keramischen Schutzrohr ummantelt. Dieses Keramikrohr verfügt an der Spitze über eine Probenöffnung. Über diese Probenöffnung wird, mit Hilfe einer nachgeschalteten Messgaspumpe das Rauchgas in die Keramikspitze gesaugt und umströmt die Messstelle des Thermoelements. Die Rauchgasprobe fließt an der Sonde vorbei und wird im Anschluss zur Abgasaufbereitung geleitet.

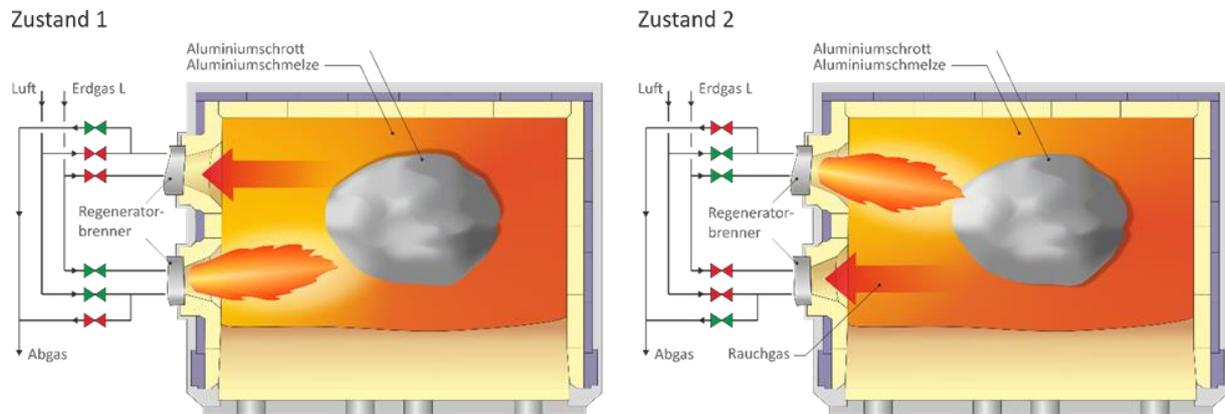


**Abbildung 3.32: Ofenzeichnung mit schematischer Darstellung des Messrasters (Quelle: GWI)**

Die Rauchgasprobe wird nach Austritt aus der Sonde in die Gasaufbereitung, bestehend aus einem Gaskühler und einem Filter, geleitet. Eine nachgeschaltete Messgaspumpe sorgt für einen definierten Volumenstrom für die anschließende Gasanalyse. Zur Analyse der Rauchgasbestandteile wurde ein Gasanalysator der Firma Emerson (Typ NGA 2000) verwendet. Der Gasanalysator verfügt über insgesamt fünf Messzellen. Die Konzentrationen von  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  im Rauchgas wurden mit Hilfe des Gasanalysators ermittelt und kontinuierlich in der Messdatenerfassung gespeichert. Nachfolgend werden die, dem Gerät zugrundeliegenden Messprinzipien kurz erläutert.

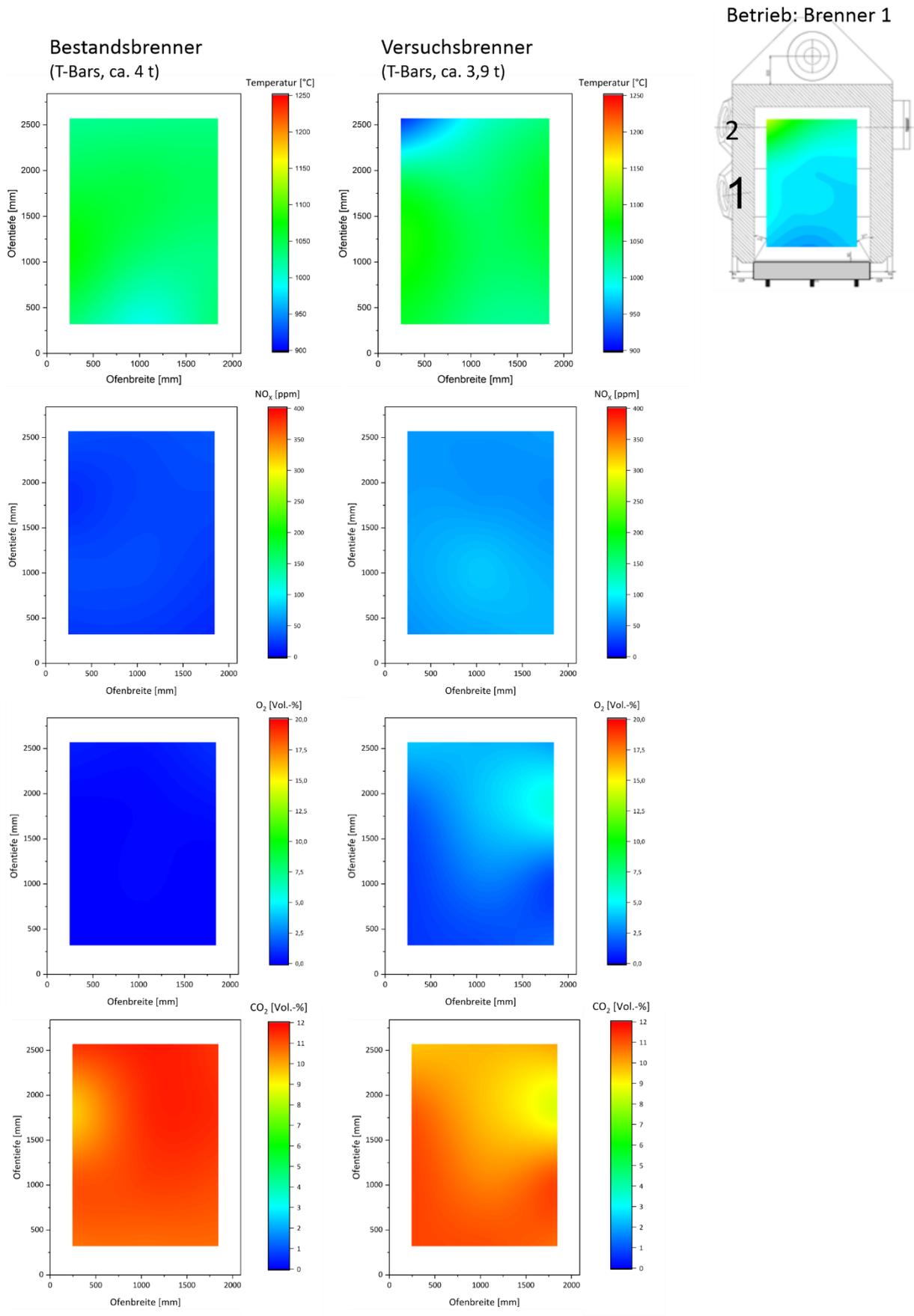
Die Komponenten  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$  werden nach dem *NDIR*-Verfahren (nicht dispersives *IR*-Fotometer) detektiert. Das *NDIR*-Verfahren nutzt die Eigenschaft der Gasmoleküle, infrarote Strahlung (*IR*) zu absorbieren. Die Stärke der Absorption ist ein direktes Maß für die Konzentration der zu detektierenden Gaskomponente. Die jeweilige Gaskomponente wird dabei über die Wellenlänge der Absorptionsbanden charakterisiert. Analog zum *NDIR*-Verfahren wird für die Detektion von  $NO_2$  das *UV*-Verfahren angewendet. Beide Messverfahren unterscheiden sich lediglich in der Wellenlänge der Strahlungsquellen. Das *UV*-Verfahren arbeitet im ultravioletten (*UV*) Wellenlängenbereich. Für die Konzentrationsmessung von  $O_2$  wird das Prinzip des Paramagnetismus angewendet.

Durch den zyklischen Betrieb der Feuerung erschien es zudem als sinnvoll, die Messungen für beide Betriebszustände durchzuführen. Die **Abbildung 3.33** stellt schematisch beide Betriebszustände dar.



**Abbildung 3.33: Prinzipschema der regenerativen Schmelzofenbefeuerung (Quelle: GWI)**

Die **Abbildung 3.34** und **Abbildung 3.35** zeigen exemplarisch die Ergebnisse der Feldmessung, die während der Versuchsreihen mit Aluminiumvollmaterial (T-Bars) durchgeführt wurden. Die Messungen wurden, wie bereits erwähnt, sowohl mit den Bestandsbrennern als auch mit dem neu entwickelten Brennerpaar durchgeführt. Der nachfolgende Vergleich zeigt den Zustand des Ofenraums während des Abschmelzvorgangs der sogenannten T-Bars. Wie zu erkennen ist, stellen die Abbildungen neben der Temperaturverteilung auch die Konzentrationsverteilung von z. B.  $\text{CO}_2$  im Ofenraum dar. Die Ergebnisse ermöglichen so einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Brennersysteme und können ferner zur Validierung der numerischen Simulation (CFD) verwendet werden.



**Abbildung 3.34: Temperatur- und Spezieskonzentrationsverteilung; Brenner 1; Chargierung mit T-Bars (Quelle: GWI)**



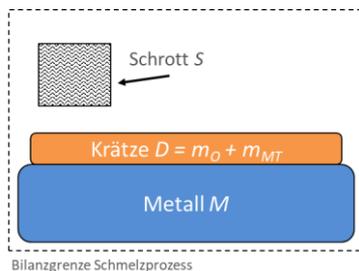
### Metallurgische Untersuchungen:

Gemäß dem Arbeitsplan wurden zunächst die experimentellen Versuche am 5 t Ofen hinsichtlich der Energie- und Massenbilanzierung mit dem alten und neuen Brennersystem analysiert. Ebenfalls wurden die Krätzeproben, mindestens 13 Proben, unter Schmelzsatz umgeschmolzen, um den Metallverlust zu bestimmen. Im Rahmen der Schmelzversuche wurden insgesamt 12 Messreihen durchgeführt. Neben der energetischen Betrachtung wurde ein Schwerpunkt des Vorhabens auf die, während des Schmelzprozesses entstehende Krätzemenge gelegt. Nachfolgend wird der Begriff *Krätze* und die Ermittlung des daraus resultierenden Metallverlustes kurz erläutert.

Die Krätze D (engl. *dross*) ist eine inhomogene Mischung aus nichtmetallischem Anteil (Metalloxide und unlösliche Verunreinigungen)  $m_o$  sowie dem in den Oxiden eingeschlossenen Metallgehalt  $m_{MT}$ .

$$D = m_o + m_{MT}$$

Der Anteil an Metalloxiden wird als Metallverlust bezeichnet und durch Umschmelzen der Krätze unter Schmelzsatz (NaCl + KCl + Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) bestimmt. Die **Abbildung 3.37** zeigt den zuvor beschriebenen Sachverhalt und stellt die Berechnungsgrundlage der nachfolgenden Auswertung übersichtlich dar.



$$\text{Krätzbildung in \%} = \frac{m_D}{m_S} * 100$$

$$\text{Metallertrag in \%} = \frac{m_S - m_D}{m_S} * 100$$

$$\text{Metallverlust in \%} = \frac{m_D * (1 - \frac{m_{MT}}{m_D})}{m_S} * 100$$

**Abbildung 3.36: Definition der Krätzemengenbestimmung (Quelle: TRIMET)**

Die **Abbildung 3.38** zeigt die Ergebnisse hinsichtlich der Krätzbildung aller 12 Messreihen. Es sei an dieser Stelle zu erwähnen, dass für die Versuchsreihe mit den Versuchsbrennern eine Messreihe nachträglich hinzugenommen wurde. In jeder der drei Messkampagnen wurden jeweils zwei Messreihen mit gleicher Chargierung durchgeführt. Im Diagramm ist die Chargierung mit Vollmaterial (T-Bars) mit 99,7 (99,7 Gew.-% Al) und die Chargierung mit losen Schrotten bzw. Profilmaterial mit Si0,5 benannt.

Die **Tabelle 3.3** zeigt die eingesetzten Schrottmengen und die Ergebnisse der Krätzbildung mit dem alten Brennersystem ohne variable Flammenform.

**Tabelle 3.3: Versuchskampagne mit altem Brennersystem ohne Luftvorwärmung**

Ver- suchstag	Schrottqualität / Einsatzmate- rial	Schrott- menge	Einsatzmaterial- dichte	Krätzemenge	Kräuze im Durch- schnitt
0	Aufbau Messequipment und Brennertest				
1	Reinalu 99,7 Blockmetall	4.013 kg	2,7 t/m <sup>3</sup>	40 kg	0,9 ± 0,2 %
3	Reinalu 99,7 Blockmetall	3.932 kg	2,7 t/m <sup>3</sup>	28 kg	
2	Profilschrotte Si0,5 (6000er)	1.990 kg	0,25 - 0,38 t/m <sup>3</sup>	27 kg	1,8 ± 0,7 %
4	Profilschrotte Si0,5 (6000er)	1.896 kg	0,25 - 0,38 t/m <sup>3</sup>	44 kg	

Wie zu erwarten war, führt der Einsatz von losen Si 0,5 Profilschrotten zu signifikant mehr Krätzebildung als Reinaluminiumblöcke

Die **Tabelle 3.4** zeigt die eingesetzten Schrottmengen und die Ergebnisse der Krätzebildung mit dem neuen Brennersystem mit umschaltbaren Flachflammenmodus im Schmelzbetrieb ohne Luftvorwärmung.

**Tabelle 3.4: Versuchskampagne mit neu entwickeltem Brennersystem ohne Luftvorwärmung**

Ver- suchstag	Schrottqualität / Einsatzmate- rial	Schrott- menge	Dichte Einsatz- material	Krätzemenge	Kräuze im Durch- schnitt
1	Reinalu 99,7 Blockmetall	3.900 kg	2,7 t/m <sup>3</sup>	38 kg	0,9 ± 0,1 %
2	Reinalu 99,7 Blockmetall	3.800 kg	2,7 t/m <sup>3</sup>	30 kg	
3	Profilschrotte Si0,5 (6000er)*	1.990 kg	0,25 - 0,38 t/m <sup>3</sup>	186 kg	5,7 ± 5,2 %
4	Profilschrotte Si0,5 (6000er)	1.800 kg	0,25 - 0,38 t/m <sup>3</sup>	37 kg	

\* stark verunreinigte Schrottcharge

Wie in **Tabelle 3.4** zu sehen ist, ergab Versuch 3 mit Profilschrotten außerordentlich viel Krätze, was durch einen größeren Anteil von Verunreinigungen in dem Schrott erklärt wird.

Die 186 kg werden als Ausreißer betrachtet. Die Krätzmenge beider Versuche ist somit vergleichbar zu dem alten Brennersystem.

Zur Bewertung des Verbrennungs- und Schadstoffverhaltens bei dem Betrieb mit regenerativer Luftvorwärmung wurden die oben genannten Versuchsreihen nach Reparatur der beschriebenen Abgasregelklappe wiederholt.

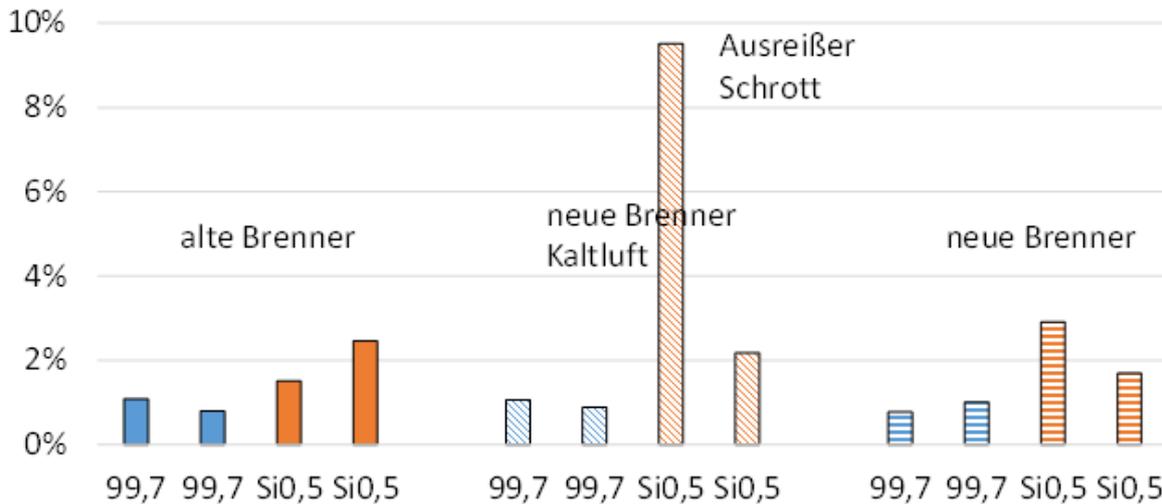


Abbildung 3.37: Bilanz der Krätzebildung (Quelle: TRIMET)

Die Bilanz der Krätzebildung (**Abbildung 3.37**) und Metallverlust (**Abbildung 3.38**) zeigen bisher keine deutliche Verbesserung durch den Einsatz der neuen Versuchs Brenner. Die Krätzebildung mit Al 99,7 Reinaluminiumblöcken ist durch die neuen Brenner leicht (0,05 % Krätze weniger) verbessert worden, wohingegen die Krätzebildung durch Si 0,5-Schrotte (6000er Legierung) leicht (0,3 % mehr Krätze) gestiegen ist. Die Ergebnisse sind vergleichbar. Die Schwankungen der Schrottzusammensetzung (Si 0,5) zeigen sich deutlich in der Krätzebildung (siehe Ausreißer).

Ferner ist zu berücksichtigen, dass jeweils nur zwei Wiederholungsversuche je Brennertyp und Schrott durchgeführt wurden. Die Aussagekraft der Ergebnisse am 5 t Ofen wird durch Großversuch am 25 t Ofen ergänzt.

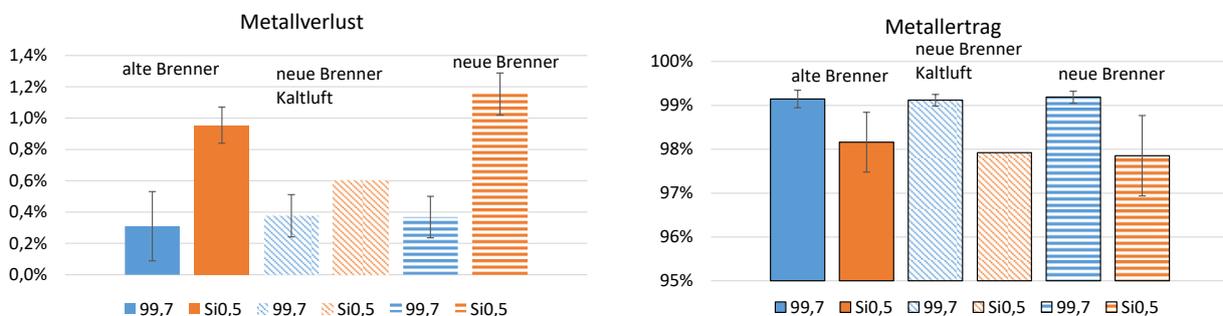
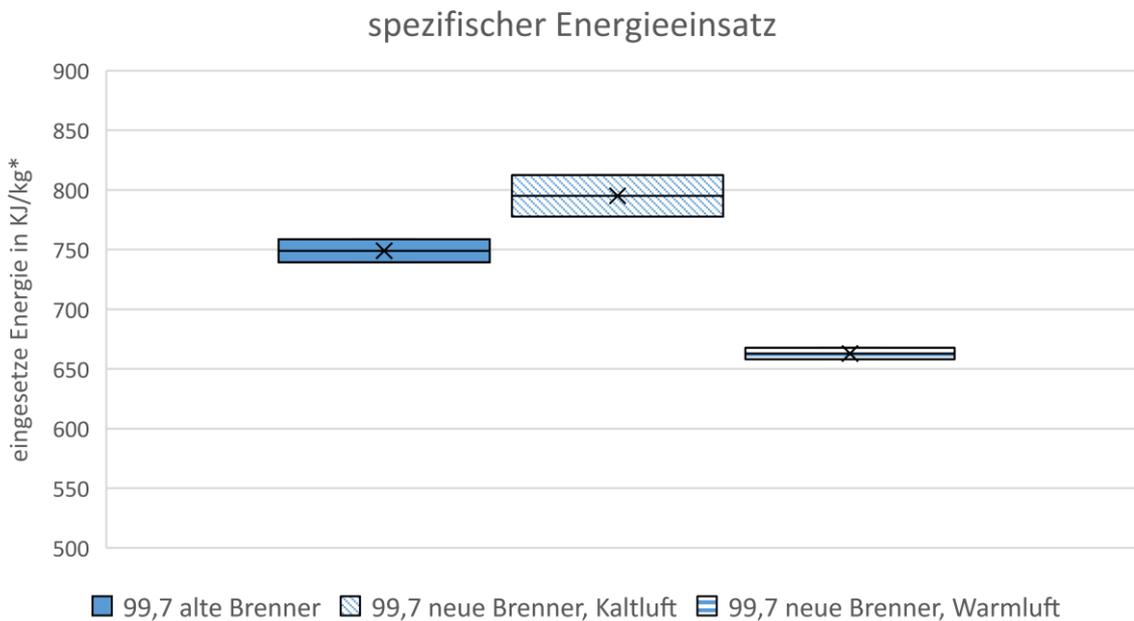


Abbildung 3.38: Bilanz des Metallverlustes (links) und -ertrags (rechts) (Quelle: TRIMET)

Zur Bewertung der energetischen Veränderung durch den Einsatz des neuen Brennersystems wurden während der Versuche die, durch das Brenngas eingetragene Energiemenge

dokumentiert. Als Bilanzraum wurde das Temperaturfenster zwischen 600 und 750 °C gewählt. In dem genannten Temperaturfenster findet der eigentliche Schmelzprozess statt.



**Abbildung 3.39: Vergleich der eingesetzten Energie pro kg Aluminium (Quelle: GWI)**

Die **Abbildung 3.39** stellt die spezifischen Energiebedarfe der drei Messkampagnen gegenüber. Analog zu den bereits beschriebenen Anlagenänderungen seitens des Brennerumbaus, fällt bei der Betrachtung der Ergebnisse der Messreihen mit dem Reinmaterial (99,7) ein zu erwartendes Verhalten der Anlage auf: der höchste Energieeinsatz erfolgte bei den Versuchsreihen mit dem neuen Brenner, jedoch ohne Verbrennungsluftvorwärmung. Anhand dieses Beispiels lässt sich simpel verdeutlichen, welchen energetischen Mehrwert eine Rückgewinnung von Abgaswärme in den Prozess mit sich bringt. Als positiv ist die Tatsache zu bewerten, dass sich durch den Einsatz der neuen Brenner in Kombination mit der regenerativen Luftvorwärmung die eingesetzte spezifische Energie im Vergleich zum Bestandsbrennersystem um ca. 12 % senken lässt. Trotz der geringen Spreizung der Messergebnisse sind die in der **Abbildung 3.39** dargestellten Ergebnisse, aufgrund der begrenzten Anzahl an Versuchen eher als Tendenz zu sehen.

Die **Abbildung 3.40** zeigt die während der Versuchsreihen entstandenen Flammenaufnahmen. Grundsätzlich konnte im Rahmen der Erprobung am 5 t- Schmelzofen bereits die Funktion des neu entwickelten Brennersystems bestätigt werden. Der Brenner verhält sich analog zu den Ergebnissen der vorhergehenden numerischen Simulationen. Die **Abbildung 3.40** zeigt die Änderung der Flammenform in Abhängigkeit des Feststoffanteils im Ofenraum bzw. der entsprechenden strömungstechnischen Versperrung. Sowohl bei der Chargierung des Ofens mit Profilschrotten als auch bei der Beladung mit Reinaluminiumblöcken ist über die gesamte Schmelzdauer ein unterschiedliches Flammenbild zu erkennen.



**Abbildung 3.40: Flammenausbildung in Abhängigkeit der Beladung des Ofens (Quelle: GWI)**

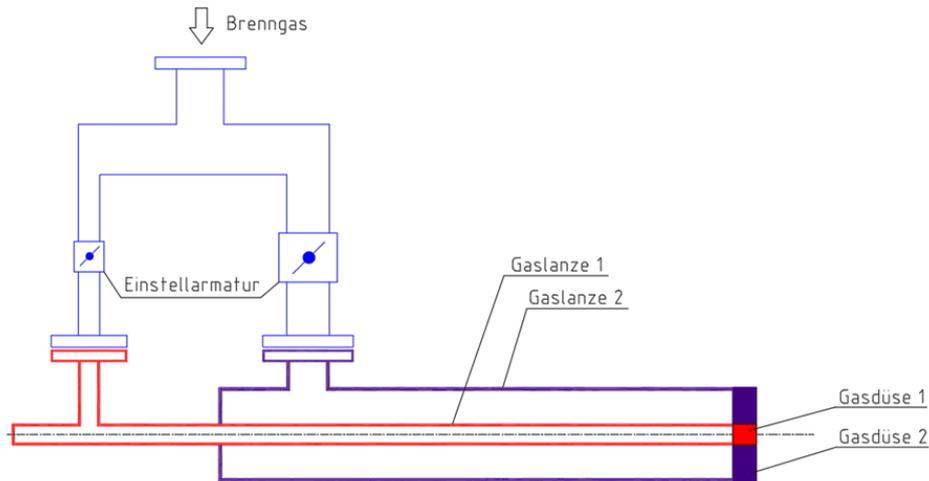
Abschließen ist festzuhalten, dass sich die Flammen entsprechend der Zielsetzung (selbständig) in Ihrer Form modulieren. Die durchgeführten Versuchsreihen sowie das optimierte Brennerdesgin waren dementsprechend als Zwischenerfolg zu verbuchen.

### 3.2.3 Erprobung des Brennersystems am 25 t Späneschmelzofen

Der Ofen für die seriennahen Versuche ist ein Schmelzaggregat der Firma Hertwich Engineering (Österreich) mit einer Brennerleistung von 1,9 MW. Die Gesamtmasse des Schmelzbads beträgt 25 t. Zur Befuerung des Ofens kommt Erdgas zum Einsatz. Das eingesetzte Brennersystem ist baugleich zu dem System im 5 t Versuchsofen. Die maximale Brennerleistung wurde auf die Ofengröße angepasst.

Da sich die Schmelzöfen mit Blick auf Abmessungen und Ausführung unterscheiden können, wurden die Brenner mit der Möglichkeit ausgestattet, die Einstellung der maximalen Flammenlänge vornehmen zu können. Auf diese Weise ist die Möglichkeit geschaffen worden, das Verbrennungsverhalten der Brenner an den jeweiligen Schmelzofen optimal anpassen zu können. Hierfür besteht die Strömungsführung des Brennstoffes aus zwei Gaslanzen, die mit unterschiedlichen Düsenausführungen ausgestattet sind (siehe **Abbildung 3.41**). Je nach Anteil der Gasmengen, die die Gasdüsen 1 und 2 beaufschlagen, kann die maximale Flammenlänge beeinflusst werden. Die Einstellung erfolgt manuell und einmalig während der Inbetriebnahme durch die Beobachtung des Prozesses. Dies setzt die Möglichkeit der Visualisierung der Flamme während des Schmelzvorganges voraus.

Bei Bedarf kann die Einstellung des Verhältnisses zwischen Kern- und Mantelgas automatisiert werden, indem die manuellen Einstellarmaturen durch Mengenregelarmaturen wie Regelklappen oder Regelventile ersetzt werden.



**Abbildung 3.41: Prinzipschema; regelbare Brenngaslanze (Quelle: ANDRITZ)**

Beschreibung der Anlage und der Versuchsdurchführung:

Nachfolgend soll der gesamte Chargier- und Schmelzvorgang an einem produktionsnahen Schmelzaggregat dargestellt werden. Die beschriebenen Versuche sind in einem Ofen durchgeführt worden, der zuvor neu ausgemauert wurde. Somit ist eine Verfälschung der Ergebnisse durch vorherige Benutzung ausgeschlossen. Nach dem Neuaufbau des Ofens sind wenige reguläre Chargen mit Rücklaufschrotten Si1 (6xxx-Serie Al mit ca. 1 Gew.-% Si) durchgelaufen. Diese, den eigentlichen Versuchschargen, vorhergehenden Einschmelzvorgänge waren notwendig, um das neue Feuerfestmaterial in einen homogenen Zustand zu versetzen. Im Anschluss an diese Chargen und vor der Versuchsdurchführung für dieses Projekt wurde der Ofen entleert und auf einer Stand-by Temperatur von 800 °C gehalten. Da eine vollständige Ofenfüllung einer Masse von ca. 25 t geschmolzenem Aluminium entspricht, die Dichte der zur Verfügung stehenden Schrotte aber bei ca. 600 kg/m<sup>3</sup> liegt, sind min. zwei Zustellungen notwendig, um die Ofenkapazität komplett auszunutzen. Die **Abbildung 3.42** zeigt einen vollständig mit Rücklaufschrotten beladenen Schmelzofen (hier den Versuchsofen).

Die erste Befüllung mit Schmiederesten wurde über eine Rutsche in den Ofen eingebracht. Die Rampe des Ofens ist 3,5 m lang und dient der Vorwärmung des Einsatzguts. Vor der nächsten Befüllung mit Schmiederesten wurde der Ofen auf seine Stand-by-Temperatur von 800 °C gebracht. Nach einer angemessenen Aufwärmzeit werden die Schotte, die auf der Ofenbank vorgewärmt wurden, mit der zweiten Charge in das Ofenbad geschoben. Die zweite Charge verbleibt auf der Ofenbank und wird dort ebenfalls vorgewärmt. Dieser Zyklus wird wiederholt, bis der Ofen gefüllt ist. Die Verweildauer auf der Bank dient der Vorwärmung der Schrotte und ist ein Sicherheitsaspekt, um den Eintrag von Feuchtigkeit in die Schmelze zu verhindern. Bei der Zustellung der Schrotte von der Rutsche in den Ofen wird auf eine gleichmäßige und möglichst dichte Ofenfüllung geachtet.



**Abbildung 3.42: Vollständig, mit Schmiederesten aus der Felgenreherstellung, befüllter Ofenraum.  
(Quelle: TRIMET)**

Sobald das Material aufgeschmolzen ist und das Schmelzbad eine Temperatur von 770 °C erreicht hat, wird die Schmelze für ihre Weiterverarbeitung vorbereitet. Das bedeutet, es wird die entstandene Krätze mittels Flurförderfahrzeug entfernt und ggf. benötigte Mengen Legierungselemente zugegeben. Im Anschluss werden die nun aufgeschmolzenen Zusätze mittels Rührschild in die Schmelze eingerührt. Dies stellt eine gleichmäßige Verteilung an Legierungselemente im gesamten Ofen sicher. Eine anschließende Wartezeit sichert die vollständige Auflösung der Zugaben.

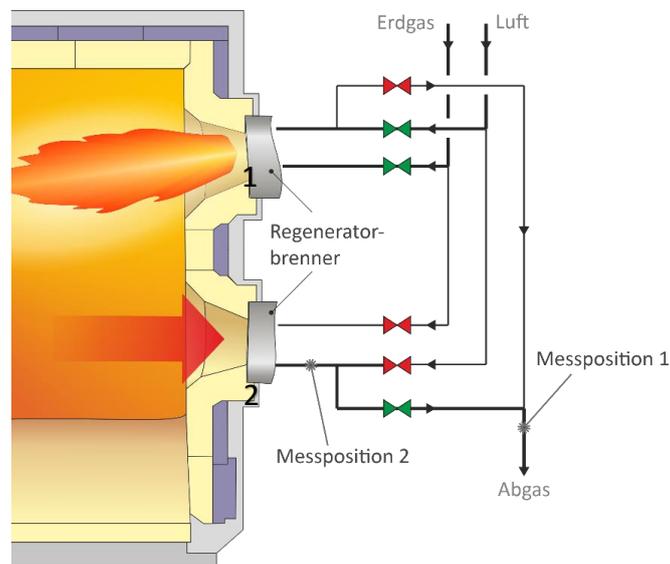
Ab einer Badtemperatur von min. 770 °C wird die, beim Aufschmelzen entstandene, Krätze entfernt. Da mit der Krätze auch Aluminium aufgenommen wird, wird diese nicht direkt aus dem Ofen entfernt, sondern verweilt auf der Ofenbank, um enthaltenes, flüssiges Aluminium zurück in das Schmelzbad fließen zu lassen. Die verbleibende, trockene Krätze wird anschließend von der Ofenbank in vorbereitete Krätzekübel verbracht und weiterverarbeitet. Die flüssige Schmelze wurde analysiert und im weiterführenden Gießprozess verarbeitet.

Wie in **Abbildung 3.40** veranschaulicht, finden in Abhängigkeit des Beladungszustandes des Ofens unterschiedliche Entwicklungen der Flamme statt. Je mehr freien Brennraum der Beladungszustand erlaubt, desto stärker dehnt sich die Flamme aus, ohne dabei nennenswert das Wärmegut zu berühren. Diese Entwicklung ist allein auf die Veränderungen des Strömungszustandes im Ofenraum zurückzuführen und bedarf kein steuerungstechnisches Eingreifen wie z. B. Umschalten von Armaturen zur Umleitung der Verbrennungsmedien Luft oder Gas.

Die Erweiterung des Steuerungskonzeptes der bestehenden Regenerativanlage für das Betreiben der neuen Entwicklung wäre hiermit nicht erforderlich.

### Emissionsmessung:

Die Messung der Rauchgaspezieskonzentration erfolgte in beiden Versuchskampagnen über eine festmontierte Abgassonde, die neben der Rauchgasproben auch eine lokale Rauchgastemperatur lieferte. Bedingt durch die Anlagenumbau und der damit einhergehenden Anpassung des Rohrleitungsbaus konnte die Abgassonde nicht an der gleichen Stelle wie vor dem Umbau positioniert werden. Die **Abbildung 3.43** zeigt schematisch die Positionierung der Messsonde vor (Messposition 1) und nach dem Umbau der Anlage (Messposition 2).

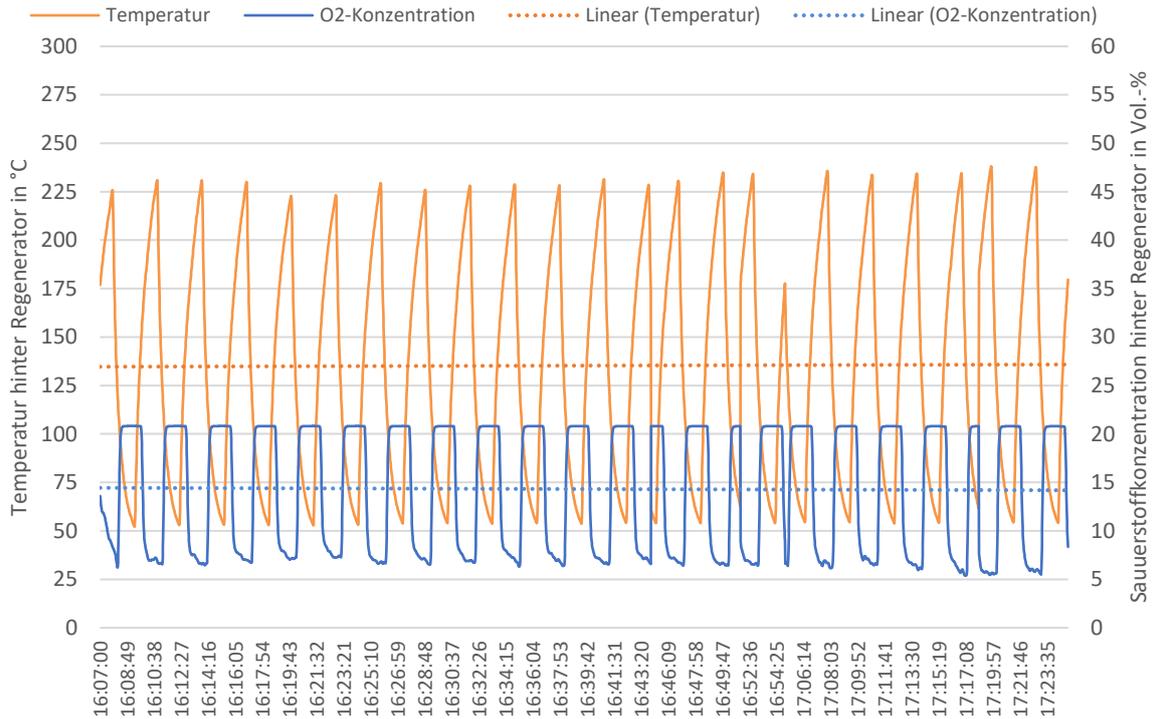


**Abbildung 3.43: schematisches Anlagenschaltbild mit Messpositionen (Quelle: GWI)**

Der Unterschied der Messpositionen wird anhand der nachfolgenden Abbildungen deutlich. Die Messung an Position 2 erfolgte direkt vor dem Regenerator des Brenners 2. Demzufolge wurde die instrumentierte Rohrleitung abwechselnd mit Rauchgas aus dem Ofenraum und kalter Verbrennungsluft vom Gebläse durchströmt. Der, in der **Abbildung 3.44** dargestellte Temperaturverlauf zeigt aufgrund der zyklischen Luft-Rauchgaswechsel eine Schwankung in dem Bereich von 60 - 230 °C. Die Sauerstoffkonzentration schwankt um einen Mittelwert von ca. 14 Vol.-% in einem Bereich von 5 - 21 Vol.-%. Somit ist der Restsauerstoffgehalt des Rauchgases als auch der Sauerstoffgehalt der Verbrennungsluft festzustellen.

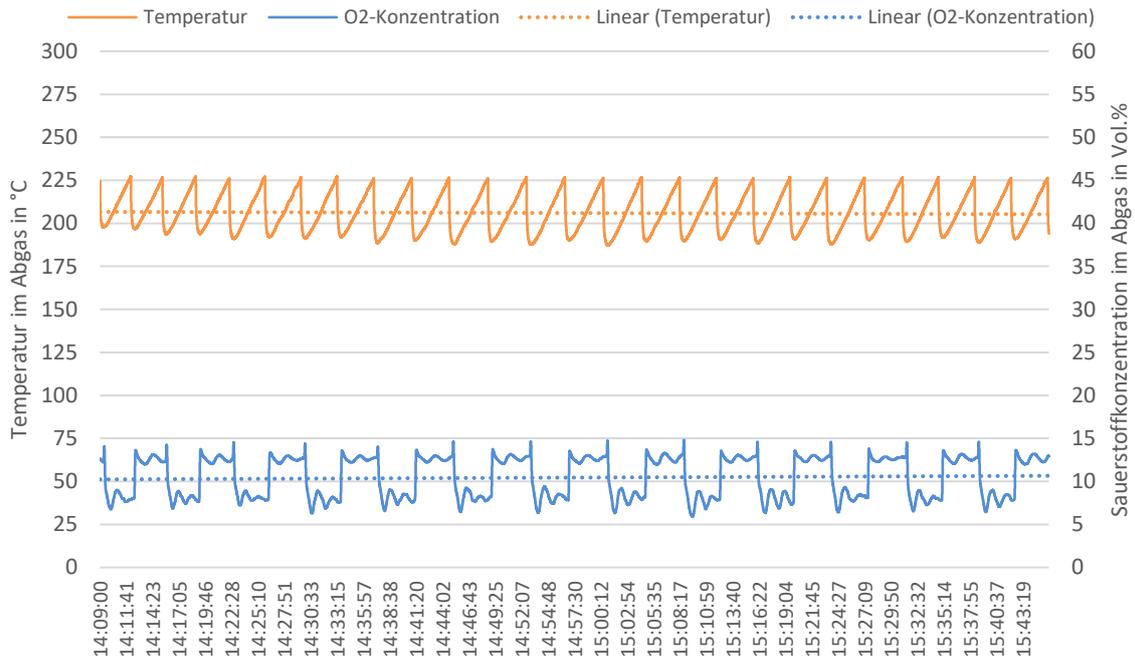
Die Rauchgasprobenentnahme erfolgte im Rahmen der Versuche mit den Bestandsbrennern in der Abgassammelleitung (siehe **Abbildung 3.43**, Messposition 1).

Diese Messposition ermöglichte zum einen die Abbildung beider Zustände (Betrieb Brenner 1 / Betrieb Brenner 2), zum anderen Messwerte mit geringeren Schwankungen festgestellt werden.

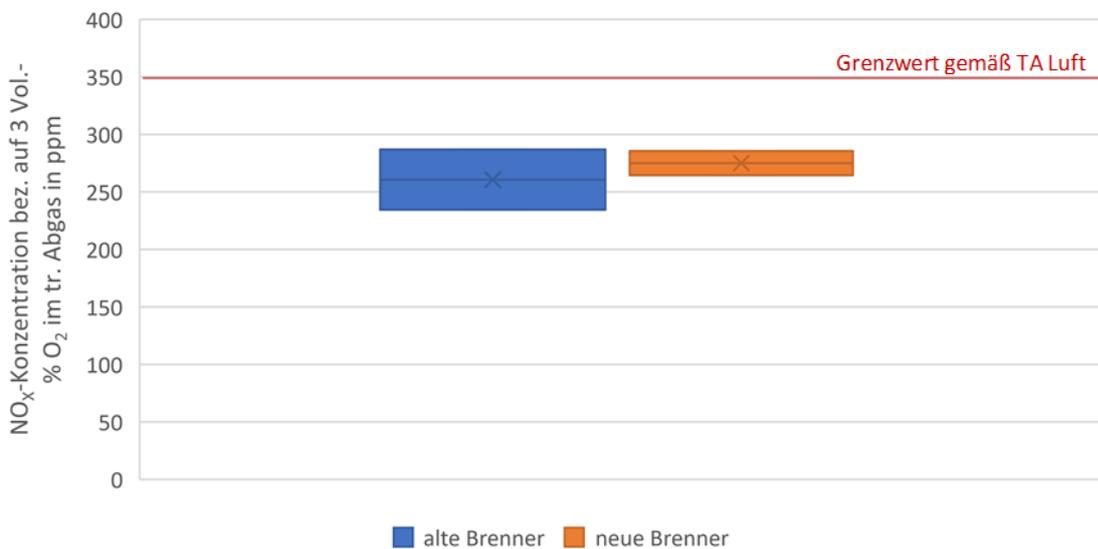


**Abbildung 3.44: zeitlicher Temperatur- und O<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf hinter dem Regenerator, neuer Brenner (Quelle: GWI)**

In der **Abbildung 3.45** ist der zeitliche Temperatur- und Sauerstoffkonzentrationsverlauf an der Messposition 2 über einen Zeitraum von ca. 1,5 h dargestellt. Hierbei ist die Vermischung des Rauchgases mit Verbrennungsluft deutlich reduziert; die messtechnisch ermittelte Sauerstoffkonzentration liegt im Mittel bei ca. 10,5 Vol.-% und erreicht ihr Maximum bei einem Wert von 15 Vol.-%. Das Minimum liegt analog zu den Ergebnissen der Messung mit den Bestandsbrennern bei ca. 5 Vol.-% und stellt damit annähernd den Restsauerstoffgehalt dar. Anhand der sich zyklisch wiederholenden Wechsel zwischen hoher und niedriger Sauerstoffkonzentration sind die Schaltpunkte der Brenner erkennbar. Die Intervalle, die einen hohen Restsauerstoffgehalt (ca. 14 Vol.-%) aufweisen, stellen den Betrieb des Brenners 1 dar. Wie in der **Abbildung 3.43** erkennbar, ist der Brenner am Ende der Rauchgassammelleitung positioniert. Auffallend ist das deutlich höhere Niveau der Sauerstoffkonzentration im direkten Vergleich zum Verlauf der Sauerstoffkonzentration im Brennerbetrieb 2. Grundsätzlich ist die Ursache nicht in der Brennereinstellung (z. B. Luftzahl) zu finden. Vielmehr liegt der Verdacht nah, dass in der Rauchgasführung des Brenners 1 Leckagen vorlagen. Bedingt durch ein nachgeschaltetes Saugzuggebläse könnte in diesem Szenario das Rauchgas durch den Eintritt von Umgebungsluft verdünnt werden. Resultierend daraus würde sich dadurch die gemessene Sauerstoffkonzentration erklären.



**Abbildung 3.45: zeitlicher Temperatur- und O<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf in der Abgassammelleitung, Bestandsbrenner (Quelle: GWI)**



**Abbildung 3.46: Vergleich der NO<sub>x</sub>-Emissionen mit altem und neuem Brennersystem, 25 t Ofen bei ca. 1.000 °C Ofenraumtemperatur (Quelle: GWI)**

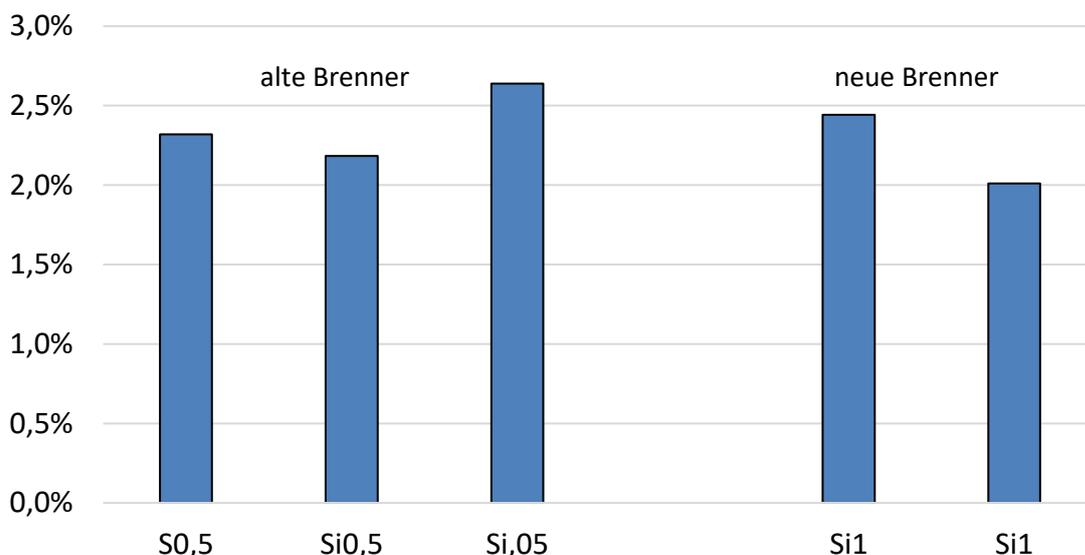
Zur Bewertung und dem Vergleich der gemessenen NO<sub>x</sub>-Konzentration der Anlage vor und nach dem Umbau wurden die ermittelten Messwerte gemäß der TA Luft [3] auf einen Restsauerstoffgehalt von 3 Vol.-% im trockenen Abgas bezogen. Dies dient der Vergleichbarkeit von Konzentrationswerten bei abweichenden Messwerten der Sauerstoffkonzentration. Die **Abbildung 3.46** zeigt den Vergleich der messtechnisch ermittelten NO<sub>x</sub>-Emissionen des

Betriebs mit dem alten und neuen Brenner. Das Diagramm basiert auf jeweils zwei Messreihen pro Anlagenzustand (neu/alt). Der Mittelwert aus beiden Messreihen wird im Diagramm durch das Kreuz markiert. Bezogen auf die Mittelwerte liegen die NO<sub>x</sub>-Emissionen der neuen Brenner leicht über den Werten der Bestandsbrenner. Es lässt sich zudem feststellen, dass beide Brenner den behördlichen Grenzwert von 350 mg/m<sup>3</sup> (bezogen auf 3 Vol.-% O<sub>2</sub> im trockenen Abgas) einhalten.

#### Metallurgische Untersuchungen:

Neben den Versuchen im 5 t Versuchsofen sind bei TRIMET Aluminium SE auch Versuche hinsichtlich der Metallverluste in einer Serienanlage durchgeführt worden. Die technischen Daten und der Ablauf des Experiments sind im vorherigen Abschnitt beschrieben. Der Ablauf ist analog zu den Versuchen im Versuchsofen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Bei der Durchführung der Versuche im Produktionsofen wurden drei aufeinander folgende Chargen unter Verwendung der alten Brenner und zwei Chargen unter Verwendung der neuen Brenner umgeschmolzen. In den drei Referenzchargen wurden Schrotte vom Typ Si0,5 eingesetzt. Bei den eingesetzten Schrotten handelt es sich um Stangenmaterial bzw. Hohlprofile aus dem Bausektor. In den Einzelversuchen wurden je 2,32 Gew.-% (617 kg), 2,18 Gew.-% (546 kg) und 2,64 Gew.-% (636 kg) Krätze gebildet. Es ergibt sich somit ein Durchschnitt von 2,38 Gew.-% Krätze pro Charge. In der Versuchsreihe, in der die neue Brennertechnologie eingesetzt wurde, sind Schrotte mit 1 Gew.-% Si (Si1) eingeschmolzen worden. Es handelte sich hierbei um Schmiedereste, die in loser Schüttung in den Ofen verbracht wurden. In der ersten Charge sind 19.340 kg und in der zweiten Charge 22.480 kg Produktionsrückläufe eingeschmolzen worden. In den beiden Durchgängen sind Krätzemengen von 2,44 Gew.-% (542 kg) und 2,01 Gew.-% (452 kg) entstanden. Somit ergibt sich eine durchschnittliche Krätzemenge von 2,23 Gew.-%, wenn Brenner der hier entwickelten Technologie eingesetzt werden.



**Abbildung 3.47: Vergleich der Krätzebildung, 25 t-Ofen (Quelle: TRIMET)**

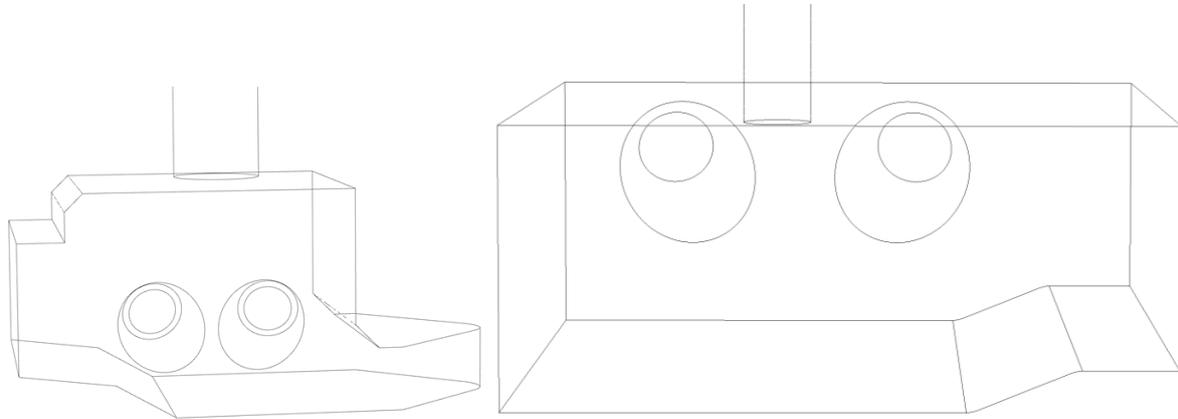
Im direkten Vergleich mit den Vorversuchen (siehe **Abbildung 3.47**) zeigt sich, dass ein sehr ähnlicher Anteil Krätze gebildet wird. Es ist allerdings auf zwei wesentliche Dinge zu achten: Zum einen wurden in den Vorversuchen am 5 t-Ofen, neben den T-Bars aus technisch reinem Aluminium, Stangenschrotte eingesetzt, welche durch ihre regelmäßige Form dichter gestapelt werden können und somit eine geringere Oberfläche aufweisen als die Schrotte im realen Versuch mit den neuen Brennern. Werden nur die Versuche mit den alten Brennern verglichen, so ergeben sich im 5 t und im 25 t-Ofen sehr ähnliche Anteile Krätze. Zum anderen ist zu beachten, dass bei den Versuchen im 25 t-Ofen mit den neuen Brennern Schrotte mit einem höheren Legierungsgehalt (Si1 statt Si0,5) eingesetzt wurden. Die Menge an Si in einer Legierung steht oft in einem direkt-proportionalen Verhältnis zu Menge Magnesium (Mg) in der Legierung. Der Abbrand von Magnesium, ein sehr oxidationsfreudiges Metall, kann die erhöhte Krätzemenge begründen. Die Anteile an gebildeter Krätze bleiben aber auf einem ähnlichen Niveau. Basierend auf der Annahme, dass die Schrotte im 25 t-Ofen mit neuen Brennern eine geringere Stapeldichte zulassen und somit eine größere Oberfläche bieten und zusätzlich einen höheren Legierungsgehalt aufweisen, kann von einer reduzierten Krätzebildung unter konstanten Bedingungen (gleiche Geometrie und Chemie der eingesetzten Schrotte) ausgegangen werden. Die Abweichungen innerhalb der Versuchsreihe sind der Verfügbarkeit der Schrotte geschuldet. Es sind nicht zu jedem beliebigen Zeitpunkt die gleichen Mengen, Formen und Qualitäten der Schrotte am Markt verfügbar. Insgesamt hat sich der Markt für Recyclingmetall über die Projektlaufzeit stark verändert. Die Ergebnisse in der Serienanlage sind in gutem Einklang mit den Versuchen am 5 t-Versuchs-ofen zu bewerten.

### **3.3 Numerische Simulation der Brenner an Realanlagen**

Analog zu den experimentellen Untersuchungen wurden die Aluminiumschmelzöfen mittels numerischer Computersimulationen analysiert. Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulationen ermöglichen Anlagen im Detail zu analysieren, auszulegen und zu optimieren. Einige Vorteile von CFD-Simulationen sind die erzeugten Datenmengen sowie die Möglichkeit, verschiedene Parameter- oder Geometriestudien mit einem vertretbaren Aufwand durchführen zu können. Der Arbeitsaufwand kann in drei Schwerpunkte gegliedert werden. Im ersten Teil, dem sogenannten PreProcessing, wird die Geometrie abgebildet und anschließend vernetzt. Dabei ist zu beachten, dass potenzielle Geometrievereinfachungen nicht die Aussagekraft der Simulation beeinflussen dürfen. Eine optimale Netzgenerierung ist essenziell, weil die Konvergenz der Simulation in vielen Fällen von einem guten Gitter abhängt. Anschließend werden im CFD-Programm die Randbedingungen angegeben sowie die Modelle ausgewählt. Hierbei ist die Erfahrung des Anwenders und die richtige Auswahl der Modellkombinationen eine grundlegende Voraussetzung für ein optimales Ergebnis. Im zweiten Schritt, dem Processing, erfolgt die Simulation. Die Rechenzeit ist abhängig von der Auswahl der Modelle (z. B. Turbulenz- und Verbrennungsmodell) und damit von den zu lösenden Gleichungen sowie von der Anzahl der Gitterzellen. Im letzten Schritt, dem Post-Processing, erfolgt die Auswertung der Ergebnisse.

### Geometriemodellierung, CFD-Modellierung Randbedingungen:

Es wurden zwei Aluminiumschmelzöfen untersucht. Jeder Ofen wurde mit zwei verschiedenen Brennerpaaren betrieben, sodass insgesamt vier Simulationsreihen durchgeführt wurden. Die Modellierung der Ofengeometrie sowie der 4 Brenner ist in der **Abbildung 3.48** dargestellt.



**Abbildung 3.48: Modellierung; 5 t -Versuchsofens (li.) und 25 t -Ofen (re.); (Quelle: GWI)**

Die Öfen besitzen einen Abzugskanal, über den der Ofendruck während des Betriebs geregelt wird, in dem ein Teil des Ofenabgases durch Änderung der Ventileinstellung abgesogen wird. Im Rahmen der Simulation wurde angenommen, dass etwa 20 Vol.-% des Ofenabgases durch den Abzugskanal abgeführt werden. Folglich wird der Regeneratorbrenner mit etwa 80 Vol.-% des Ofenabgases belastet. Der 5 t -Ofen wird mit 800 kW und der 25 t -Ofen mit 2.000 kW betrieben. Die Luftzahl beträgt jeweils 1,1 und die Luft wird auf etwa 600 °C vorgewärmt. Während des Betriebs wird über das Regeneratorbrennerpaar abwechselnd Erdgas verfeuert. Der Taktwechsel beträgt etwa 90 Sekunden, weshalb der Prozess in der Praxis instationär ist. Im Rahmen der Simulation wird vereinfacht der Zustand bei Feuerung über einen Brenner untersucht, womit ein stationärer Prozess angenommen wird.

Der Schmelzvorgang der Aluminiumschrotte kann nicht ohne Weiteres im Detail modelliert werden. Stattdessen wurde für die Aluminiumschmelze die Temperatur 660 °C (Schmelztemperatur von Aluminium) und der Emissionsgrad 0,8 definiert.

### Turbulenz- und Verbrennungsmodellierung

Grundsätzlich bieten kommerzielle CFD-Anwendungen eine ganze Reihe von verschiedenen Modellen zur Beschreibung von Turbulenz und Verbrennung an, die alle ihre Stärken und Schwächen haben. Welche Modelle herangezogen werden, hängt von der Aufgabenstellung ab. Die Modellauswahl ist daher grundsätzlich mit Bedacht zu treffen. Hier fließt auch die Erfahrung des CFD-Ingenieurs ein. In dem vorliegenden Fall wird die Strömung mit dem k- $\epsilon$ -realizable-Modell simuliert. Dieses Modell eignet sich für hochturbulente Strömungen und wird oft für industrielle Aufgabenstellungen eingesetzt. Die Verbrennung wird mit dem PDF-Gleichgewichts-Modell betrachtet. Tabellenbasierte Modelle wie das nicht-adiabate PDF-

Gleichgewichtsmodell (PDF: Probability Density Function) sind für derartige Untersuchungen erfahrungsgemäß gut geeignet, wie dies auch an vorherigen Untersuchungen zu sehen ist [4]. PDF-Gleichgewichtsmodelle basieren auf sogenannten Look-Up-Tables. Bei diesem Modellierungsansatz wird vorausgesetzt, dass bei nicht-vorgemischten Flammen die chemische Reaktion viel schneller abläuft als die turbulente Mischung der Reaktionspartner. Durch die Annahme „gemischt = verbrannt“ wird der Verbrennungsprozess durch das Mischungsverhalten von Oxidator mit Brenngas bestimmt. Bei tabellenbasierten Verfahren müssen nur zwei weitere Transportgleichungen für den mittleren Mischungsbruch und die mittlere Varianz des Mischungsbruches gelöst werden. Der numerische Aufwand bleibt damit überschaubar. Die Strahlung wird mit dem Discrete-Ordinates-Model modelliert. In der **Tabelle 3.5** sind die Setup Einstellungen für die durchgeführten Simulationen zusammengefasst.

**Tabelle 3.5: CFD Setup**

Code	Ansys Fluent v2021 R1 (Reynolds Averaged Navier-Stokes, stationär)
Turbulenzmodell	Realizable k-ε-Modell
Strahlungsmodell	Discrete Ordinates Modell (DO)
Verbrennungsmodell	Nicht-Adiabates PDF-Gleichgewichtsmodell
Wände	Nicht adiat

### Temperaturverteilungen

Beim Aluminiumschmelzen muss die Temperatur im Ofen ein bestimmtes Niveau (hier: 900 °C) erreichen, damit der Schmelzprozess einsetzt. In **Abbildung 3.49** ist die Temperaturverteilung entlang der Brennerachse dargestellt.

In allen Fällen liegt die Ofentemperatur oberhalb von 900 °C und damit deutlich höher als die erforderliche Schmelztemperatur für Aluminium. Anhand der Strahlen mit den hohen Temperaturspitzen können die Flammen erahnt werden. Beim 25 t -Ofen mit den neuen Brennern berührt die Darstellungsebene keine Luftzuführung, weshalb die Flammen nicht gut erfasst werden können.

### CO- Verteilungen

Neben der Temperaturverteilung spielt die CO-Konzentration, siehe **Abbildung 3.50**, eine wichtige Rolle zur Beurteilung der Verbrennung. Bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen wie Erdgas entsteht zunächst CO, das anschließend weiter zu CO<sub>2</sub> oxidiert. Die CO-Konzentration kann deshalb als Indikator zur Bewertung des Ausbrandes herangezogen werden. Es ist ersichtlich, dass in allen Fällen eine vollständige Verbrennung erreicht wird. Ein Vergleich mit dem Temperaturverlauf zeigt auf, dass Temperatur- und CO-Höchstwerte deckungsgleich sind, dort die Flamme gebildet wird.

### Geschwindigkeiten über der Aluminiumschmelze

Hohe Geschwindigkeiten über der Aluminiumschmelze können zur Aufwirbelung von Partikeln aus den Schrotten und der Schmelze führen, die anschließend mit dem Abgas ausgetragen werden, was zu Anlagerungen im Regenerator und somit zur Beeinträchtigung des Regeneratorverhaltens führen kann. Ein Blick auf die **Abbildung 3.511** zeigt, dass in allen Fällen die Geschwindigkeiten über der Aluminiumschmelze moderat im Bereich 1 - 10 m/s liegen.

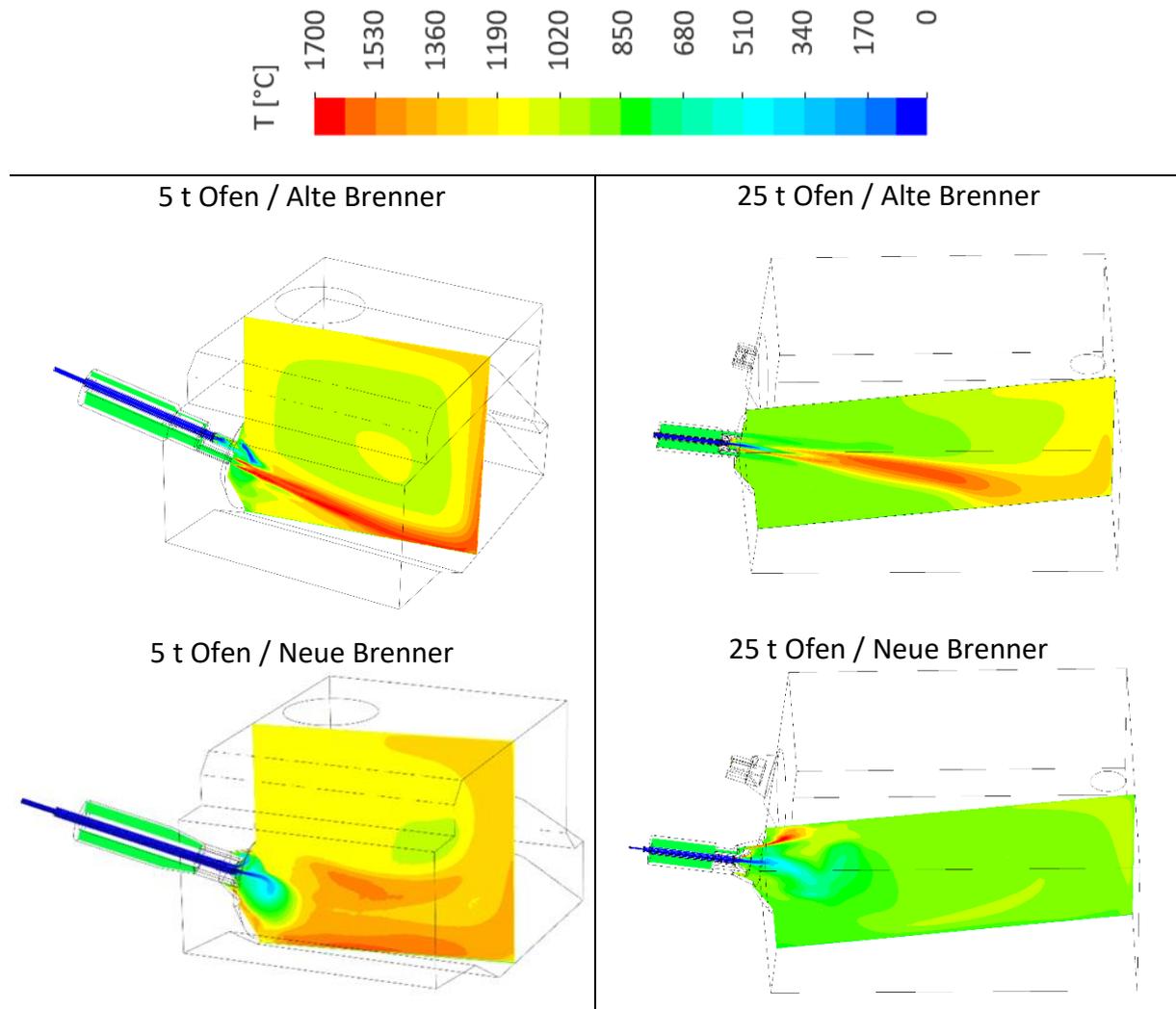
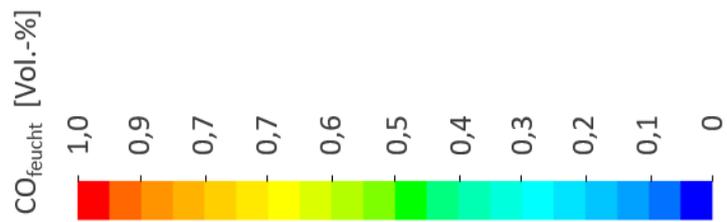
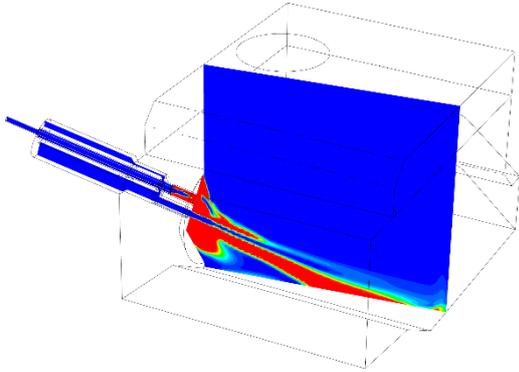


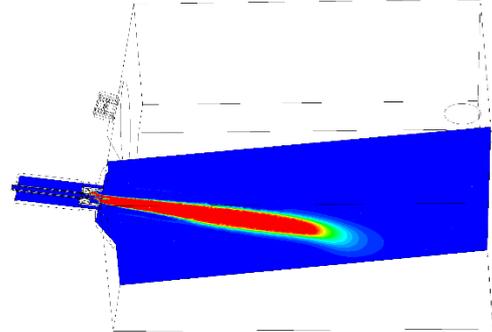
Abbildung 3.49: Temperaturverteilungen im Ofen (Quelle: GWI)



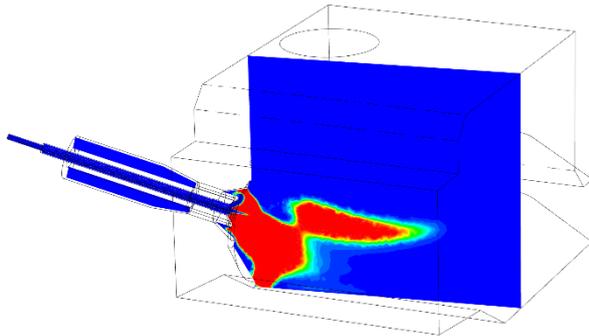
5 t Ofen / Alte Brenner



25 t Ofen / Alte Brenner



5 t Ofen / Neue Brenner



25 t Ofen / Neue Brenner

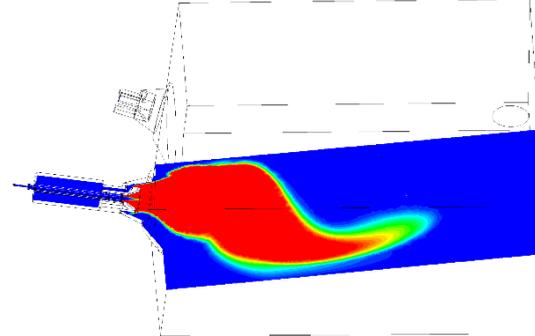


Abbildung 3.50: CO-Verteilung im Ofen (feucht) (Quelle: GWI)

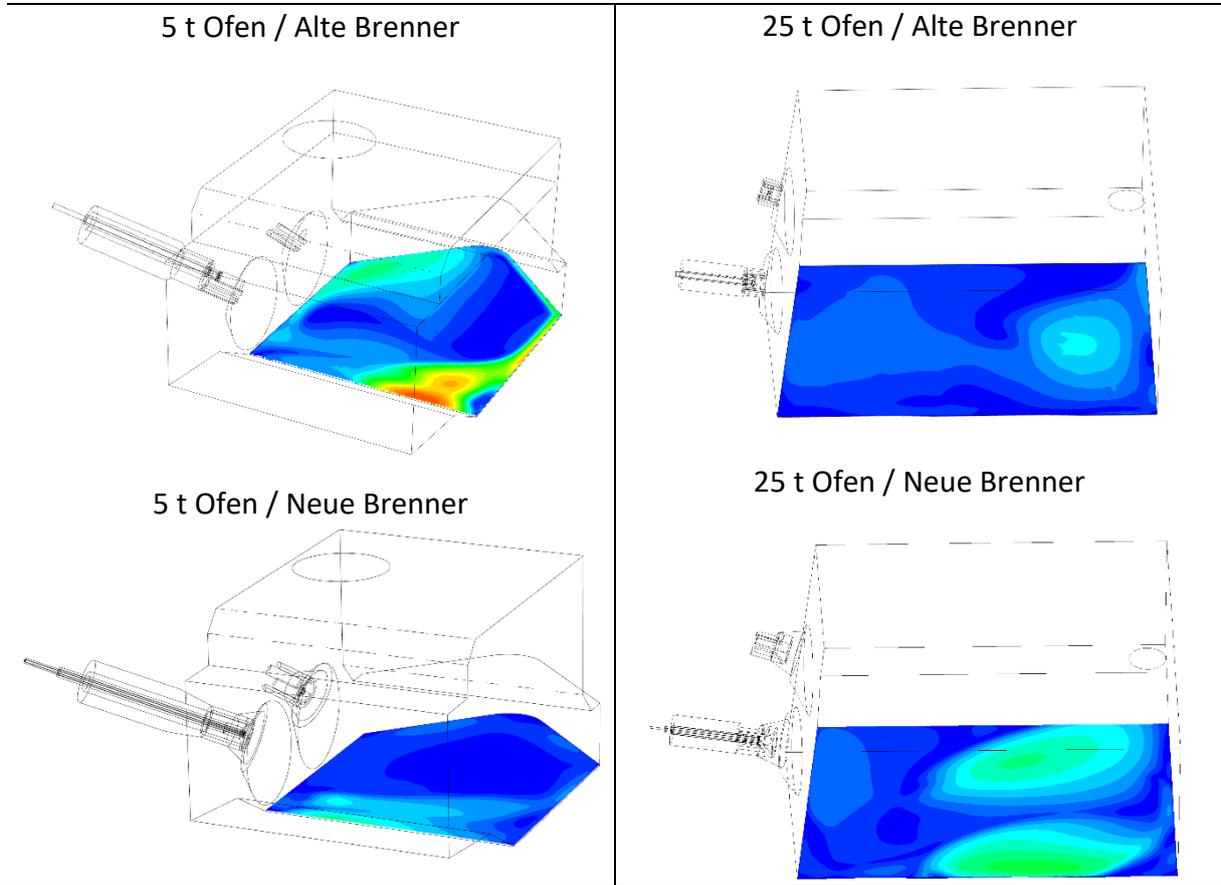
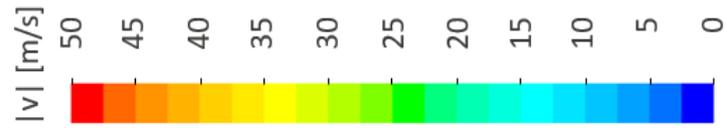


Abbildung 3.51: Geschwindigkeitsverteilung oberhalb vom Schmelzbad (Quelle: GWI)

### Wärmeeintrag in die Aluminiumschmelze

Die eigentliche Zielgröße ist der Wärmeeintrag in die Aluminiumschmelze. Die Ergebnisse (**Abbildung 3.52**) zeigen, dass unabhängig vom Regenerator-Brenner-Paar sowohl im 5 t -Ofen als auch im 25 t -Ofen ungefähr die gleichen Schmelzleistungen realisiert werden. Ein Wechsel des Brennerpaars hat somit keinen negativen Einfluss auf die Schmelzleistung. Im 5 t -Ofen sind die Wärmeströme in die Schmelze höher, die Übertragungsflächen hingegen deutlich geringer, weshalb dort insgesamt weniger Wärme in die Aluminiumschmelze übertragen wird als bei dem 25 t -Ofen. Dort, wo die Flammen nah an der Aluminiumoberfläche kommen, sind die Wärmeströme in die Aluminiumschmelze aufgrund der Strahlung entsprechend höher.

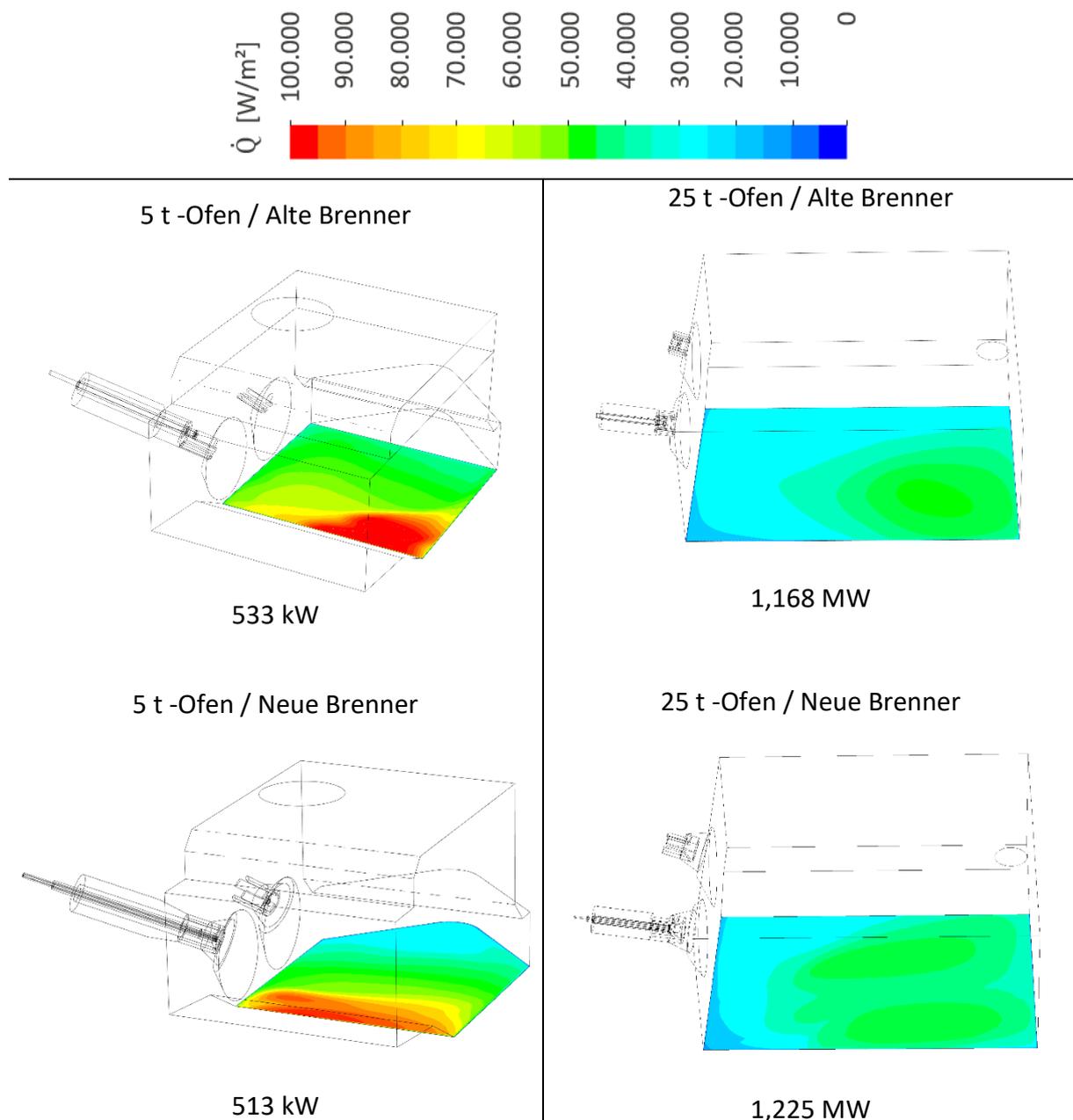


Abbildung 3.52: Wärmeeintrag in das Schmelzbad (Quelle: GWI)

### 3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Brennerentwicklung

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer regenerativen Verbrennungstechnik zum schonenderen Einschmelzen von Aluminiumschrott. Dafür sollte ein umschaltbarer Brenner entwickelt werden, der in zwei Modi betrieben werden kann:

*Flachflamme – Ofenbeladungszustand ungeschmolzen*

*Freistrahlfamme – Ofenbeladungszustand geschmolzen*

Im Rahmen der Entwicklungsphase und bei näherer Betrachtung stellten sich bei diesem Konzept einige Nachteile heraus:

- Um eine Flachflammenform erzeugen zu können, muss der Brennerstein weitgeöffnet (**Abbildung 3.2**) ausgeführt werden. Bei dieser Brennerausführung ließe sich nicht vermeiden, dass der Brennluftstrom am Brenner, der Kontur des Brennersteins folgend, Richtung Aluminiumbad gelenkt wird. Da dieser Luftstrom hohe Konzentrationen an Sauerstoff transportiert, würde der Kontakt mit dem Aluminiumbad zu erhöhter Krätzbildung führen.
- Um die Umschaltung von Flachflammen- auf das Freistrahlmodes automatisieren zu können, müssen Bedingungen definiert werden, wann der jeweilige Modus eingeschaltet werden soll. Diese Bedingungen müssen an den Zustand des Materials im Ofen geknüpft werden, die sich stets verändern. Der Aluminiumberg schrumpft langsam beginnend auf der Brennerseite. Sobald der Abstand zum Brenner sich vergrößert, kann der Wärmeeintrag in das Material beim Flachflammenmodus nur noch über die Strahlung erfolgen. Dies stellt aufgrund des geringen Emissionsgrades von Aluminium einen ineffizienten Wärmeaustausch dar. Eine frühzeitige Umschaltung zur Jet-Flamme hätte dagegen ungünstige Auswirkungen mit Blick auf die Krätzbildung.

Im Laufe des Projektes wurde daher nach einem neuen Brennerkonzept gesucht, idealerweise einen Brenner mit dynamisch, sich selbst modulierender Flamme. Die Strömungsführung am Brenner sollte auf die Veränderungen des Beladungszustandes reagieren und damit die Flamme sich dem jeweiligen Zustand automatisch allein anpassen.

Hierfür wurde eine spezielle Form der Luftdüse entwickelt, die sowohl eine breitangelegte als auch eine langgestreckte Flammenausbildung erlaubt. Die Strömungsführung am Brenner und damit die Flammenform ändert sich in Abhängigkeit des Beladungszustandes des Ofens. Die Simulationsergebnisse sowie später die Testversuche haben die selbstmodulierende Eigenschaft der Flamme bestätigt. Um den maximalen Streckbereich der Flamme zu beeinflussen, wurde der Brenner mit zwei Gaslanzen ausgestattet. Die max. Flammenlänge kann durch Veränderung der Anteile von Gas 1 und Gas 2 verändert werden. Wird anteilig mehr Gas über die erste Gaslanze gefahren, dann hat der Brenner bei Möglichkeit frei zu brennen und eine längere Flamme zu bilden und umgekehrt.

### 3.5 Betrachtung weiterer Abwärmepotenziale und nutzbarer Technologien

Im Rahmen des vorliegenden Arbeitsschrittes wurden konkret für die Ofenanwendung neben der Wärmerückgewinnung durch das regenerative Brennersysteme weitere Abwärmepotenziale in Betracht gezogen und hinsichtlich der Anwendung analysiert.

Grundsätzlich wurde festgestellt, dass durch die bereits vorhandene Ausstattung der Schmelzöfen mit Regeneratorbrennersystemen in Kombination mit der hohen Auslastung der Abwärmenutzung Energieverluste auf einem hohen Temperaturniveau im Werk Essen hinsichtlich der Schmelzöfen nur in kleinstmengen vorkommen lässt. Demzufolge ist ausschließlich das Rauchgas nach Abkühlung durch die Regeneratoren energetisch nutzbar.

Wie oben bereits beschrieben, zeigt die **Abbildung 3.45** einen charakteristischen Temperaturverlauf des Rauchgases eines Schmelzofens mit Bestandsbrennern. Bei der Annahme der Nutzung von 90 % der Rauchgasmenge zur Abwärmenutzung mittels Regeneratoren und einer resultierenden Temperatur von im Mittel 205 °C ergibt sich konkret für den untersuchten 25 t-Schmelzofen im Betrieb eine Verlustwärmeleistung von ca. 150 kW. Unter Berücksichtigung der Anzahl aller betriebenen Schmelzöfen der TRIMET SE am Standort Essen würde sich die theoretisch zur Verfügung stehende Gesamtwärmeleistung um ein Vielfaches erhöhen.

Grundsätzlich beschränkt das geringe Temperaturniveau die weitere Abwärmenutzung auf wenige Technologien. Als Nutzungsformen sind beispielsweise die Abwärmenutzung durch eine ORC-Anlage (Organic Rankine Cycle) zur Stromgewinnung oder die Bereitstellung von Warmwasser für Gebäudebeheizung (ca. 70 °C im Vorlauf) zu nennen. Hinsichtlich der Wirkungsgrade und der Investitionskosten hat sich Die TRIMET SE im Rahmen der Überlegungen dazu entschieden, im gesamten Werk Gas-Wasserwärmetauscher zu implementieren und damit die Restwärme auf einen 120 °C-Wasserkreislauf zu übertragen. Dieser Heißwasserkreislauf soll zukünftig der Beheizung der Werkshallen dienen und damit die Energieeffizienz der Produktion deutlich erhöhen.



## **5 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Das Projekt und erste Ergebnisse wurden auf folgenden Tagungen/Messen/Konferenzen, auf Webseiten und in folgenden Zeitschriften vorgestellt und veröffentlicht:

- *Projektsteckbrief unter: <https://www.gwi-essen.de/medien/publikationen/aktuelle-steckbriefe/aluregbre.pdf>*

Es wurde keine Patentanmeldung seitens der Forschungspartner durchgeführt.

Weiterhin sind folgende Veröffentlichungen geplant:

- *Abschlussbericht auf den Webseiten der Forschungspartner*
- *Veröffentlichung auf der Thermprocess 2023 als Poster*
- *Veröffentlichung in den Zeitschriften Aluminium, prozesswärme, ...*

## 6 Literatur

- [1] *statista*: „Produktion von Primär- und Sekundäraluminium in Deutschland in den Jahren 2011 bis 2021“. Link: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197960/umfrage/produktion-von-primar-und-sekundaeraluminium-in-deutschland/> (30.01.2023)
- [2] Wüning, J. G., 2019: „Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen: Grundlagen - Brennertechniken – Anwendungen“, Vulkan Verlag
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft“, 2002
- [4] Nowakowski, T.: „Untersuchung der Auswirkung von Wasserstoff-Zumischung ins Erdgasnetz auf industrielle Feuerungsprozesse in thermoprozesstechnischen Anlagen“, Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Abschlussbericht, Essen, 2017.