



Gemeinsamer Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

Umsetzung der kombinierten Gas- und Sauerstoff-Vorwärmung zur Effizienzsteigerung und CO₂-Einsparung an Oxy-Fuel-Glasschmelz- wannen

Projektkronym: Oxy-Vor

Projektlaufzeit: 01.07.2016 – 31.12.2019



Projektpartner:

UAS Messtechnik GmbH

Dipl.-Ing. (FH) Florian Stadler
Prof. H. Staudinger-Str. 4
94234 Viechtach

T: +49(0)9942 9486-234

E: fstadler@uas.de

Förderkennzeichen: 01LY1603A

Klein- und mittelständisches
Unternehmen

**Gas- und Wärme-Institut Essen
e.V.**

Dr.-Ing. Anne Giese
Hafenstraße 101
45356 Essen

T: +49(0)201 3618 – 257

E: a.giese@gwi-essen.de

Förderkennzeichen: 01LY1603B

Forschungsinstitut,
eingetragener Verein

Autoren:

Anne Giese, Bledar Islami, Jörg Leicher

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.

Florian Stadler,

UAS Messtechnik GmbH

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

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis..... | 3 |
| 1 Zusammenfassung..... | 5 |
| 2 Hintergründe und Ausgangssituation..... | 6 |
| 2.1 Gesamtziel des Projektes | 6 |
| 2.2 Ausgangssituation und Stand der Technik | 6 |
| 3 Vorgehensweise und erzielte Ergebnisse..... | 17 |
| 3.1 Numerische Simulation der Glasschmelzwanne, Modelle und Annahmen..... | 17 |
| 3.2 AS 1: Untersuchung der Auswirkungen der Vorwärmung mittels numerischer Simulation an der ausgewählten Glasschmelzwanne (GWI/UAS)..... | 18 |
| 3.2.1 AS 1.1: Detaillierte Vermessung der ausgewählten Glasschmelzwanne (GWI/UAS)..... | 18 |
| 3.2.2 AS 1.2: Definition der Parameter für die Vorwärmung und Fahrweise der Wanne (z. B. Temperatur) (GWI/UAS)..... | 20 |
| 3.2.3 AS 1.3: CFD Simulation der ausgewählten Glasschmelzwanne ohne Vorwärmsystem (GWI) 22 | |
| 3.2.4 AS 1.4: CFD Simulation der ausgewählten Glasschmelzwanne mit Vorwärmsystem (GWI). 25 | |
| 3.2.5 AS 1.5: Auswertung und Aufstellung der Modifikationen der Brennersysteme und Analyse der Regel- und Steuerungskette (GWI/UAS)..... | 27 |
| 3.3 AS 2. Bau der kombinierten Gas- und Sauerstoffvorwärmung (UAS)..... | 34 |
| 3.3.1 AS 2.1: Erstellung der Konstruktionszeichnungen und Materialauswahl (UAS) | 34 |
| Die Abbildungen 3.12 und 3.13 zeigen beispielhaft die erstellten Konstruktionszeichnungen und das R&I-Fließschema..... | 34 |
| 3.3.2 AS 2.2: Bau der kombinierten Gas- und Sauerstoffvorwärmung (UAS)..... | 35 |
| 3.4 AS 3. Konfiguration der Regelstrecke (UAS/GWI)..... | 38 |
| 3.4.1 AS 3.1: Aufstellung einer Regelungsstrategie und Anpassung von Regelparametern (UAS/GWI) | 38 |
| 3.4.2 AS 3.2: Einbindung der Regel- und Steuerungskette in das Vorwärmsystem (UAS)..... | 39 |
| 3.5 AS 4. Umsetzung an einer realen Anlage und Funktionstest (UAS/GWI)..... | 42 |
| 3.5.1 AS 4.1 Integration, Inbetriebnahme (UAS/GWI) | 42 |
| 3.5.1.1 Anlagenimplementierung..... | 42 |
| 3.5.1.2 Brenner und Brennersteine..... | 47 |
| 3.5.2 AS 4.2 Langzeittest, detaillierte Vermessung der ausgewählten Glasschmelzwanne, Aufnahme prozessspezifischer Daten (UAS/GWI)..... | 55 |
| 3.5.3 AS 4.3 Auswertung und Analyse der Daten und Modifikation des Systems (UAS/GWI) | 57 |
| 3.5.4 AS 4.4 Erarbeitung von Handlungsempfehlungen (UAS/GWI)..... | 60 |
| 4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit..... | 62 |
| 5 Fortschreibung des Verwertungsplans..... | 63 |
| 5.1 Schutzrechtsanmeldungen..... | 63 |
| 5.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses | 63 |
| 5.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen..... | 63 |

| | | |
|---|-----------------|----|
| 6 | Danksagung..... | 65 |
| 7 | Literatur..... | 66 |

1 Zusammenfassung

Gerade in Zeiten des Klimawandels und der Diskussion über die Reduzierung der CO₂-Emissionen müssen Anlagenbetreiber energieintensiver Industriezweige, wie z. B. die Glasherstellung, ihre Anlagen so energieeffizient wie möglich unter der Gewährleistung der Produktqualität und der Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte fahren. Der Einsatz effektiver Oxy-Fuel-Brennertechnologie ist dabei ein zielführender Schritt. Jedoch ist es immer noch Stand der Technik, dass die im Abgas enthaltene Wärmeenergie meist nicht weiter genutzt wird z. B. zur Vorwärmung der Medien oder Glasrohstoffe. Das Ziel dieses Projektes war deshalb die Integration einer kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung an einer Glasschmelzwanne mit der zugehörigen Regelungsstrecke, um die möglichen Einsparpotenziale zu demonstrieren.

Dieses Ziel konnte nur teilweise erreicht werden.

Die Vorwärmeinheit wurde an die Erfordernisse der Glasschmelzwanne der Firma Zwiessel Kristallglas angepasst, gebaut, vor Ort in die Anlageninfrastruktur integriert, die Steuer- und Regelungskonzepte wurden erarbeitet und ebenfalls erfolgreich implementiert. Anhand der Erfassung des Istzustandes der Wanne und anschließender numerischer CFD-Simulationen wurden die Auswirkungen der kombinierten Vorwärmung von Erdgas und Sauerstoff auf die Wärmeübertragung, Strömungs- und Temperaturverteilung abgeschätzt und Modifizierungen in der Fahrweise vorgeschlagen. Eine angepasste Brennergeometrie wurde in Zusammenarbeit mit einem Brennerhersteller entwickelt und ebenfalls mittels numerischer Simulationen überprüft.

Die Umsetzung einer ersten Brennergeometrie erfolgte entsprechend dem Projektplan.

Es haben sich während des Tests bzgl. der verwendeten Materialien und dem Zusammenspiel zwischen Strömung und Temperaturverteilung im Brennerstein sowie mit dem verwendeten Gemenge Komplikationen ergeben, die zur Beschädigung der Brennersteine führte. Durch weitere Modifikationen wurde versucht, diese Probleme zu beheben. Darauf aufbauend wurden 2 weitere Brennertypen entwickelt, gebaut und in die Wanne integriert. Jedoch kam es auch hierbei immer wieder zu Wechselwirkungen zwischen Strömung, Temperatur, Brennersteinmaterial und Glasgemenge, die zur Zerstörung der Brennersteine und zu Schlieren im Glas führten.

Die Langzeiterprobung des Vorwärmsystems und die Feststellung des Einflusses des Systems auf den Wannenbetrieb, konnten aufgrund der von Beginn an andauernden Schwierigkeiten mit den Brennersteinen nicht erfolgreich und abschließend durchgeführt werden. Bis zum Ende des Projektes konnte keiner der eingebauten Brenner/Steine die angesetzte Kaltphase (Betrieb ohne Vorwärmung) absolvieren, ohne dabei gravierende Einflüsse auf den Produktionsbetrieb zu nehmen.

Trotz fortlaufender Abstimmung der Gemengezusammensetzung, Betriebsparameter, etc. mit dem Brennerlieferanten und dessen Steinlieferanten traten bis zum Schluss massive Probleme auf, die einem Heißbetrieb des Vorwärmsystems entgegenstanden.

2 Hintergründe und Ausgangssituation

2.1 Gesamtziel des Projektes

Das übergeordnete Ziel dieses Projektes war die Untersuchung und Integration einer kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung an einer Bestandsanlage. Des Weiteren sollte die zugehörige Regelungsstrecke neu konzipiert und für das integrierte Vorwärmssystem eingestellt werden, um lokale Hot-Spots, ungleichmäßige Wärmeverteilung auf das Glasbad, Beeinflussung der Glasqualität (z. B. durch Schaumbildung), Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen (z. B. NO_x und SO_x) und thermische Belastungen am Feuerfestmaterial zu minimieren. Dadurch sollte insgesamt der spezifische Energieverbrauch an einer Oxy-Fuel-Glasschmelzwanne weiter gesenkt werden. Hierfür hat die Firma UAS Messtechnik GmbH (kurz: UAS) ein System (Prototyp) entwickelt und am Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (kurz: GWI) getestet, mit welchem der gasförmige Brennstoff vor Eintritt in den Verbrennungsraum auf Temperaturen bis 400 °C vorgewärmt wird. Zusätzlich wird der als Oxidator verwendete Sauerstoff ebenfalls auf dieses Temperaturniveau vorgewärmt, was den Effekt auf die Energieeinsparung nochmals deutlich steigert. Höhere Vorwärmtemperaturen sind zwar möglich, aber nicht zielführend, da beim Brennstoff Erdgas die Kohlenwasserstoffverbindungen bereits bei Temperaturen knapp oberhalb 400 °C zu „cracken“ beginnen, was somit zu sicherheitstechnischen Problemen an den Wärmetauschern und Armaturen führt. Bei Sauerstoffvorwärmtemperaturen $> 400\text{ °C}$ spielt zudem die Werkstoffauswahl eine große Rolle. Für die Leitungen und Armaturen müssen dann Spezialstähle oder Keramiken eingesetzt werden, die zu unverhältnismäßig hohen Kosten führen und eine sinnvolle Amortisation der Anlagen nicht mehr ermöglichen. Nachweislich ergeben sich aus der hier vorgeschlagenen kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung deutliche Einsparungen an Brennstoff und somit auch an Sauerstoff sowie damit verbunden eine Minimierung der CO_2 -Emissionen.

2.2 Ausgangssituation und Stand der Technik

In der Glasindustrie gehört das Schmelzen von Glas mit zu den energieintensivsten Prozessen. Bis zu 85 % des Primärenergieeinsatzes im Glasherstellungsprozess werden für das eigentliche Schmelzen eingesetzt, da die benötigten Feuerraumtemperaturen für den Schmelzprozess teilweise über 1.600 °C liegen und große Wärmemengen benötigt werden. Als Brennstoff kommt in der Regel Erdgas zum Einsatz. Um diese hohen Temperaturen zu erreichen, wird für das Beheizen einer Glasschmelzwanne die Luft, mit der im Abgas enthaltenen Enthalpie regenerativ bis nahe 1.400 °C bzw. rekuperativ bis zu 800 °C vorgewärmt, [1]. Damit wird gleichzeitig der Wirkungsgrad dieser Anlagen gesteigert und somit der Brennstoffeinsatz reduziert, da die im Abgas enthaltene Wärme zur Luftvorwärmung verwendet wird. In der Glasindustrie sind aufgrund der hohen benötigten Prozesstemperaturen und der großen Stoffströme meist Regeneratoren zu finden. Diese Regeneratoren können durchaus von vergleichbarer Größe wie der eigentliche Feuerungsraum sein (siehe **Abbildung 2.1**). Aufgrund der hohen Prozesstemperaturen stellt insbesondere die Minimierung der thermischen Stickoxidemissionen

(NO_x) bei gleichzeitig hoher energetischer Effizienz eine technologische Herausforderung dar, die durch verschärfte Grenzwerte zusätzlich an Bedeutung gewinnt.

Eine völlig andere Möglichkeit, hohe Verbrennungstemperaturen zu erreichen, stellt die sogenannte Oxy-Fuel-Verbrennung, also die Verbrennung eines Brennstoffs mit annähernd reinem Sauerstoff anstelle von Luft als Oxidator, dar, die sich mittlerweile in vielen Branchen der Hochtemperaturverfahrenstechnik erfolgreich etabliert hat [2], [3], [4].

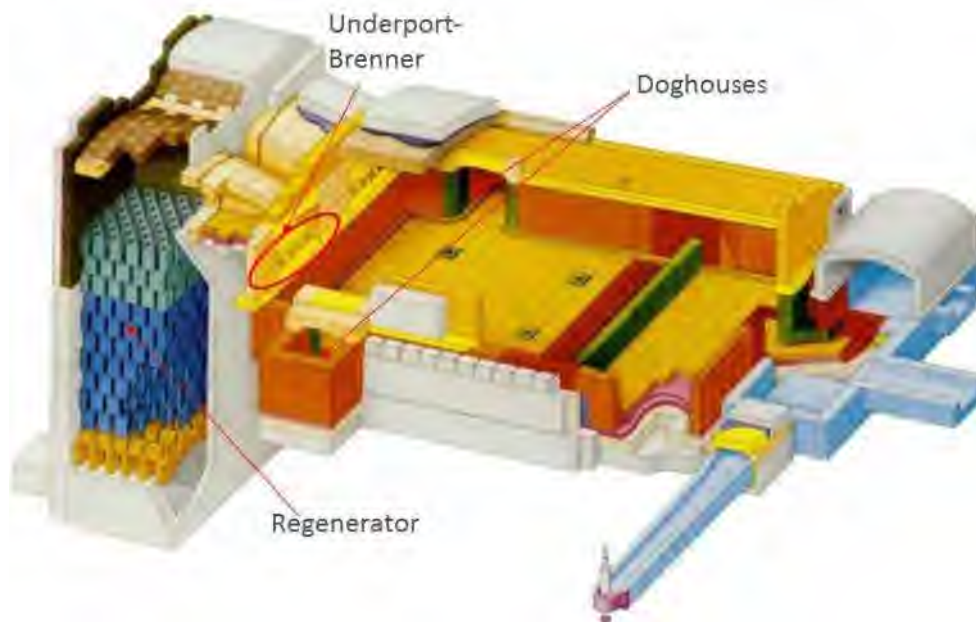


Abbildung 2.1: Darstellung einer regenerativen U-Flammenwanne [5]

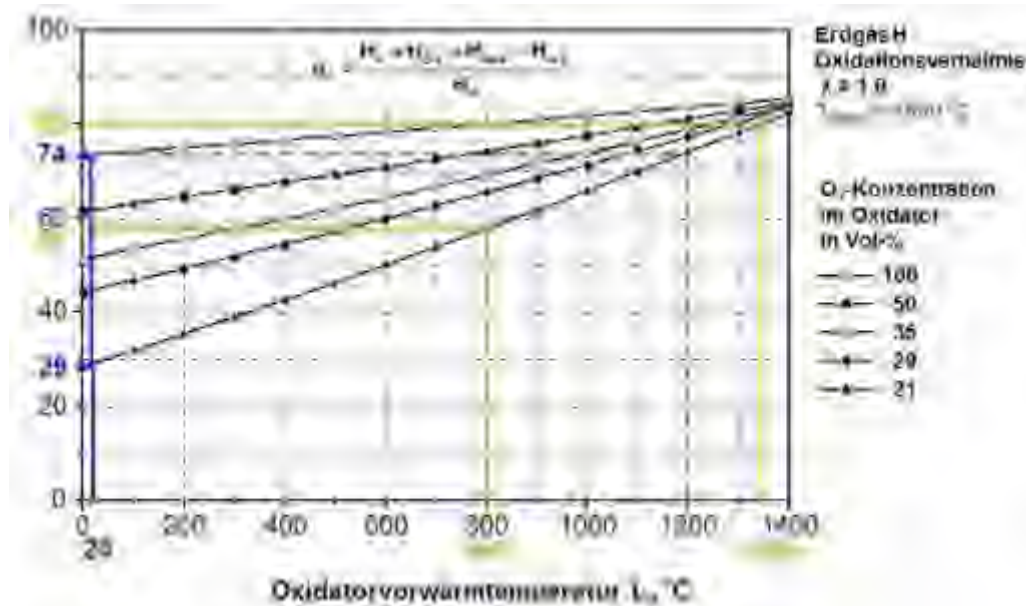


Abbildung 2.2: Zusammenhänge zwischen Oxidator-Vorwärmtemperatur, Sauerstoffgehalt und feuerungstechnischem Wirkungsgrad [8]

Diese Technologie bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich: Oxy-Fuel-Prozesse bieten extrem hohe feuerungstechnische Wirkungsgrade bei gleichzeitig hervorragenden Wärmeüber-

tragungseigenschaften [6] [7]. **Abbildung 2.2** zeigt die Entwicklung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur und der O₂-Anreicherung. Es wird deutlich, dass bei der Oxy-Fuel-Verbrennung (ohne Vorwärmung), verglichen mit der nicht-vorgewärmten Erdgas-Luft-Verbrennung, erheblich höhere Wirkungsgrade erreicht werden. Um mit dem Oxidator Luft vergleichbare Wirkungsgrade zu erreichen, muss eine Luftvorwärmtemperatur von mindestens 1.200 °C erreicht werden. In realen Anlagen werden Luftvorwärmtemperaturen bis 1.400 °C erreicht.

Die erreichbaren Flammentemperaturen sind bei der Oxy-Fuel-Verbrennung extrem hoch (adiabate Flammentemperatur bei Stöchiometrie ca. 2.800 °C) und gleichzeitig ergeben sich durch die Abgaszusammensetzung (im wesentlichen CO₂ und H₂O) sehr gute Wärmeübertragungseigenschaften [2], [7], [9]. **Abbildung 2.3** zeigt in einer Darstellung die Strahlungsintensitäten eines Abgases einer Erdgas-Luft- und einer Erdgas-Sauerstoff-Verbrennung, aufgetragen über der Wellenzahl (Kehrwert der Wellenlänge). Es wird deutlich, dass in weiten Bereichen des Spektrums die Strahlungsintensität einer Oxy-Fuel-Flamme erheblich höher ist als die einer konventionellen Gas-Luft-Flamme [9].

Da bei der Oxy-Fuel-Verbrennung der Stickstoff als Hauptbestandteil von Luft wegfällt, ergeben sich erheblich geringere Volumenströme für Oxidator und Abgas, so dass die Anlagen an sich, aber auch Filteranlagen für die Abgasaufbereitung, kleiner und kompakter ausgelegt werden können. Zudem entfallen die großen Regeneratoren zur Luftvorwärmung. Da Regeneratoren einem großen Verschleiß unterworfen sind, erhöht sich oft die Anlagenlebensdauer [4].

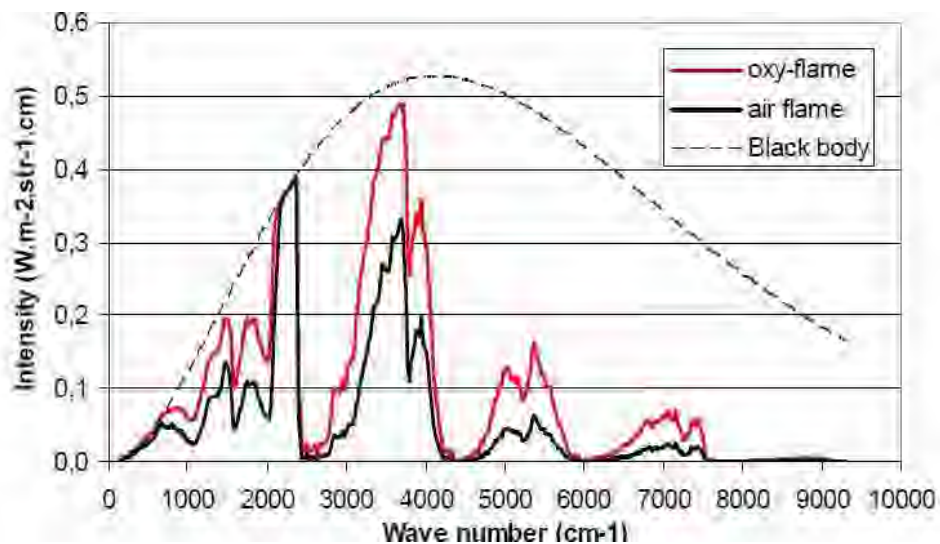


Abbildung 2.3: Strahlungsintensitäten von Abgasen einer Oxy-Fuel- und einer Erdgas-Luft-Flamme nach [9]

Aus Sicht der Prozessregelung ist die Oxy-Fuel-Feuerung ebenfalls in vielerlei Hinsicht von Vorteil: kleinere Volumenströme machen Anlagen leichter regelbar, zudem muss das „Altern“ von Regeneratoren, also schlechtere Luftvorwärmeigenschaften und daraus resultierende, veränderliche Luftvorwärmtemperaturen über die Lebensdauer des Regenerators hinweg, nicht mehr berücksichtigt werden. Dies führt zu reduziertem Brenngasverbrauch und zudem oft

auch zu verbesserter Produktqualität. Die bessere Regelbarkeit von Oxy-Fuel-Anlagen reduziert zudem häufig die Notwendigkeit von elektrischen Zusatzheizungen („boosting“), oder alternativ kann mit dem gleichen Energieeintrag eine höhere Tonnageleistung erreicht werden [4].

Im Hinblick auf Abgasemissionen stellt die Oxy-Fuel-Verbrennung, neben den reduzierten CO₂-Emissionen durch höhere Effizienz und Wärmeübertragung, auch eine sehr erfolgreiche Primärmaßnahme zur Minderung von Stickoxid-Emissionen (NO_x) dar, indem die Haupt-Stickstoffquelle, der in der Luft enthaltene Stickstoff, entfernt wird. Theoretisch lassen sich somit verbrennungsbedingte NO_x-Emissionen vollständig unterbinden. In der Realität können sowohl im Erdgas als auch im Sauerstoff kleinere Mengen Stickstoff enthalten sein, zudem besteht bei Industrieanlagen immer die Gefahr von Falschlufteinbrüchen. Manchmal werden in der Glasindustrie auch Nitratverbindungen zum Läutern der Schmelze in das Gemenge gegeben, die ebenfalls in die Gasphase übergehen und NO_x bilden können [10], [11]. Dennoch können durch die Oxy-Fuel-Verbrennung, wenn mögliche externe Stickstoffquellen weitestgehend vermieden werden, NO_x-Emissionen drastisch reduziert werden, wie anhand von Beispielen sowohl der Glas- als auch anderer Hochtemperaturindustrien belegt werden kann [12], [13].

Schwefeloxidemissionen (SO_x) sind bei der Nutzung von Erdgas in der Regel ebenfalls nicht brennstoffbedingt, da die meisten Erdgase, im Gegensatz zu Heizöl, Kohle oder Biomasse, als annähernd schwefelfrei angesehen werden können. Haupt-Schwefelquellen im Glasschmelzprozess sind somit das Gemenge, recycelte Scherben und Filterstaub, unter Umständen kann aber auch die Verbrennungsluft Schwefelverbindungen aus dem Regenerator aufnehmen und in den Brennraum tragen [14]. Schwefelverbindungen, die im Brennraum freigesetzt werden, werden fast vollständig in SO_x umgewandelt. Die Oxy-Fuel-Technologie weist auch hier einen Vorteil auf, da Sekundärmaßnahmen zum Ausfiltern von SO_x aus dem Rauchgas aufgrund der geringeren Volumenströme effizienter arbeiten [4]. Allerdings muss bei Oxy-Fuel-Feuerungen der Sulfatgehalt im Gemenge erheblich reduziert werden, da der zur Läuterung eingebrachte Schwefel unter Oxy-Fuel-Bedingungen intensiver mit in der Schmelze gebundenem Wasser reagiert als bei der konventionellen regenerativen Feuerung mit Luft [15]. Kritisch für die Wirtschaftlichkeit einer Oxy-Fuel-Anlage sind in besonderem Maße die Kosten für die Erzeugung des Sauerstoffs. Diese wirken sich zwar nicht unmittelbar im feuerungstechnischen Wirkungsgrad der Anlage aus, müssen aber dennoch in der energetischen und wirtschaftlichen Bilanzierung einer Anlage berücksichtigt werden. Wichtig ist hier insbesondere der Strombedarf, so dass sich Oxy-Fuel-Anlagen besonders stark in Ländern durchgesetzt haben, wo Elektrizität günstig ist (Frankreich, USA) oder der Sauerstoff selbst aus anderen Gründen kostengünstig zur Verfügung steht (Niederlande). In den USA sind mittlerweile etwa 25 % aller neuen Glasschmelzaggregate Oxy-Fuel-Anlagen [5], in den Niederlanden 18 % [16].

Die Oxy-Fuel-Verbrennung hat sich dabei in verschiedenen Bereichen der Glasindustrie unterschiedlich stark etabliert, wobei bei der Glasfaserherstellung und den Spezialgläsern mit ihren

verhältnismäßig kleinen Schmelzaggregaten der Marktanteil am größten ist [17]. Aber auch in der Behälterglasindustrie nimmt die Anzahl von Oxy-Fuel-Anlagen zu [18].

Im Gegensatz zu Industrieofenanlagen mit klassischer Erdgas-Luftverbrennung, bei denen rekuperative oder regenerative Luftvorwärmung als Stand der Technik gelten kann, wird bei Oxy-Fuel-Anlagen die im Abgas enthaltene Wärme derzeit in der Regel nicht weiter genutzt, wodurch ein nicht unerheblicher Anteil an Energie dem Prozess verloren geht. Nach [18] können die Abgaswärmeverluste bei einer Oxy-Fuel-Glasschmelzwanne bis zu 30 % der eingebrachten Energie betragen. Hinzu kommt, dass das Abgas häufig bewusst abgekühlt wird, um niedrigere Temperaturniveaus für nachgeschaltete Filteranlagen sicherzustellen. Hier besteht erhebliches Potential für weitere Wirkungsgradsteigerungen.

Abbildung 2.2 verdeutlicht, dass auch bei der Oxy-Fuel-Verbrennung durch die Vorwärmung des Sauerstoffs eine Wirkungsgradsteigerung erreicht werden kann. Würde zusätzlich noch eine Brenngasvorwärmung realisiert, sind weitere Effizienzsteigerungen möglich. Gerade bei der Oxy-Fuel-Verbrennung erscheint es aufgrund des Verhältnisses von Brenngas- zu Oxidatorvolumenstrom (1 : 2 für die stöchiometrische Oxy-Fuel-Verbrennung, gegenüber 1 : 9,524 bei der stöchiometrischen Verbrennung mit Luft, jeweils für Methan) sinnvoll, beide Reaktanden vorzuwärmen.

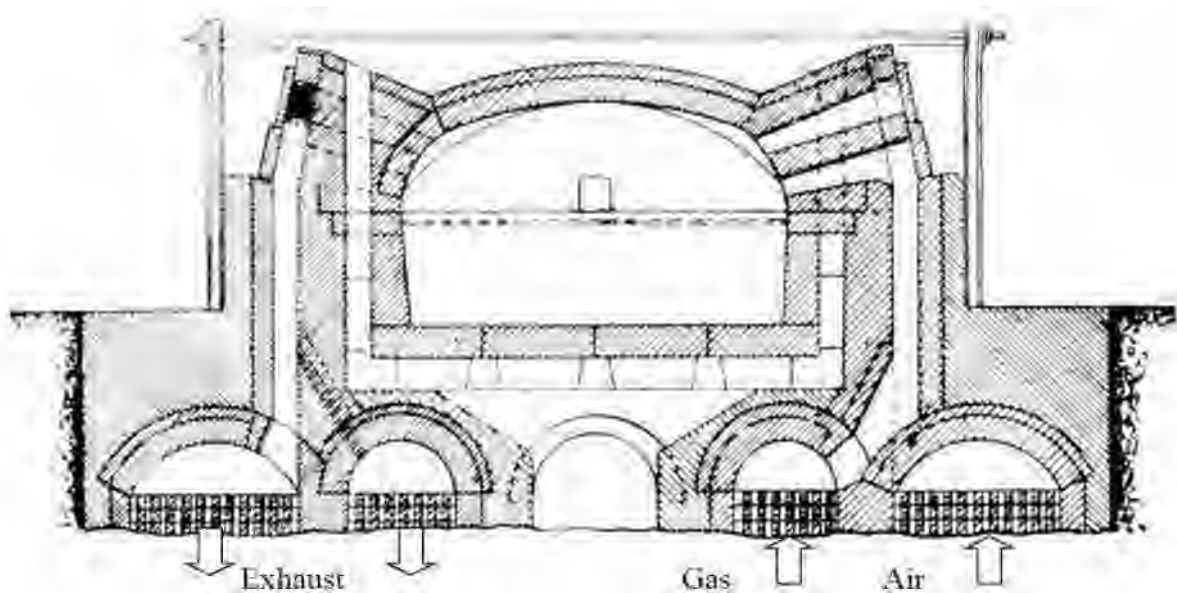


Abbildung 2.4: Zeichnung eines Siemens-Martin-Industrieofens [10]

Die Idee einer Vorwärmung von Brenngas und Oxidator ist in der Glasindustrie nicht neu: Bis in die 60er Jahre hinein wurden in Europa oder den USA Glasschmelzwannen mit niederkalorischen Prozessgasen oder Stadtgasen befeuert, wobei sowohl das Brenngas als auch die Verbrennungsluft regenerativ vorgewärmt werden mussten, um überhaupt die notwendigen Prozesstemperaturen zum Schmelzen von Glas zu erreichen [10]. In anderen Teilen der Welt sind derartige Anlagen auch heute noch im Einsatz [19]. **Abbildung 2.4** zeigt ein Schema des klassischen Siemens-Martin-Ofenkonzepts, bei dem das Abgas in zwei getrennte Regeneratoren

geleitet wird, einen für die Verbrennungsluft und einen für das Brenngas. Zyklisch wurde dann die Strömungsrichtung gewechselt, um auf diese Weise sowohl Brenngas als auch Luft vorzuwärmen.

Bei vorgewärmtem Sauerstoff spielt die Auswahl der Leitungswerkstoffe eine sicherheitsrelevante Rolle [28]. Das angestrebte Temperaturniveau von etwa 200 - 400 °C für Brenngas bzw. Oxidator bedeutet auch, dass auf große Regeneratoren verzichtet werden kann, anstelle dessen soll die Medienvorwärmung mit Hilfe kostengünstiger metallener Rekuperatoren erfolgen.

Erste Untersuchungen zum Einsatz der kombinierten Erdgas- und Sauerstoffvorwärmung mit Hilfe von Abwärme in der Glasindustrie liegen bereits vor, wobei Einsparungen bzgl. Brenngas- und Oxidatorverbrauch in der Größenordnung von 8 - 10 % genannt werden, je nach Temperaturniveau der Vorwärmung der Reaktanden [19], [20]. Die im EU-Projekt „HotOxyGlass“ untersuchte Konfiguration ist in **Abbildung 2.5** dargestellt. Dabei wird in der in [18], [21] beschriebenen Vorgehensweise die Wärme vom Abgas nicht direkt an die aufzuheizenden Medien Erdgas und Sauerstoff abgegeben. Anstelle dessen erwärmt das Abgas in einem ersten Rekuperator einen Luftstrom, der dann in einem zweiten Rekuperatorsatz sowohl Gas als auch Sauerstoff erwärmt. Eine ähnliche Konfiguration ist auch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens geplant. Aus dem „HotOxyGlass“-Projekt sind in den letzten Jahren die „HeatOx“-Projekte entstanden, bei denen in Ost-Europa mehrere Oxy-Fuel-Anlagen mit kombinierten Erdgas-Sauerstoffvorwärmung erweitert wurden. Die erreichten Sauerstofftemperaturen konnten auf bis zu 800 °C angehoben werden, die Erdgasvorwärmung ist nach wie vor auf etwa 400 °C begrenzt [22], [23], [24].

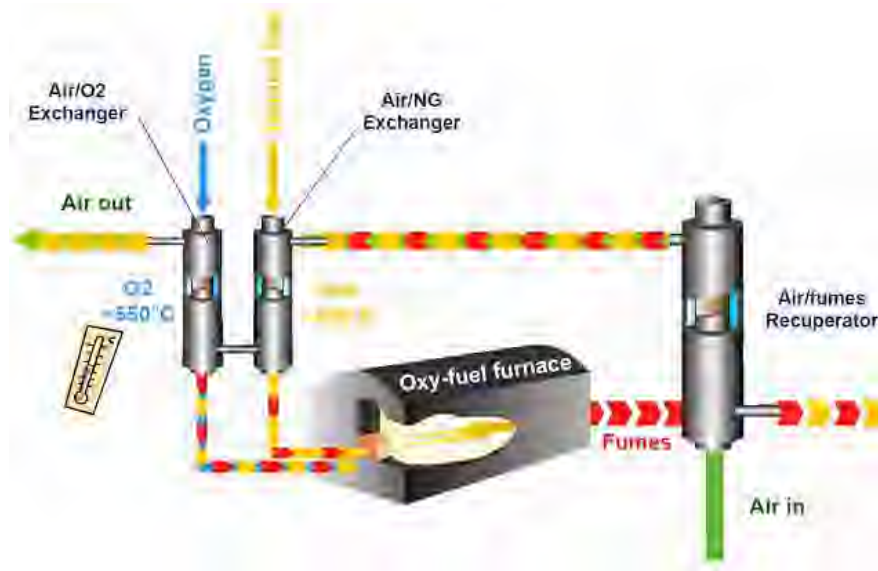


Abbildung 2.5: Feuerungskonzept des EU-Projekts „HotOxyGlass“ [21]

Die Herausforderung und die speziellen Ziele dieses Vorhabens sind, im Gegensatz zu den o. g. „HotOxyGlass“- und „HeatOx“-Projekten, die Untersuchung der Einflüsse der Vorwärmung auf die Prozesse im Ofenraum und die Optimierung der Energieeinsparung bzw. die Minimierung von negativen Effekten auf den Schmelzprozess, die Glasqualität und die Lebensdauer

des Feuerfestmaterials durch Anpassung des Regelungskonzeptes. Hierbei spielen hauptsächlich Änderungen der Flammencharakteristik durch veränderliche Brennstoff- und Oxidator-temperaturen eine große Rolle. Speziell sind die Risiken von sog. „hot spots“ (ungleichmäßige Energieverteilung über dem Glasbad, führt zu Problemen der Glasqualität) und der Überhitzung der Ofenraumwandungen (führt zum Schmelzen des Feuerfestmaterials, bedingt dadurch eine deutliche Verkürzung der Wannenstandzeit und die Minderung der Glasqualität durch Eintrag von Silikaten, etc. ins Glasbad) zu unterbinden.

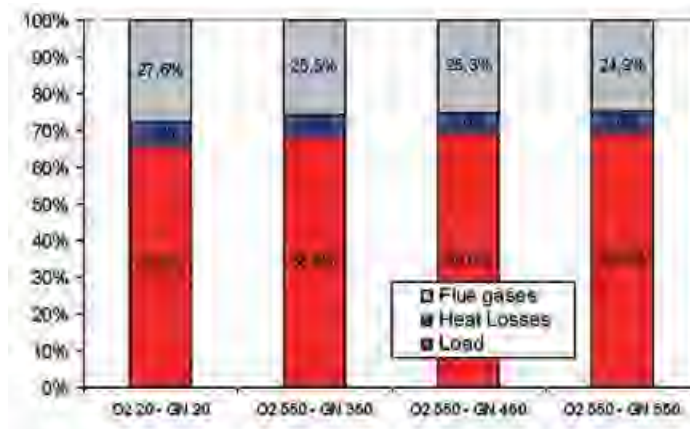


Abbildung 2.6: Relative Wärmeverluste, bezogen auf die eingebrachte Energiemenge bei Prüfstandsuntersuchungen zur kombinierten Gas-/Sauerstoffvorwärmung [18]. „Load“ bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Wärme, die von der Schmelze aufgenommen wird.

Abbildung 2.6 zeigt eine Analyse der relativen Wärmeverluste, die bei Prüfstandsversuchen für Erdgas- und Sauerstoffvorwärmung auf verschiedene Temperaturniveaus ermittelt wurden [18]. Die Ergebnisse der Untersuchungen waren vielversprechend genug, dass 2008 ein erstes Schmelzaggregat für Flachglas in Frankreich mit der sogenannten „HotOxyGlass“-Technologie ausgerüstet wurde, seit April 2014 ist eine zweite Anlage in der Tschechischen Republik in Betrieb [25]. In Bulgarien wurde eine Oxy-Fuel-befeuerte Glaswanne mit einer kombinierten Erdgas-Sauerstoffvorwärmung erweitert, erste Betriebserfahrungen wurden 2017 vorgestellt [23].

Eine völlig andere Form der Abgaswärmerückgewinnung stellt die sogenannte thermochemische Rekuperation [26] bzw. Regeneration (TCR) [19] dar. Hierbei wird die im Abgas enthaltene Wärme nicht rein thermisch genutzt, sondern das Abgas wird mit Erdgas (und evtl. auch zusätzlichem Dampf) bei hoher Temperatur vermischt, sodass die im Erdgas enthaltenen Kohlenwasserstoffe und die Reaktionsprodukte CO_2 und H_2O im Abgas teilweise oder auch vollständig zu einem Synthesegas reformiert (je nach Prozess zwischen 800 - 1.300 °C heiß) werden. Je nach Verfahren und vorliegenden Temperaturniveaus müssen die Reforming-Reaktionen durch einen Katalysator unterstützt werden. Diese Verfahren erlauben theoretisch Energieeinsparungen von mehr als 20 % [19], [26], verglichen mit einer konventionellen Oxy-Fuel-Feuerung. Sie sind aber auch mit einem erheblichen anlagentechnischen Aufwand verbunden, insbesondere bei der thermochemischen Regeneration, bei der sowohl für den Oxidator als

auch das Syngas Regeneratoren zur Verfügung gestellt werden müssen. Bei der thermochemischen Rekuperation hingegen werden aufgrund des niedrigeren Temperaturniveaus Katalysatoren benötigt, was hohe Anforderungen an die Abgasaufbereitung stellt.

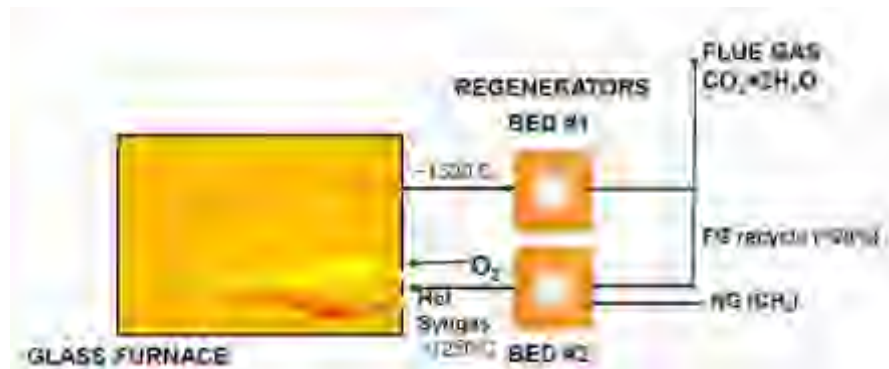


Abbildung 2.7: Prinzip der thermochemischen Regeneration in einer Oxy-Fuel-Glasschmelzwanne [19]

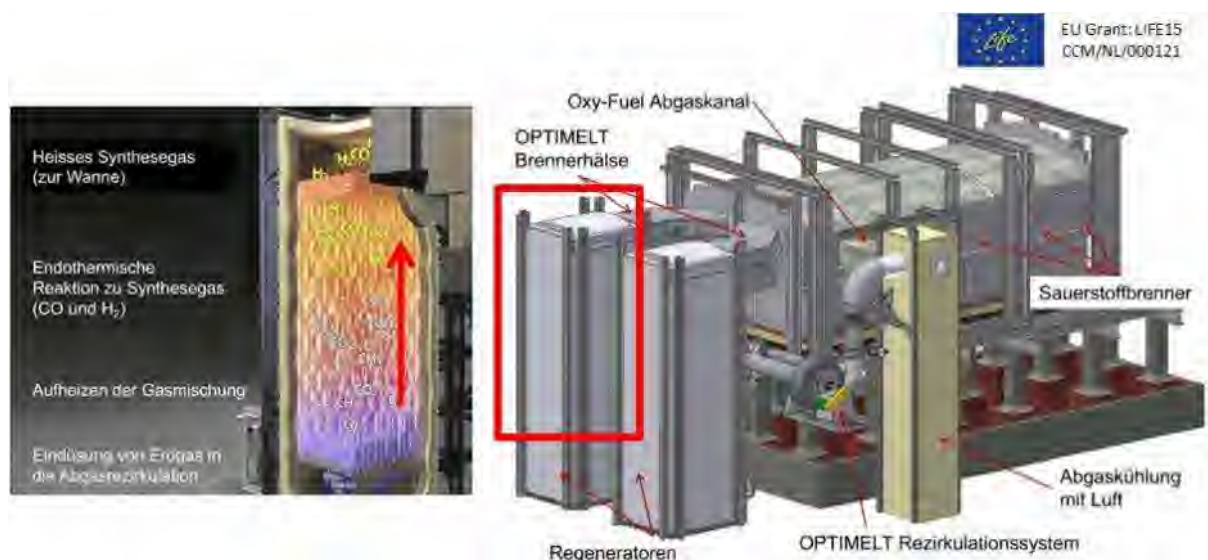


Abbildung 2.8: Darstellung eines Oxy-Fuel-Glasschmelzaggregats, das wahlweise mit oder ohne TCR betrieben werden kann [19]

Im Jahre 2014 wurde in Mexiko ein erstes kleineres industrielles Schmelzaggregat (Produktion: 50 Tonnen/Tag) im Rahmen einer Kaltreparatur mit einer Anlage zur thermochemischen Regeneration ausgerüstet. Erste Betriebserfahrungen belegen eine Energieersparnis von etwa 15 - 18 % [27]. Bei größeren Anlagen ist mit höheren Effizienzsteigerungen zu rechnen. Mittlerweile wurde in den Niederlanden ein größeres Oxy-TCR-Schmelzaggregat mit einer Tagesproduktion von etwa 200 t/d in Betrieb genommen [28].

Für die im Rahmen dieses Vorhabens zu untersuchende Technologie zur kombinierten Erdgas-Sauerstoff-Vorwärmung wurde vorab eine Patentrecherche durchgeführt. Diese ergab, dass bisher nur eine Patentanmeldung der Firma AirLiquide vorhanden ist. Jedoch liegt der Schwerpunkt bei der UAS-Technologie auf der Regelungstechnik, so dass grundsätzliche Unterschiede zur Patentanmeldung von AirLiquide bestehen.

2.2. Bisherige Arbeiten

Im Rahmen des vom Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (kurz: GWI) durchgeführten AIF-Forschungsprojekt „Entwicklung und Optimierung von Rekuperatorbrennern“ (IGF-Förder-Nr.: 13319 N) [29] konnte gezeigt werden, welches Potential allein eine reine Sauerstoffvorwärmung aufweist. Es wurde eine Brennstoff- und Sauerstoffersparnis von bis zu 14 % nachgewiesen, allerdings bei einer extrem hohen Sauerstoff-Vorwärmtemperatur von bis zu 1.100 °C. Daher liegen die Effizienzgewinne hier höher als in dem bereits erwähnten HotOxyGlass-Projekt. Es konnten bei diesem System NO_x-Emission von 20 - 200 mg/m³ erreicht werden, womit die Grenzwerte der damaligen TA Luft eingehalten wurden. Eine Sauerstoffvorwärmung bis zu diesen Temperaturen ist nur mit speziellen keramischen Materialien zu realisieren, da der über 1.000 °C vorgewärmte Sauerstoff sehr aggressiv und korrosiv ist.

Weitere Forschungsprojekte des GWI mit dem Themenschwerpunkt Oxy-Fuel-Technologie beschäftigten sich mit der Optimierung von Oxy-Fuel-Brennern hinsichtlich der Flammenausbreitung, der Wärmeübertragung und der NO_x-Emissionen [30], [31], [32], [33], [34]. Dabei wurden sowohl numerische Simulationen als auch experimentelle Untersuchungen an semi-industriellen Hochtemperaturversuchsanlagen des GWI zur Analyse der Prozesse im Brennraum eines Industrieofens, zur Modifikation der Betriebsparameter und zur Veranschaulichung der Optimierungspotenziale eingesetzt.

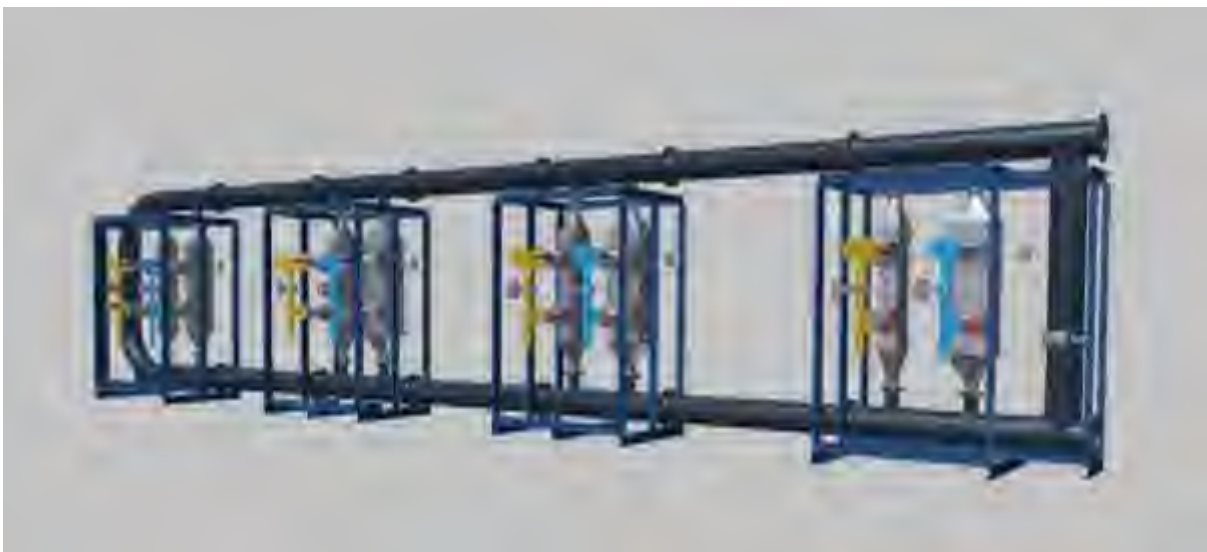


Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau des Vorwärmersystems [Quelle: UAS]

Unabhängig von dem oben genannten EU-Forschungsprojekt [21], umgesetzt durch die Unternehmen AirLiquide und AGC, hat die UAS Messtechnik GmbH (kurz UAS) in den letzten Jahren ein eigenständiges System zur Vorwärmung von Brennstoff und Sauerstoff entwickelt. Das Vorwärmersystem der UAS ist modular in Skidbauweise mit getrennten Stoffströmen für Brennstoff und Sauerstoff aufgebaut. In **Abbildung 2.9** ist eine Vorwärmeinheit für 4 Brenner dargestellt. Das Heizmedium, beispielsweise Luft, wird in einem Rekuperator mit dem Abgas der Schmelzwanne aufgeheizt. Die vorgewärmte Luft wird in der großen Versorgungsleitung,

unten rechts in **Abbildung 2.9**, in das Vorwärmssystem geführt. In jedem Modul befindet sich jeweils ein rekuperativer Wärmetauscher für Brennstoff (gelb) und Sauerstoff (blau), die die Stoffströme erwärmen. Verschiedene Mess- und Regeleinrichtungen kontrollieren die Vorwärmung separat für jeden Brenner und steuern und überwachen die Einheiten auf Dichtheit, Unter-/Überdruck und Temperatur.

Die Auslegung des Vorwärmssystems beinhaltet eine sehr flexible Arbeitsweise. Das System soll stufenlos von kalt bis max. 400 °C Vorwärmung von Brennstoff und Sauerstoff betrieben werden können, je nach Anforderung und in Abhängigkeit vom benötigten Wärmebedarf und der Betriebsweise der Glaswanne. Dazu soll das Vorwärmssystem in die automatische Brennerregelung der Wanne eingebunden werden. Weiterhin soll das Vorwärmssystem jederzeit von Heiß- auf Kaltbetrieb umgeschaltet werden können, ohne Änderungen am Brenner (z. B. Düsenwechsel) vornehmen zu müssen und ohne den Glaswannenbetrieb zu beeinflussen. Eine vollautomatische Betriebsweise des Vorwärmssystems soll dazu führen, dass kein zusätzlicher Bedienungsaufwand erforderlich ist.

Durch die einfache Bauweise des Vorwärmssystems kann eine Aufrüstung von bestehenden Glasschmelzwannen erfolgen und somit eine Effizienzsteigerung dieser Anlagen gewährleistet werden. Diese einfache „retrofit“-Möglichkeit ist ein wesentlicher Unterschied zu den theoretisch deutlich effizienteren TCR-Konzepten, die mit einem weitaus größeren anlagentechnischen Aufwand einhergehen.

Die kombinierte Sauerstoff-Brennstoff-Vorwärmung ist in der Industrie bisher eher unüblich, da sicherheitstechnische Bedenken bestehen. Bei der Auslegung des Vorwärmssystems von UAS ist die Sicherheitstechnik nach DIN EN 746-2 [34] entwickelt worden. Mit der kombinierten Vorwärmung von Brennstoff und Sauerstoff ist es möglich nicht nur den Energieverbrauch von Glasschmelzwannen zu minimieren, sondern auch die Emissionswerte von CO₂, NO_x und SO_x deutlich zu reduzieren.

Dieses System wurde bereits im Labormaßstab am GWI getestet und wurde Anfang 2013 im industriellen Testeinsatz an einer Faserglasschmelzwanne in Deutschland erprobt.

Hauptunterschied der Vorwärmssysteme von UAS und AGC/Air Liquide ist hierbei vor allem das Regelungskonzept, welches bei UAS vorsieht, unterschiedliche Vorwärmtemperaturen bedarfsabhängig und vollautomatisiert einstellen zu können. Ein weiterer Unterschied ist, dass das UAS-Konzept vollkommen unabhängig von den in der Anlage installierten Brennern arbeitet, und damit besonders für Retrofit-Maßnahmen geeignet ist. Bei der AGC/Air Liquide-Entwicklung [18] war ein weiterentwickelter Air Liquide-Brenner integraler Bestandteil des Konzepts.

Weiterhin ist eine automatische Umschaltung integriert, welche z. B. bei detektierten Leckagen eigenständig die kalten Medien im Bypass um die Vorwärmssystem leitet, ohne dabei den Schmelzprozess negativ zu beeinflussen. Während des ersten Tests wurde, neben der Einsparung an Brennstoff, auch die Eignung der eingesetzten Materialien für heißen Sauerstoff untersucht.

An der bestehenden Faserglasschmelzwanne mit insgesamt 9 Einzelbrennern wurde 1 Brenner mit einem Vorwärmssystem ausgerüstet. Die Feuerungsleistung an diesem Brenner beträgt ca. 11 % des Gesamtenergiebedarfs der Wanne. Aus diesem Umstand sind feuerungstechnische Auswirkungen, z. B. auf Emissionsbildungen, Einflüsse auf die Strömungsdynamik im Ofenraum der gesamten Anlage relativ schwierig nachzuvollziehen. Während des Betriebs konnten bisher jedoch deutliche Energieeinsparungen von mehr als 10 % am Brenner mit der installierten Vorwärmanlage festgestellt werden. Diese Einsparungen liegen einerseits an der Enthalpieerhöhung der Medien vor der Glaswanne und andererseits sind deutliche Optimierungen der Flamme festzustellen, z. B. eine Steigerung der Leuchtkraft, die zu einem besseren Energieeintrag ins Glasbad führen könnte.

Zudem wurden Veränderungen auf die das Glasbad bedeckende Schaumschicht bemerkt. Diese Schaumschicht bildet sich vor allem sehr häufig bei der Faserglasproduktion und verschlechtert den Energieeintrag ins Glasbad, aufgrund ihrer isolierenden Wirkung. Beim Einsatz der kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung muss eine negative Beeinflussung der Schaumbildung definitiv vermieden werden. Dazu sind weitere Untersuchungen u. a. Anpassungen der Brennereinstellung notwendig.

Zur Vermeidung von Risiken für den Anlagenbetrieb (z. B. negative Beeinträchtigung der Strömungsdynamiken im Oberofen oder in der Glasschmelze, Zerstörung von Feuerfestmaterialien aufgrund zu hoher Feuerungstemperaturen; etc.), sowie zur Evaluierung des Einflusses der kombinierten Vorwärmung auf die Prozessparameter, Verbrennungscharakteristik und Abgaszusammensetzung, sind weitergehende Untersuchungen unumgänglich.

Zusätzlich ist es notwendig, die bisher gesammelten Erkenntnisse aus dem Langzeittest zu nutzen, um die kombinierte Vorwärmanlage in Bezug auf Regelbarkeit, speziell bei der Ausrüstung von mehreren Systemen an einer bestehenden Schmelzwanne, und Handling für den Anlagenbetreiber zu modifizieren und zu optimieren.

3 Vorgehensweise und erzielte Ergebnisse

Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit der Forschungspartner GWI und UAS mit der Unterstützung der Zwiessel Kristallglas AG durchgeführt. Ziel war die Untersuchung der Auswirkungen einer kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung auf den Glasschmelzprozess sowie die Implementierung dieser Vorwärmeinheit an einer Glasschmelzwanne. Dies beinhaltete die Auslegung, Konstruktion und den Bau einer entsprechenden Vorwärmeinheit, inkl. MSR-Technik sowie die Auswahl geeigneter Materialien. Um die vorher beschriebenen Auswirkungen zu untersuchen, wurden numerische Strömungssimulationen (CFD) und detaillierte experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Abschließend wurde die Vorwärmeinheit an einer realen Anlage der Firma Zwiessel Kristallglas AG implementiert und das Aggregat in Betrieb genommen. Langzeittests sollten Aufschluss über die tatsächlich erreichten Energieeinsparungen geben.

3.1 Numerische Simulation der Glasschmelzwanne, Modelle und Annahmen

Bei der Auslegung, Optimierung und Konfiguration von feuerungstechnischen Anlagensystemen sind CFD-Simulationen hilfreich und weitestgehend etablierte Werkzeuge. Sowohl Risiken und Ausfallzeiten, die durch Umbaumaßnahmen entstehen, als auch die Kosten für Versuchsreihen können durch den Einsatz von Simulationstools erheblich gesenkt werden. Verbrennungssimulationen sind hilfreich ein System detailliert und vollständig zu analysieren. Ein essenzieller Vorteil von Computersimulationen ist die generierbare Datenmenge. Die Messtechnik besitzt Grenzen, z. B. aufgrund der Temperaturbeständigkeit des Materials, Zugänglichkeit am Aggregat, oder eine Größe ist messtechnisch nicht erfassbar, wie z. B. zugeführte Wärmemenge ins Gut oder die Geschwindigkeitsverteilung oberhalb der Schmelze. In CFD-Simulationen kann praktisch jede physikalische oder thermochemische Größe visualisiert und quantifiziert werden.

Ziel dieses Projekt war die Untersuchung der Auswirkungen einer kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung auf den Glasschmelzprozess und die Implementierung dieser Vorwärmeinheit an einer Glasschmelzwanne. Die vorhandenen Brenner (Brennertyp 1) in der Glasschmelzwanne sind für den Betrieb mit einer kombinierten Brennstoff-Sauerstoffvorwärmung nicht geeignet. Die Konfiguration der neuen Brenner wurden durch CFD-Simulationen gestützt.

Im Folgenden werden die CFD-Modelle, Modellierung der Wanne und der verschiedenen Brenner, die Randbedingungen, die Brennerkonfiguration und die CFD-Ergebnisse aufeinander aufbauend schrittweise dargestellt und erläutert.

Alle in diesem Kapitel vorgestellten CFD-Simulationen basieren auf einer stationären RANS-Formulierung, wobei als CFD-Code ANSYS Fluent zum Einsatz kam. Als Turbulenzmodell wurde das „realizable k- ϵ -Modell“ verwendet, für den Strahlungswärmetransport ein „Discrete-Ordinates“-Modell. Zur Modellierung des Verbrennungsverhaltens wurde das „PDF-Chemical Equilibrium“-Modell (PDF: Probability Density Function) verwendet. Dieses Modell beschreibt

das Verbrennungsverhalten für den hier vorliegenden Fall hinreichend genau. Bei den Rechnungen wurde ausschließlich der Feuerungsraum betrachtet, der Einfluss des Glasbades auf Strömung, Verbrennung und Wärmeübertragung wurden durch geeignete Randbedingungen beschrieben, die in allen betrachteten Fällen gleichblieben. Es sei darauf hingewiesen, dass in der Simulation ausschließlich der Feuerungsprozess betrachtet wird, d. h. „Ausdampfungs“-Effekte aus dem Glasbad (z. B. Gemengegase: aus den Rohstoffen freigesetztes CO₂) gehen nicht in die Simulation ein.

3.2 AS 1: Untersuchung der Auswirkungen der Vorwärmung mittels numerischer Simulation an der ausgewählten Glasschmelzwanne (GWI/UAS)

3.2.1 AS 1.1: Detaillierte Vermessung der ausgewählten Glasschmelzwanne (GWI/UAS)

Im Sommer 2016 wurde die Wanne 4 der Zwieseler Kristallglas AG messtechnisch erfasst. In **Abbildung 3.1** sind die Brenner- und die Messpositionen in der Wanne und im Kamin eingezeichnet.

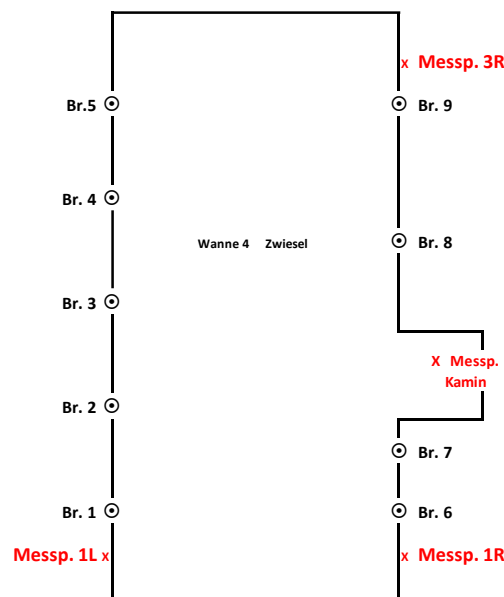


Abbildung 3.1: Brenner- und Messpositionen der Wanne 4 der Kristallglas AG (Quelle: GWI)

Tabelle 3.1: Erfasste Messdaten der Wanne 4 der Zwiesel Kristallglas

| Zeit | Pos. Ofen | Pos. Sonde M - x cm | O ₂ Vol.-% | CO ₂ Vol.-% | CO ppm | NO ppm | NO ₂ ppm | T _{Sonde} °C |
|-------|-----------|------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------|-----------|------------------------|--------------------------|
| 08:50 | 1 Links | Mitte (M) | 7,7 | 73,4 | 300 - 1.300 | > 5.600 | > 1.325 | 1.440 |
| 08:55 | 1 Links | M - 50 | 5,7 - 6,4 | 75,4 | 1.000 - 5.000 | > 5.600 | > 1.325 | 1.432 |
| 09:02 | 1 Links | M - 100 | 4,9 - 5,2 | 75,4 | 230 - 310 | > 5.600 | > 1.325 | 1.414 |
| 09:07 | 1 Links | M - 150 | 5,8 - 8,6 | 72,5 | 130 - 250 | > 5.600 | > 1.325 | 1.391 |

| | | | | | | | | |
|-------|----------|---------|-----------|------|-------------|-------|---------|-------|
| 09:12 | 1 Links | M - 190 | 6,3 - 7,6 | 69,5 | 80 - 150 | 4.700 | > 1.325 | 1.370 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 10:17 | 1 Rechts | Mitte | 9,7 | 73,4 | 210 - 230 | 4.680 | > 1.325 | 1.424 |
| 10:27 | 1 Rechts | M - 50 | 12,4 | 68 | 110 - 180 | 3.750 | > 1.325 | 1.435 |
| 10:36 | 1 Rechts | M - 100 | 11,9 | 67 | 90 | 4.250 | > 1.325 | 1.408 |
| 10:48 | 1 Rechts | M - 150 | 10,5 | 70 | 108 | 4.700 | > 1.325 | 1.392 |
| 10:58 | 1 Rechts | M - 190 | 13,7 | 43,9 | 30 | 3.000 | > 1.325 | 1.334 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 11:30 | Kamin | | 4,8 | 77,4 | 129 | 4.460 | > 1.325 | 1.378 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 14:44 | 3 Rechts | Mitte | 8,1 | 68,1 | 180 | 2.130 | 874 | 1.460 |
| 14:48 | 3 Rechts | M - 50 | 8,9 | 69,2 | 700 - 1.200 | 2.335 | 1.063 | 1.467 |
| 15:01 | 3 Rechts | M - 150 | 10,4 | 65,2 | 190 - 300 | 2.450 | 1.330 | 1.468 |
| 15:09 | 3 Rechts | M - 190 | 10,4 | 65,1 | 146 | 2.420 | 1.310 | 1.448 |
| 15:20 | 3 Rechts | M - 190 | 11,7 | 56,6 | 75 | 2.155 | 1.225 | 1.412 |
| | | | | | | | | |

Tabelle 3.1 gibt die erfassten Messdaten wieder. In **Abbildung 3.2** ist ein typischer Auszug der in der Leitwarte der Zwieseler Kristallglas erfassten Betriebsparameter während der Messung dargestellt.



Abbildung 3.2: Typischer Auszug der Betriebsparameter der Wanne 4 (Quelle: Zwiesel)

3.2.2 AS 1.2: Definition der Parameter für die Vorwärmung und Fahrweise der Wanne (z. B. Temperatur) (GWI/UAS)

In **Abbildung 3.3** ist das numerische Modell der Glasschmelzwanne 4 in Zwiesel abgebildet. In den Simulationen wird nur der Oberofen (Verbrennungsraum) berücksichtigt. Das Glasbad wird nicht mit betrachtet. Die Oberfläche des Glasbades wird als Wand mit einem definierten Temperatur- und Emissionsverlauf modelliert. Diese Vorgehensweise hat sich in vielen Forschungsprojekten und Untersuchungen bewährt. An der Wanne sind 5 Brenner rechts und 4 Brenner links angeschlossen. Die Positionierung und Anordnung der Brenner sind durch die Bezeichnung „Brenner 1“, „Brenner 2“ etc. veranschaulicht.

Die Brenner 1 bis 9 der Wanne werden unterschiedlich beaufschlagt. Über die Brenner, die außen positioniert sind, wird weniger Leistung in die Wanne eingebracht, da sie sich in Wandnähe befinden (1, 5, 6 und 9). Wie in **Abbildung 3.4** zu sehen ist, liegt die chemische Leistung pro Brenner zwischen 200 und 500 kW.

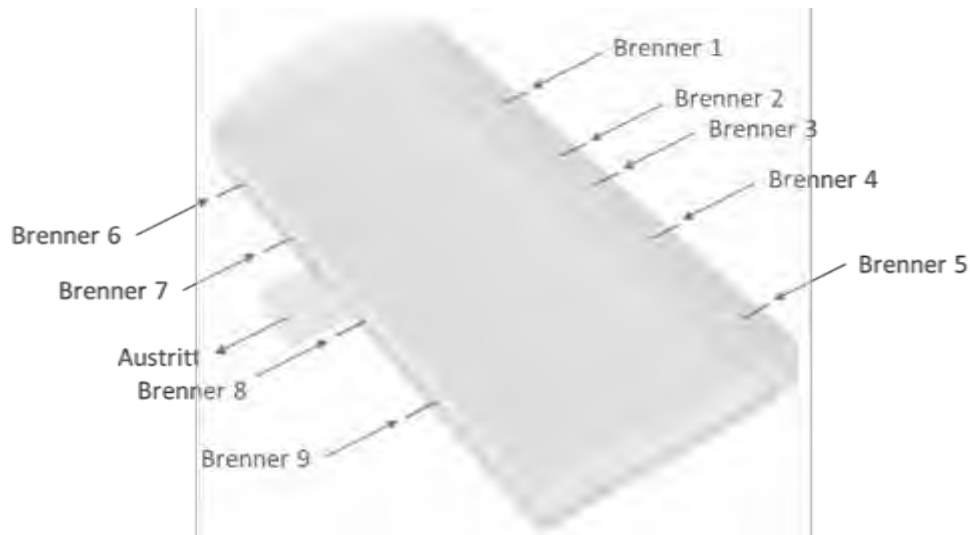


Abbildung 3.3: Numerisches Modell der Glasschmelzwanne 4 (Quelle GWI)

Abbildung 3.4 ist ein Auszug, der die Betriebsparameter während einer Messung dargestellt. Dieser Auszug wurde in der Leitwarte von Zwieseler Kristallglas aufgenommen und stellt eine Momentaufnahme dar. Das bedeutet nicht, dass die Medienströme über die gesamte Dauer an den einzelnen Brennern konstant sind. Im Gegenteil, die Medienströme an jeden einzelnen Brenner fluktuieren mit der Zeit. Der gezeigte Betriebspunkt bildet aber gemäß Beobachtungen - über einen längeren Zeitraum - einen belastbaren Mittelwert, um den die Medienströme hin- und herschwanken. In **Tabelle 3.2** sind die entsprechenden Medienmengen an den einzelnen Brenner für den dargestellten Betriebspunkt festgehalten. Die Temperatur der zugeführten Medien (Brenngas und Sauerstoff) im Grundzustand beträgt 25 °C.

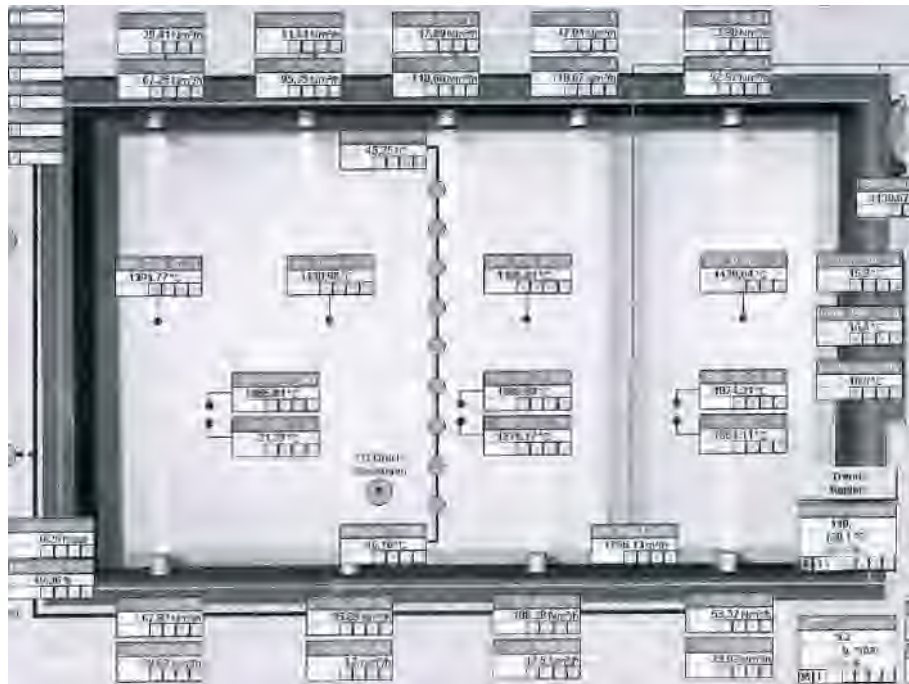


Abbildung 3.4: Typischer Auszug der Betriebsparameter der Wanne 4 (Quelle: Zwiesel)

Tabelle 3.2: Betriebsdaten bei Einsatz von Brennertyp 1 (Referenzzustand)

| | Brennerleistung [kW] | Luftzahl [-] | V-Gas [m _N ³ /h] | V-Oxidator [m _N ³ /h] |
|------------|-------------------------|-----------------|---|--|
| Brenner 1 | 299,20 | 1,123 | 29,41 | 67,25 |
| Brenner 2 | 421,58 | 1,130 | 41,44 | 95,35 |
| Brenner 3 | 487,20 | 1,135 | 47,89 | 110,66 |
| Brenner 4 | 487,41 | 1,134 | 47,91 | 110,67 |
| Brenner 5 | 233,78 | 1,132 | 22,98 | 52,97 |
| Brenner 6 | 301,34 | 1,126 | 29,62 | 67,92 |
| Brenner 7 | 427,28 | 1,121 | 42,00 | 95,89 |
| Brenner 8 | 483,24 | 1,119 | 47,50 | 108,29 |
| Brenner 9 | 233,17 | 1,143 | 22,92 | 53,37 |
| Summe | 3374,20 | - | 331,67 | 762,37 |
| Mittelwert | 374,91 | 1,129 | 36,85 | 84,71 |

Vorgesehen war eine maximale Vorwärmung von 400 °C, wobei regelungstechnisch der Sollwert der Vorwärmung 380 °C beträgt.

Um die Auswirkungen der Vorwärmung auf die Betriebsweise der Wanne kontrolliert beobachten zu können, wurden zu Beginn der Testphase unterschiedliche Vorwärmtemperaturen an den ausgewählten Brennern gefahren, wobei die Vorwärmtemperatur hier in einem definierten Zeitraum kontinuierlich gesteigert wurde. Zudem war es vorgesehen, die

Vorwärmtemperaturen der einzelnen Brenner zu variieren, um so das Temperaturprofil der Wanne mit beeinflussen zu können (dies geschieht normalerweise nur über die Einstellung der Gasdurchsätze).

Besonderes Augenmerk sollte weiterhin auf signifikante Veränderungen der Flammen in Abhängigkeit von den Vorwärmtemperaturen gelegt werden. Bei Vorversuchen wurden hier Änderungen in Temperaturbereichen von 150 - 250 °C beobachtet.

Die Fahrweise der Wanne wird weiterhin über die Gewölbetemperaturen des Oberofens definiert.

3.2.3 AS 1.3: CFD Simulation der ausgewählten Glasschmelzwanne ohne Vorwärmssystem (GWI)

Im ersten Schritt wird der Regelbetrieb im Grundzustand betrachtet. Das ist auch gleichzeitig der Referenzfall, mit dem weitere eingestellte Brennerkonfigurationen verglichen werden. Im Regelbetrieb wird die Glasschmelzwanne mit einem Rohr-in-Rohr-Brenner (Brennertyp 1) betrieben, siehe **Abbildung 3.5**. Die Gaslanze ist innen zentriert positioniert und hat einen Durchmesser von 24,5 mm. Um die Gaslanze herum befindet sich die Luftlanze mit einer Spaltbreite von 10,8 mm. Die Medienvolumenströme für den Regelbetrieb sind in **Tabelle 3.2** aufgeführt. Die Gas- und Lufttemperatur beträgt 25 °C.



Abbildung 3.5: Brennertyp 1 (Quelle: GWI)

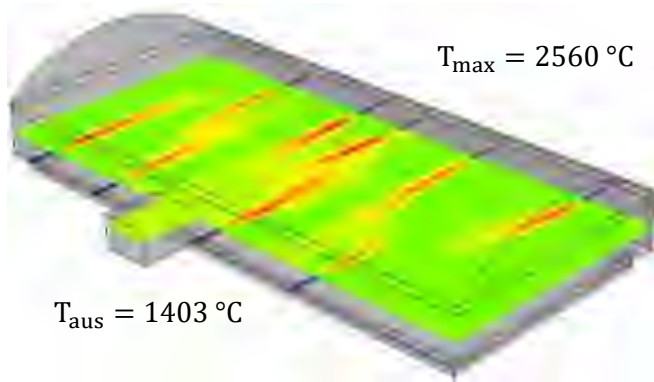
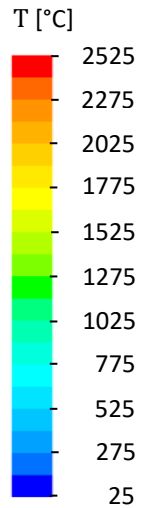
Glasschmelzwannen spielen eine zentrale Rolle für viele Glasherstellungsprozesse. Im Zuge der Energiewende und der damit verbundenen CO₂-Zertifizierung gewinnt die Optimierung von Glasschmelzwannen immer mehr an Bedeutung. Eine Analyse von Glasschmelzwannen mit Hilfe von CFD-Simulationen kann neue Erkenntnisse und Optimierungspotenzial aufzeigen.

In **Abbildung 3.6** sind in der oberen Reihe die Temperatur- und die trockene CO-Verteilung auf einer horizontalen Ebene dargestellt, die auf der mittleren Brennerhöhe positioniert ist. Zu sehen sind die langen Flammen, welche an den Strähnen mit hohen Temperaturen bzw. hohen CO-Konzentrationen zu sehen sind. Die langen Flammen resultieren aus einer schlechten Mischung von Oxidator und Brennstoff. Ziel dieser Konzeptionierung ist, die Wärmeübertragung durch die Strahlung in das Glasbad über der gesamten Glasbadfläche zu homogenisieren.

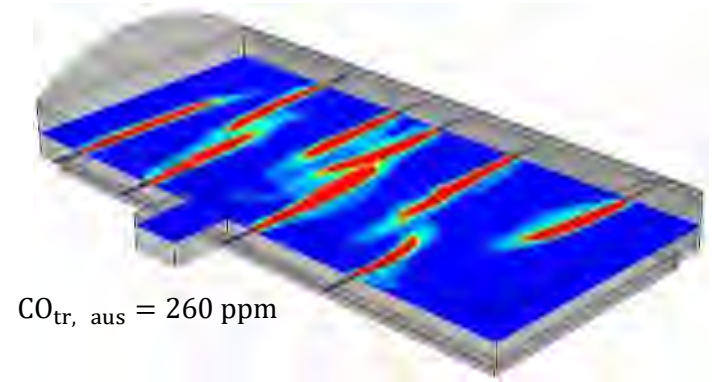
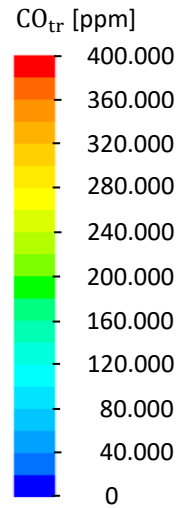
Rechts unten in **Abbildung 3.6** ist die Verteilung der Wärmestromdichte in das Glasbad dargestellt. Durch Integration der Wärmestromdichteverteilung über das Glasbad erhält man die insgesamt ins Glasbad eingebrachte Leistung. In diesem Fall sind das ca. 2,21 MW.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Strömung unmittelbar über dem Glasbad (**Abbildung 3.6, unten links**). An einer Stirnseite der Wanne wird das staubförmige Gemenge in die Glaswanne

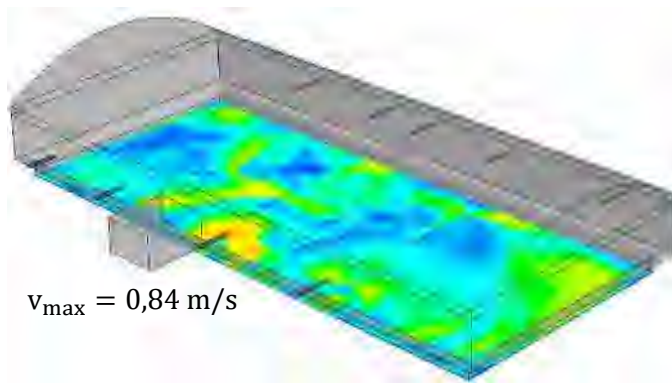
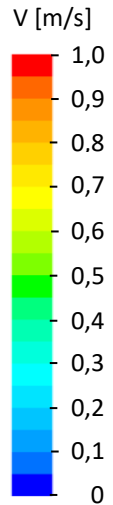
eingbracht, welches dann aufschmilzt. Erhöhen sich die Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich, kommt es zum Austrag staubförmiger Bestandteile oder zu einer erhöhten Ausdampfung von Alkalien. Beides führt zu einer Beeinflussung der Glasqualität und zur Beschädigung des Abgaskanals oder zu einer erhöhten Belastung der nachgeschalteten Abgasreinigung, da diese Bestandteile dann in kälteren Regionen auskondensieren. Die Auswertung zeigt, dass die maximal auftretende Absolutgeschwindigkeit unterhalb von 1 m/s liegt. Das ist verhältnismäßig gering, sodass hier sichergestellt werden kann, dass keine Partikeln und Staub aus dem Glasbad bzw. Gemenge aufgewirbelt und aus der Wanne ausgetragen werden.



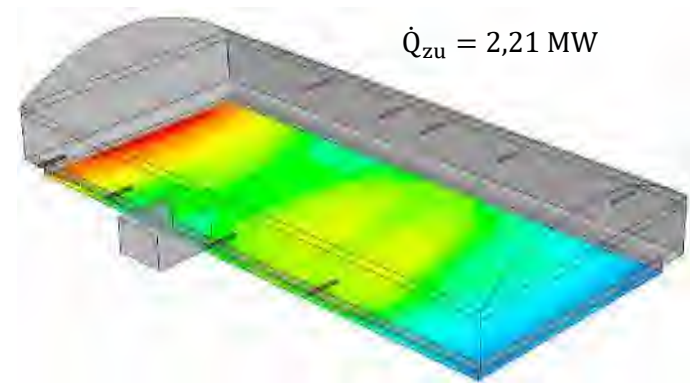
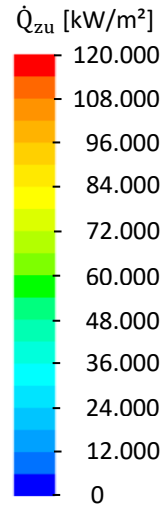
a) Temperaturverteilung



b) CO-Konzentrationsverteilung



c) Geschwindigkeitsverteilung



d) Wärmestromverteilung

Abbildung 3.6: Simulationsergebnisse bei Einsatz des Standardbrenners – Referenzfall (Brennertyp 1), (Quelle: GWI)

3.2.4 AS 1.4: CFD Simulation der ausgewählten Glasschmelzwanne mit Vorwärmssystem (GWI)

Die Brenner (Brennertyp 1) im Grundzustand sind für den Betrieb mit einer kombinierten Brennstoff-Sauerstoffvorwärmung nicht geeignet. Im Rahmen des Projektes wurde eine neue Brennergeometrie entwickelt und mit Hilfe der numerischen Simulation im Vergleich zum Referenzfall überprüft. Dieser Brenner wurde gebaut und in die Wanne implementiert. Jedoch haben sich während des Tests bzgl. der verwendeten Materialien und dem Zusammenspiel zwischen Strömung und Temperaturverteilung im Brennerstein sowie mit dem verwendeten Gemenge Komplikationen ergeben, die zur Beschädigung der Brennersteine führte. Durch weitere Modifikationen wurde versucht, diese Probleme zu beheben. Darauf aufbauend wurde der Brennertyp 3 entwickelt und simuliert. Auch hier kam es nach dem Einbau in die Wanne zu Wechselwirkungen zwischen Strömung, Temperatur, Brennersteinmaterial und Glasmenge. Danach wurde die Brennergeometrie 4 weiter modifiziert und simuliert.

Der Brennertyp 2 besteht aus einer zentrierten Brennerstoff- und 8 Sauerstoffdüsen. Jeweils vier Sauerstoffdüsen haben einen Durchmesser von 14 mm (Sauerstoffdüse 1) bzw. 22 mm (Sauerstoffdüse 2). Die Sauerstoffdüsen 1 und 2 sind auf dem Umfang abwechselnd und in gleichmäßigen Abständen angeordnet. Im Betrieb werden 25 % des Oxidators über Sauerstoffdüse 1 und 75 % über Sauerstoffdüse 2 zugeführt. Die Brennertypen 3 und 4 sind Variationen von Brennertyp 2.

Der prinzipielle Aufbau der verschiedenen Brenner ist in **Abbildung 3.7** dargestellt.

Referenzzustand



a) Brennertyp 1

- Gaslanzendurchmesser = 24,5 mm
- Luftlanzendurchmesser = 48,3 mm
- Spaltbreite der Luftlanze = 10,8 mm



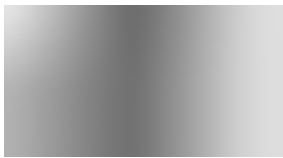
b) Brennertyp 2

- Gaslanzendurchmesser = 32,0 mm
- 1 Luftlanzendurchmesser = 14,0 mm
- 2 Luftlanzendurchmesser = 22,0 mm



c) Brennertyp 3

- Gaslanzendurchmesser = 33,0 mm
- 1 Luftlanzendurchmesser = 14,0 mm
- 2 Luftlanzendurchmesser = 22,0 mm
- Brennersteinlänge = 150,0 mm
- Brennersteindurchmesser = 125,0 mm



d) Brennertyp 4

- Gaslanzendurchmesser = 32,0 mm
- 1 Luftlanzendurchmesser = 14,0 mm
- 2 Luftlanzendurchmesser = 22,0 mm
- Brennersteinlänge = 100,0 mm
- Brennersteindurchmesser = 145,0 mm

Abbildung 3.7 Darstellung der untersuchten Brennertypen 1 – 4 (Quelle: GWI)

Aufgrund der baulichen Vorgaben können bei einem Wechsel von Brennertyp 1 zu Brennertyp 2 bzw. zu Brennertyp 3 oder Brennertyp 4 nur die Brenner an den Positionen 2, 3, 4, 7 und 8 ausgetauscht, siehe **Abbildung 3.1**, und auch nur mit der kombinierten Brennstoff-Sauerstoff-Vorwärmung betrieben werden. Die restlichen Brenner bleiben davon unberührt. Nach dem Brennerwechsel können im Prinzip drei verschiedene BrennerEinstellungen, wie in **Tabelle 3.3** aufgeführt, vorgenommen werden.

Tabelle 3.3: untersuchte Betriebszustände

| <u>Variante</u> | <u>Betriebszustand</u> |
|-----------------|--|
| V1 | <ul style="list-style-type: none"> - Medien werden nicht vorgewärmt - Luft- und Brennstofftemperatur beträgt 25 °C - Brennstoffleistung bleibt konstant |
| V2 | <ul style="list-style-type: none"> - Die Vorwärmtemperatur der Medien (Sauerstoff und Brennstoff) beträgt 380 °C - Die Brennstoffleistung wird konstant gehalten |
| V3 | <ul style="list-style-type: none"> - Die Vorwärmtemperatur der Medien (Sauerstoff und Brennstoff) beträgt 380 °C - Die Brennstoffleistung wird reduziert, mit dem Ziel den Energieeintrag in die Glasschmelzwanne konstant zu halten -> Änderung der Medienmassenströme |

Der Betrieb von Variante 3 erfordert eine Nachregelung der Medienmassenströme. Die entsprechenden Brennerbetriebsdaten für diesen Fall sind in **Tabelle 3.4** enthalten.

Tabelle 1.4.: Betriebsdaten bei Einsatz von Brennertyp 3 (Variante 3)

| | Brennerleistung [kW] | Luftzahl [-] | V-Gas [m _N ³ /h] | V-Oxidator [m _N ³ /h] | Ersparnis [%] |
|-----------|-------------------------|-----------------|---|--|------------------|
| Brenner 1 | 299,2 | 1,123 | 29,41 | 67,25 | 0 |
| Brenner 2 | 398,88 | 1,13 | 39,21 | 90,26 | 5,4 |
| Brenner 3 | 460,9 | 1,135 | 45,3 | 104,73 | 5,4 |
| Brenner 4 | 461,09 | 1,134 | 45,32 | 104,74 | 5,4 |
| Brenner 5 | 233,78 | 1,132 | 22,98 | 52,97 | 0 |
| Brenner 6 | 301,34 | 1,126 | 29,62 | 67,92 | 0 |
| Brenner 7 | 404,38 | 1,121 | 39,75 | 90,79 | 5,4 |
| Brenner 8 | 457,35 | 1,119 | 44,96 | 102,54 | 5,4 |
| Brenner 9 | 233,17 | 1,143 | 22,92 | 53,37 | 0 |
| Summe | 3.250,1 | - | 319,47 | 734,56 | 3,7 |
| Mittewert | 361,12 | 1,129 | 35,50 | 81,62 | - |

3.2.5 AS 1.5: Auswertung und Aufstellung der Modifikationen der Brennersysteme und Analyse der Regel- und Steuerungskette (GWI/UAS)

Auswertung und Aufstellung der Modifikationen der Brennersysteme

In den **Abbildungen 3.8 bis 3.11** sind die Ergebnisse bei Einsatz des Brennertypen 2 bis 4 zusammengefasst. Ausgewertet sind jeweils drei mögliche Betriebseinstellungen (Variante 1 bis 3). Die Temperatur- und CO-Verteilung sind in der Brennebene dargestellt, während die Wärmestromdichteverteilung in das Glasbad und die absolute Geschwindigkeitsverteilung 10 mm über dem Glasbad visualisiert werden.

Diese neun Simulationen im Detail zu beschreiben und mit dem Referenzfall separat zu vergleichen, führt zu Wiederholungen. Damit die Übersicht erhalten bleibt, werden im Folgenden exemplarisch die Ergebnisse bei Einsatz des Brennertyps 2 ausführlich diskutiert. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit dem Referenzfall (**Abbildung 3.6**). Die Vorgehensweise und Argumente können analog auf den Vergleich mit Brennertyp 3 und 4 transferiert werden.

Analyse des Brennertyp 2

Die Varianten mit (V2 und V3) und ohne Vorwärmung (V1) zeigen, dass die Temperaturverteilung und die Strömung innerhalb der Wanne ähnlich aussehen. In V2 (Vorwärmung ohne Anpassung der Brennerleitung) ist die in das Glasbad zugeführte Wärmeenergie etwas höher. Grund dafür ist der insgesamt höhere Wärmeeintrag in das Schmelzaggregat durch die zusätzliche Luftvorwärmung. Dies bedeutet, dass eine Produktionssteigerung hier ohne Probleme durch Erhöhung der Brennerleistung realisierbar ist. Die Variante 3, Reduzierung der Brennstoffzugabe, zeigt analoge Verhältnisse in der Wanne und der Wärmeübertragung zur

Variante ohne Vorwärmung (V1). Abschließend wird auch hier die Geschwindigkeiten 10 mm über das Glasbad betrachtet, wobei das zu beobachtende Geschwindigkeitsintervall entscheidend ist. Mit Geschwindigkeiten zwischen 0 und 1 m/s kann hier von einer ähnlichen Geschwindigkeitsverteilung wie beim Referenzfall gesprochen werden. Die auftretende Maximalgeschwindigkeit ist in allen Fällen etwa 1 m/s und auch nur punktuell zu beobachten. Insgesamt ist in keiner der Varianten mit einem vermehrten Staubaustrag zu rechnen.

Diese Erkenntnisse und Zusammenfassung der möglichen Betriebseinstellungen (Varianten) gilt analog für den Betrieb mit Brennertyp 3 und Brennertyp 4.

Vergleich von Brennertyp 2 (Variante 1) mit dem Referenzfall (Brennertyp 1)

Der Vergleich von Referenzfall (**Abbildung 3.6**) und Variante 1 (**Abbildung 3.8, 3.9, 3.10, 3.11** – Brennertyp 2) zeigt, dass der Einfluss der neuen Brenner auf Strömung, Temperatur und Wärmeübertragung moderat ist. Durch den Wechsel der Rohr-in-Rohr-Geometrie, mit den sehr kompakten, runden Flammen, durch die etwas komplexere Brennersteingeometrie der neuen Brenner weisen diese eine etwas breiter gefächerte Flamme auf. Dies ist an der CO-Verteilung und der etwas erhöhten Wärmeübertragung in das Glasbad sehr gut erkennbar. Die leicht erhöhten CO-Emissionen für diesen Fall sind auf die etwas schlechtere Mischung von Brennstoff und Oxidator zurückzuführen. Dies verdeutlichen die CO- und Temperaturverteilung. Die Flammen weisen nicht ganz die straffe Kontur wie im Referenzfall auf. Das liegt an den niedrigeren Austrittsgeschwindigkeiten von Gas und Oxidator. Die Auswirkungen sind aber sehr gering, wie dies auch anhand der Wärmeübertragung in das Glasbad sowie an der Geschwindigkeitsverteilung 10 mm über dem Glasbad zu erkennen ist. Die auftretende Absolutgeschwindigkeit ist in beiden Fällen vergleichbar und liegt bei maximal 1 m/s. Somit kann sichergestellt werden, dass keine Partikeln oder Staub aus dem Glasbad aufgewirbelt und aus der Wanne ausgetragen werden. Was zu massiven Ablagerungen und Verstopfungen am Austritt bzw. nachgeschalteten Prozessen führen und damit erhebliche Folgekosten verursachen würde.

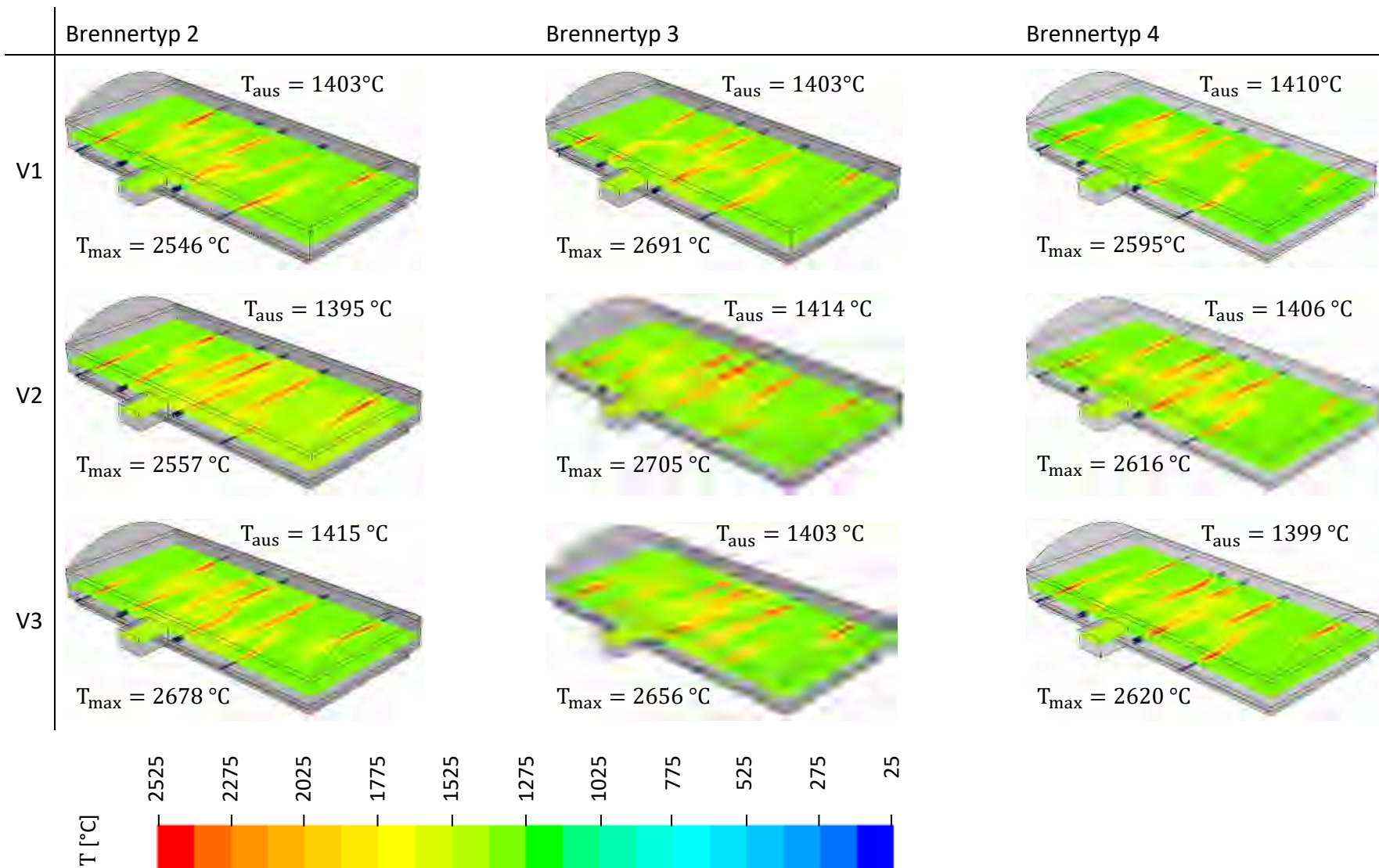


Abbildung 3.8: Temperaturverteilung in der Brennebene für die Brennertypen 2 bis 4 für die untersuchten Betriebszustände Variante 1 bis 3 (Quelle: GWI)

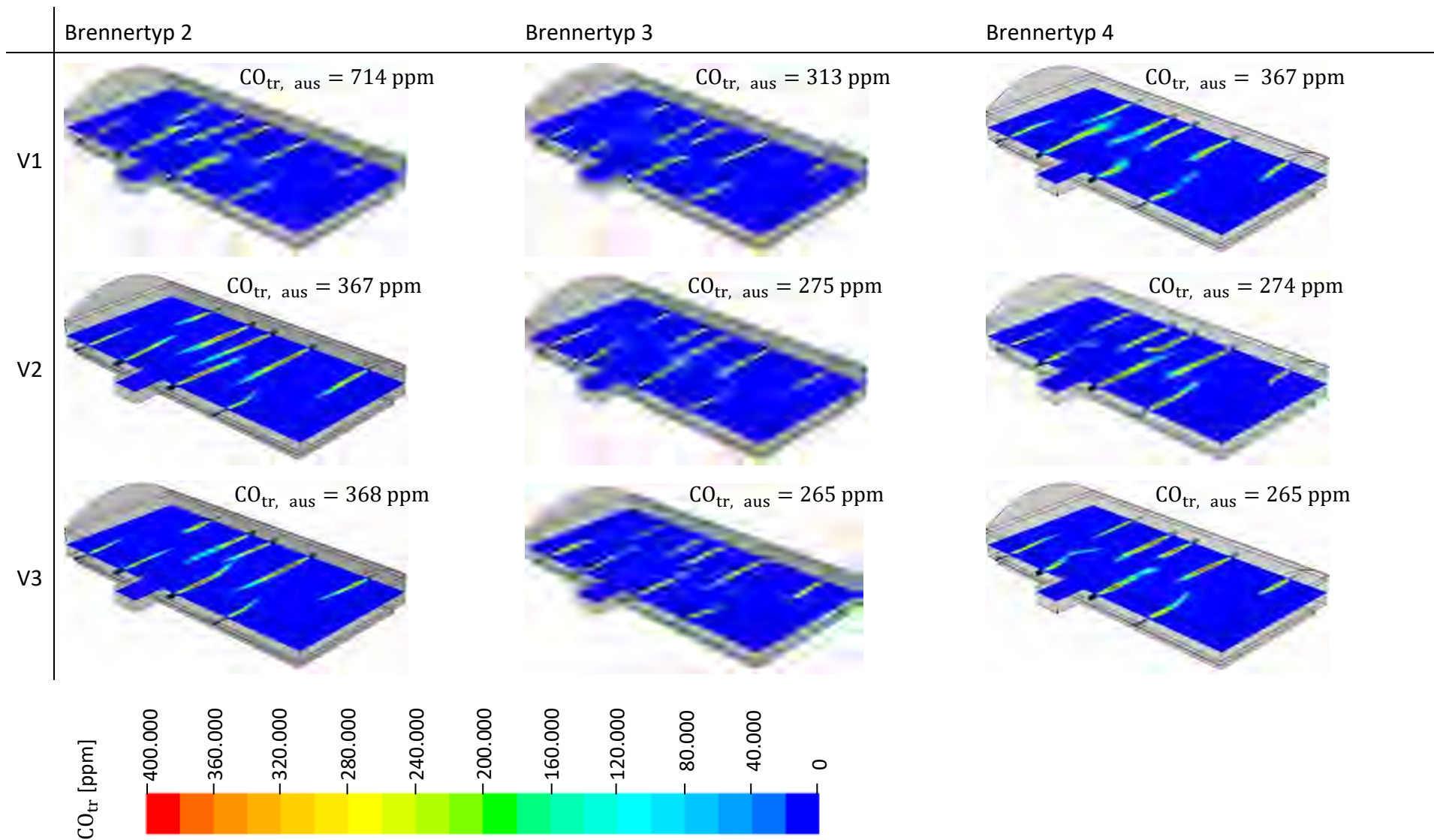


Abbildung 3.9: CO-Konzentrationsverteilung in der Brennerebene für die Brennertypen 2 bis 4 für die untersuchten Betriebszustände Variante 1 bis 3 (Quelle: GWI)

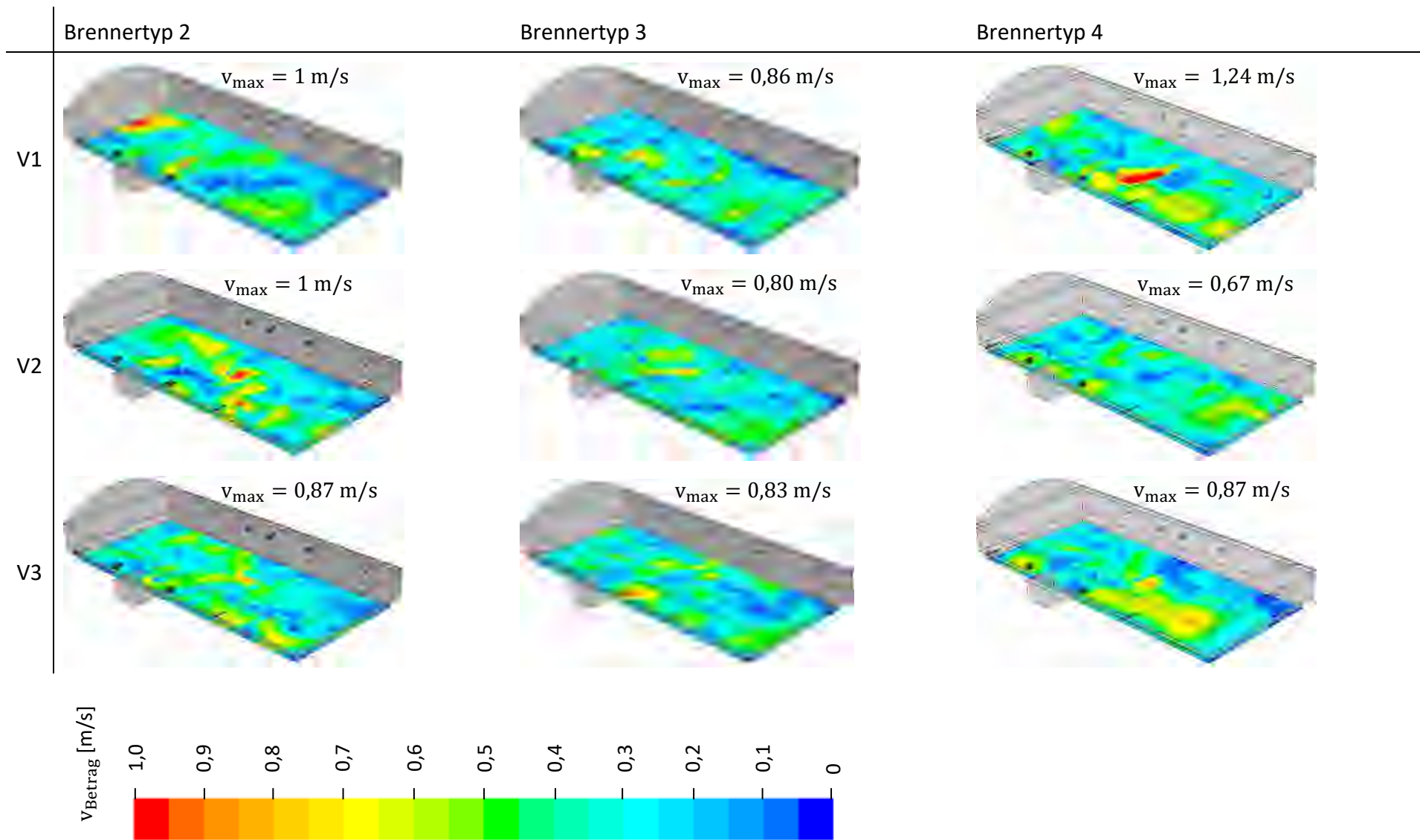


Abbildung 3.10: Geschwindigkeitsverteilung 10 mm über dem Glasbad für die Brennertypen 2 bis 4 für die untersuchten Betriebszustände Variante 1 bis 3 (Quelle: GWI)

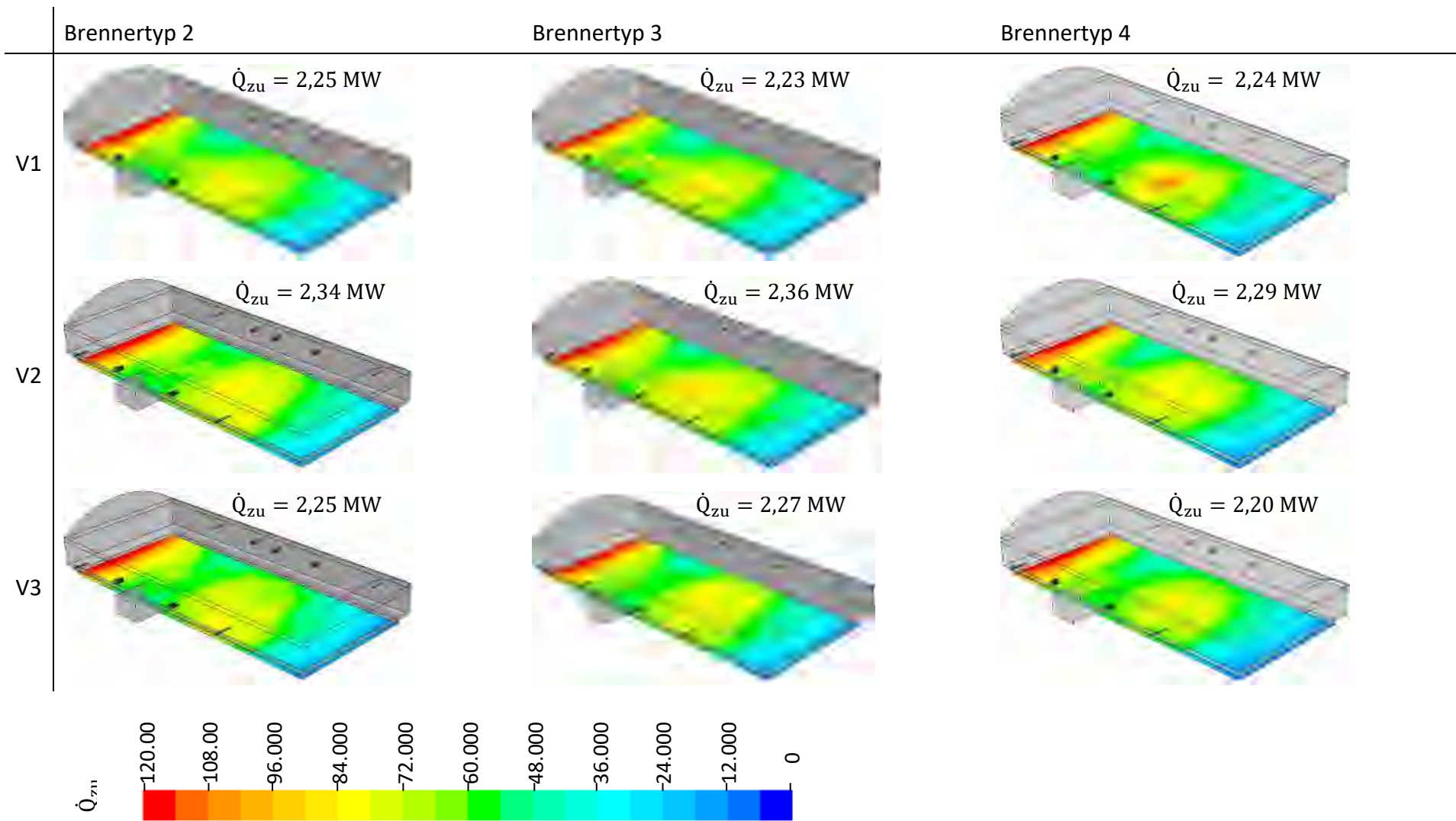


Abbildung 3.11: Wärmestromverteilung in das Glasbad für die Brennertypen 2 bis 4 für die untersuchten Betriebszustände Variante 1 bis 3 (Quelle: GWI)

Analyse der Regel- und Steuerungskette

Das Regelungskonzept sieht vor, dass die kundenseitig bereits vorhandene Hardware zur Durchfluss- und Verhältnisregelung der Einzelbrenner weiter unverändert verwendet wird. Auch die vorhandene Steuerungssoftware soll im ersten Schritt nicht verändert werden. D. h. die Vorwärmeinheiten sollen als autark arbeitende Systeme installiert werden, wodurch für den Kunden und für das Bedienpersonal der Schmelze keine Veränderungen entstehen.

Das Regelungssystem des Vorwärmesystems wird derart gestaltet, dass sämtliche betriebs- und sicherheitstechnischen Parameter eigenständig erfasst, ausgewertet und umgesetzt werden. Dies führt dazu, dass sich das Vorwärmesystem im Störfall automatisch abschaltet, ohne dabei den Betrieb der Schmelzwanne zu beeinflussen.

Die Parameter der Brennersteuerung und des Vorwärmesystems werden während des gesamten Versuchszeitraumes erfasst und ausgewertet. Hierbei werden Optimierungsmöglichkeiten im Zusammenspiel zwischen Vorwärmung und Brennersteuerung erfasst.

Die Regelung des Vorwärm-Systems an sich wird auf die kundenseitigen Verhältnisse angepasst. Hier spielen vor allem das Zusammenwirken mit der vorhandenen Sicherheitstechnik, wie auch die Regelung des Zwischenkreislaufes zur Übertragung der Energie des Wannenabgases auf das Vorwärmesystem eine entscheidende Rolle.

Beim Regelungssystem wurden mehrere Möglichkeiten zur Optimierung ausgemacht. Zusammengefasst konnten im Zuge des Testlaufs am GWI-Ofen folgende Ansatzpunkte für entsprechende Modifikation des Vorwärmesystems ausgemacht werden:

- Große Trägheit beim Reaktionsverhalten
Regeleingriffe zur gewünschten Erhöhung oder Senkung der Vorwärmtemperaturen für Erdgas und Sauerstoff wirken sich teilweise sehr zeitverzögert auf den Vorwärmprozess aus. Speziell die Verringerung der Vorwärmtemperatur reagiert sehr träge. Grund hierfür ist v. a. die „Speichermasse“ der Wärmetauscher.
➔ Modifikation: Anpassen der Regler auf verzögertes Temperaturverhalten (langsamer mit Trendanalyse)
- Wärmeverteilung bei Mehrbrenneranlagen
Die Wärmeversorgung mit Heißluft wurde im Versuchszeitraum weitgehend über den externen Luftvorwärmer geregelt, d. h. bei größerem Wärmebedarf für die Vorwärmung wurde die Leistung des LUVOs erhöht, bei geringerem Bedarf, reduziert. Im Anwendungsfall an einer realen Anlage wird die zur Verfügung gestellte Menge an Heißluft unabhängig vom Bedarf der Vorwärmanlage geregelt (Regelgröße hauptsächlich die ordnungsgemäße Kühlung des Abgaswärmetauschers). Zu diesem Zweck ist das PreHeating-System mit einem regelbaren Heißluftbypass am Heißluft-Eintritt ausgestattet. Bei Mehrbedarf wird der Bypass weiter geschlossen, bei verringerter Abnahme, weiter geöffnet. Es ergeben sich dadurch überlagernde und sich gegenseitig beeinflussende Regelkreise (Gesamtwärmemenge + Einzelregelung an Wärmeübertragern).

- ➔ Modifikation: Abstimmung der Regler-Hierarchie; Anpassung der Reglergeschwindigkeiten

FAZIT: Durch Anpassung der Regler konnte die Geschwindigkeit von Temperaturanpassungen optimiert werden. Problematisch gestaltete sich hierbei allerdings der Einfluss bei Mehrbrenneranlagen. Durch die Regelung des Heißluftdurchsatzes über die einzelnen Wärmetauscher (Gas und Sauerstoff) pro Brenner, ist bei zu schneller Regelung ein „Aufschaukeln“ über das Gesamtsystem zu beobachten, da die einzelnen Durchsätze direkt miteinander korrelieren. Eine Erhöhung des Heißluftdurchsatzes an einem Brenner reduziert zwangsläufig den Durchsatz an den anderen Brennern, dies führt zu einer konkurrierenden Regelung. Die Anpassung auf eine „gestufte“ Regelungsstrategie konnte diesem Effekt weitgehend entgegenwirken. Die Reduzierung der Reglergeschwindigkeit und Verlangsamung der Temperaturanpassung wirkte sich zusätzlich positiv auf das Verhalten der Gesamtanlage aus

3.3 AS 2. Bau der kombinierten Gas- und Sauerstoffvorwärmung (UAS)

3.3.1 AS 2.1: Erstellung der Konstruktionszeichnungen und Materialauswahl (UAS)

Die **Abbildungen 3.12** und **3.13** zeigen beispielhaft die erstellten Konstruktionszeichnungen und das R&I-Fließschema.

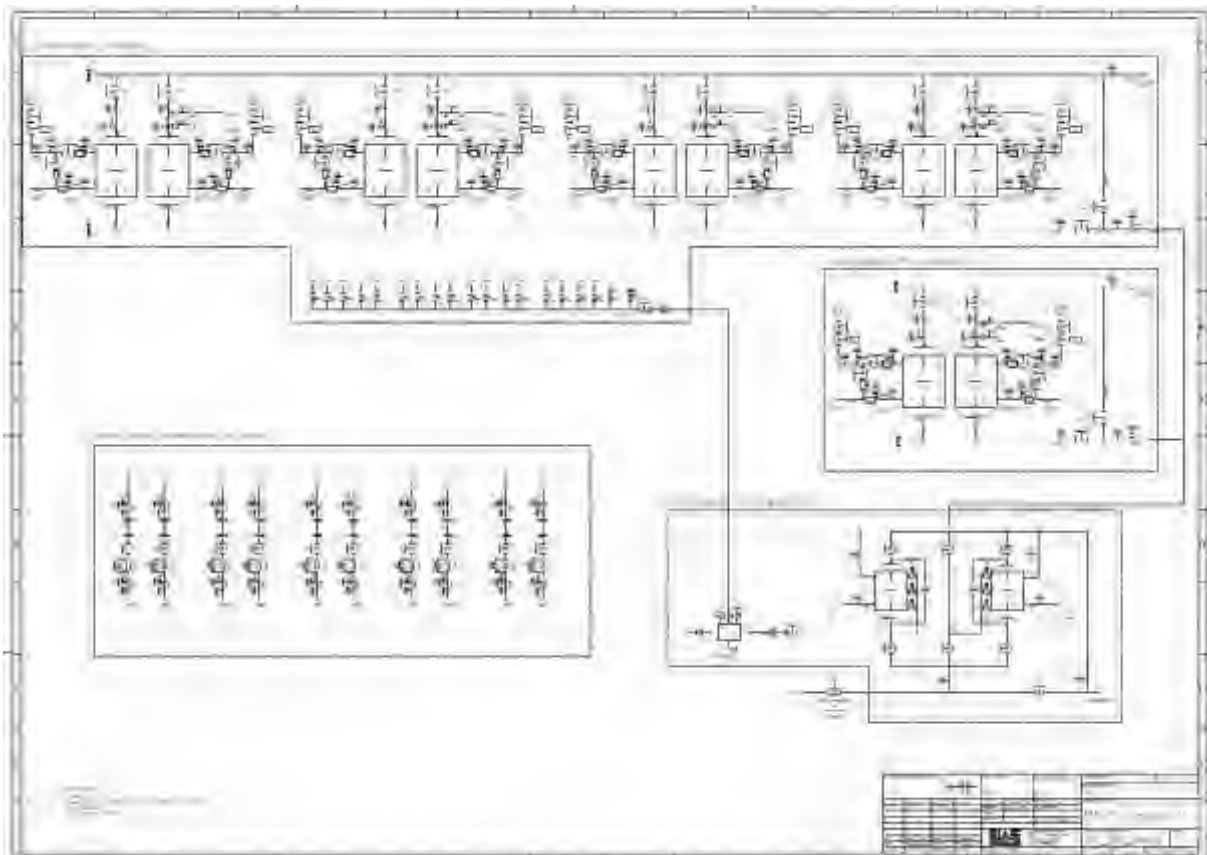


Abbildung 3.12: R&I-Fließschema des Gesamtprozesses inkl. 4 neu zu bauenden Vorwärmstationen (oben), dem anzupassenden vorhandenen Modul (Mitte-rechts), der Heißluftgewinnung aus dem Abgas der Glas-schmelzwanne (unten-rechts), den Regelstationen für Heißbetrieb (links) und der Steuerluftverteilung (mittig unter 4er-Station) (Quelle: UAS)

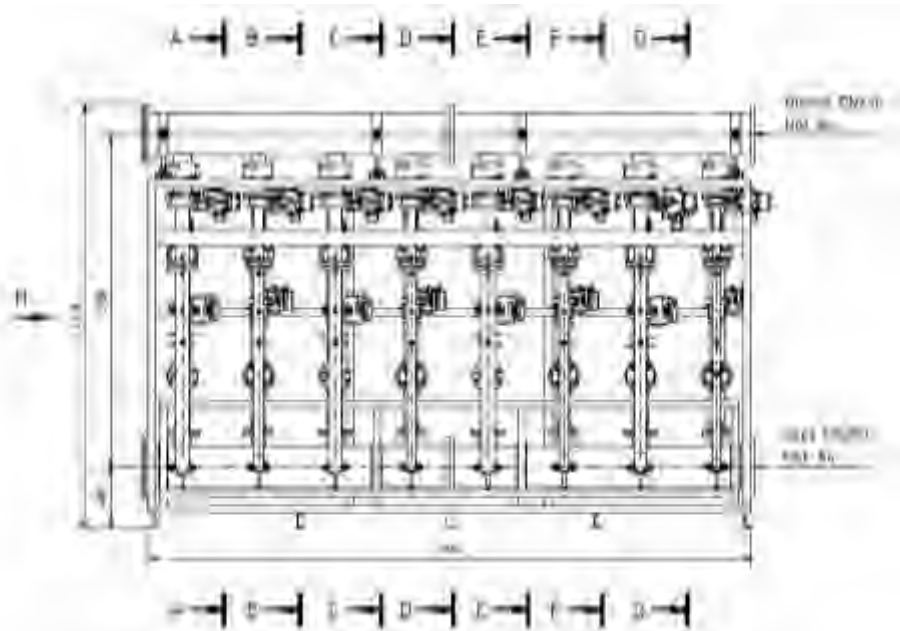


Abbildung 3.13: 2-D Konstruktionszeichnung der 4er-Station, inkl. Heißluftversorgung (oben und unten), Wärmetauscher (im Hintergrund), Bypass und Heißregelstrecke (im Vordergrund) mit den notwendigen Regeleinrichtungen (Quelle: UAS)

3.3.2 AS 2.2: Bau der kombinierten Gas- und Sauerstoffvorwärmung (UAS)

In **Abbildung 3.14** ist ein 3-D-Modell der gebauten Vorwärmstation dargestellt. **Abbildung 3.15** zeigt den dazugehörigen Schaltschrank.



Abbildung 3.14: 3D-Modell der 4er Station im Stahlrahmen mit Heißluftversorgung, Wärmetauscher, Bypass- und Regelstrecken (Quelle: UAS)



Abbildung 3.15: Links: Steuerschrank der 4er-Station inkl. Touchpanel, Bedien- und Anzeigeelemente und Auswerteeinheit der Gaswarnzentrale, Rechts: Steuerschrank Innenansicht inkl. Siemens S-1200 SPS (Quelle: UAS)

Der finale Zusammenbau der Module erfolgte erst vor Ort bei der Zwiesel Kristallglas AG, da aufgrund der engen Wege ein Transport der Anlage nur in Teilen möglich war. Abgesetzte Leitungen für Druckmessungen und Gaswarnanlage wurden in diesem Zuge auch vor Ort angepasst.

Die Isolierung der heißen Anlagenteile und der elektrische Anschluss der Komponenten mit den Schaltschränken erfolgte nach Fertigstellung der Verrohrung zwischen den Stationen.



Abbildung 3.16: 4er-Skid, Bypass- und Regelstrecken (Quelle: UAS)



Abbildung 3.17: 4er-Skid, Wärmetauschereinheit (Quelle: UAS)



Abbildung 3.18: Heißluftversorgung mit Bypass (Quelle: UAS)

3.4 AS 3. Konfiguration der Regelungsstrecke (UAS/GWI)

3.4.1 AS 3.1: Aufstellung einer Regelungsstrategie und Anpassung von Regelparametern (UAS/GWI)

Die Regelungsstrategie wurde so aufgestellt, um auch im Störfall der Vorwärmanlage, den Betrieb der Schmelzwanne nicht zu beeinträchtigen.

Die in den vorangegangenen Arbeitsschritten erarbeiteten notwendigen Modifikationen wurden hierbei berücksichtigt.

- Große Trägheit beim Reaktionsverhalten
Zur Anpassung der Regler auf die Trägheit des Wärmeübertragungssystems wurde bei der Programmierung eine höchstmögliche Flexibilität umgesetzt. Dies wurde hauptsächlich über eine Vielzahl an frei einstellbaren Parametersätzen erreicht. Bei der Inbetriebnahme der Anlage und im späteren Betrieb ist es somit relativ einfach möglich, das Anlagenverhalten der tatsächlichen Situation anzupassen, ohne größere Änderungen in der Anlagensoftware vorzunehmen.
- Wärmeverteilung der Mehrbrenneranlagen
Die Regelhierarchie wurde entsprechend angepasst, die Geschwindigkeiten können, wie bereits im vorgenannten Punkt beschrieben, über die Parameterverwaltung an die tatsächliche Betriebsituation angepasst werden.
- Heißluftherzeugung aus dem Wannenabgas
Das Konzept für die Wärmerückgewinnung der Abgasenergie zur Übertragung auf die Vorwärmeinheiten wurde entwickelt.
Das Wannenabgas wird über einen Hochtemperatur-Saugzuggebläse aus dem bestehenden, gemauerten Abgaskanal der Wanne 4 geleitet. Ein, dem Saugzug vorgeschalteter, Wärmetauscher überträgt die Energie des Abgases auf das Zwischenmedium Luft, welches wiederum die Vorwärmeinheiten versorgt und Brennstoff und Oxidator vorwärmt.
Die Ofendruckregelung der Schmelzwanne wird hierbei durch den Saugzug übernommen. Der Abgaswärmetauscher wird im Störfall, oder zur Wartungszwecken umfahren, ohne dass dadurch die Produktion beeinträchtigt wird.
Bei Ausfall des Saugzugs übernimmt die bereits vorhandene Ofendruckregelung über Klappensteuerung wieder die Regelung.
Da im Wannenabgas ein erhöhter Staub- und Kondensatanteil vorhanden ist, wird der Wärmetauscher mit einem automatisch geregelten Abreinigungssystem ausgestattet.

FAZIT: Die Ofendruckregelung über den Saugzug funktionierte von Beginn an einwandfrei. Die kundenseitige Wannenregelung übernimmt die Regelung des Saugzugs, in Abhängigkeit von Ofendruck und Gegendruck des Wärmetauschers bei erhöhtem Zusetzen der

Übertragungsflächen. Bei Ausfall des Saugzuges (simuliert über Schließen von abgasseitigen Absperrorganen) und damit verbundenem Anstieg des Ofendruckes, übernimmt die vorhandene kundenseitige Ofendruckregelung über Kaminzugklappe. Eine Beeinflussung des Wannenbetriebes ist somit nicht gegeben.

3.4.2 AS 3.2: Einbindung der Regel- und Steuerungskette in das Vorwärmssystem (UAS)

Die unter 3.1 entwickelte Regelungsstrategie wurde softwaremäßig entsprechend umgesetzt. Das Pilotsystem wurde im ersten Schritt als autarkes Regelungssystem entwickelt. Dies bedeutet, dass die Wannenregelung unabhängig vom Preheating-System läuft und sich daher für das Bedienpersonal des Anlagenbetreibers keine Änderungen ergeben. Das Vorwärmssystem stellt ein Add-on zur Energieeinsparung für die Schmelzwanne dar, ohne dabei den Produktionsprozess zu beeinträchtigen. Im Störfall schaltet das System automatisch und sicher ab, am Leitsystem gibt es hierbei nur eine optische Signalisierung.

Die Bedienung der Anlage erfolgt direkt am Schaltschrank über ein Touchpanel oder über einen separaten PC in der Leitwarte.

Eine spätere Einbindung in das kundenseitige Prozessleitsystem ist über entsprechende Schnittstellen problemlos möglich.

Die eigentliche Bedienung der Anlage erfolgt über das grundlegende Ein- und Ausschalten der Anlage im Gesamten oder von einzelnen Brennern. Individuell können pro Brenner und Medium (Gas und Sauerstoff) die gewünschten Vorwärmtemperaturen vorgegeben werden. Dies ist jedoch hauptsächlich zu Versuchszwecken notwendig, um hier eine Ableitung über Auswirkungen der Vorwärmtemperaturen auf den Energieverbrauch und den Einfluss auf den Schmelzprozess zu machen.

Abbildung 3.19 zeigt die Gesamtübersicht der Preheating-Stationen für Brenner 2R – 4L. Hellblau hinterlegt ist der kundenseitige Setpoint (SP), mit dem die gewünschte Vorwärmtemperatur pro Brenner eingestellt werden kann. Weiterhin sind Betriebsdaten und Statusmeldungen ersichtlich.

Detailliertere Informationen zu den einzelnen Brennern bzw. Medien liefern die, in **Abbildung 3.20** und **3.21** dargestellte Oberfläche pro Einzelbrenner / Stoffstrom. Hierbei sind die exakten Ein- und Austrittstemperaturen aller Stoffströme ersichtlich.

Anpassungen und Optimierungen der grundlegenden Regelparameter, werden auf einer zusätzlichen Oberfläche dargestellt (**Abbildung 3.22**), um hier speziell die gestufte Vorwärmung und die unter AP 3.1 entwickelte Regelungsstrategie einstellen, testen und optimieren zu können.



Abbildung 3.19: Bedien- und Übersichtsoberfläche des Vorwärmesystems (Quelle: UAS)

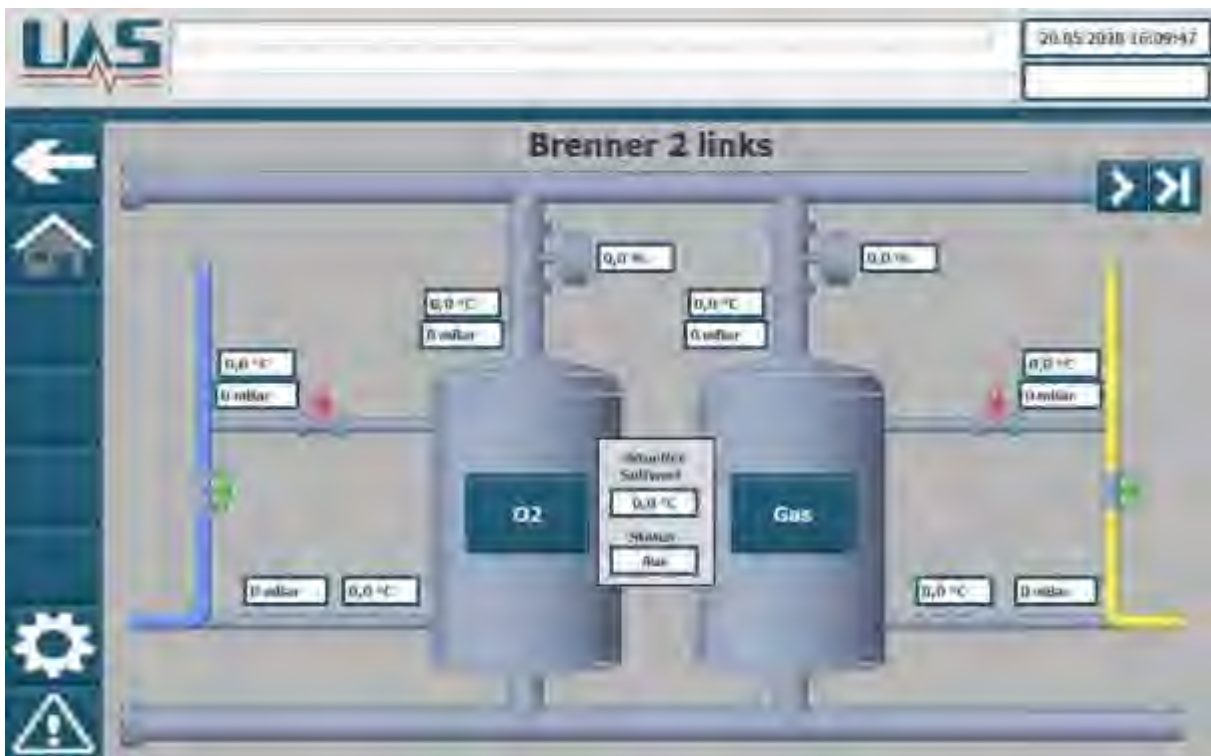


Abbildung 3.20: Übersichtsoberfläche eines Einzelbrenners (Quelle: UAS)

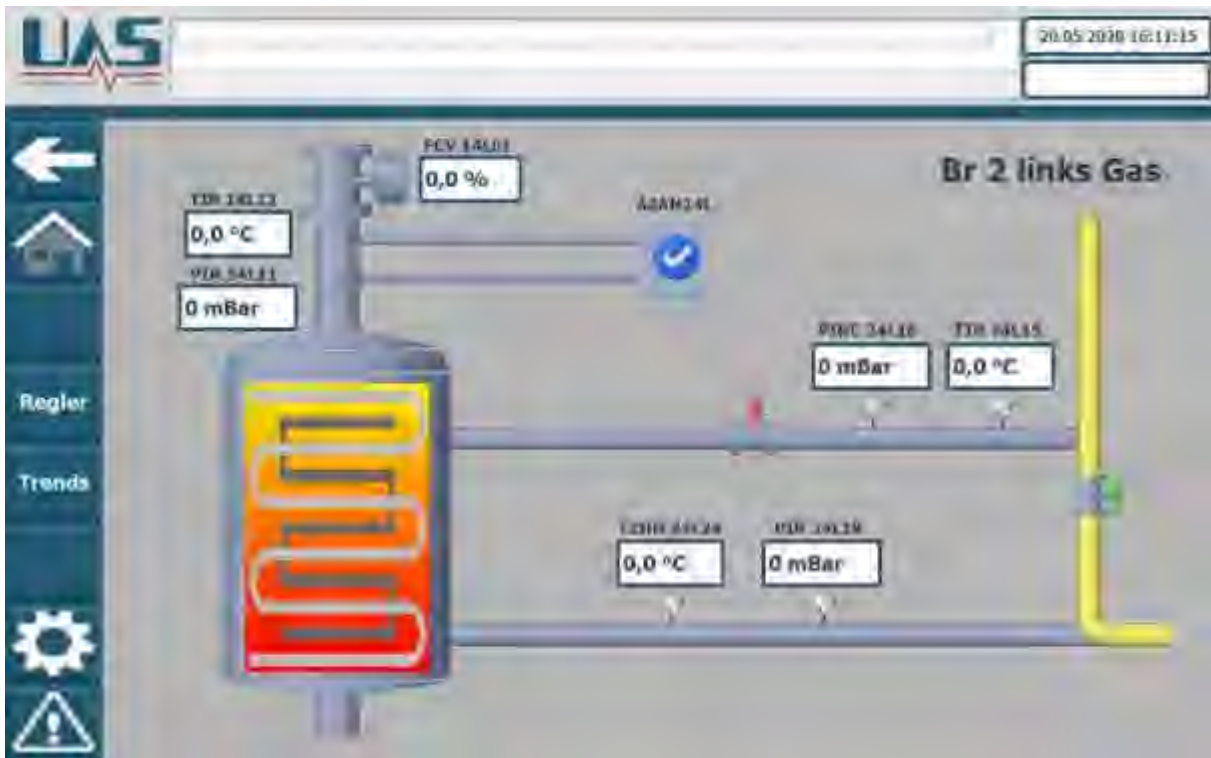


Abbildung 3.21: Übersichtsoberfläche eines Medienstroms pro Einzelbrenner (Quelle: UAS)

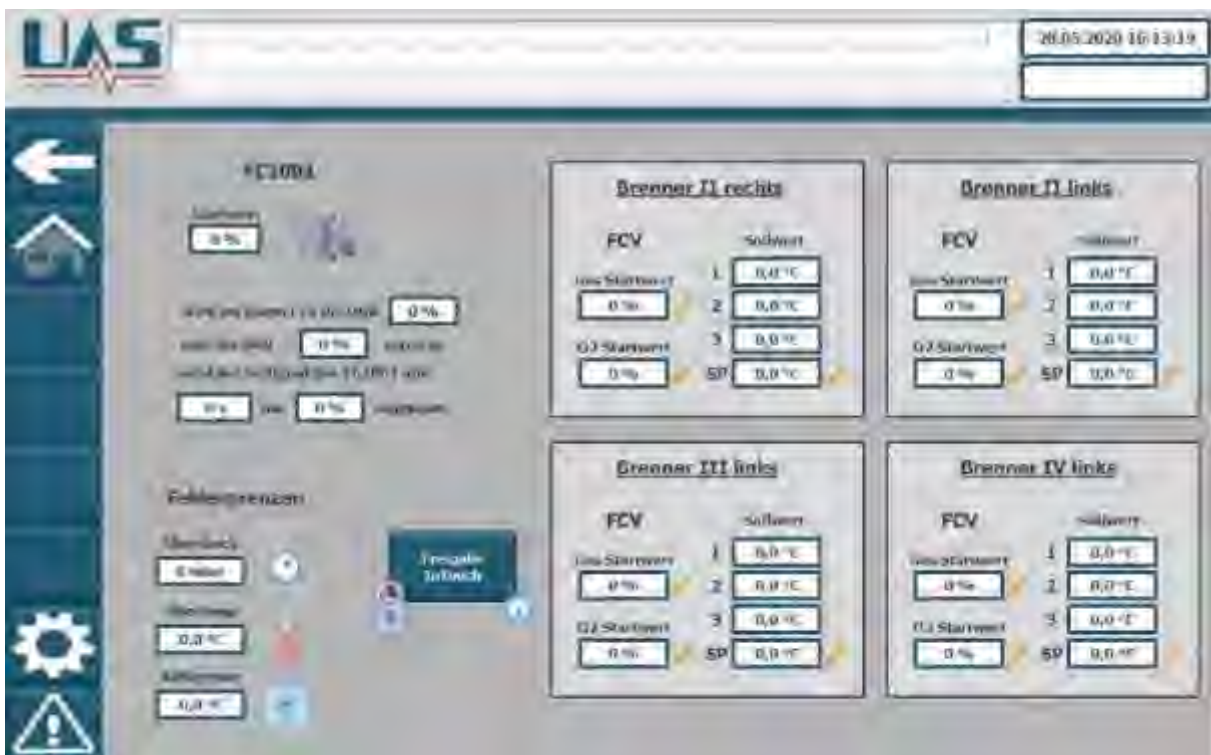


Abbildung 3.22: Inbetriebnahme- und Optimierungsoberfläche des Vorwärmersystems (Quelle: UAS)

Zusätzlich existiert eine Bedienoberfläche für die separate Heißlufterzeugung, mit entsprechenden manuellen Bedienelementen, speziell für die Inbetriebnahme und zu Versuchszwecken, siehe **Abbildung 3.23**.

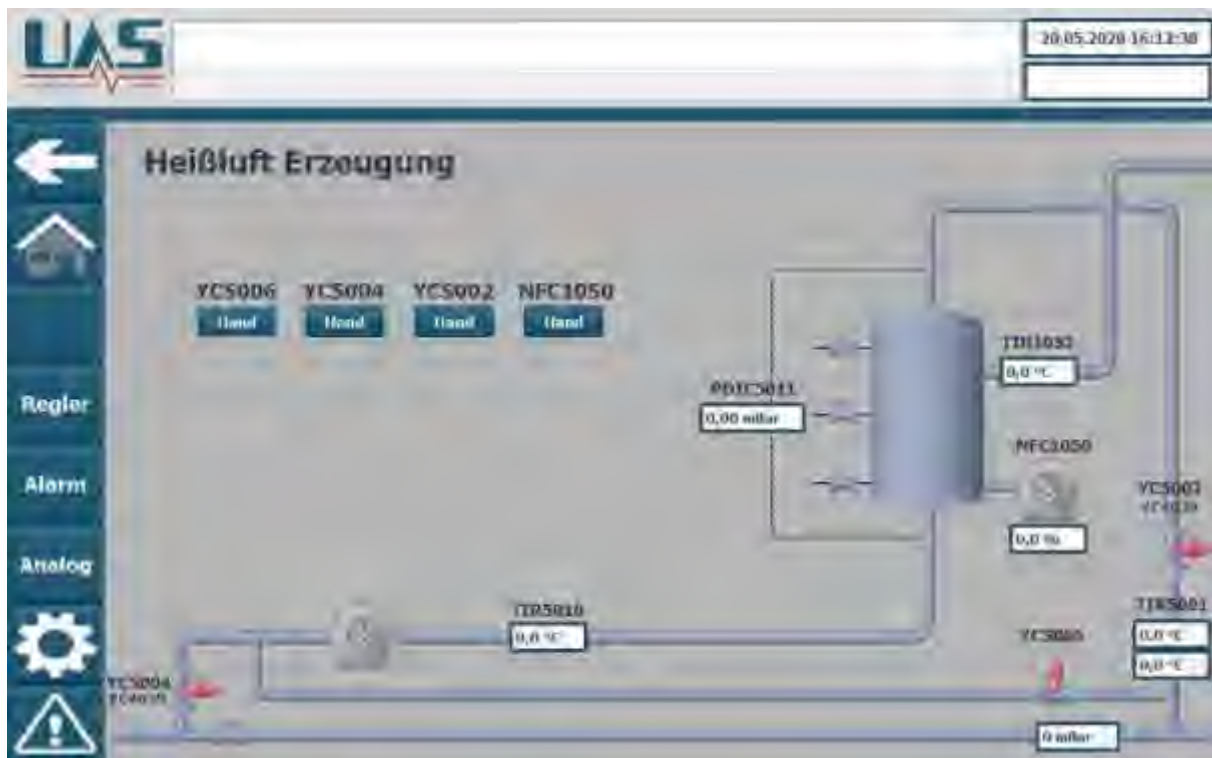


Abbildung 3.23: Bedienoberfläche der Heißlufterzeugung (Quelle: UAS)

3.5 AS 4. Umsetzung an einer realen Anlage und Funktionstest (UAS/GWI)

3.5.1 AS 4.1 Integration, Inbetriebnahme (UAS/GWI)

3.5.1.1 Anlagenimplementierung

Das gesamte Vorwärmesystem besteht aus einer, aus dem Vorprojekt existierenden Einzelanlage, einer 4er-Station, einer Brennerregelstation „heiß“ für 5 Brenner, einem Skid zur Heißluftversorgung, einem Heißluftwärmetauscher inkl. Gebläse und Saugzug, sowie den entsprechenden Schaltschränken. Der Einbau erfolgte im Wannenkeller, neben dem Abgaskanal, aus welchem das Abgas zur Erzeugung von Heißluft entnommen wird, siehe **Abbildung 3.24**.

Aufgrund der stark eingeschränkten Platzsituation im Keller der Schmelzwanne musste der vorhandene Einzelskid angepasst und mechanisch in die 4er-Anlage integriert werden. Regelungstechnisch blieb diese Station allerdings eigenständig, jedoch übernimmt das Bypassventil der 4er-Station nun die Abschaltung für alle 5 Stationen, siehe **Abbildung 3.25**.

Die Installation der Stationen gestaltete sich aufgrund der Platzsituation vor Ort etwas schwierig. Speziell der Leitungsbau zwischen kundenseitig vorhandener Wannensregelstation, Vorwärmanlage und Brenner war aufgrund der Vielzahl vorhandener Leitungen im Keller aufwendig, konnte jedoch letztendlich wie geplant umgesetzt werden.

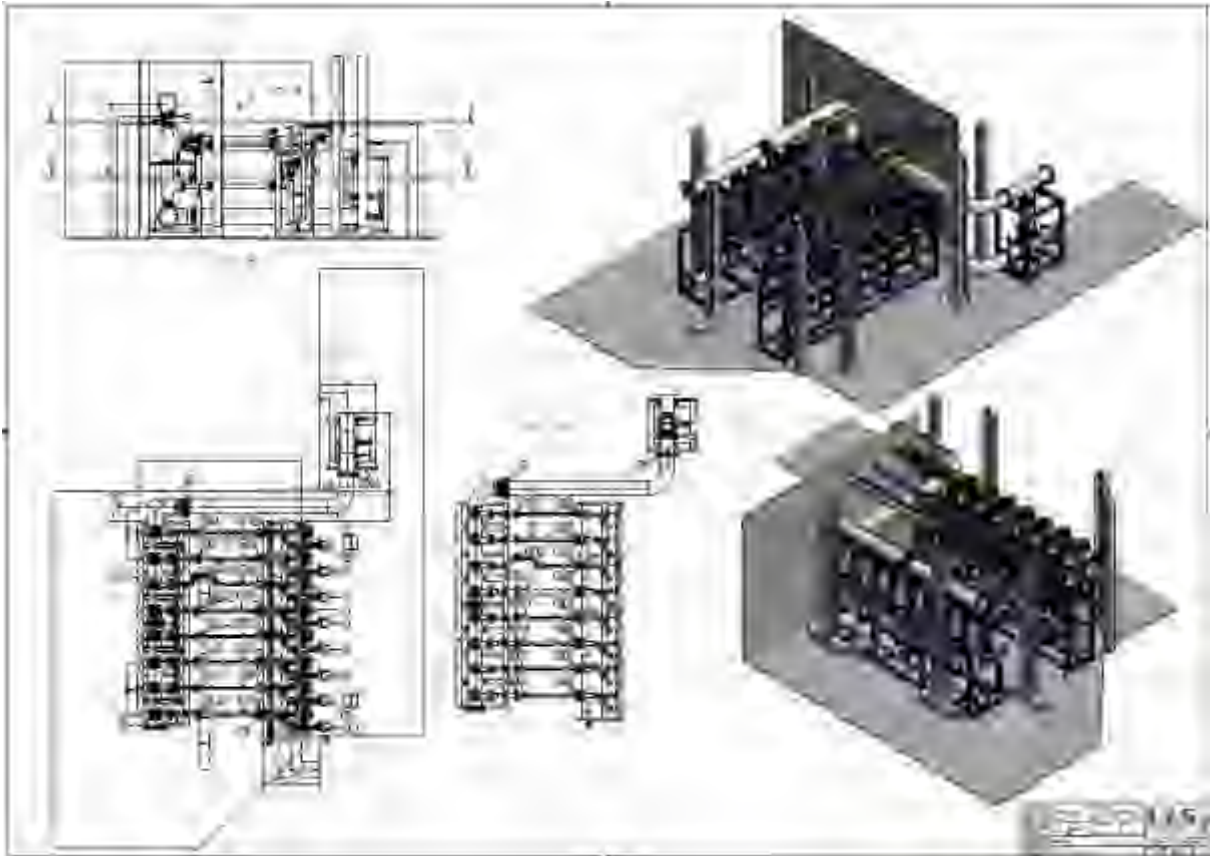


Abbildung 3.24: Ursprüngliche Planung „Keller“ mit 4er-Skid und Einzelskid separat (nicht im Bild), (Quelle: UAS)

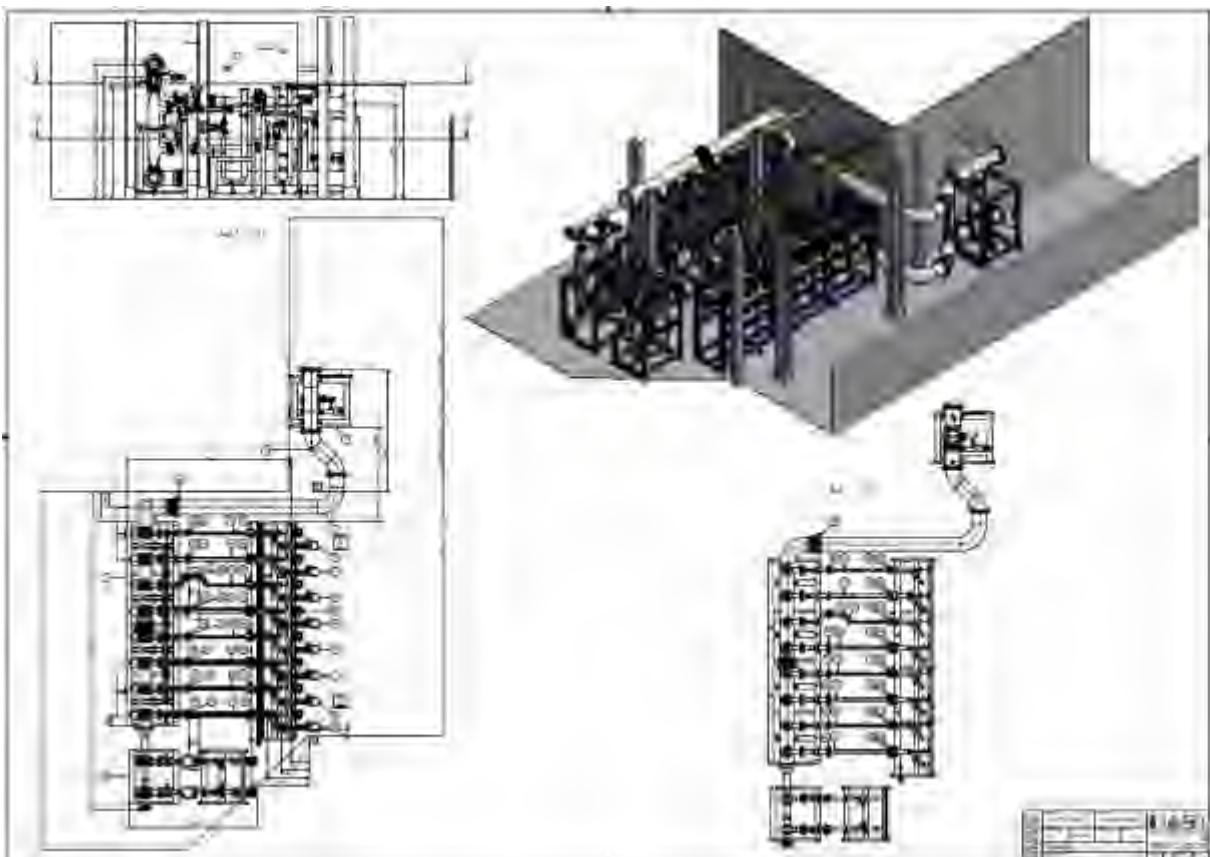


Abbildung 3.25: Angepasste Planung „Keller“ mit Einzelskid montiert an 4er-Skid, (Quelle: UAS)

Die nachfolgenden **Abbildungen 3.26 bis 3.32** zeigen die Anlage mit entsprechendem Equipment nach der Installation.



Abbildung 3.26: Gesamtanlage aufgebaut bei Zwiesel Kristallglas AG



Abbildung 3.27: Schaltschränke bei Zwiesel Kristallglas AG (links Steuerschrank Vorwärmstationen, Mitte Steuerschrank Brennerregelung, rechts rückseitig Leistungsschrank), (Quelle: UAS)



Abbildung 3.28: Rückseitige Ansicht der Vorwärmstationen mit den isolierten Wärmetauschern für Erdgas und Sauerstoff, sowie den Absaugeinheiten für die Leckageüberwachung, (Quelle: UAS)



Abbildung 3.29: Vorbereitete Abgasentnahme mit Heißluftwärmetauscher (mittig hinter Säule) und Saugzuggebläse (Hintergrund) (Quelle: UAS)



Abbildung 3.30: Abgasentnahme aus dem Abgaskanal (Quelle: UAS)



Abbildung 3.31: Brennerversorgungsleitungen mit vorgewärmtem Sauerstoff und Erdgas unter der Wanne (Quelle: UAS)

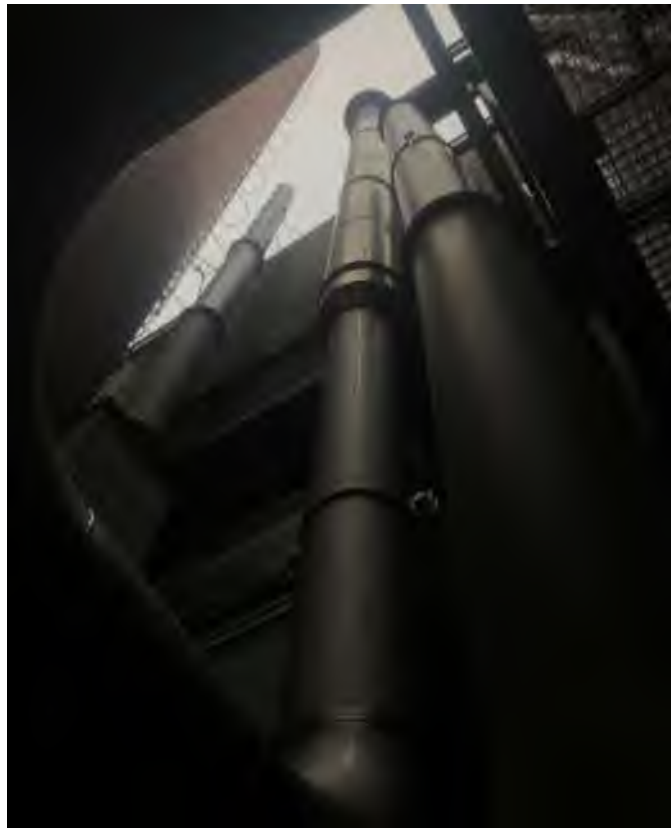


Abbildung 3.32: Abführung der überschüssigen Heißluft aus der Vorwärmstation über Dach (mittlere Leitung) (Quelle: UAS)

3.5.1.2 Brenner und Brennersteine

Erster Brennereinbau

Gemäß der ursprünglichen Planung war der Wechsel der ersten Brenner für Juni/Juli 2017 geplant. Aufgrund von Zeitverzögerung beim Guss der Brennersteine konnte der geplante Liefertermin der Brenner nicht gehalten werden. Ein Einbau der Brenner im September war dann jedoch aus Produktionsgründen nicht möglich.

Ein weiterer Verzug bei der Steinproduktion führte letztendlich zum Brennersteinwechsel im Dezember 2017.

Am 18.12.2017 wurde der erste Preheating-Brenner 2R (siehe **Abbildung 3.33**) installiert und „kalt“, d. h. ohne Vorwärmung in Betrieb genommen. In KW2/2018 sollten die Brenner 2L, 3L und 4L installiert und in Betrieb genommen werden. Die Installation von Brenner 3R wurde aufgrund der schwierigen Einbausituation (direkt neben dem Abgasfuchs) vorerst ausgesetzt.



Abbildung 3.33: Installierter Preheating-Brenner mit „kalten“ Anschlüssen und provisorischer Halterung über Kette (Quelle: UAS)

Am 15.01.2018 sollten die weiteren Brenner getauscht werden. Zu Beginn des geplanten Brennerwechsels wurde der verbaute Brenner 2R kontrolliert. Dabei wurde ein erhöhter Kondensatanfall am Brenner beobachtet. Zudem war bereits ein Riss des Brennersteins zu erkennen. Der Brenner wurde daraufhin ausgebaut und der Stein gegen einen Neuen getauscht. Die **Abbildung 3.34** zeigt den ausgebauten Brennerstein. Deutlich zu erkennen sind die Kondensatablagerungen, die die vorhandenen Sauerstoffdüsen zusetzen. Zusätzlich sichtbar sind ein horizontaler und ein vertikaler Riss durch den gesamten Brennerstein.



Abbildung 3.34: Ausgebauter Preheating-Brennerstein nach ca. 4 Wochen in Betrieb (Quelle: UAS)

Aufgrund der Kondensatproblematik und der schwierigen Reinigungsmöglichkeiten der Preheating-Brenner wurde mit Zwiesel Kristallglas vereinbart, dass die Kondensationsproblematik erstmal weiter beobachtet wird und eine gangbare Lösung für die Handhabbarkeit des Brenners zur Reinigung gefunden werden muss, da andererseits Probleme für die Produktion und ein erheblicher Mehraufwand für das Wannenpersonal befürchtet wird.

Die Kondensatproblematik besteht im Detail darin, dass ein Gemisch aus Gemengeanteilen und abgeschmolzenem Feuerfestmaterial aus dem Oberofen über die inneren Seitenwände nach unten läuft. Im Kaltbetrieb des Brenners düsen ca. 30 °C kaltes Erdgas und Sauerstoff über den Brennerstein in den Ofen. An dieser kalten Stelle „gefrieren“ die Kondensate und setzen die Brennerdüsen zu. Dies kann dazu führen, dass die Ausprägung der Flamme blockiert wird und der Brenner ausfällt.

Bei den bestehenden Brennern handelt es sich um Rohr-in-Rohr-Brenner. Die Brennerdüse ist hier deutlich größer als beim Quadraflo-Brenner und der Brenner ist viel kleiner und leicht demontierbar. Der Reinigungsaufwand ist daher sehr gering.

Für die Preheating-Brenner wurde daher eine spezielle Halterung- und Verfahreinrichtung entwickelt, mit der der Ausbau des Brennerkörpers zur Reinigung deutlich vereinfacht wird. Dennoch war hier ein erhöhter Arbeitsaufwand für den Kunden notwendig.

Wegen der besonderen Konstruktion der Brennerdüsen– 4 mittlere O₂-Düsen und 4 kleine O₂-Düsen um die größere Gasdüse, sind speziell die Sauerstoffdüsen von Kondensatablagerungen betroffen und hier insbesondere die kleinen Düsen, da die Strömungsgeschwindigkeiten der nicht-vorgewärmten Medien relativ klein sind.

Auch durch kontinuierliche Reinigung des Brenners konnte das Zusetzen der Brennerdüsen nicht verhindert werden. Zusätzlich wurden Beständigkeitsprobleme des Steinmaterials mit dem Gemenge der Schmelze festgestellt, was zu einem erhöhten Verschleiß am Brennerstein und somit zu zusätzlichem Zusetzen der Düsen führte. Aus diesem Grunde war ein Wechsel des Steinmaterials der Brenner notwendig.

Zweiter Brennersteinwechsel

Am 23.05.2018 wurde der Brennerstein 2R gegen einen modifizierten Stein getauscht. Die Steinzusammensetzung des neuen Steins sollte dem erhöhten Verschleiß entgegenwirken. Zusätzlich wurden Anpassungen in der Aufnahme des Brennerkörpers vorgenommen, um die Wartungsarbeiten am Brenner zu erleichtern.

Die Anlagerung des Kondensats an der Öffnung des Brennersteins zur Wanne kann durch den neuen Stein allerdings nicht verringert werden, da diese, wie oben bereits beschrieben, durch das Eintreten der kalten Medienströme verursacht wird.

Es wurde daher davon ausgegangen, dass beim Betrieb im Vorwärmmodus, das Zusetzen der Düsen deutlich reduziert und die Reinigungsintervalle dadurch verlängert werden. Daher wurde eine Übergangsvorrichtung installiert. Mit einem separaten Temperbrenner wurden die Medien des bereits installierten Brenners auf max. 400 °C vorgewärmt. In diesem Zuge konnten auch die ersten Programmtests des Vorwärmmoduls durchgeführt werden. Die Tests

wurde Mitte Juli 2018 durchgeführt. Mit dieser Betriebsweise konnten Vorwärm-temperaturen von 200 °C erreicht werden. Aufgrund der nur geringen Vorwärmtemperaturen war kein direkter positiver Einfluss auf die Kondensatbildung festzustellen, siehe **Abbildung 3.35**.



Abbildung 3.35: Ausgebauter Preheating-Brennerstein nach ca. 4 Monaten in Betrieb; Verschleiß auf Düsen-seite (links im Bild) ist deutlich zu erkennen (Quelle: ZK)

Die Arbeiten von UAS wurden durch GWI-Mitarbeiter unterstützt. Speziell bei der Analyse der aufgetretenen Probleme.

Flammenrückschlag

Am 21.09.2018 wurde ein massiver Flammenrückschlag am Brenner 2R beobachtet. Dieser Rückschlag wurde durch das Zusetzen der Brennerdüsen ausgelöst, obwohl diese wenige Tage zuvor gereinigt wurden. Durch das Verschließen der Düsen durch Kondensate steigt der Gegendruck für Gas und Sauerstoff. Bei zu hohem Gegendruck brennt die Flamme aus den Entlastungsbohrungen auf der Vorderseite des Brennerkörpers.

Aufgrund dieses Vorfalls wurde das Reinigungsintervall des Brenners nochmals reduziert. Zusätzlich wurde der Lieferant beauftragt, das Brennerdesign zu ändern, um die Kondensatproblematik endgültig zu lösen.

Dritter Brennersteinwechsel

Am 19.12.2018 wurde der Brenner 2R erneut getauscht. Vom Brennerlieferanten wurde ein neues Brennerdesign (**Abbildung 3.36**) geliefert.



Abbildung 3.36: Neues Brennerdesign Brennertyp 3 (Quelle: Hotwork)

Der Brennerkörper bleibt hierbei gleich, es wird davor nur ein metallischer Düsenblock montiert, welcher die Düsen im ursprünglichen Brennerstein ersetzt. Der Querschnitt der Brennersteinöffnung wird dadurch deutlich größer, was dem Zusetzen durch, vom Gewölbe ablaufendem Kondensat über den Brennerstein vermeidet.

Zum Test des neuen Brennerdesigns, war ein Zeitraum von einem Monat vereinbart, danach sollten die weiteren Brenner nachgerüstet werden.

Erneuter Brennerschaden

Am 29.01.2019 wurde ein stark verändertes Flammenbild am Brenner 2R beobachtet. Bei genauerer Betrachtung wurden mehrere glühende Stellen am Brennerkörper erkannt. Der Brenner wurde daher ausgebaut.

Der Brennerstein war an der Öffnung zur Wanne mehreren Stellen durch die Flammen abgeschmolzen. Die Brennerdüse war komplett verkohlt, was aufgrund einer massiven Überhitzung im Brennerstein hervorgerufen wurde, siehe **Abbildung 3.37**.



Abbildung 3.37: Brennerstein mit Abschmelzungen (linkes Bild) und überhitzte (verkohlte) Brennerdüse (rechtes Bild), (Quelle: UAS)

Der Schaden entstand vermutlich bei der Reinigung des Brenners. Hierbei muss der Brennerkörper von der Düse demontiert werden, damit die Düsenlöcher separat gereinigt werden können. Durch eine Verschiebung der Dichtung zwischen Brennerkörper und Düse wurden die Medienströme abgelenkt, was zur Bildung einer schweißbrennerartigen Flamme führte.

Der neue Brenner war somit nicht praxistauglich, da ein Verrutschen der Dichtung bei Wiedereinbau nie gänzlich ausgeschlossen werden kann und das damit verbundene Gefahrenpotential sehr hoch ist.

Aus diesem Grund wurde beschlossen, den Brenner in diesem Design nicht wieder einzubauen. Die Wanne wurde wieder in den Ursprungszustand zurückgebaut, um die laufende Produktion nicht zu gefährden, d. h. die ursprünglichen Rohr-in-Rohr-Brenner (Brennertyp 1) wurden wieder installiert, bis eine endgültige Lösung seitens des Brennerherstellers geliefert werden kann.

Vierter Brennersteinwechsel und Inbetriebnahme

Die Brenner wurden von der Fa. Hotwork überarbeitet, siehe **Abbildung 3.38**. Die Überarbeitung sah eine Rückkehr zum ursprünglichen Brennerkonzept ohne Stahldüse vor. Verändert wurde auch die chemische Zusammensetzung des Brennersteins, in Abstimmung mit dem Steinlieferanten.

Nach erfolgter Fertigung wurden die Brenner 2R und 2L im September 2019 in die Wanne integriert und nach erfolgreicher kalter Testphase wurden Anfang November die Brenner 3L und 4L installiert.

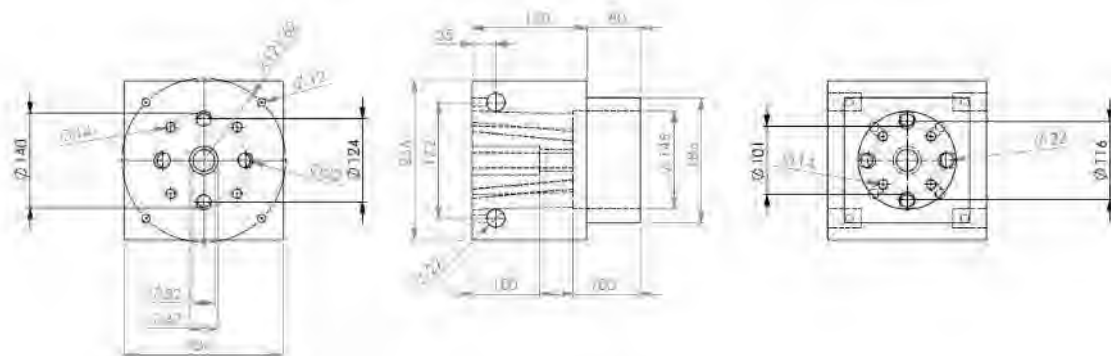


Abbildung 3.38: Überarbeitete Brennergeometrie mit Keramikspitze (Quelle: Hotwork)

Während der Kaltbetriebsphase wurde ein deutlich verbessertes Flammenbild an den Preheating-Brennern festgestellt. Dieses bedingt einen verbesserten Wärmeeintrag ins Glasbad und damit verbunden, eine Reduzierung an Erdgas für die Feuerung.

Bei der Produktion wurde zu dieser Zeit allerdings ein erhöhtes Schlierenaufreten im Endprodukt Glas festgestellt. Ob hierbei ein direkter Zusammenhang mit dem neuen Brennersteinmaterial besteht, konnte zu diesem Zeitpunkt nicht geklärt werden.

Nach Abschluss der Kaltbetriebsphase wurde die Heißlufterzeugung in Betrieb genommen. Dabei wird das Wannenasgas über einen, mit einem Wärmetauscher und Saugzug

ausgestatteten Bypass aus dem bestehenden Abgaskanal umgeleitet. Die Ofendruckklappe, die normalerweise die Regelung des Ofendrucks übernimmt, wird dabei weitgehend geschlossen. Die Regelung des Ofendrucks übernimmt der Saugzug.

Die Heißlufterzeugung funktionierte problemlos. Im Zuge der Testphase konnte keine nennenswerte Verschmutzung der Wärmetauscherflächen festgestellt werden.

Über einen Zeitraum von 4 Tagen wurden das An- und Abfahrverhalten, die Sicherheitsfunktionen sowie die Regelung der Vorwärmeinheiten stufenweise getestet. Dies geschah im überwachten Betrieb, d. h. die Anlage wurde morgens gestartet und abends außer Betrieb genommen. Während dieser Testphase wurde die Regelung durch Parameteranpassung optimiert. Hier wurde speziell die Reaktionszeit auf Lastwechsel, das Zu- und Wegschalten einzelner Brenner, sowie das Anfahren unterschiedlicher Temperaturprofile untersucht.

Da mittlerweile ein erhöhter Produktausfall durch Schlierenbildung beim Kunden festgestellt werden musste, wurde vor dem endgültigen Start der Heißbetriebsphase mit dem Kunden vereinbart, die PH-Brenner nochmals zurückzubauen, um einen eventuellen Einfluss des Steinmaterials auf das Schlierenaufreten im Glas auszuschließen.

Das Ergebnis des Ausbaus zeigte erneut deutliche Abnutzungserscheinungen an den Brennersteinen, siehe **Abbildung 3.39**. Speziell an den Brennern 2R und 2L waren nach 9 Wochen Betrieb deutliche Korrosionsschäden zu erkennen. Das Steinmaterial reagiert hierbei mit der Schmelzofenatmosphäre und löst sich aus dem Stein. Die Brennerdüsen werden dadurch verschlossen und das abgeschmolzene Steinmaterial gelangt ins Glasbad, wodurch sich im Endprodukt sogenannte Schlieren wiederfinden, welche zu Verminderung der Glasqualität bzw. zu einem erhöhten Ausschuss führen.



Abbildung 3.39: Brennersteine nach dem Ausbau (Quelle: Zwiesel Kristallglas)

3.5.2 AS 4.2 Langzeittest, detaillierte Vermessung der ausgewählten Glasschmelzwanne, Aufnahme prozessspezifischer Daten (UAS/GWI)

Langzeitmessungen konnten aus den oben beschriebenen Gründen nicht durchgeführt werden. Die verschiedenen Phasen der Brennermodifikationen wurden von den GWI-Mitarbeitern trotz der auftretenden Schwierigkeiten messtechnisch begleitet.

Nachfolgend sind beispielhaft die Ergebnisse zweier Messkampagnen aufgeführt, siehe **Tabelle 3.5** und **3.6**. Die Messpositionen sind der Abbildung 3.1 zu entnehmen.

Tabelle 3.5: Messkampagne Juli 2017 (Brennertyp 2)

| Nr. | Pos. Ofen | Pos. Sonde M - x cm | O ₂ Vol.-% | CO ppm | NO ppm | NO ₂ ppm | T _{Sonde} °C |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|--------------------------|
| | | | | | | | |
| 1 | 1 Links | Mitte (M) | 8 | 8.500 | 2.650 | 800 | 1.514 |
| 2 | 1 Links | M - 40 | 9,3 | 1.000 | 3.000 | 1.325 | 1.480 |
| 3 | 1 Links | M - 80 | 11,5 | 300 | 2.980 | 1.320 | 1.423 |
| 4 | 1 Links | M - 120 | 13,2 | 50 | 2.850 | > 1.325 | 1.397 |
| 5 | 1 Links | M - 160 | 12,5 | 36 | 2.900 | > 1.325 | 1.380 |
| 6 | 1 Links | M - 175 | 20,6 | 4 | 170 | 70 | 1.020 |
| | | | | | | | |
| 7 | 1 Rechts | Mitte (M) | 9,5 | 520 | 9.350 | 1.325 | 1.470 |
| 8 | 1 Rechts | M - 40 | 11,1 | 110 | 2.950 | > 1.325 | 1.455 |
| 9 | 1 Rechts | M - 80 | 10,7 | 88,3 | 2.480 | > 1.325 | 1.453 |
| 10 | 1 Rechts | M - 120 | 10,2 | 98 | 2.510 | > 1.325 | 1.448 |
| 11 | 1 Rechts | M - 160 | 10,6 | 78 | 2.350 | 1.280 | 1.410 |
| 12 | 1 Rechts | M - 175 | 20,8 | 3 | 94 | 60 | 1.102 |
| | | | | | | | |
| 13 | 3 Rechts | Mitte (M) | 12,5 | 111 | 1.880 | 720 | 1.520 |
| 14 | 3 Rechts | M - 40 | 12,4 | 119 | 1.820 | 730 | 1.518 |
| 15 | 3 Rechts | M - 80 | 12,7 | 125 | 1.705 | 601 | 1.510 |
| 16 | 3 Rechts | M - 120 | 12,9 | 91 | 1.655 | 660 | 1.495 |
| 17 | 3 Rechts | M - 160 | 14,6 | 53 | 1.550 | 600 | 1.440 |
| 18 | 3 Rechts | M - 175 | 20,4 | 2 | 165 | 22 | 1.202 |
| | | | | | | | |

Tabelle 3.6: Messkampagne Dezember 2019 (Brennertyp 4)

| Nr. | Pos. Ofen | Pos. Sonde M - x cm | O ₂ Vol.-% | CO ppm | NO ppm | NO ₂ ppm | T _{Sonde} °C |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|-----------|-----------|------------------------|--------------------------|
| | | | | | | | |
| 1 | 1 Links | Mitte (M) | 9,5 | 180 | 2.715 | > 1.325 | 1.495 |
| 2 | 1 Links | M - 40 | 10,4 | 60 | 2.510 | > 1.325 | 1.458 |

| | | | | | | | |
|----|----------|-----------|------|-----|-------|---------|-------|
| 3 | 1 Links | M - 80 | 11,0 | 43 | 2.440 | > 1.325 | 1.410 |
| 4 | 1 Links | M - 120 | 12,5 | 32 | 2.375 | > 1.325 | 1.375 |
| 5 | 1 Links | M - 160 | 12,6 | 26 | 2.200 | > 1.325 | 1.360 |
| 6 | 1 Links | M - 175 | 13,9 | 20 | 2.180 | > 1.325 | 1.345 |
| | | | | | | | |
| 7 | 1 Rechts | Mitte (M) | 12,2 | 56 | 2345 | > 1.325 | 1.419 |
| 8 | 1 Rechts | M - 40 | 11,8 | 60 | 2470 | > 1.325 | 1.417 |
| 9 | 1 Rechts | M - 80 | 10,6 | 57 | 2530 | > 1.325 | 1.408 |
| 10 | 1 Rechts | M - 120 | 10,3 | 56 | 2520 | > 1.325 | 1.394 |
| 11 | 1 Rechts | M - 160 | 11,1 | 43 | 2430 | > 1.325 | 1.380 |
| 12 | 1 Rechts | M - 175 | 15,2 | 20 | 1680 | > 1.325 | 1.324 |
| | | | | | | | |
| 13 | 3 Rechts | Mitte (M) | 7,9 | 150 | 1905 | > 1.325 | 1.487 |
| 14 | 3 Rechts | M - 40 | 6,6 | 182 | 1935 | > 1.325 | 1.494 |
| 15 | 3 Rechts | M - 80 | 7,0 | 160 | 1880 | > 1.325 | 1.480 |
| 16 | 3 Rechts | M - 120 | 8,2 | 105 | 1750 | > 1.325 | 1.465 |
| 17 | 3 Rechts | M - 160 | 11,4 | 72 | 1530 | > 1.325 | 1.441 |
| 18 | 3 Rechts | M - 175 | 12,1 | 40 | 1510 | > 1.325 | 1.384 |
| | | | | | | | |

Die Langzeiterprobung des Vorwärmesystems und die Feststellung des Einflusses des Systems auf den Wannenbetrieb, konnten aufgrund der von Beginn an andauernden Schwierigkeiten mit den Brennersteinen nicht erfolgreich und abschließend durchgeführt werden. Bis zum Ende des Projektes konnte keiner der eingebauten Brenner/Steine die angesetzte Kaltphase (Betrieb ohne Vorwärmung) absolvieren, ohne dabei gravierende Einflüsse auf den Produktionsbetrieb zu nehmen. Der Produktionsbetrieb war vor allem durch die hohe Abnutzung der Brennersteine und der Zuverlässigkeit der Brenner gestört.

Trotz fortlaufender Abstimmung der Gemengezusammensetzung, Betriebsparameter, etc. mit dem Brennerlieferanten und dessen Steinlieferanten traten bis zum Schluss massive Probleme auf, die einem Heißbetrieb des Vorwärmesystems entgegenstanden.

Herausgestellt werden muss dabei, dass es sich bei den eingesetzten Preheating-Brennern der Fa. Hotwork um ausgereifte und bereits mehrfach im Einsatz befindliche Produkte handelt, die auch bei einem Vorprojekt bereits mehrere Jahre in einer Glasschmelzwanne im Einsatz waren.

Im Zuge der Heißbetriebnahme konnte über einen Zeitraum von ca. 1 Woche das Vorwärmesystem erfolgreich in Betrieb genommen und das Steuerungskonzept entsprechend angepasst und getestet werden. Aufgrund der Beständigkeitsprobleme und der damit einhergehenden Vermutung, dass dies die Ursache für die Schlierenproblematik, musste das Projekt, nach bereits mehrfacher Verlängerung, ohne abschließenden Langzeittest abgeschlossen werden.

3.5.3 AS 4.3 Auswertung und Analyse der Daten und Modifikation des Systems (UAS/GWI)

Die durchgeführten Modifikationen der Brennergeometrie und der Regelungstechnik sind in den vorherigen Kapiteln und Arbeitspaketen ausführlich beschrieben worden.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Messkampagnen kurz gegenübergestellt.

In den **Abbildungen 3.40 bis 3.42** sind die CO-, NO-Konzentrationen und die Temperaturen für die vorher erwähnten Messkampagnen gegenübergestellt. Die hier gezeigten Daten zeigen den Betrieb des Ofens und der Brenner ohne die Vorwärmeinheit.

Deutlich erkennbar ist beim bisherigen Rohr-in-Rohr-Brennersystem (Brennertyp 1), dass sowohl die CO-Emissionen als auch die NO_x-Emissionen deutlich über den Werten der neuen Brennern liegen, obwohl das Sauerstoffangebot bei allen untersuchten Brennertypen ähnlich ist. Dies deutet auf eine deutlich schlechtere Verbrennung hin und birgt die Gefahr, dass unverbrannte Bestandteile in die Kaminanlage gelangen.

Die Ofenraumtemperaturen sind für alle untersuchten Brennertypen relativ ähnlich. Ein klarer Trend zeichnet sich nicht ab. In Bezug auf die Verbrennungsqualität haben die neuen Brenner gegenüber den bisher eingesetzten Brennern einen deutlichen Vorteil. Klare straffe Flammen mit geringeren NO_x-Emissionen.

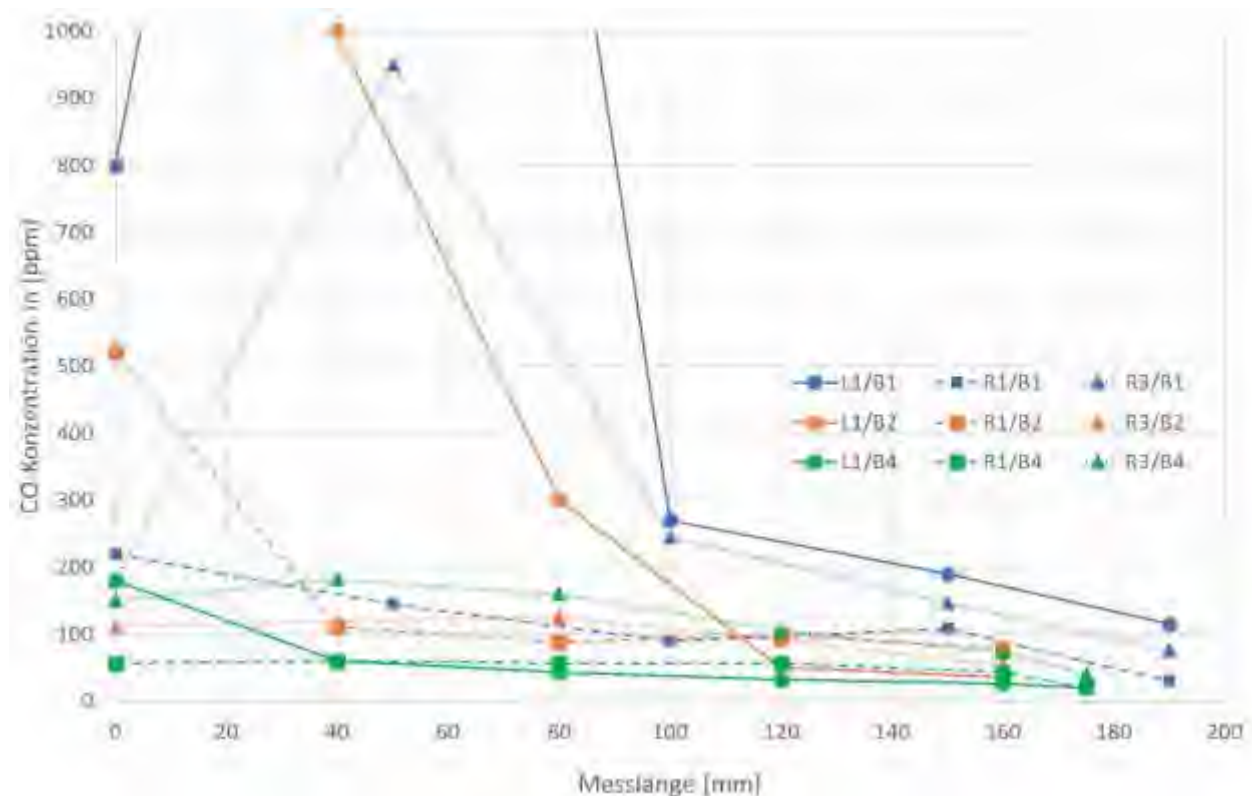


Abbildung 3.40: Gegenüberstellung der CO-Konzentrationen an den 3 Messpositionen für die 3 untersuchten Brennertypen, ohne Vorwärmung (Bezeichnung: L1/B1 = Messposition 1Links/Brennertyp 1) (Quelle: GWI)

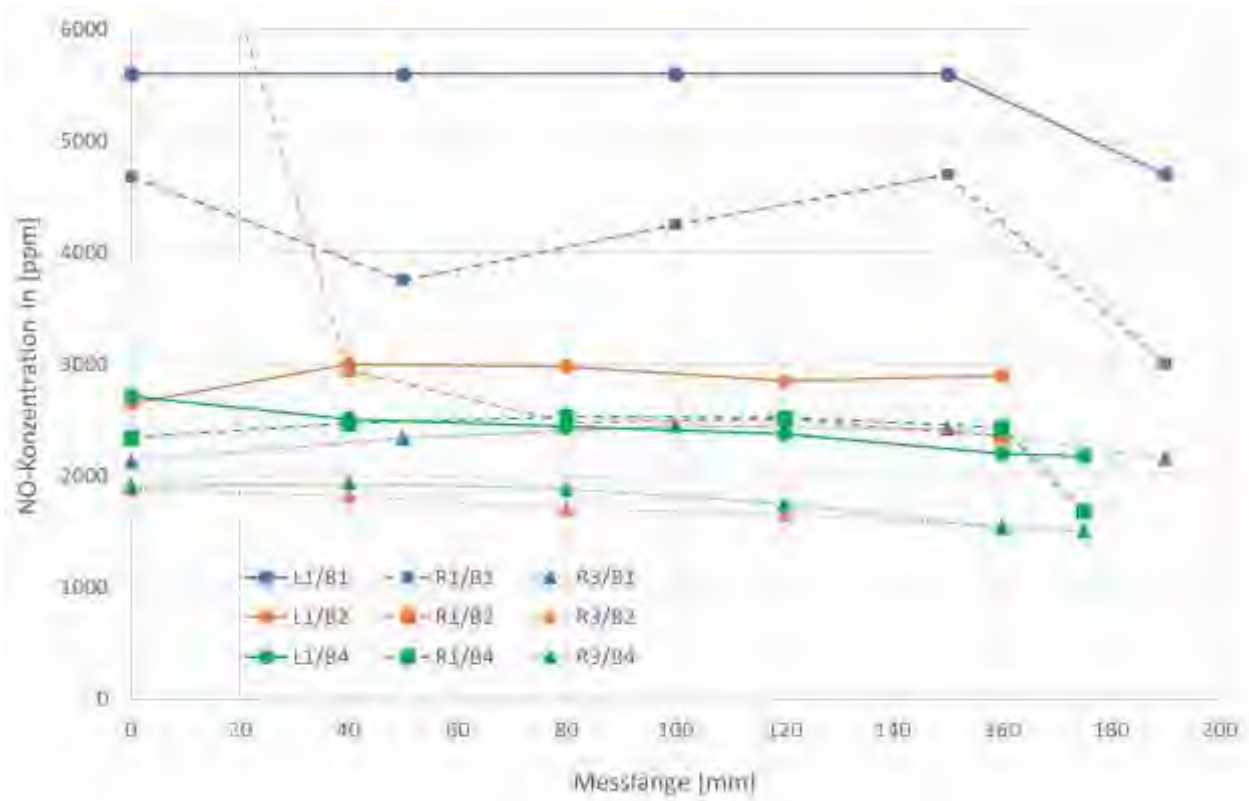


Abbildung 3.41: Gegenüberstellung der NO-Konzentrationen an den 3 Messpositionen für die 3 untersuchten Brenntypen, ohne Vorwärmung (Bezeichnung: L1/B1 = Messposition 1Links/Brenntyp 1) (Quelle: GWI)

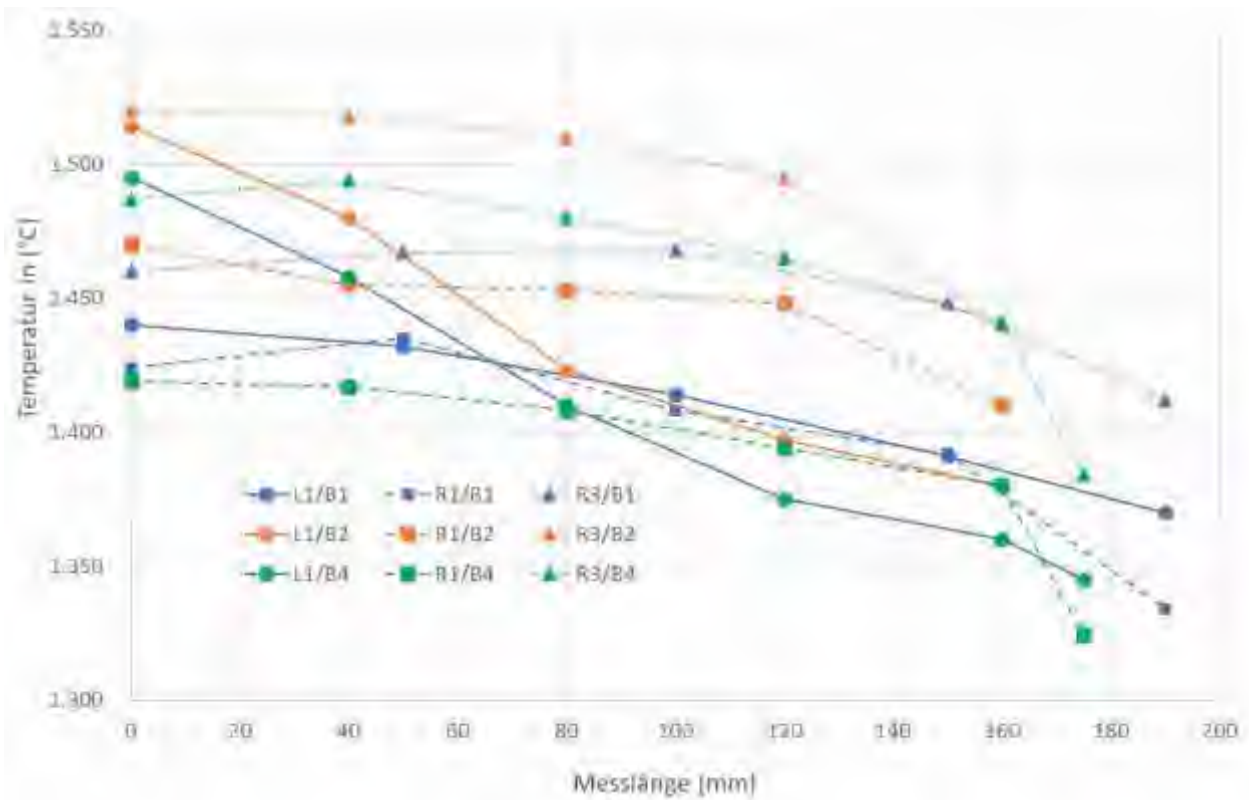


Abbildung 3.42: Gegenüberstellung der Temperaturen an den 3 Messpositionen für die 3 untersuchten Brenntypen, ohne Vorwärmung (Bezeichnung: L1/B1 = Messposition 1Links/Brenntyp 1) (Quelle: GWI)

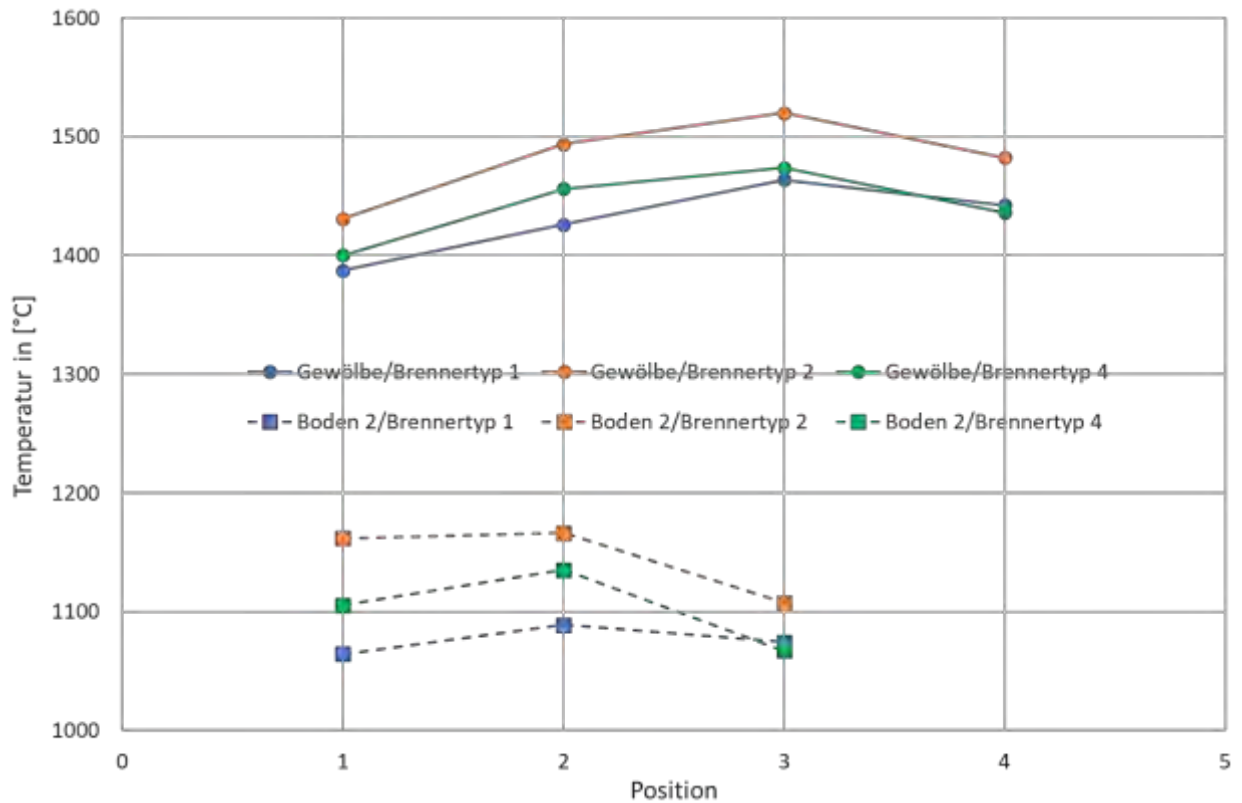


Abbildung 3.43: Gegenüberstellung der Gewölbe- und Bodentemperaturen für die 3 untersuchten Brennertypen, ohne Vorwärmung, Daten von Zwiesel Kristallglas (Quelle: GWI)

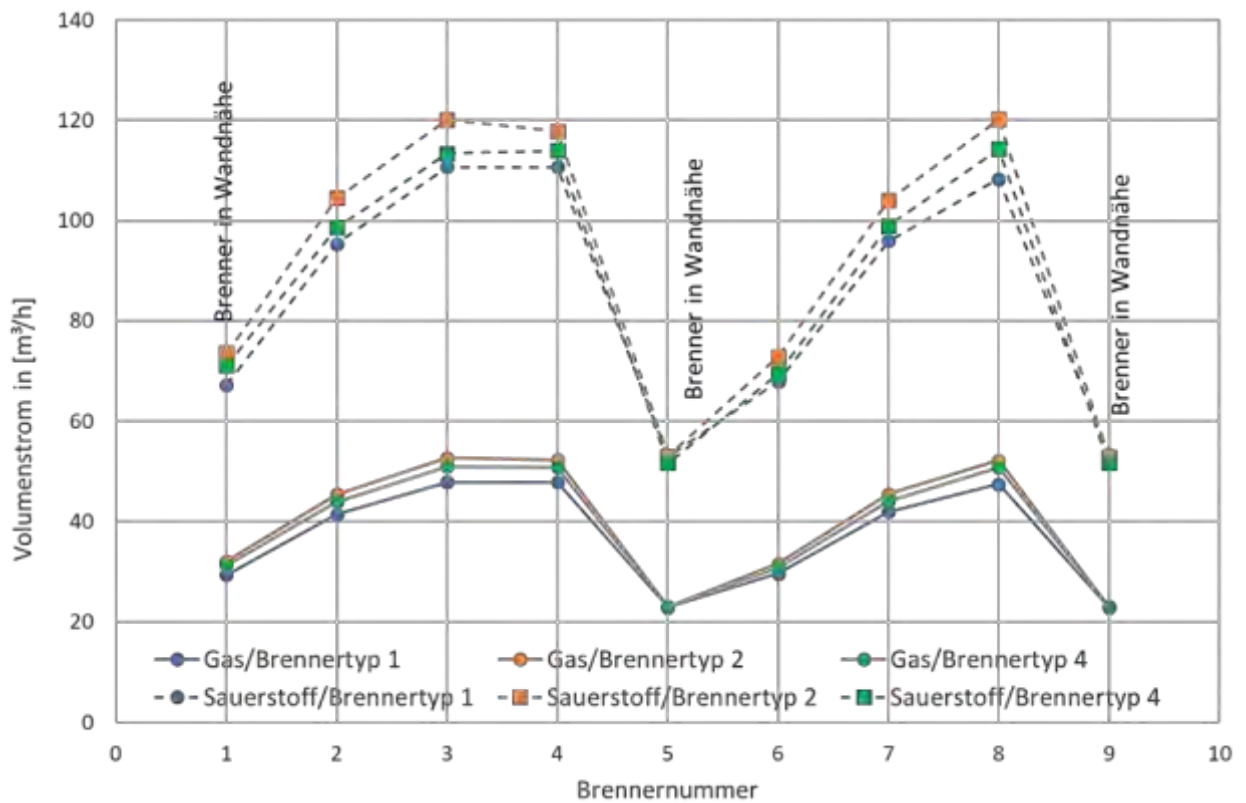


Abbildung 3.44: Gegenüberstellung Volumenströme Gas und Sauerstoff für die 3 untersuchten Brennertypen, ohne Vorwärmung, Daten von Zwiesel Kristallglas (Quelle: GWI)

In den **Abbildungen 3.43** und **3.44** sind die im Leitsystem der Firma Zwiesel Kristallglas erfassten Ofenraumtemperaturen sowie Gas- und Sauerstoffvolumenströme aufgeführt.

Diese Werte lassen sich jedoch nur bedingt miteinander vergleichen, da während der jeweiligen Messkampagnen unterschiedliche Tonnagen und Scherbengehalte gefahren wurden.

Da wie zuvor erläutert ein Heißversuch nicht möglich war, werden der Vollständigkeit halber die Energiebilanzen der numerischen Simulation hier kurz beispielhaft für den Brennertyp 4 dargestellt. In **Tabelle 3.7** sind die prozentualen Änderungen der Energiebilanzen im Vergleich zum Referenzfall (Brennertyp 1, 100 %) für die untersuchten Szenarien (ohne Vorwärmung (V1), mit Vorwärmung und nichtangepasster Brennerleistung (V2) und mit Vorwärmung und angepasster Brennerleistung (V3)) aufgeführt.

Tabelle: 3.7: Änderungen der Energiebilanz der numerischen Simulation für Brennertyp 4 im Vergleich mit dem Referenzfall und den drei untersuchten Szenarien

| | Referenz | V1 | V2 | V3 |
|------------------------|----------|--------|--------|--------|
| Brennstoff | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 96,50 |
| Vorwärmung | 0,00 | 0,00 | 3,50 | 3,50 |
| eingebraachte Leistung | 100,00 | 100,00 | 103,50 | 100,00 |
| | | | | |
| Abgas | 100,00 | 99,76 | 100,97 | 96,86 |
| Wände | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| Glasbad | 100,00 | 101,90 | 105,75 | 101,67 |

Die hier untersuchte Brennstoffeinsparung liegt bei 3,5 %. Dies spiegelt sich auch in den entsprechenden Abgasverlusten wider. Die Wärmeübertragung ins Glasbad scheint schon im Fall einer geänderten Brennergeometrie und damit einer optimaleren Flammgeometrie anzusteigen, dies wird auch durch die Messwerte gezeigt. Wenn dies jetzt noch mit der Brennstoffvorwärmung gekoppelt wird, sind theoretisch 5 % und mehr Energieeinsparung möglich. Dies mit dem reduzierten Sauerstoffverbrauch durch den reduzierten Brennstoffeinsatz und dem damit verbundenen Energieverbrauch gekoppelt, zeigt weitere Einsparpotenziale auf.

Die zeitnah anstehenden Langzeitversuche werden die genaue Größenordnung der Energieeinsparung anhand von realen Daten belegen.

3.5.4 AS 4.4 Erarbeitung von Handlungsempfehlungen (UAS/GWI)

Die Ableitung von Handlungsempfehlungen lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt nur bedingt vornehmen, da wie vorher ausführlich erläutert, der Betrieb mit Vorwärmeinheit nicht vollumfänglich realisiert werden konnte.

Die bisherigen Tests, Versuche, Inbetriebnahmen der Vorwärmeinheit an sich haben aber gezeigt, dass die eigentliche Vorwärmeinheit einschließlich des erarbeiteten Steuerungs- und Regelungskonzeptes sowie der umgesetzten Abgasrückführung einwandfrei arbeitet und den Anforderungen der Glasindustrie entspricht.

Die Wärmeübertragung aus dem Abgas an die Medien Brenngas und Sauerstoff funktioniert auch im Industriebetrieb.

Folgende Aspekte lassen sich aus den bisherigen Arbeiten ableiten:

- Das Brennerdesign muss an die Wanne und das verwendete Glasgemenge angepasst werden und ist für eine erfolgreiche Umsetzung maßgeblich.
- Das Brennersteinmaterial muss an die Glasgemengezusammensetzung individuell angepasst werden.
- Das System muss kompakter gebaut werden, um Bauraum und Stellfläche bei der Aufstellung der Anlage vor Ort zu minimieren. Der Zusammenbau erfolgte aktuell in Einzelteilen.
- Mit der neuen Brennergeometrie (Brennertyp 4) ist eine Reduktion der NO_x-Emissionen realisiert worden.

Die folgenden Schritte werden zeitnah von den Partnern umgesetzt, um die vollständigen Ziele des Projektes, wenn auch außerhalb der Projektlaufzeit, zu erreichen:

- Aktuell wird ein neues Brennerdesign entwickelt, das den besonderen Bedürfnissen und Anforderungen der Zwiesel Kristallglas entspricht.
- Anschließend wird das Vorwärmssystem im kalten Zustand und dann im Vorwärmmodus in Betrieb genommen.
- Abschließend werden im Rahmen von Langzeittests die Beständigkeit der Komponenten (z. B. Abgasrücksaugung) untersucht, die bisher nicht vollständig geprüft und getestet werden konnten.
- Weiterhin wird dann die erreichbare Energieeinsparung anhand von Betriebsdaten validiert.

5 Fortschreibung des Verwertungsplans

5.1 Schutzrechtsanmeldungen

Es wurden während der Projektlaufzeit keine Patente angemeldet.

5.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das System der kombinierten Vorwärmung von Brennstoff und Sauerstoff funktioniert. Anhand der numerischen Simulationen der untersuchten Glasschmelzwanne und ersten Tests an Versuchsofen konnte eine deutliche Energieeinsparung von ca. 5 % nachgewiesen werden. Die Umsetzung und Implementierung der Vorwärmeinheit sowie einer angepassten Steuerungs- und Regelungstechnik an einer Industrieanlage ist erfolgt. Nach der erneuten Anpassung des Brennerdesigns werden die Langzeitversuche an der Glasschmelzwanne der Firma Zwiessel Kristallglas final durchgeführt.

Aktuell sind mehrere Anlagen bei der Firma UAS angefragt und werden nach erfolgreichem Test zeitnah umgesetzt werden. Diese Umsetzung sollte innerhalb von 2 Jahren erfolgt sein. Die Glasindustrie umfasst eine Vielzahl von klein- und mittelständischen Betrieben, die im Rahmen der Diskussionen der Energiewende bestrebt sind, ihre Anlagen energieeffizienter und damit ein Stück weit CO₂-reduzierter zu betreiben. Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen einerseits die Schwierigkeiten der Umsetzung der kombinierten Vorwärmung von Brennstoff und Sauerstoff im hochkomplexen System „Glasschmelzwanne“, das Zusammenspiel der verschiedensten Faktoren (Glasgemenge (Einsatzstoffe), Feuerfestmaterial, Temperatur und Atmosphäre im Ofenraum, erreichbare Produktqualität, effiziente Wannenfahrweise, usw.), die zu beachten sind, aber auch die Möglichkeiten eine ohnehin schon effiziente Oxy-Fuel-Glasschmelzwanne noch energieeffizienter zu betreiben.

Oxy-Fuel-Verbrennungssysteme kommen auch in Hochtemperaturbereichen anderer Industriebranchen zum Einsatz, z. B. in der Stahl- (z. B. Elektrolichtbogenöfen, Pfannenfeuer) und NE-Metallindustrie (z. B. Sekundäraluminium- und Silberschmelzöfen) zum Einsatz. Auch bei diesen Anwendungen wird die im Abgas enthaltene Wärme meist nicht weiter genutzt. Mit der im Rahmen dieses Projektes weiterentwickelten Vorwärmeinheit sowie dem dazugehörigen Steuer- und Regelungskonzept können auch in diesen Branchen weitere Einsparpotenziale erschlossen werden. Dass Firmen aus diesen Industriezweigen an dieser Technologie interessiert sind, zeigen zahlreiche Anfragen aus dem Stahl- und Aluminiumbereich. Nach Anpassung des Systems an die entsprechenden Anforderungen dieser Industriezweige ist eine Umsetzung innerhalb der nächsten 4 Jahre geplant.

5.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit wurden erste Ergebnisse auf folgenden Tagungen/Messen/Konferenzen vorgestellt und veröffentlicht:

- Projektsteckbrief auf der GWI-Homepage: [http://gwi.wvgw-config.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe_lfd_Projekte/Jahr_2017/Steckbrief_Oxy -
Vor 2. Phase .pdf](http://gwi.wvgw-config.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe_lfd_Projekte/Jahr_2017/Steckbrief_Oxy_-_Vor_2_Phase.pdf)
- Zwieseler Fachschulkolloquium 2018, 07./08.05.2018: „Effizienzsteigerung durch Gas- und Sauerstoffvorwärmung an einer Oxyfuel-Schmelzwanne“

Nach der Projektlaufzeit geplante Veröffentlichungen:

- Veröffentlichung des Abschlussberichtes auf den Homepages der Forschungspartner UAS und GWI
- Glasstec Messe, Juni 2021 in Düsseldorf
- Nach Vorliegen der finalen Ergebnisse des Langzeittests Veröffentlichung in den Zeitschriften Glass International, Prozesswärme, heat processing, glass worldwide,

6 Danksagung

Die Autoren danken dem Projektträger DLR und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die fachliche und finanzielle Unterstützung des Projektes. Weiterhin möchten wir der Zwiesel Kristallgas AG und ihren Mitarbeitern für die tatkräftige Unterstützung bei der Realisierung des Projektes danken.

7 Literatur

- [1] Lindig, M., "The challenge of conventional furnace design," *Glass*, vol. 81, no. 9, 2004.
- [2] Pfeifer, H., Högner, W., Fredriksson, P., von Scheele, J., Paul, R., "Energieeffizienz und Minderung des CO₂-Ausstoßes durch Sauerstoffverbrennung," *stahl und eisen*, vol. 129, no. 8, pp. 51–62, 2009.
- [3] Niemi, T., "Increased Efficiency in Heating: State-of-the-Art Oxyfuel Combustion," in *Proceedings of the Finnish Flame Days*, 2009, [Online]. Available: http://www.ffrc.fi/FlameDays_2009/NiemiPaper.pdf.
- [4] Baukal, C.E., Jr., Ed., *Oxygen-Enhanced Combustion*. CRC Press, 1998.
- [5] Ross, C. P., Tincher, G. L., Rasmussen, M., "Glass Melting Technology: A Technical and Economic Assessment," Glass Manufacturing Industry Council / U.S. Department of Energy- Industrial Technologies Program, USA, #DE-FC36-021D14315, 2004. [Online]. Available: [/oxyfuel/Glass melting tech assessment_GMIC_2004](#).
- [6] Gas- und Wärme-Institut Essen e. V., Ed., *gwi-Arbeitsblätter*. Essen: Vulkan-Verlag, 2012.
- [7] Kremer, H., "The Effect of Oxygen Enrichment on Radiative Heat Transfer, Fuel Efficiency and NO_x Emissions," presented at the TOTeM17: "The Use of Oxygen for Industrial Combustion," Cernay la Ville, Frankreich, 2000, [Online]. Available: [/Literatur/Oxy-Fuel/TOTeM17/The Effect of Oxygen Enrichment on Radiative Heat Transfer, Fuel Efficiency and NOx Emissions - Kremer.pdf](#).
- [8] Wüning, J. G., Milani, A., *Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen - Grundlagen, Brennertechniken, Anwendungen*, 2nd ed. Essen: Vulkan-Verlag, 2011.
- [9] Contino, A., Douchamps, O., Behen, J., "Combustion in glass furnaces: recent developments and next challenges," presented at the 21st "Journées d'études" (JDE) of the Belgian Section of the Combustion Institute, Liège, Belgien, 2010, [Online]. Available: http://www.oxyfuel-heatrecovery.com/file/otherelement/pj/10-05-11-cci_conference_agc&al143972.pdf.
- [10] Pont, R.S., "History and Evolution of Clean Efficient Firing Techniques for Glass Melting Furnaces," presented at the 10th International Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB10), Porto, Portugal, 2015.
- [11] "Alternative Control Techniques Document - NO_x Emissions from Glass Manufacturing," Environmental Protection Agency (EPA), Research Triangle Park, USA, EPA-453/R-94-037, 1994. [Online]. Available: <http://www3.epa.gov/ttnatc1/dir1/glassact.pdf>.
- [12] von Schéele, J., Gartz, M., Paul, R., Lantz, M. T., Riegert, J. P., Söderlund, S., "Flameless oxyfuel combustion for increased production and reduced CO₂ and NO_x emissions," *stahl und eisen*, vol. 128, no. 7, pp. 35–40, 2008.
- [13] Spoljaric, D., Palmaj, G., "Reducing emissions and improving energy efficiency by oxy-fuel fired glass melting technology: Experiences, Limits and Expectations," presented at

- the Glassman, Türkei, 2011, [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/view/11660196/reducing-emissions-and-improving-energy-glassman-events>.
- [14] Fleischmann, B., "Verbrennungstechnisch bedingte Schwefelmissionen," in *Effiziente Verbrennungstechnik für die Glasindustrie*, Offenbach: Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V., 2011, pp. 187–191.
- [15] Kobayashi, H., "Advances in Oxy-Fuel Fired Glass Melting Technology," presented at the 20th International Congress on Glass (ICG), Kyoto, Japan, 2004.
- [16] Schep, J. J., "A decade of oxy-fuel glass melting in The Netherlands," presented at the Séminaire d'Institut du Verre, Glasstec, 2002, [Online]. Available: [/literatur/oxy-fuel/10yrs_oxyfuel_NL](#).
- [17] "A Clear Future - UK glass manufacturing sector decarbonisation roadmap to 2050," British Glass, 2014.
- [18] Joumani, Y., Tsiava, R., Leroux, B., Douxchamps, O., Contino, A., "Alglass Heat recovery: an advanced Oxy-combustion technology with heat recovery for glass furnaces makes sustainable performances," *verre*, vol. 16, no. 5, pp. 19–24, 2010.
- [19] Kobayashi, H., Wu, K. T., Bell, R.L., "Thermochemical Regenerator: A High Efficiency Heat Recovery System for Oxy-Fired Glass Furnaces," presented at the 1st Joint Meeting DGG-ACerS GOMD, Aachen, 2014.
- [20] Rue, D., Kurek, H., Khinkis, M., Kozlov, A., "Thermochemical Recuperation for Heat Recovery," presented at the ACerS GOMD, Tuscon, USA, 2008.
- [21] "HotOxyGlass," LIFE07 ENV/F/000179. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE07_ENV_F_000179_LAYMAN.pdf.
- [22] Kang, T., Noel, M., Paubel, X., Jarry, L., Arzan, N., Goruney, T., Orhan, B., Caglayan, E., "Environmental assessment of reactant preheating technology - Impact on reduction of NOx, CO2 and dust emission," presented at the 90. Glastechnische Tagung der DGG, Goslar, 2016.
- [23] Jarry, L., Paubel, X., Kang, T., Görüney, T., Arzan, N., "Combustion with oxygen and natural gas preheated at high temperature: latest results and new development," presented at the 2017 ICG Annual Meeting & 32nd SISECAM Glass Symposium, Istanbul, Türkei, 2017.
- [24] Jarry, L., "Combustion Technologies and models helping carbon neutrality," presented at the GlassTrend Seminar "How to face the technological challenges of the Paris climate agreement?," Marktheidenfeld/Würzburg, 2018.
- [25] "Flat glass furnace operating with preheated oxygen and natural gas," presented at the 12th ESG Conference, Parma, Italien, 2014, [Online]. Available: <http://www.agc-hoxygas.eu/14GT.pdf>.
- [26] van Limpt, H., Suarez-Barcena, A., de Wit, E., "Glass production dedicated Thermo Chemical Recuperator - Thermo-Chemical-Recuperator Technology: A big step towards

- energy efficient glass melting,” presented at the 1st Joint Meeting DGG-ACerS GOMD, Aachen, 2014.
- [27] Iyoha, U., Wu, K., Laux, S., Kobayashi, H., de Diego, J., “Improved Furnace Energy Efficiency with OPTIMELT Thermochemical Regenerator System,” presented at the Glassman Europe 2015, Lyon, Frankreich, 2015, [Online]. Available: <http://www.glassmanevents.com/europe/conference>.
- [28] Huuskes, G., Wijbenga, G., Laux, S., Kobayashi, S., Chakravarti, S., “OPTIMELT - Innovative Heat Recovery Technology Put into Practice,” presented at the Linde-Expertenforum “Glas,” Dessau, 2019.
- [29] Brune, M., “Entwicklung und Optimierung von Oxy-Fuel-Rekuperatorbrennern,” Abschlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 13319 N.
- [30] Flamme, M., Brune, M., Haep, J., Kremer, H., “NO_x-Emission bei der Erdgasverbrennung mit sauerstoffangereicherter Verbrennungsluft,” Gaswärme-Institut e. V. Essen, Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 8571.
- [31] “Untersuchung zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Wärmeübertragung einer Oxy-Fuel-Glasschmelzwanne - ‘O₂-Glaswanne,’” Essen, Abschlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 15987 N, 2012.
- [32] MacLean, S., Leicher, J., Giese, A., Irlenbusch, J., “NO_x-arme Nutzung von Oxy-Fuel-Verbrennung mit stark N₂-haltigem Sauerstoff in der NE-Metallurgie,” *Gaswärme International*, no. 04, pp. 85–92, 2012.
- [33] Al-Halbouni, A., Benim, A.C., Giese, A., “Entwicklung eines effizienten, schadstoff- und pulsationsarmen Überschall-Sauerstoff-Öl-/Gasbrenners für energieintensive Industrieanwendungen,” Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Essen, Abschlussbericht, 2014.
- [34] Leicher, J., Giese, A., Bomba, V., Rogg, B., Wollny, P., Wlokas, I., Kempf, A., Tröger, J.W., Seeger, T., “Verbesserung der mathematischen Modellierung von Oxy-Fuel-Feuerungsprozessen in der thermischen Verfahrenstechnik (O₂-HTVT),” Essen, Abschlussbericht IGF-Nr. 17838 N, 2016.
- [35] “DIN EN 746.2: 2011-02: Industrielle Thermoprozessanlagen - Teil 2: Sicherheitsanforderungen an Feuerungen und Brennstoffführungssysteme; Deutsche Fassung EN 746-2:2010,” Norm.