



Gemeinsamer Abschlussbericht zum DBU- Forschungsprojekt

Kombinierte Gas- und Sauerstoff-Vorwärmung zur Effizienzsteigerung
und CO₂-Einsparung an Oxy-Fuel-Glasschmelzwannen – 1. Phase

Projekttitel: Oxy-Vor

Berichtszeitraum: 08.12.2015 – 07.06.2017

Aktenzeichen: 32079/01-24/2

Datum: 14.09.2017

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

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

Forschungsinstitut,
eingetragener Verein

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|---|
| 1 | Zusammenfassung | 3 |
| 2 | Einleitung | 4 |
| 2.1 | Ausgangssituation | 4 |
| 2.2 | Zielsetzung | 5 |
| 3 | Ergebnisse | 7 |
| 3.1 | AS 1 Auslegung und experimentelle Untersuchung einer kombinierten Gas- und Sauerstoffvorwärmung (UAS/GWI) | 7 |
| 3.1.1 | AS 1.1 Auswahl einer realen Glaswanne (UAS) | 7 |
| 3.1.2 | AS 1.2 Kinetische und numerische Berechnungen (GWI/UAS) | 7 |
| 3.1.3 | AS 1.3 Bau eines Prototyps des Vorwärmers(UAS) | 10 |
| 3.1.4 | AS 1.4 Experimentelle Untersuchung des Prototyps am GWI-Ofen (GWI/UAS) | 12 |
| 3.2 | AS 2. Numerische Untersuchung der Vorwärmmodule am GWI-Ofen und der ausgewählten Glasschmelzwanne (GWI/UAS) | 21 |
| 3.2.1 | AS 2.1 Detaillierte Vermessung der ausgewählten Glaswanne (GWI/UAS) | 21 |
| 3.2.2 | AS 2.2 CFD-Simulation des GWI-Ofens (GWI) | 22 |
| 3.2.3 | AS 2.3 CFD Simulation der ausgewählten Glasschmelzwanne ohne Vorwärmersystem (GWI) | 29 |
| 3.2.4 | AS 2.4 CFD Simulation der ausgewählten Glasschmelzwanne mit Vorwärmersystem (GWI) | Fehler! Textmarke nicht definiert. |
| 3.2.5 | AS 2.5 Modifikation der Brennersysteme und Analyse der Regel- und Steuerungskette (GWI/UAS) | 35 |
| 4 | Fazit | 37 |
| 5 | Literatur | 38 |

1 Zusammenfassung

Die Verbrennung mit reinem Sauerstoff als Oxidator stellt neben einer Luftvorwärmung eine Alternative dar, mit der fossile Brennstoffe eingespart und somit CO₂-Emissionen reduziert werden können. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass für die Bereitstellung von Sauerstoff ebenfalls Energie benötigt wird. Gerade für die Glasindustrie mit ihren prozessbedingt sehr hohen Schmelztemperaturen ist die Oxy-Fuel-Verbrennung eine sinnvolle und kostengünstige Alternative. Jedoch gewinnt der Einsatz von reinem Sauerstoff als Oxidator auch in anderen Industriezweigen, wie der Stahl- und NE-Metallindustrie, immer mehr an Bedeutung. Gründe hierfür sind u. a. die deutlich höhere Flexibilität in der Anlagenfahrweise bzgl. Schmelzleistung, die reinere Atmosphäre, gerade für spezielle Produkteigenschaften sowie die niedrigeren Schadstoffemissionen (Voraussetzung keine Falschlufzugabe).

In luftbefeugten Anlagen wird die im Abgas enthaltene Wärme in den meisten Fällen zum Vorwärmen der Luft, der Rohstoffe oder in anderen Prozessschritten (z. B. zur Dampferzeugung oder für Trocknungsprozesse) genutzt, um so Energie und damit Brennstoff einzusparen. Brennstoff wird in den meisten Fällen nicht vorgewärmt, da die damit erreichbare Energieeinsparung gegenüber einer Luftvorwärmung deutlich niedriger ausfällt und mit einem höheren Aufwand verbunden ist. Bei der Oxy-Fuel-Verbrennung ist eine Nutzung der Abgaswärme nicht Stand der Technik. Im Gegenteil, meist wird das Abgas durch Zumischung von Luft bewusst runtergequenchet, um die nachgeschalteten Abgasreinigungsanlagen nicht zu gefährden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollten die Möglichkeiten und Auswirkungen einer kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung an einer Glasschmelzwanne untersucht werden. Dazu wurde im ersten Schritt die Vorwärmeinheit ausgelegt und gebaut. Anschließend wurden die erreichbaren Brennstoffeinsparungen, die möglichen Auswirkungen auf die Wärmeübertragung, das Schadstoff- und das Strömungsverhalten durch Untersuchungen an einem semi-industriellen Versuchsofen näher betrachtet. Daraus wurden die Auslegungskriterien für den einzusetzenden Brenner abgeleitet. Im letzten Arbeitsschritt dieses Projektes wurden die Auswirkungen und Möglichkeiten der Umsetzung der Oxy-Fuel-Vorwärmung an einer realen Anlage mit Hilfe numerischer Simulationen untersucht.

Anhand der Messungen am semi-industriellen Versuchsstand wurde gegenüber der theoretisch berechneten Brennstoffeinsparung von knapp 5 % eine Brennstoffeinsparung von 8 % bei einer Vorwärmtemperatur von 380 °C erreicht. Durch die moderate Erhöhung der adiabaten Verbrennungstemperatur von gerade mal 35 K bei dieser Vorwärmtemperatur sind die Auswirkungen auf das Wärmeübertragungs- und Schadstoffverhalten ebenfalls als gering anzusehen. Der Einfluss auf das Strömungsverhalten kann durch den eingesetzten Brenner kompensiert werden. Die numerischen Untersuchungen der Umsetzung der Vorwärmung an der realen Anlage unterstreichen diese Aussage.

In einer weiteren Phase des Projektes wird die Umsetzung der kombinierten Oxy-Fuel-Vorwärmung an der untersuchten Anlage realisiert. Dieses Nachfolgeprojekt wird vom Projektträger DLR im Rahmen des Förderprogramms „KMU Innovativ“ vom Ministerium für Bildung und Forschung unter der Fördernr.: 01LY1603A und 01LY1603B gefördert.

2 Einleitung

2.1 Ausgangssituation

Glas ist ein Werkstoff, der aus dem täglichen Leben nicht wegzudenken ist und durch seine Eigenschaften in allen Bereichen (z. B. Lebensmittel, Medizin, Bauwesen, Verkehr, Kommunikation, Haushalt, Verpackung, aber auch im Energiesektor) eine große Rolle spielt. Das Schmelzen und Herstellen von Glas zählt zu den energieintensiven Industrien. In Europa ist Deutschland der größte Glasproduzent.

Im Gegensatz zu Glasschmelzwannen mit klassischer Erdgas-Luftverbrennung, bei denen rekuperative oder regenerative Luftvorwärmung (siehe **Abbildung 2.1**) als Stand der Technik gelten kann, wird bei Oxy-Fuel-Anlagen (anstelle von Luft kommt als Oxidator reiner Sauerstoff (Oxygen) zur Anwendung) die im Abgas enthaltene Wärme derzeit nicht weiter genutzt, wodurch ein nicht unerheblicher Anteil an Energie dem Prozess verloren geht.

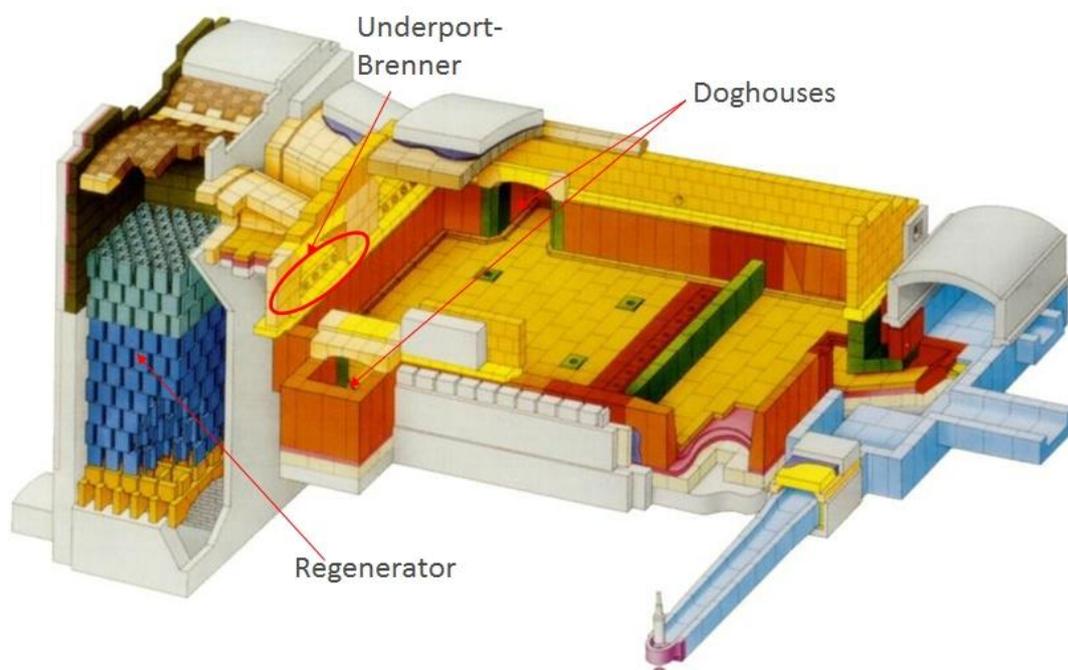


Abbildung 2.1: Darstellung einer regenerativen U-Flammenwanne [1]

Bisher betragen die Abgaswärmeverluste bei einer Oxy-Fuel-Glasschmelzwanne etwa 30 % der eingebrachten Energie. Hinzu kommt, dass das Abgas häufig bewusst abgekühlt wird, um niedrigere Temperaturniveaus für nachgeschaltete Filteranlagen sicherzustellen. Hier besteht erhebliches Potential für weitere Wirkungsgradsteigerungen. Dies wird anhand der **Abbildung 2.2** deutlich.

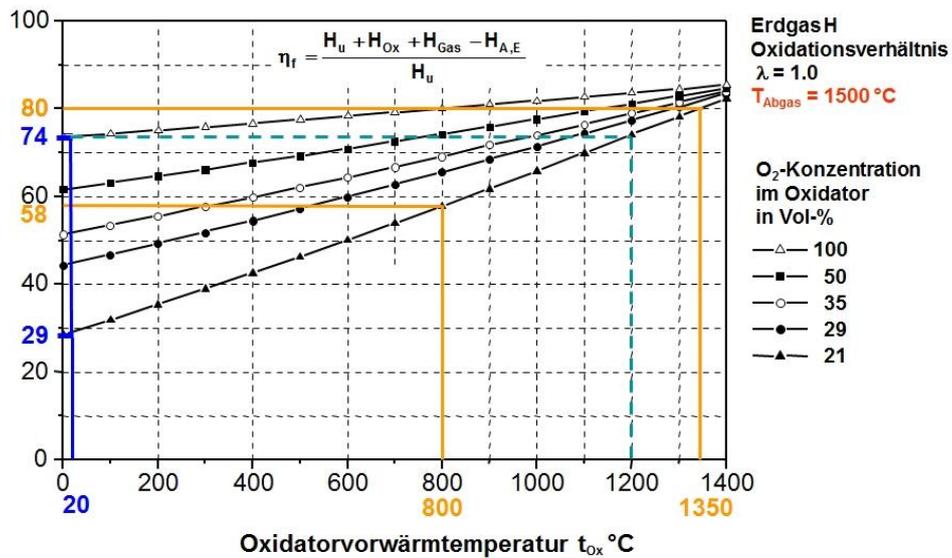


Abbildung 2.2: Zusammenhänge zwischen Oxidator-Vorwärmtemperatur, Sauerstoffgehalt und feuerungstechnischem Wirkungsgrad [2]



Abbildung 2.3: Modul Sauerstoff-Brennstoff-Vorwärmung (Quelle: UAS Messtechnik GmbH)

2.2 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieses Projektes ist die Untersuchung und Vorbereitung Integration einer kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung an einer Bestandsanlage und die Neukonzipierung und Einstellung einer Regelungsstrecke für das integrierte Vorwärmssystem, 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 thermisch Belastungen am Feuerfestmaterial zu minimieren. Dadurch soll insgesamt der spezifische Energieverbrauch an einer Oxy-Fuel-Glasschmelzwanne weiter gesenkt werden. Hierfür hat die Fa. UAS ein System entwickelt, 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 Temperaturen sind zwar möglich aber nicht zielführend, da beim Brennstoff der Crackvorgang bereits bei Temperaturen knapp über 400 °C beginnt, was zu sicherheitstechnischen Problemen an den Wärmetauschern und Armaturen führt. Bei Sauerstoffvorwärmtemperaturen $> 400\text{ °C}$ spielt die Werkstoffauswahl eine große Rolle. Für die Leitungen und Armaturen müssen dann Spezialstähle oder Keramiken eingesetzt werden, was zu unverhältnismäßig hohen Kosten führt und eine sinnvolle Amortisation der Anlagen nicht mehr möglich macht. Nachweislich ergeben sich, aus der hier vorgeschlagenen kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung, deutliche Einsparungen an Brennstoff, Sauerstoff und Minimierung der CO_2 -Emissionen.

Bei den weiterführenden Untersuchungen des entwickelten Prototyps des Vorwärmers von der Fa. UAS sollen eine Reihe von Fragen bzgl. der geänderten Wärmeübertragung durch die auftretenden Auswirkungen auf die Flammenform und -temperaturen (z. B. Verlagerung des „hot spots“) und der sich durch die Brennstoff- und Sauerstoffeinsparung ergebenden Änderungen der Strömungsverhältnisse im Oberofen der Glaswanne geklärt werden. Darauf aufbauend muss eine Anpassung der Brennergeometrie und -positionierung bei bestehenden Anlagen analysiert werden. Das Hauptaugenmerk der geplanten Arbeiten liegt in der Untersuchung des Einflusses der Vorwärmung auf die Verbrennung, einschließlich Abgasentstehung und der optimierten Prozessführung durch Anpassung der Steuerungs- und Regelungskette auf verschiedene Betriebsbedingungen. Weiterhin sollen die Auswirkungen und Risiken der Vorwärmung z. B. auf die Glasqualität und den Ofenraum (Feuerfestmaterial) ermittelt werden.

Wie bereits oben aufgeführt, ist das Vorwärmersystem so konzipiert, dass flexibel und vollautomatisiert unterschiedliche Vorwärmtemperaturen gefahren werden können. Ein Umschalten von „heiß“ auf „kalt“ ist beispielsweise notwendig, wenn am Vorwärmer eine Leckage festgestellt wird oder Wartungsarbeiten durchgeführt werden. Weiterhin kann durch die Variierung der Vorwärmtemperaturen das notwendige Temperaturprofil der Wanne geregelt werden, wodurch die Homogenisierung der Schmelze positiv beeinflusst wird, was zu einer Verbesserung der Glasqualität führt.

3 Ergebnisse

3.1 AS 1 Auslegung und experimentelle Untersuchung einer kombinierten Gas- und Sauerstoffvorwärmung (UAS/GWI)

3.1.1 AS 1.1 Auswahl einer realen Glaswanne (UAS)

Für die geplanten Untersuchungen der kombinierten Brennstoff-Sauerstoff-Vorwärmung konnte die Firma Zwiesel Kristallglas AG in Zwiesel gewonnen werden. Eine Abbildung der untersuchten Wanne ist in **Abbildung 3.1** zu sehen.



Abbildung 3.1: Glasschmelzwanne der Fa. Zwiesel Kristallglas AG

3.1.2 AS 1.2 Energetische Berechnungen und Auslegung des Prototypen (GWI/UAS)

In diesem Arbeitsschritt wurden erste Berechnungen der Auswirkung der Oxy-Fuel-Vorwärmung auf die Flammentemperatur, die Brennstoffeinsparung und den feuerungstechnischen Wirkungsgrad im Vergleich zu einer Luft-Brennstoff-Flamme mit und ohne Vorwärmung durchgeführt. In **Tabelle 3.1** sind die adiabaten Flammentemperaturen der dabei betrachteten Fälle gegenübergestellt. Als Brennstoff wurde reines Methan bei einer Luftzahl von 1,15 betrachtet.

Tabelle 3.1: Berechnete adiabate Flammentemperaturen für Luft und Sauerstoff als Oxidator für reines Methan und $\lambda = 1,15$

| Oxidator | Vorwärmtemperatur °C | adiabate Flammentemperatur bei Luftzahl 1,15 °C |
|------------|-------------------------|---|
| Luft | 20 | 1.821 |
| | 380 | 2.005 |
| | 600 | 2.101 |
| | 1200 | 2.329 |
| Sauerstoff | 20 | 2.760 |
| | 170 | 2.774 |
| | 380 | 2.795 |

Der Anstieg der adiabaten Verbrennungstemperatur fällt im Fall der Sauerstoffvorwärmung auf 380 °C (Differenz zum nicht vorgewärmten Zustand: 35 K) deutlich geringer aus, als bei einer vergleichbaren Luftvorwärmung (Differenz zum nicht vorgewärmten Zustand: 184 K).

Um die erreichbaren Brennstoffeinsparungen (Gl. 3.8) und Änderungen des feuerungstechnischen Wirkungsgrades (Gl. 3.9) abschätzen zu können, ist der folgende theoretische Fall betrachtet worden. Für alle dargestellten Varianten ist davon ausgegangen worden, dass immer ein konstanter Wärmeeintrag in ein Wärmegut und die Wände erfolgt. Der Brennstoffeinsatz ist daraufhin bei konstant bleibender Luftzahl angepasst worden. Die Wärme im Abgas variiert entsprechend. Die Bilanzgrenze für den feuerungstechnischen Wirkungsgrad liegt hinter einem Wärmetauscher.

In der **Abbildung 3.2** ist dafür der feuerungstechnische Wirkungsgrad dargestellt.

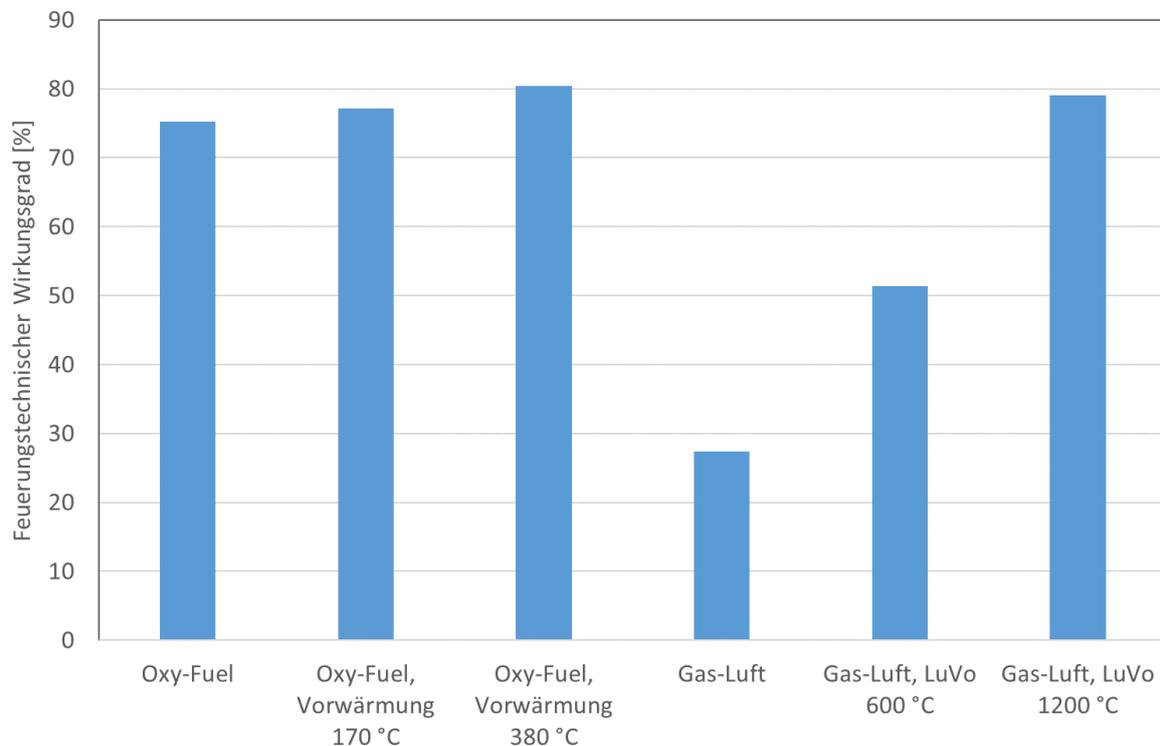


Abbildung 3.2: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad im Vergleich der Oxidatoren Luft und Sauerstoff für verschiedene Vorwärmtemperaturen bei konstantem Wärmeeintrag in ein Wärmegut und die Wände

Anhand dieser Darstellung ist das Potenzial der Luftvorwärmung deutlich zu sehen. Mit einer Umstellung auf eine reine, nicht vorgewärmte Sauerstoffverbrennung ist der feuerungstechnische Wirkungsgrad im Vergleich zu einer nicht vorgewärmten Luftverbrennung deutlich zu steigern. Ähnliche Größenordnungen sind erst ab einer Luftvorwärmung von über 1.000 °C erreichbar.

In den **Abbildung 3.3.** und **3.4** sind die entsprechenden erreichbaren theoretischen Brennstoffeinsparungen bzw. die relativen Brennstoffverbräuche dargestellt. In **Abbildung 3.3** ist als Bezugspunkt die nicht vorgewärmte Luftverbrennung und in **Abbildung 3.4** die nicht vorgewärmte Sauerstoffverbrennung gewählt worden.

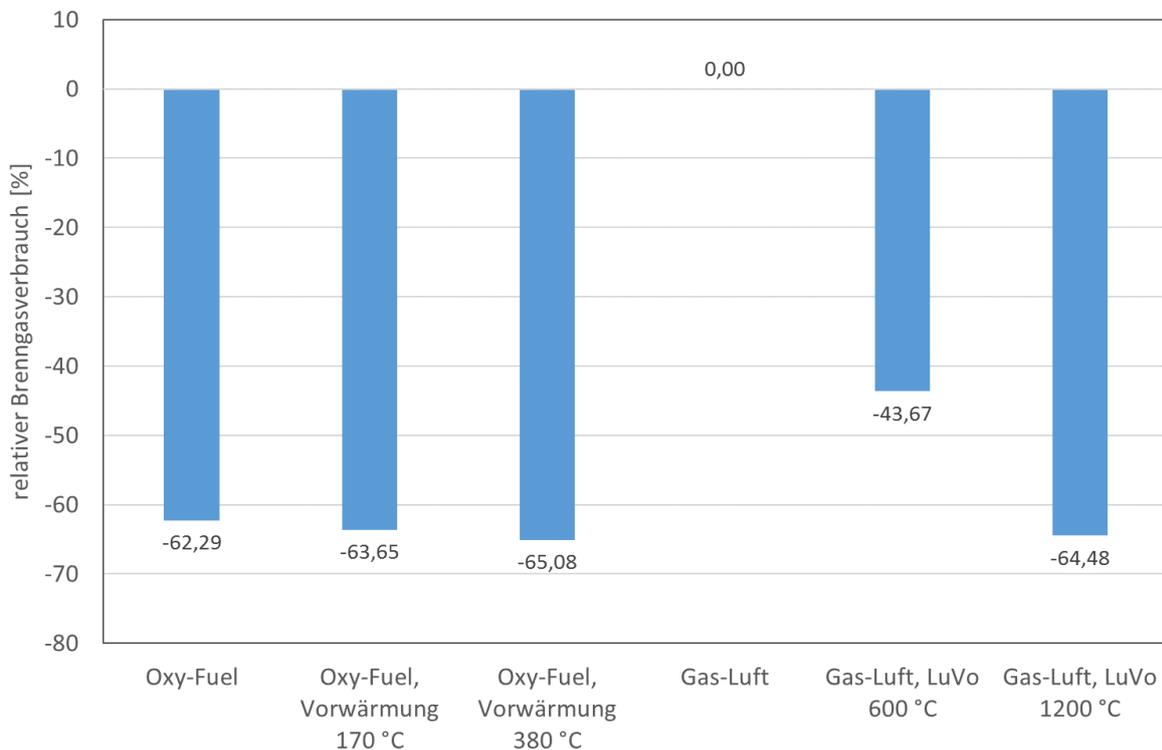


Abbildung 3.3: Relativer Brenngasverbrauch im Vergleich der Oxidatoren Luft und Sauerstoff für verschiedene Vorwärmtemperaturen bei konstantem Wärmeeintrag in ein Wärmegut und die Wände, Bezugspunkt nicht vorgewärmte Luft

In **Abbildung 3.3** verdeutlicht, dass eine entsprechende Luftvorwärmung von über 1.000 °C, vom Brennstoffeinsatz ungefähr auf dem gleichen Niveau wie die Sauerstoffverbrennung liegt. **Abbildung 3.4** zeigt die Brennstoffeinsparung der kombinierten Sauerstoff-Brennstoffvorwärmung im Vergleich zum nicht vorgewärmten Fall.

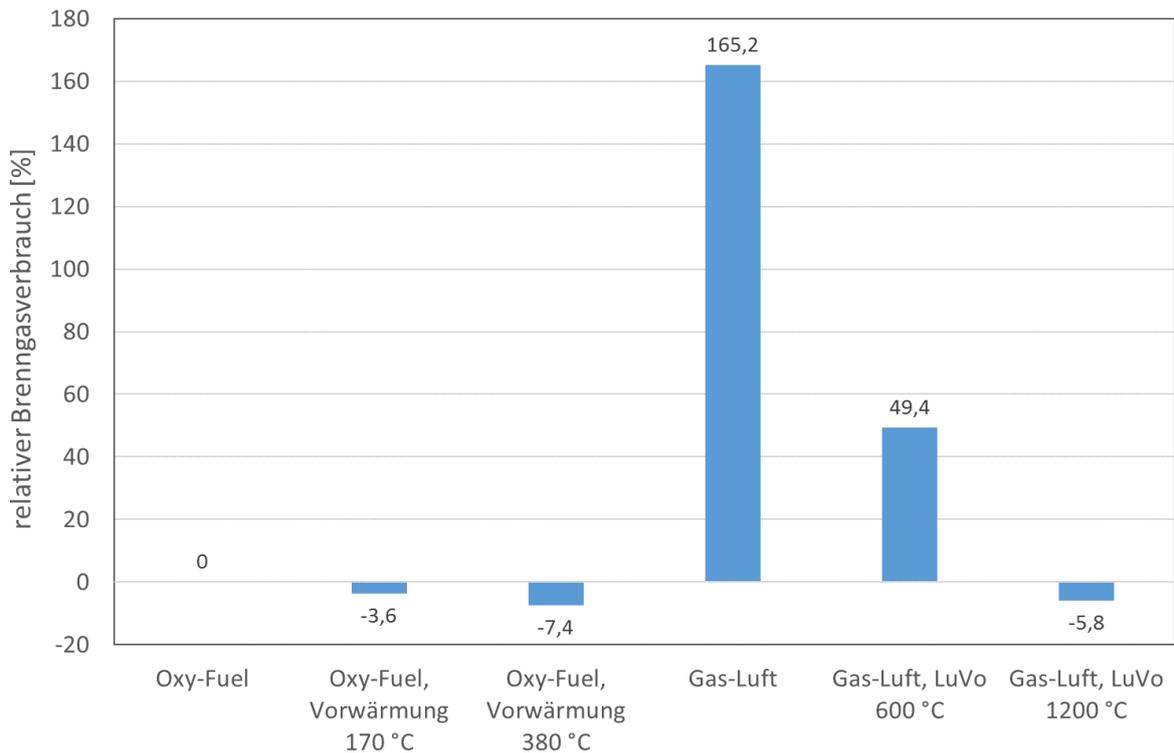


Abbildung 3.4: Relativer Brenngasverbrauch im Vergleich der Oxidatoren Luft und Sauerstoff für verschiedene Vorwärmtemperaturen bei konstantem Wärmeeintrag in ein Wärmegut und die Wände, Bezugspunkt nicht vorgewärmter Sauerstoff

Für die Auslegung des Prototypen wurden die Parameter der ausgewählten Schmelzwanne bei ZK zugrunde gelegt (Feuerungsleistung max. 500 kW => max. 50 m³_N/h Erdgas mit bei einem Verhältnis von 1:2,3). Die Dimensionierung berücksichtigte dabei die Einhaltung von maximalen Strömungsgeschwindigkeiten, Drücken und Temperaturen.

3.1.3 AS 1.3 Bau eines Prototyps des Vorwärmersystems (UAS)

Die konstruktive Umsetzung des Prototypen wurde in Anlehnung an die Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU durchgeführt, obwohl die Anlage aufgrund geringerer Auslegungsdrücke nicht unter die genannte Richtlinie fällt. Die sicherheitstechnische Auslegung der Prototypenanlage erfolgte auf Grundlagen der DIN 746-2:2010 „Industrielle Thermoprozessanlagen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an Feuerungsanlagen und Brennstoffführungssysteme“.

Die Prototypenanlage, siehe **Abbildung 3.5** besteht aus einer Erdgasstrecke und einer Sauerstoffstrecke, ausgestattet mit jeweils einem Wärmeübertrager für die unabhängige Vorwärmung der Medien. Beide Strecken verfügen über einen zusätzlichen Bypass, zur automatischen Umfahrung des Wärmetauschers im Störfall. Hierdurch kann der „kalte“ Brennerbetrieb auch im Falle von unzulässige Betriebszuständen oder Leckagen am Wärmetauscher gewährleistet werden. Versorgt werden beide Strecken über eine gemeinsame Heißluftzu- und -abführung. Die bedarfsmäßige Verteilung der Wärmemenge erfolgt über entsprechende Regelventile, gesteuert über eine Sicherheits-SPS. Der entsprechende Schaltschrank inkl. genannter

SPS, Bedienpanel und notwendige Peripherie wurde für den Testlauf direkt am Rahmen der Vorwärmeinheit montiert.

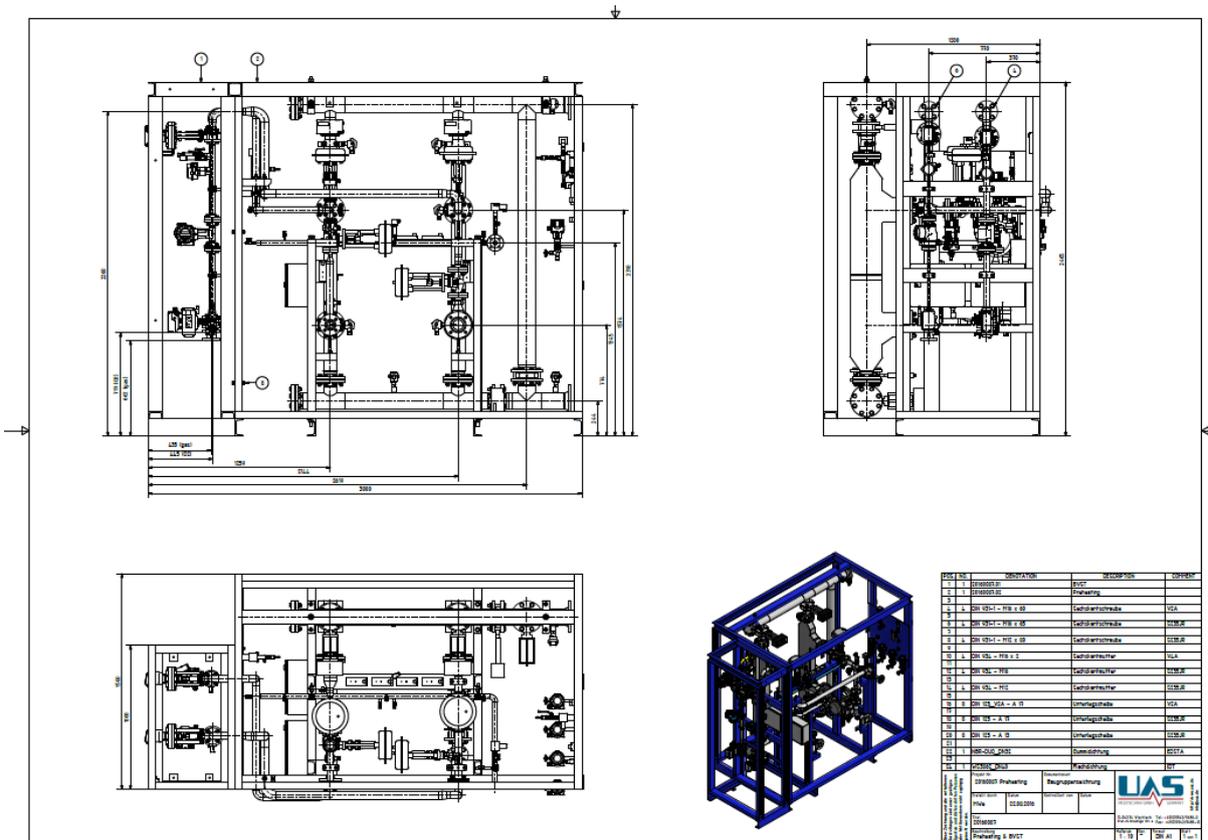


Abbildung 3.5: Aufbau der Prototypanlage (Quelle: UAS)



Abbildung 3.6: Aufbau des Prototypen am GWI-Versuchsofen

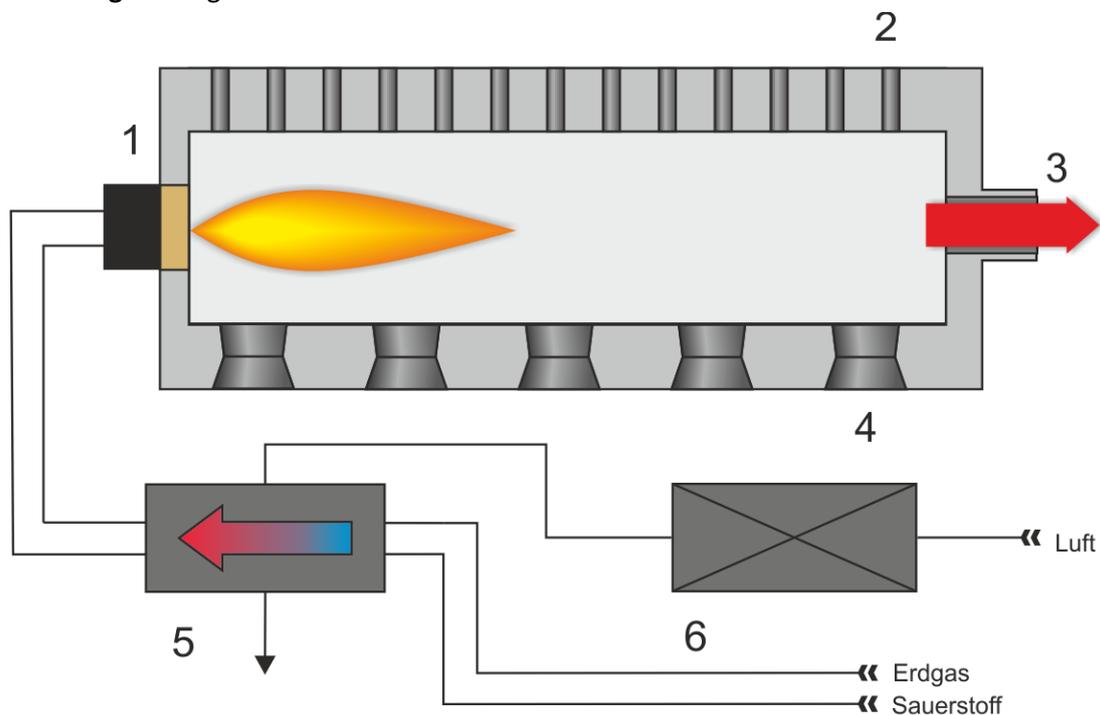
Für einen Testlauf am GWI-Ofen wurde eine separate Brennerstrecke für die Regelung der Durchflüsse von Erdgas und Sauerstoff gefertigt, siehe **Abbildung 3.6**.

3.1.4 AS 1.4 Experimentelle Untersuchung des Prototyps am GWI-Ofen (GWI/UAS)

Im Rahmen des Projektes wurden Messungen an einem semi-industriellen Versuchsofen des GWI durchgeführt und ausgewertet. Die Versuche sollen Aufschluss darüber geben, in wie weit sich Brenngas und CO₂ durch eine Medienvorwärmung in einer Oxyfuel-Verbrennung einsparen lassen.

Versuchsstand

Die **Abbildung 3.7** zeigt schematisch den Aufbau des GWI-Versuchsstandes.

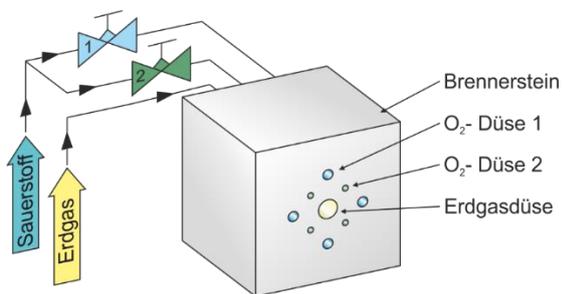


- | | |
|----------------|------------------|
| 1. Brenner | 4. Schauöffnung |
| 2. Messöffnung | 5. Wärmetauscher |
| 3. Abgaskanal | 6. Luftvorwärmer |

Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des Versuchsstandes (Quelle: GWI)

Die Brennkammer wurde mit einem Oxyfuel-Einzelbrenner (siehe **Abbildung 3.8**) ausgestattet, welcher mittig an der Frontseite installiert wurde (siehe **Abbildung 3.7**, Nr. 1). Das Abgas, welches durch die Verbrennung entsteht, verlässt die Brennkammer über einen Abgaskanal und wird über einen Schornstein in die Atmosphäre geleitet. Im Abgaskanal befindet sich hierbei eine Abgassonde mit angeschlossenem Analysegerät, welches die Anteile der einzelnen Gaskomponenten (O₂, CO, CO₂, NO, NO₂) misst. Zusätzlich wird die lokale Rauchgastemperatur über ein Thermoelement ermittelt.

In **Abbildung 3.8** ist der verwendete Oxyfuel-Brenner schematisch (a) und montiert am Versuchsofen (b) dargestellt.



a) Schematische Darstellung des untersuchten Oxy-Fuel-Brenners



b) Oxy-Fuel-Brenner am GWI-Versuchssofen montiert

Abbildung 3.8: Untersuchter Oxy-Fuel-Brenner (Quelle: GWI)

Der eingebaute Brenner ist für eine Brennerleistung von ca. 300 kW ausgelegt. Das Brenngas und der Sauerstoff werden getrennt in den Brenner geleitet und werden erst nach dem Brenneraustritt in der Brennkammer gemischt (Diffusionsbrenner). Der Sauerstoff wird dabei über je 4 kleinere und 4 größere Düsen in die Brennkammer eingeleitet, das Erdgas gelangt über eine zentrale Düse in den Brennraum.

Zur Medientvorwärmung wird das in Kapitel 3.1.3 gebaute Vorwärmgerüst verwendet, das sowohl Erdgas als auch Sauerstoff auf eine definierte Temperatur erwärmt. Das Vorwärmgerüst besteht aus jeweils einem Wärmeübertrager für jedes Gas (Sauerstoff/Erdgas) und ist zusätzlich mit MSR-Technik in Kombination mit einer programmierbaren Steuerung ausgestattet. Die notwendige Wärmemenge, die zur Medientvorwärmung erforderlich ist, wird in diesem Versuchsaufbau von einem Luftvorwärmer bereitgestellt. In der Praxis soll ausschließlich Rauchgas zur Bereitstellung dieser Wärmemenge verwendet werden. Das am GWI eingesetzte Vorwärmgerüst ist in **Abbildung 3.9** dargestellt.

Versuchsdurchführung

Die Messkampagne am GWI-Versuchsstand umfasst drei Untersuchungen mit jeweils unterschiedlichen Temperaturen der Medien. Die Vorwärmtemperaturen sind dabei wie folgt definiert:

Messung 1: $T = 25 \text{ °C}$

Messung 2: $T = 170 \text{ °C}$

Messung 3: $T = 380 \text{ °C}$

Für jede Messreihe wird ein stationärer Zustand in der Brennkammer generiert mit einer Ofenraumtemperatur von ca. 1.600 °C und einer Oxidationszahl von 1,1.



Abbildung 3.9: Untersuchtes Vorwärmmodul

2D-Feldmessung:

Während der Untersuchungen wurden die Spezies und Temperaturen als 2D-Feldmessung nach dem in **Abbildung 3.10** dargestellten Messraster und mit der in **Abbildung 3.11** abgebildeten Messsonde, erfasst. An jedem Messpunkt wird mit Hilfe dieser wassergekühlten Feldsonde Rauchgas aus der Brennkammer abgesaugt und in das entsprechende Analysegerät weitergeleitet, siehe **Tabelle 3.2**. Dort wird mit verschiedenen Messprinzipien die Konzentration der verschiedenen Gase im Reaktionsraum gemessen (CO , CO_2 , O_2 , NO_x). Des Weiteren wird an jedem Messpunkt die Rauchgastemperatur gemessen. Dazu befindet sich an der Spitze der Feldsonde ein Thermoelement vom Typ B, welches durch ein keramisches Schutzrohr von der Umgebungsstrahlung (z. B. Wandstrahlung) abgeschirmt wird.

Mit Hilfe dieser Plots kann anschaulich die Veränderung der Spezies- und der Temperaturverteilung durch eine Medientvorwärmung untersucht werden. Es bleibt anzumerken, dass aufgrund von Undichtigkeiten in der Brennkammer, geringe Mengen an Luft in den Brennraum gelangen können. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass während der Untersuchungen 2 Kühlrohre verwendet wurden, durch welche dem Ofenraum Wärmeenergie entzogen und eine definierte Ofenraumtemperatur realisiert werden konnte.

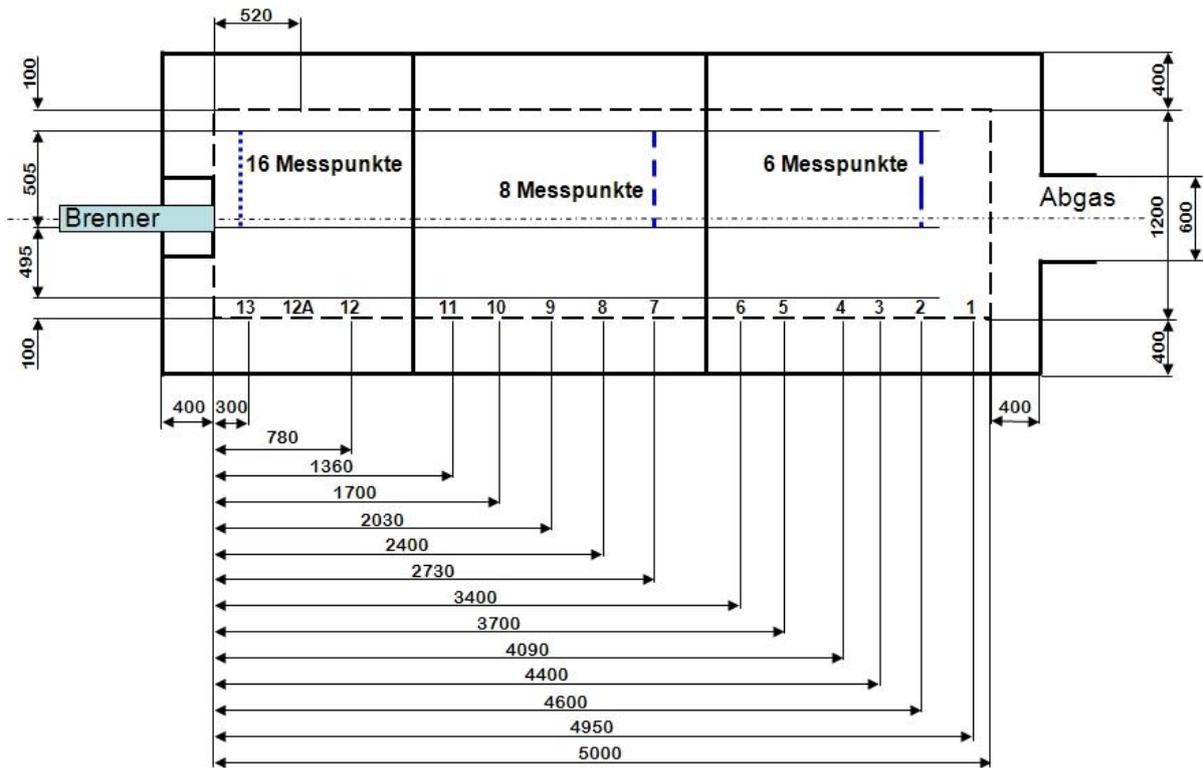


Abbildung 3.10: Messraster der 2-DFeldmessungen (Quelle: GWI)

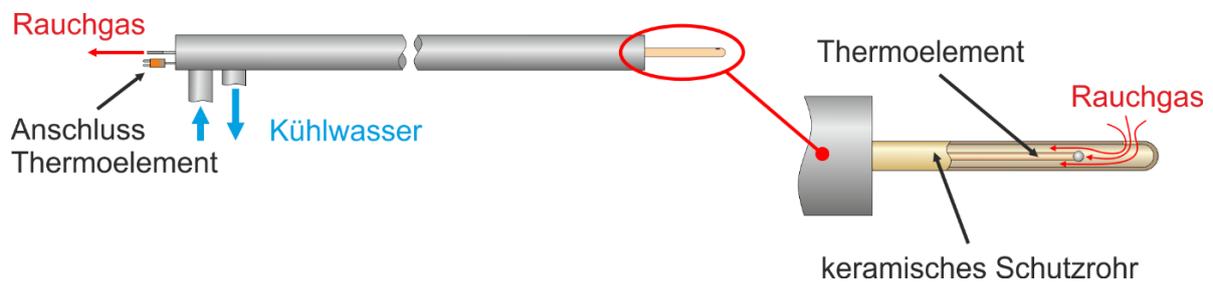


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der Feldsonde (Quelle: GWI)

Verwendete Messtechnik

Bei den durchgeführten Feldmessungen wurden Temperatur, Druck, Durchfluss sowie die Konzentrationen verschiedener Gase in der Brennkammer und im Abgas gemessen. Dazu wurde verschiedenste Messtechnik verwendet, welche in **Tabelle 3.2** aufgeführt ist.

Tabelle 3.2: Übersicht der verwendeten Messtechnik

| Messgröße | | Einheit | Messgerät | Messbereich | Genauigkeit |
|------------------------|--------------------------------------|------------------------|---|-------------|----------------------|
| Temperatur | Ofenraum/Ofenwand/ Abgas | °C | Thermoelement, Typ B | 200 - 1.700 | $\pm 0,0025$ * t |
| | Kühlwasser | | Thermoelement, Typ K | 0 - 1.100 | $\pm 0,0025$ * t |
| Konzentration im Abgas | Sauerstoff (O ₂) | Vol.-% | Rosemount NGA 2000 MLT 4, Paramagnetismus | 0 - 25 | ≤ 1 % |
| | Kohlenstoffdioxid (CO ₂) | | Rosemount NGA 2000 MLT 4, NDIR- Verfahren | 0 - 100 | ≤ 1 % |
| | Kohlenstoffmonoxid (CO) | ppm | Eco Physics CLD822Sr, Chemilumineszenz- Verfahren | 0 - 2.000 | ≤ 1 % |
| | Stickstoffdioxid (NO ₂) | | | | |
| | Stickstoffmonoxid (NO) | | | | |
| | Stickoxide (NO _x) | | | | |
| Menge | Gas | m ³ /h i.N. | Krohne Typ VA 20 R | 0 - 100 | ≤ 1 % |
| | Wasser | m ³ /h i.N. | Krohne Typ VA | 44 - 450 | ± 1 % |

Auswertung der Temperatur- und Speziesprofile

Aufgrund der Medienvorwärmung bis 380 °C ändert sich die Dichte von Erdgas und Sauerstoff und damit auch die Austrittsgeschwindigkeit bei gleichbleibenden Austrittsflächen. Die Berechnung ergab, dass die Austrittsgeschwindigkeit von Erdgas bei einer Vorwärmtemperatur von 170 °C um 52 % und bei einer Vorwärmtemperatur von 380 °C um 113 % gegenüber der Messung ohne Vorwärmung ansteigt.

Die Temperaturdifferenz der adiabaten Flammentemperatur, siehe Kapitel 3.1.2 liegt zwischen der ersten und dritten Messung bei 35 °C, was einer Temperaturerhöhung von ca. 1,25 % entspricht. Es ist folglich davon auszugehen, dass die, durch Medienvorwärmung hervorgerufene Veränderung der adiabaten Flammentemperatur nur sehr geringe Auswirkungen auf das Temperaturprofil haben wird. In den **Abbildungen 3.12 bis 3.16** sind die gemessenen Spezies- und Temperaturverteilungen dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass das dreidimensionale Strömungsprofil der Verbrennung in der Brennkammer aufgrund des Messrasters lediglich zweidimensional dargestellt werden kann. Liegt die Reaktionszone nicht in der horizontalen Brennebene, können diese Zustände messtechnisch nicht erfasst werden.

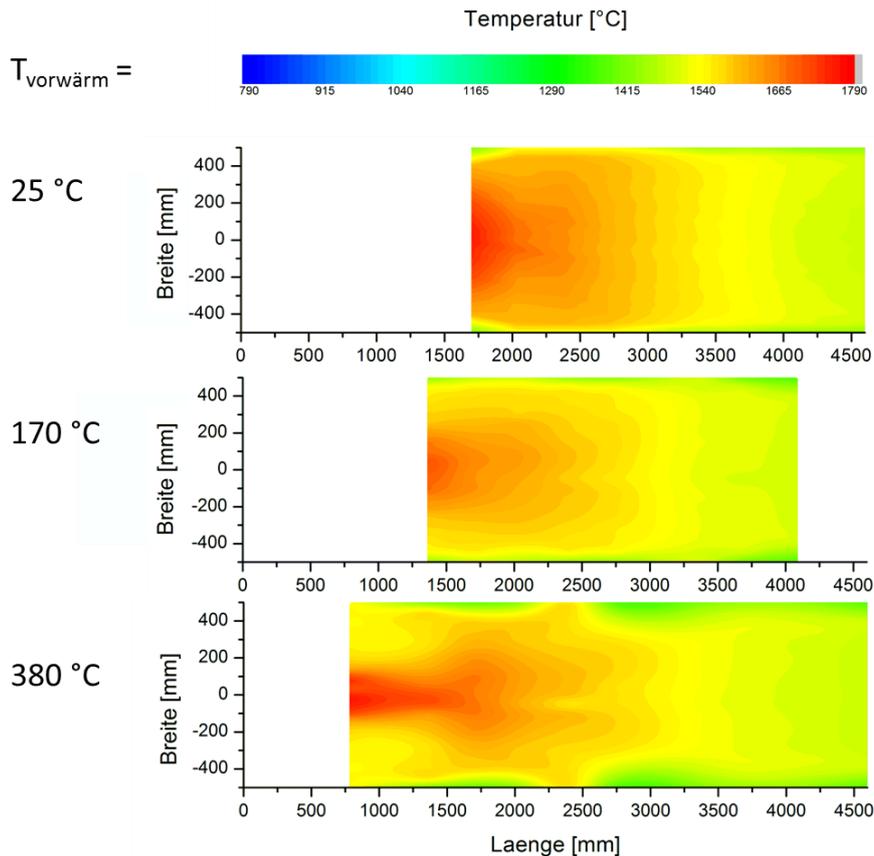


Abbildung 3.12: Temperaturprofil in der Brennkammer für verschiedene Vorwärmtemperaturen

In **Abbildung 3.13** ist zu erkennen, dass das Verbrennungsendprodukt CO_2 mit zunehmender Vorwärmtemperatur schneller gebildet wird und sich die CO_2 -Bereiche mit hoher Konzentration somit in Richtung des Brenners verlagern. Dies ist anhand der veränderten Austrittsgeschwindigkeiten und der damit resultierenden Änderung der Impulsverhältnisse zu erklären. Die Impulsverhältnisse sind ausschlaggebend für die Mischung von Brennstoff und Oxidator und somit für die Größe und Geometrie der Reaktionszone. Durch eine bessere Mischung wird die Reaktionsgeschwindigkeit der Verbrennung beschleunigt und es wird folglich früher CO_2 im Rauchgas gebildet. **Abbildung 3.12** unterstreicht dies: Durch die bessere Mischung und die daraus resultierende kürzere Flamme verschiebt sich das Temperaturmaximum weiter in Richtung des Brenners. Es ist außerdem zu erkennen, dass die Flamme mit steigender Vorwärmtemperatur einschnürt, was ebenfalls durch die Impulserhöhung am Austritt der Brennerdüsen zu erklären ist. Aufgrund der schmalen Flammenform und der daraus resultierenden kleineren Flammenoberfläche verliert die Flamme weniger Wärme, weswegen die Flamme relativ weit in die Brennkammer ragt und erst sehr spät Wärme verliert und sich somit auf weitet.

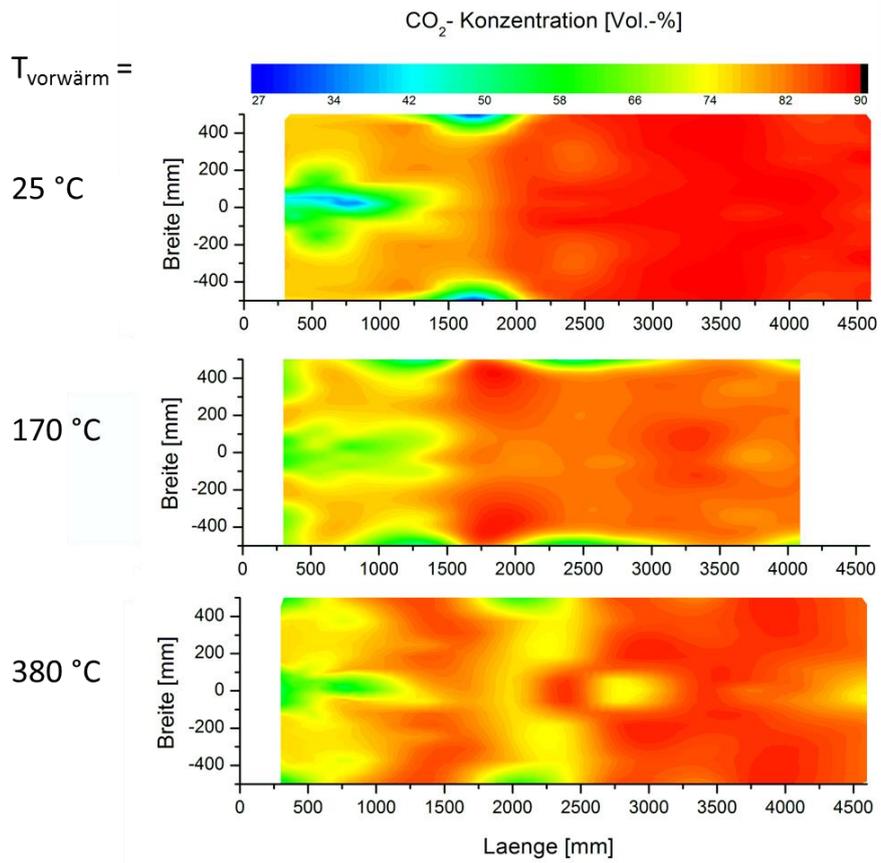


Abbildung 3.13: CO₂-Verteilung in der Brennkammer für verschiedene Vorwärmtemperaturen

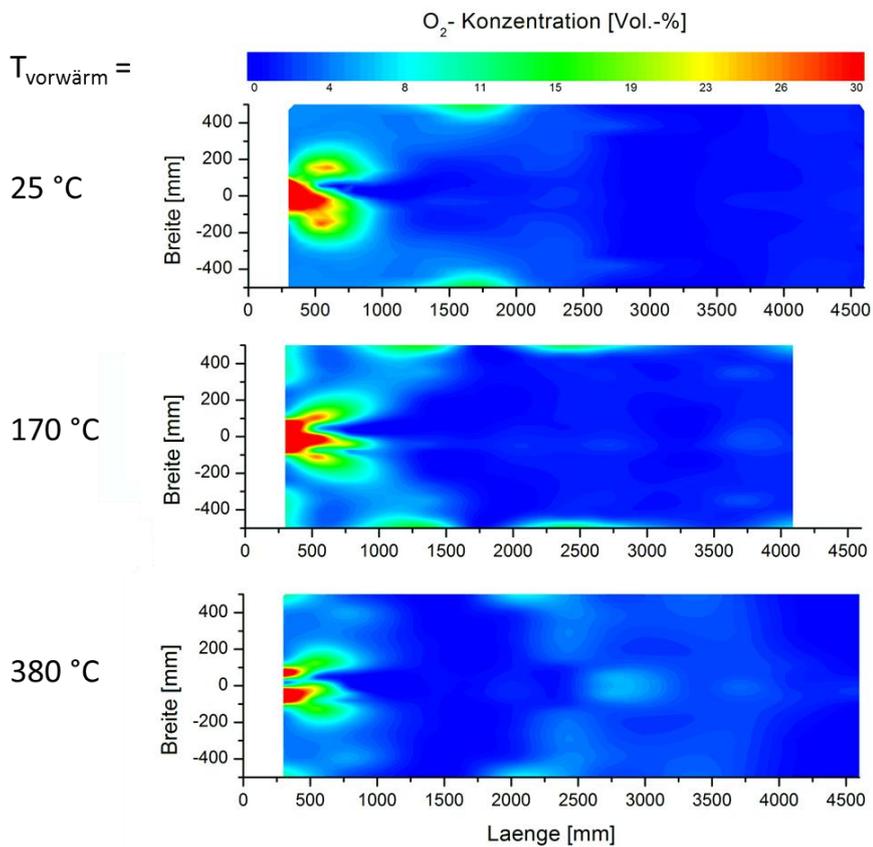


Abbildung 3.14: O₂-Verteilung in der Brennkammer für verschiedene Vorwärmtemperaturen

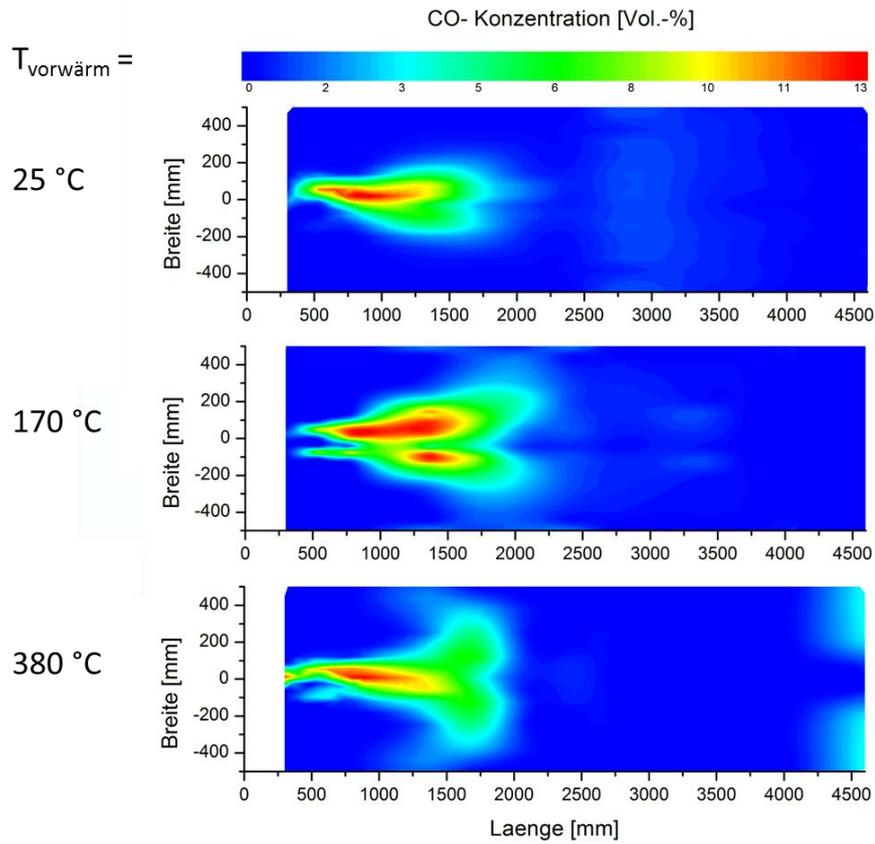


Abbildung 3.15: CO-Verteilung in der Brennkammer für verschiedene Vorwärmtemperaturen

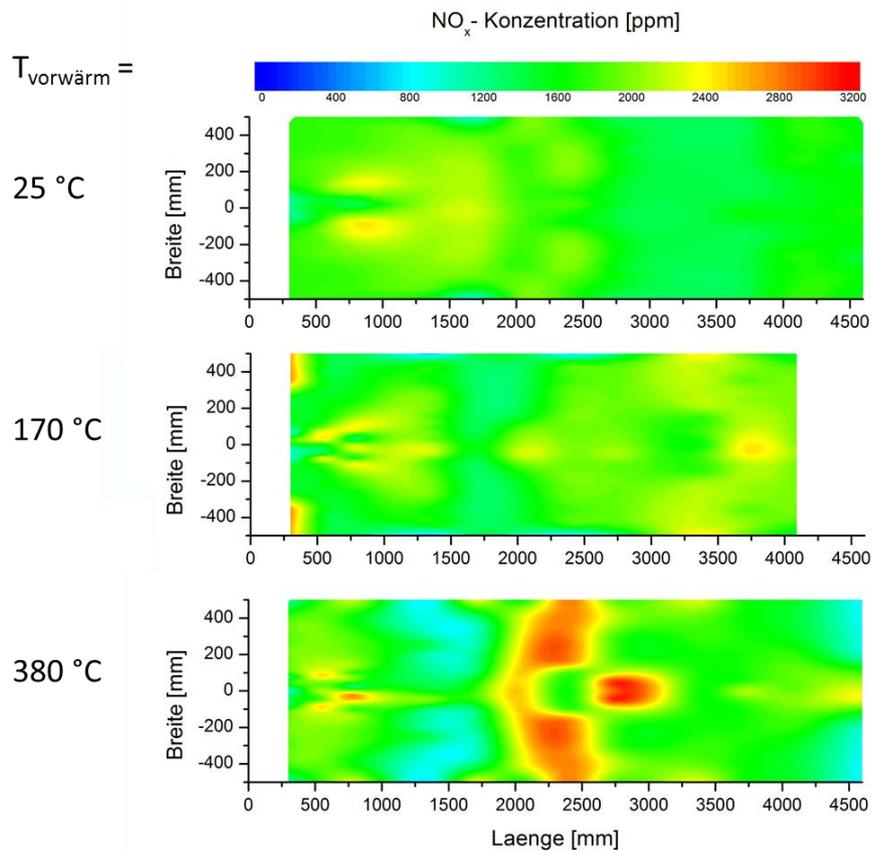


Abbildung 3.16: NO_x-Konzentration in der Brennkammer für verschiedene Vorwärmtemperaturen

Bei der Betrachtung der Sauerstoffverteilung, **Abbildung 3.14**, in der Brennkammer fällt auf, dass die Bereiche mit einer hohen Sauerstoffkonzentration mit zunehmender Vorwärmtemperatur abnehmen. Vergleicht man die O₂-Verteilung für die Messung ohne Vorwärmung mit der O₂-Verteilung mit Vorwärmung (im Besonderen die für eine Vorwärmtemperatur von 380 °C) so ist der sauerstoffreiche Bereich sowohl in der Länge, als auch in der Breite deutlich verkleinert. Dies passt zu der Erklärung, dass die Mischung verbessert wird und die Reaktionszone mit zunehmender Vorwärmtemperatur kleiner wird.

Abbildung 3.15 zeigt die CO-Verteilung. Zu erkennen ist, dass die Reaktionszone bei den beiden Messungen mit Medienvorwärmung etwas größer/länger ist als bei der Messung ohne Medienvorwärmung. Dies scheint der vorangegangenen Argumentation auf den ersten Blick zu widersprechen. Eine nähere Betrachtung der CO-Verteilung zeigt, dass sich die Reaktionszone gegen Ende auf weitet. Auch in der Temperaturverteilung ist zu erkennen, dass die Temperatur nach einer kontinuierlichen Abnahme an den Rändern der Brennkammer wieder steigt. Der Bereich der lokal maximalen Temperatur „fächert“ auch hier etwas auf. Außerdem ist zu erkennen, dass die Reaktionszone zunächst größer wird (25 °C → 170 °C), anschließend jedoch wieder kleiner wird (170 °C → 380 °C). Eine Erklärung für dieses Phänomen könnte die Brennergeometrie liefern. Durch die sich ändernden Durchflussverhältnisse innerhalb der Sauerstoffdüsen 1 zu 2 kann die Reaktionslänge bzw. die Flammenlänge für verschiedene Vorwärmtemperaturen variieren. Zusätzlich kann die Flamme aufgrund des erhöhten Austrittsimpulses bei zunehmender Vorwärmtemperatur ihren Winkel im Raum verändern. Ist die Reaktionszone nicht mehr in der Mitte der Messebene, so erscheint die Reaktionszone je nach Veränderung zu klein oder zu groß. Die **Abbildung 3.16** stellt die NO_x-Konzentrationsverteilung in der Brennkammer dar. Die NO_x-Emissionen sind bei einer Sauerstoffverbrennung mit nahezu stickstofffreien Brenngasen in der Regel sehr gering. Jedoch ist es fast unvermeidlich, dass bei einer Anlagenfahrweise im Unterdruckbereich ($p_{\text{Ofen}} < p_{\text{Umgebung}}$) an verschiedenen Bauteilen geringe Mengen Umgebungsluft (21 % O₂, 79 % N₂) in die Brennkammer strömt. Dies hat zur Folge, dass bei den lokal hohen Temperaturen einer Sauerstoffverbrennung die NO_x-Bildung stärker steigt. Dieser Effekt kann bei der NO_x-Verteilung für eine Vorwärmtemperatur von 380 °C beobachtet werden. Dabei ist zu erwähnen, dass die Messung des dritten Versuchs kritisch bzw. vorsichtig zu beurteilen ist. Die hohe NO_x-Konzentration in der Mitte der Brennkammer unterscheidet sich stark von den beiden anderen Messungen. Die O₂-Verteilung in der Brennkammer, welche in **Abbildung 3.14** zu sehen ist, untermauert diese Annahme, dass hier Falschluff in die Brennkammer gelangt ist. Wird diese Stelle vernachlässigt, so ist das Niveau der NO_x-Konzentration bei allen drei Messungen sehr ähnlich. Bei genauerer Betrachtung ist in der Flamme lokal allerdings eine minimale erhöhte NO_x-Konzentration bei zunehmender Vorwärmtemperatur zu erkennen. Durch die höhere Eintrittsgeschwindigkeit des Gases und der daraus resultierenden besseren Mischung kann es in der Flamme lokal zu höheren Temperaturspitzen kommen. Dies begünstigt die Bildung von NO_x.

Die aufgezeichneten Messdaten welche während der Feldmessungen gesammelt wurden, liefern ausreichende Informationen, um eine eindimensionale Energie-Bilanzierung sowie Berechnungen zur Effizienzsteigerung und CO₂-Einsparung durchzuführen.

3.2 AS 2. Numerische Untersuchung der Vorwärmmodule an der ausgewählten Glasschmelzwanne (GWI/UAS)

3.2.1 AS 2.1 Detaillierte Vermessung der ausgewählten Glaswanne (GWI/UAS)

Die Wanne 4, siehe **Abbildung 3.1** der Zwieseler Kristallglas AG wurde messtechnisch erfasst. In der **Abbildung 3.17** ist links einer der ursprünglichen Sauerstoffbrenner und rechts die eingesetzte GWI-Messsonde zu sehen.



a) eingebauter Sauerstoffbrenner

b) GWI-Messsonde

Abbildung 3.17: eingebaute Sauerstoffbrenner und Messsonde des GWI an der Wanne 4 der Zwiesel Kristallglas AG

Abbildung 3.18 gibt einige Einblicke im Inneren der Glasschmelzwanne wider.

Abbildung 3.20 zeigt beispielhaft die Temperaturverläufe der beiden gegenüberliegenden Messöffnungen L1 und R1 sowie der Messöffnung R4.

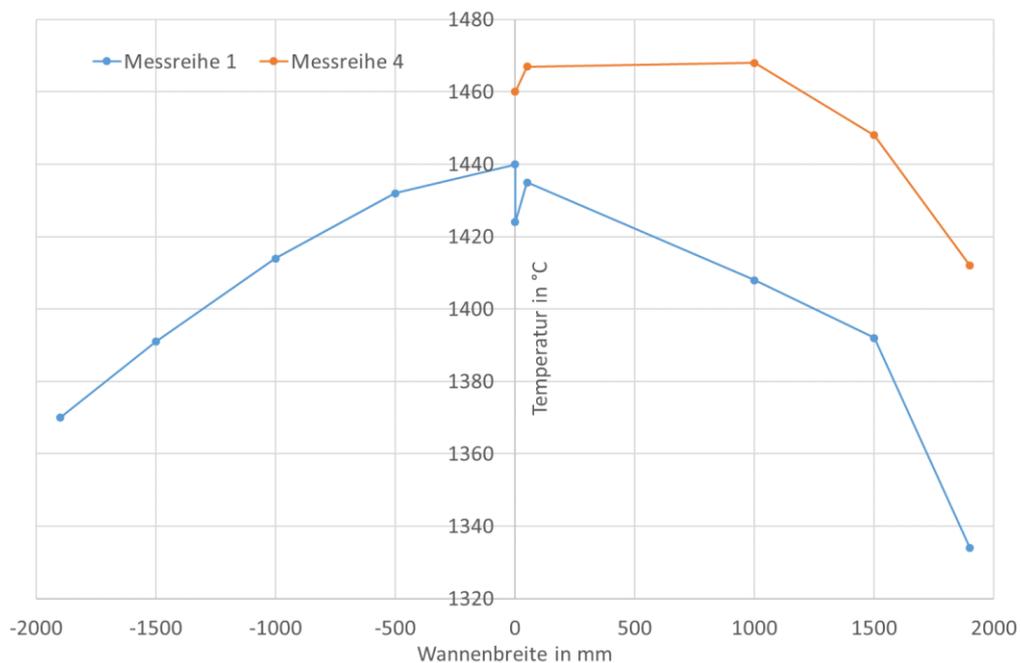


Abbildung 3.20: gemessener Temperaturverlauf an 2 verschiedenen Messpositionen

3.2.2 AS 2.2 Bilanzierung des GWI-Ofens/Energieeinsparung (GWI)

Um die mögliche Energieeinsparung einer kombinierten Oxy-Fuel-Vorwärmung zu bestimmen, wird anhand der Messergebnisse des GWI-Versuchsofens eine Energiebilanz aufgestellt. Die Wärmeströme in und an der Brennkammer können über verschiedene Ansätze berechnet bzw. beschrieben werden. **Abbildung 3.22** zeigt schematisch alle berücksichtigten Wärmeströme an der Brennkammer. Die eingehenden Wärmeströme werden definiert durch die im Brenngas gebundene chemische Energie sowie die thermische Energie der Medien, welche aus der Medientvorwärmung resultiert. Die ausgehenden Wärmeströme werden bestimmt durch die Abgasverluste, die Verluste durch die Kühlrohre und durch die Ofenwand.

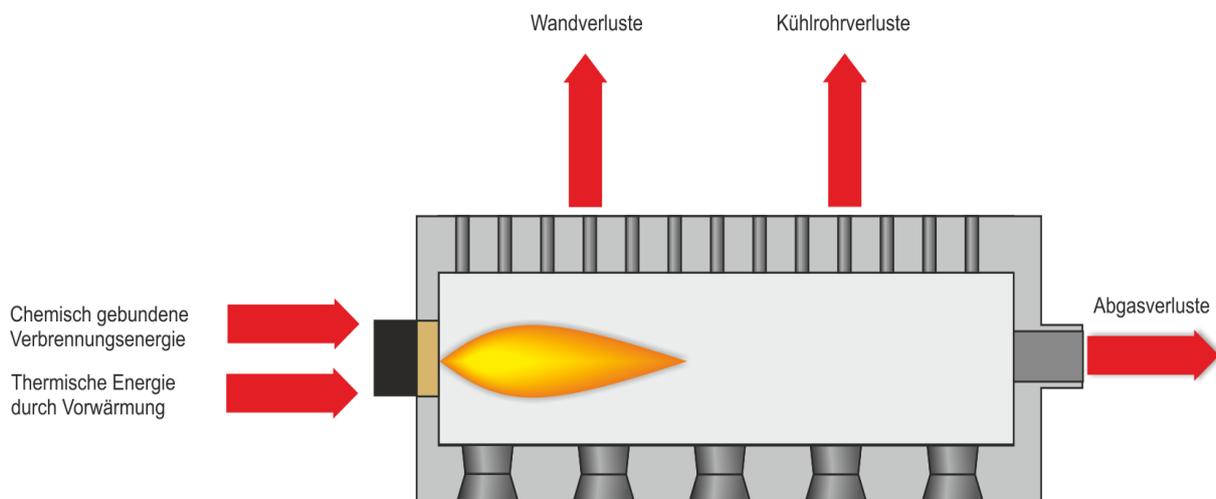


Abbildung 3.22: Schematische Darstellung der anliegenden Wärmeströme (Quelle: GWI)

Chemische Verbrennungsenergie

Die chemische Verbrennungsenergie ist die Energie, die bei der Verbrennung eines Brenngases wie z. B. Erdgas freigesetzt wird. Dabei besitzen die Molekülverbindungen nach der Verbrennung ein niedrigeres Energieniveau als vor der Verbrennung. Die Energiedifferenz wird als Wärmeenergie freigesetzt und kann mit folgender Formel berechnet werden.

$$\dot{Q}_v = H_i * \dot{m}_{gas} \quad (3.1)$$

Dabei ist \dot{m}_{gas} der Massenstrom des Brenngases in kg/h und H_i der Heizwert des Brenngases in kJ/kg. Die am GWI anliegende Erdgasbeschaffenheit ist als Monatsmittelwert in **Abbildung 3.23** zu sehen.

| Monatsdurchschnittsanalyse für: | | 01.08.2016 - 01.09.2016 | |
|---------------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------|
| GB Bezirk: | | Essen Mitte 2 Goldschmidt | |
| | | DE70091845127G0000057002140S00V1A | |
| Messwerte * | | | |
| Brennwert (gemessen) | Hseff | 11,510 | kWh/m ³ |
| Normdichte (gemessen) | Rhon | 0,8022 | kg/m ³ |
| Kohlenstoffdioxid | CO2 | 1,93 | mol-% |
| Gaskomponenten ** | | | |
| Kohlenstoffdioxid | CO2 | 1,93 | mol-% |
| Stickstoff | N2 | 0,7801 | mol-% |
| Methan | CH4 | 89,9526 | mol-% |
| Ethan | C2H6 | 6,1022 | mol-% |
| Propan | C3H8 | 0,9467 | mol-% |
| 2-Methylpropan | iC4H10 | 0,1021 | mol-% |
| n-Butan | nC4H10 | 0,1213 | mol-% |
| 2-Methylbutan | i-C5H12 | 0,0238 | mol-% |
| n-Penthan | n-C5H12 | 0,0195 | mol-% |
| Hexan+ | C6plus | 0,0154 | mol-% |
| 2,2 Dimethylpropan | neo-C5H12 | 0,0002 | mol-% |
| Sauerstoff | O2 | 0,0000 | mol-% |
| Berechnungsgrößen | | | |
| Heizwert (Volumen) *** | Hin | 10,397 | kWh/m ³ |
| Spez- CO2 - Emissionsfaktor *** | ECO2 | 0,056902 | t/GJ |
| Methanzahl | MZ | 80 | - |
| Brennwert (molar) **** | Hsm | 925,991 | kJ/mol |
| Heizwert (molar) **** | Him | 836,427 | kJ/mol |
| Wobbe Index **** | Ws | 14,599 | kWh/m ³ |
| Wobbe Index **** | Wi | 13,199 | kWh/m ³ |
| Realgasfaktor **** | Zn | 0,9971 | - |
| Molare Masse **** | M | 17,9259 | kg/kmol |

Abbildung 3.23: Erdgaszusammensetzung und Kennwerte am GWI im August 2016 (Quelle: GWI)

Thermische Energie durch Vorwärmung

Die thermische Energie durch die Vorwärmung des Brenngases und des Sauerstoffs wird bestimmt durch die spez. Wärmekapazität c_p , dem Massenstrom und der Temperatur T_{VW} des entsprechenden Mediums. Sie bezeichnet die kinetische Energie der Gasmoleküle, welche mit steigender Temperatur zunimmt. Gleichung 3.2 beschreibt den Wärmestrom durch die Gas-Vorwärmung.

$$\dot{Q}_{Th} = c_{p,Gas/Sauerstoff} * \dot{m}_{Gas/Sauerstoff} * (T_{VW} - T_U) \quad (3.2)$$

Die Umgebungstemperatur T_U wird hierbei auf 25 °C gesetzt. Die Vorwärmtemperaturen T_{VW} belaufen sich auf 25 °C, 170 °C und 380 °C.

Abgasverluste

Die Abgasverluste folgen den selben physikalischen Gesetzen wie die thermischen Energie durch Vorwärmung und werden analog zu Gleichung 3.2 mit

$$\dot{Q}_{Ab} = c_p * \dot{m}_{Abgas} * (T_{Ab} - T_U) \quad (3.3)$$

berechnet. Der Abgasmassenstrom \dot{m}_{Abgas} setzt sich aufgrund des Massenerhaltungssatzes aus dem Massenstrom des Sauerstoffs und des Erdgases zusammen. Die Umgebungstemperatur wird dabei auf $T_U = 25$ °C gesetzt. Die spezifische Wärmekapazität c_p ist konzentrations- und temperaturabhängig.

Kühlrohrverluste

Während der Messung wurde der Brennkammer durch Kühlrohre thermische Energie entzogen, um somit die gewünschte Brennkammertemperatur zu erreichen. Der Massenstrom des Wassers, welches durch die Kühlrohre fließt, entspricht $\dot{m}_W = 1,388 \text{ kg/s}$. Durch die Messung der Wassereintrittstemperatur $T_{W,E} = 21,2 \text{ °C}$ und der Wasseraustrittstemperatur $T_{W,A} = 25,9 \text{ °C}$ kann der Kühlrohrverlust zu

$$\dot{Q}_{KR} = c_{p,W} * \dot{m}_W * (T_{W,A} - T_{W,E}) \quad (3.4)$$

berechnet werden. Dabei entspricht c_p der spez. Wärmekapazität von Wasser, welche $4,183 \text{ kJ/kg}$ beträgt.

Wandverluste

Der Wärmestrom durch die Brennkammerwand kann mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{WL} = \lambda_{ofen} * \frac{A}{d} * (T_{WI} - T_{WA}) \quad (3.5)$$

Dabei ist λ_{ofen} die Wärmeleitfähigkeit, A die gesamte Oberfläche der Brennkammer, d die Wandstärke und T_{WI} bzw. T_{WA} die Innen- bzw. Außentemperatur der Brennkammerwand. Die Wärmeleitfähigkeit λ_{ofen} der Brennkammerwand beträgt $0,00165 \text{ W/mK}$.

Die Innentemperatur der Brennkammerwand wird mittels fest installierter Thermoelemente des Typs B gemessen. Um die Oberflächentemperatur der Außenseite der Brennkammer zu ermitteln, wurde diese während der Messkampagne mit einer Thermografiekamera aufgenommen. Die anschließende Auswertung der Bilder ergaben die durchschnittlichen Außenwandtemperaturen. **Abbildung 3.24** zeigt die aufgenommenen Bilder sowie die gemittelten Temperaturen.

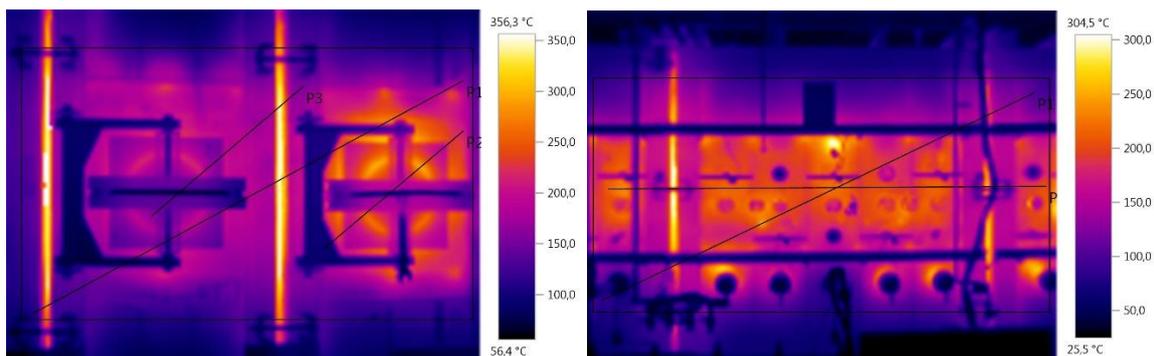


Abbildung 3.24: Thermografieaufnahmen der Brennkammer (Quelle: GWI)

Die Auswertung ergab eine durchschnittliche Wandtemperatur von $T_{WA} = 180 \text{ °C}$.

Gaseinsparung durch Vorwärmung

1. Theoretische Berechnung

Durch die Vorwärmung des Brenngases und des Sauerstoffs wird zusätzlich thermische Energie in die Brennkammer geführt. Wird die eingebrachte und ausgebrachte Leistung konstant gehalten, so

ergibt diese Differenz eine Reduzierung der Gaszufuhr. Die Brennstoffeinsparung durch Vorwärmung wird im Folgendem theoretisch berechnet.

Werden alle eingehenden und alle ausgehende Wärmeströme gegeneinandergestellt, so ergibt sich die folgende Bilanzierungsgleichung:

$$\dot{Q}_V + \dot{Q}_{Th,Gas} + \dot{Q}_{Th,Sauerstoff} = \dot{Q}_{Abgas} + \dot{Q}_{KR} + \dot{Q}_{WL} \quad (3.6)$$

Durch Einsetzen der entsprechenden Formeln ergibt sich Formel 3.7:

$$H_i * \dot{m}_{Gas} + c_p * \dot{m}_{Gas} * (T_{VW} - T_U) + c_p * \dot{m}_{Sauerstoff} * (T_{VW} - T_U) = c_p * \dot{m}_{Abgas} * (T_{Abgas} - T_U) + c_{p,W} * \dot{m}_W * (T_{W,A} - T_{W,E}) + \lambda_{Ofen} * \frac{A}{d} * (T_{WI} - T_{WA}). \quad (3.7)$$

Die sich einstellende Energiebilanz ist in **Abbildung 3.25** dargestellt. Dabei sind die **roten** Zahlenwerte ohne Medienvorwärmung und **grün**, die Zahlenwerte mit einer Medienvorwärmung von 380 °C.

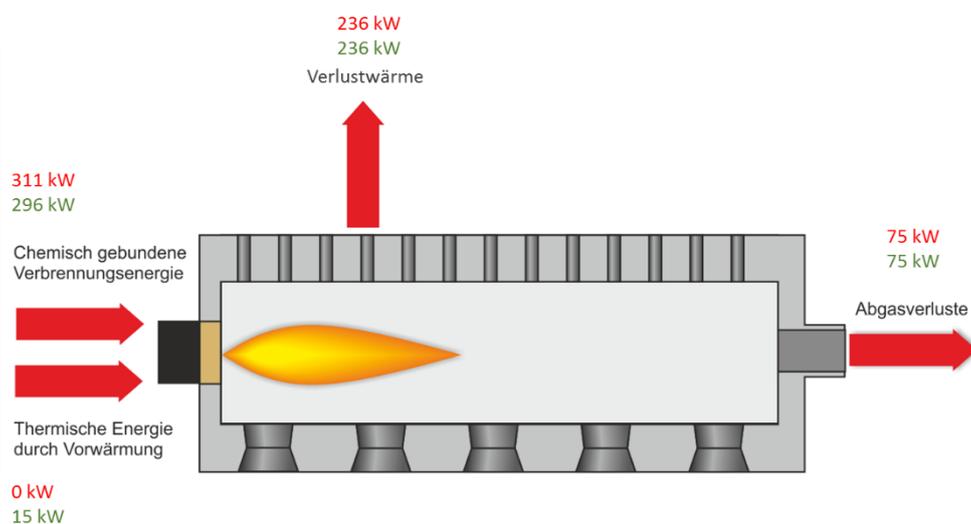


Abbildung 3.25: Theoretisch ermittelte Energiebilanz der GWI- Brennkammer bei konstanter eingebrachter Leistung (Quelle: GWI)

2. Theoretische Berechnung mit konstanter Ofenraum- bzw. Abgastemperatur

In der vorherigen Rechnung ist von einer konstanten Abgaswärme ausgegangen worden. Da der Abgasmassenstrom kleiner wird, wenn der Brennstoff- und Sauerstoffmassenstrom angepasst wird, muss die Abgastemperatur entsprechend steigen. Geht man nun von einer konstanten Ofenraum- und damit konstanten Abgastemperatur aus, ergibt sich die Energiebilanz in **Abbildung 3.26**.

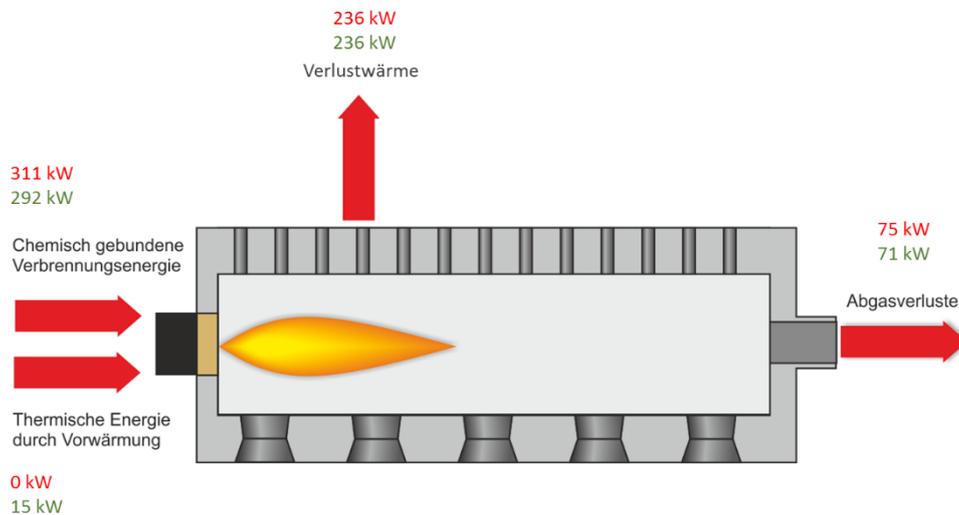


Abbildung 3.26: Theoretisch ermittelte Energiebilanz der GWI- Brennkammer bei konstanter Ofenraum- bzw. Abgastemperatur (Quelle: GWI)

Hier sinkt die eingebrachte Leistung über den Brennstoff weiter ab, da die Abgaswärme bei konstanten Temperaturen ebenfalls abnimmt.

3. Ermittlung der Energiebilanz aus Messwerten

Anhand der unter AS 1.4 ermittelten Messwerte wurde ebenfalls eine Bilanz um den Ofenraum erstellt. Die Werte sind in der **Abbildung 3.27** zu sehen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Ofenraum- und Ofenwandtemperaturen annähernd konstant bleiben.

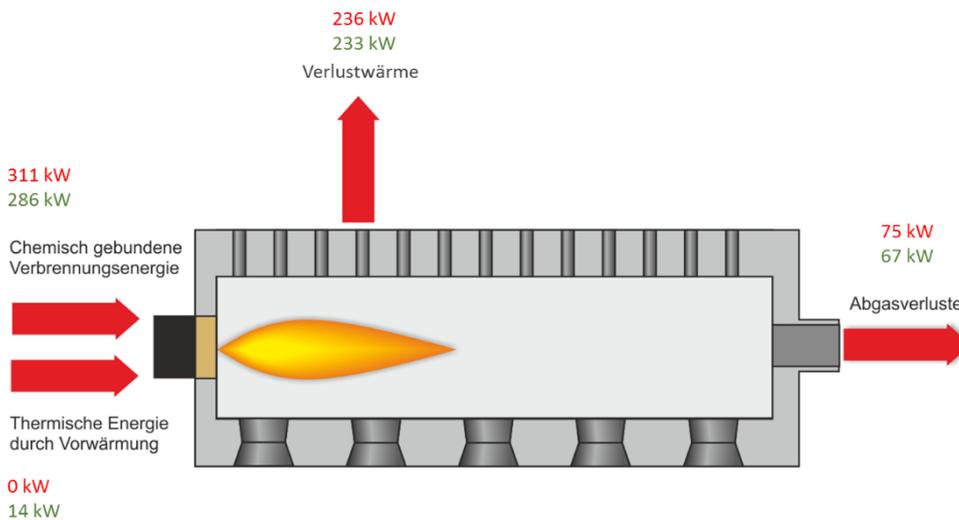


Abbildung 3.27: Ermittelte Energiebilanz der GWI- Brennkammer anhand der Messwerte (Quelle: GWI)

Obwohl die Verlustwärme etwas absinkt, ist die eingebrachte gemessene chemische Energie noch niedriger als im vorher betrachteten Fall. Durch eine abnehmende Abgastemperatur um ca. 35 K mit steigender Vorwärmung verringern sich damit auch die Abgasverluste.

4. Brennstoffeinsparung und feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Für die drei betrachteten Fälle werden nun die Brennstoffeinsparung und der feuerungstechnische Wirkungsgrad berechnet und verglichen.

Die Brennstoffeinsparung lässt sich nach Gleichung 3.8

$$\Delta_{\text{Brennstoff}} = \frac{\dot{m}_{\text{Gas,Vorwärmung}} - \dot{m}_{\text{Gas,Referenz}}}{\dot{m}_{\text{Gas,Referenz}}} * 100 \% \quad (3.8)$$

und der feuerungstechnische Wirkungsgrad nach Gleichung 3.9 bestimmen.

$$\eta = \left(1 - \frac{\dot{Q}_{\text{Abgas}} - \dot{Q}_{\text{Vorwärmung}}}{\dot{Q}_{\text{Brennstoff}}}\right) * 100 \% \quad (3.9)$$

In den **Abbildungen 3.28** und **3.29** sind die Brennstoffeinsparung und die Änderung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades im Vergleich zum Fall ohne Oxy-Fuel-Vorwärmung für die verschiedenen betrachteten Ansätze aufgeführt.

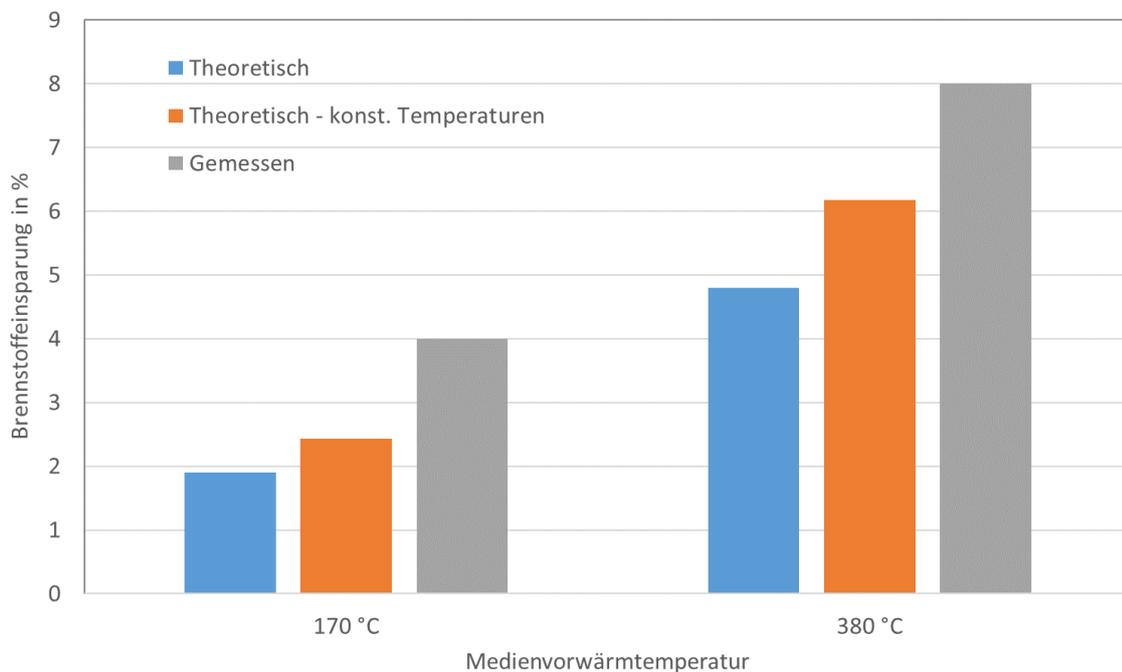


Abbildung 3.28: Brennstoffeinsparung im Vergleich zum Fall ohne Oxy-Fuel-Vorwärmung (Quelle: GWI)

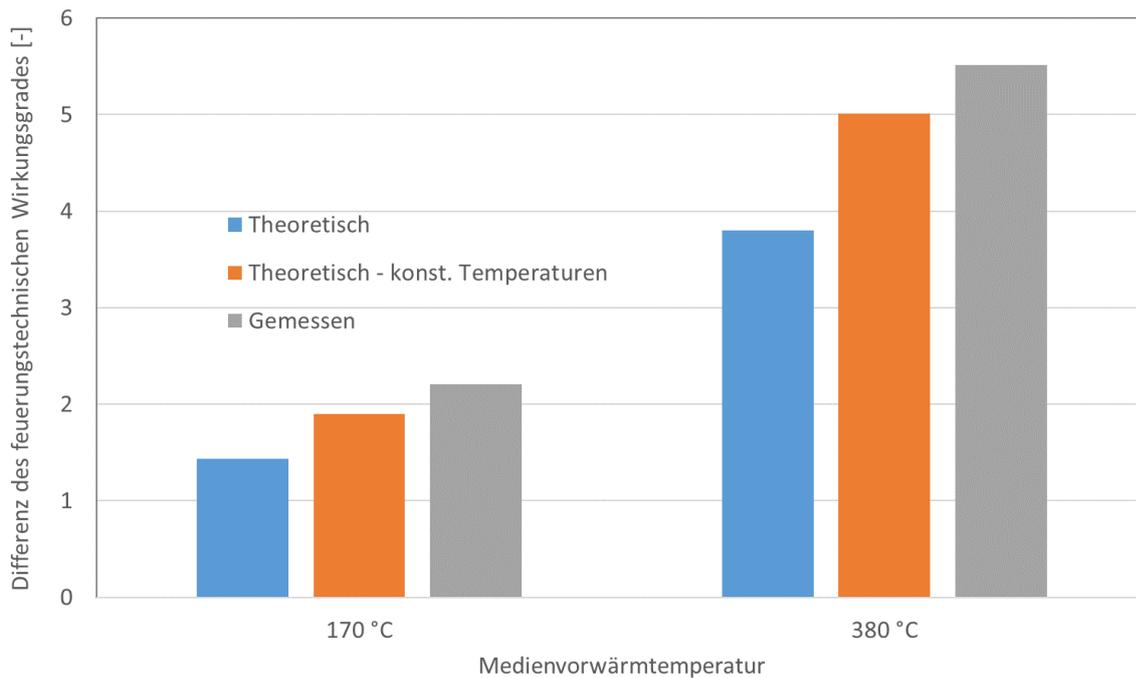


Abbildung 3.29: Änderung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades im Vergleich zum Fall ohne Oxy-Fuel-Vorwärmung (Quelle: GWI)

Hier zeigt sich, dass die Brennstoffeinsparung anhand der an der GWI-Anlage gemessenen Werte fast doppelt so groß wie die theoretisch berechneten Werte ausfällt. Analog verhält es sich mit dem feuerungstechnischen Wirkungsgrad.

CO₂-Bilanzierung

Es wurde gezeigt, dass durch eine Medienvorwärmung eine Brennstoff- und Sauerstoffeinsparung erzielt werden kann, welche gleichzeitig eine geringere Abgasmenge bedingt. Das Abgas einer Erdgas-Sauerstoffverbrennung besteht hauptsächlich aus CO₂ und H₂O. Kohlendioxid ist ein Treibhausgas, welches den Klimawandel maßgeblich vorantreibt. Seit dem letzten Jahrzehnt ist das Treibhausgas zunehmend in den Fokus der weltweiten Klimapolitik gerückt. Das erklärte Ziel ist demnach branchenübergreifend CO₂ einzusparen. Im Folgenden wird die durch Medienvorwärmung erzielte CO₂-Einsparung ermittelt.

Zunächst wird mit Gleichung 3.10 die spezifische CO₂ Menge im Abgas bestimmt.

$$V_{CO_2} = \left(CO^B + CH_4^B + \sum n C_n H_m^B + CO_2^B \right) \left[\frac{m_n^3 CO_2}{m_n^3 Brenngas} \right] \quad (3.10)$$

Für die Erdgaszusammensetzung aus **Abbildung 3.23** ergibt sich eine CO₂-Menge im Abgas zu $V_{CO_2} = 1,058 \left[\frac{m_n^3 CO_2}{m_n^3 Brenngas} \right]$. Anschließend wird diese Größe mit dem vorhandenen Brenngasvolumenstrom verrechnet, um die absolute CO₂-Menge zu berechnen, welche bei einem gegebenen Brenngasvolumenstrom entsteht.

$$\dot{V}_{CO_2} = V_{CO_2} * \dot{V}_{Gas} [m^3_{CO_2}/h] \quad (3.11)$$

In **Tabelle 3.4** sind die CO₂-Emissionen sowie -Einsparungen für drei unterschiedliche Vorwärmtemperaturen anhand der Daten der Messungen der GWI-Versuchsanlage aufgeführt.

Tabelle 3.4: CO₂-Emissionen und CO₂-Einsparung anhand der Messungen am GWI-Versuchsofen

| Vorwärmtemperatur | 25 °C | 170 °C | 380 °C |
|--|---------|--------|---------|
| CO ₂ -Emissionen [m ³ _N /h] | 33,0625 | 31,74 | 30,4175 |
| CO ₂ -Einsparung [%] | | 4 | 8 |

Unter der Annahme, dass die Versuchsanlage eine reale Industrieanlage wäre und kontinuierlich das ganze Jahr betrieben wird, könnten bei einer Oxy-Fuel-Vorwärmung von 170 °C 11,585 t_{CO₂}/a und bei 380 °C 23,17 t_{CO₂}/a eingespart werden. Hierbei ist die CO₂-Einsparung durch den Minderverbrauch des Sauerstoffs noch nicht berücksichtigt.

3.2.3 AS 2.3 und AS 2.4 CFD Simulation der ausgewählten Glasschmelzwanne mit und ohne Vorwärmsystem (GWI)

In diesem Arbeitsschritt wird die im AS 2.1 untersuchte Glasschmelzwanne numerisch abgebildet und der IST-Zustand simuliert. Anschließend werden die numerischen Simulationen mit Vorwärmung durchgeführt und die Auswirkungen und Einflüsse diskutiert. In **Abbildung 3.30** ist die Wanne als numerisches Modell abgebildet. In den Simulationen wird nur der Oberofen (Verbrennungsraum) berücksichtigt. Das Glasbad wird nicht betrachtet. Die Oberfläche des Glasbades wird als Wand mit einem definierten Temperatur- und Emissionsverlauf angenommen. Diese Vorgehensweise hat sich in vielen Forschungsprojekten und Untersuchungen bewährt. In **Abbildung 3.30** ist neben der Position der Brenner auch der Abgaskanal dargestellt.

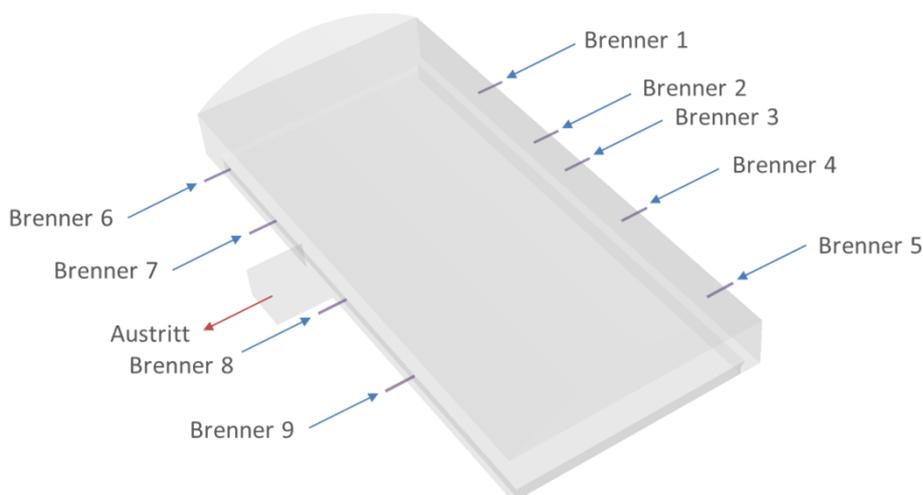


Abbildung 3.30: Abbildung der Wanne 4 im numerischen Modell

In **Tabelle 3.5** sind die Eingangsparameter wie Leistung und Erdgaszusammensetzung aufgeführt.

Tabelle 3.5: Eingangsparameter für die numerischen Simulationen

| | |
|---|---------|
| Gesamtleistung in MW | 3.374 |
| Luftzahl | 1,128 |
| Erdgaszusammensetzung in Vol.-% | |
| CH ₄ | 96,1526 |
| C ₂ H ₄ | 0,0000 |
| C ₂ H ₆ | 2,8330 |
| C ₃ H ₈ | 0,1627 |
| C ₄ H ₁₀ | 0,0910 |
| C ₅ H ₁₂ +C _n H _m | 0,0157 |

Die Brenner der Wanne werden unterschiedlich beaufschlagt. Über die Brenner, die sich an den äußeren Positionen befinden, wird weniger Leistung in die Wanne eingebracht, da sie sich in Wandnähe befinden.

Die Zellenanzahl und die verwendeten Berechnungsmodelle für Turbulenz, Strahlung und Verbrennung sind in **Tabelle 3.6** dargestellt. Das k- ω -Turbulenz-Modell hat sich für die Verbrennung in Glasschmelzwannen als das geeignetste herausgestellt. Die Verbrennung kann aufgrund der Erdgaszusammensetzung nur mit dem pdf-Modell in einer vertretbaren Rechenzeit abgebildet werden.

Tabelle 3.6: CFD-Setup, Berechnungsmodelle und Gitteranzahl

| CFD-Setup | |
|--------------------|--|
| Software | ANSYS FLUENT, Version 14.5.7 |
| Methode | Stationäre RANS-Simulation |
| Gittergröße | Ca. 3.5 Millionen Zellen |
| Turbulenzmodell | k- ω -Modell Standard |
| Verbrennungsmodell | nicht-adiabates PDF-Gleichgewichtsmodell |
| Strahlungsmodell | Discrete-Ordinate-Model |

Die vorhandenen Brenner (siehe **Abbildung 3.31 a**) in der Glasschmelzwanne sind für den Betrieb mit einer kombinierten Brennstoff-Sauerstoffvorwärmung nicht geeignet. Deshalb wurde ein neuartiges Brennerdesign für die Anwendung verschiedener Vorwärmtemperaturen entwickelt. Dieses ist im AS 1.4 ausführlich an der GWI-Versuchsanlage untersucht worden. Der prinzipielle Aufbau ist in **Abbildung 3.31 b**) dargestellt. Die numerischen Untersuchungen mit Oxy-Fuel-Vorwärmung sind dann ausschließlich mit dem neuen Brennersystem durchgeführt worden. Die Umsetzung der Oxy-Fuel-Vorwärmung wird voraussichtlich nur über die Brenner 2, 3, 4, 7 und 8 erfolgen. Deshalb wird in den Simulationen auch nur dieser Umbau berücksichtigt.

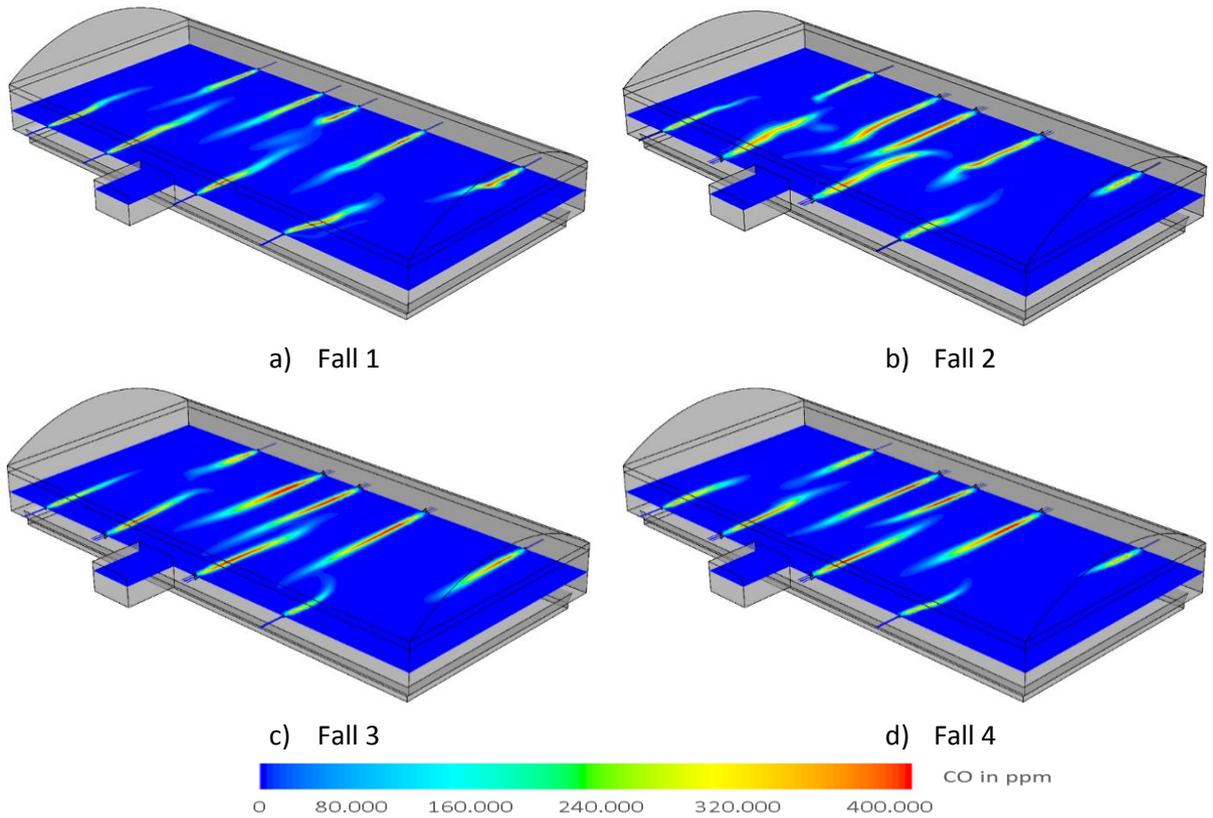


Abbildung 3.33: Simulierte CO-Konzentrationsverteilung in der Brennerebene der Glasschmelzwanne für die untersuchten Szenarien (maximaler Skaleneindwert)

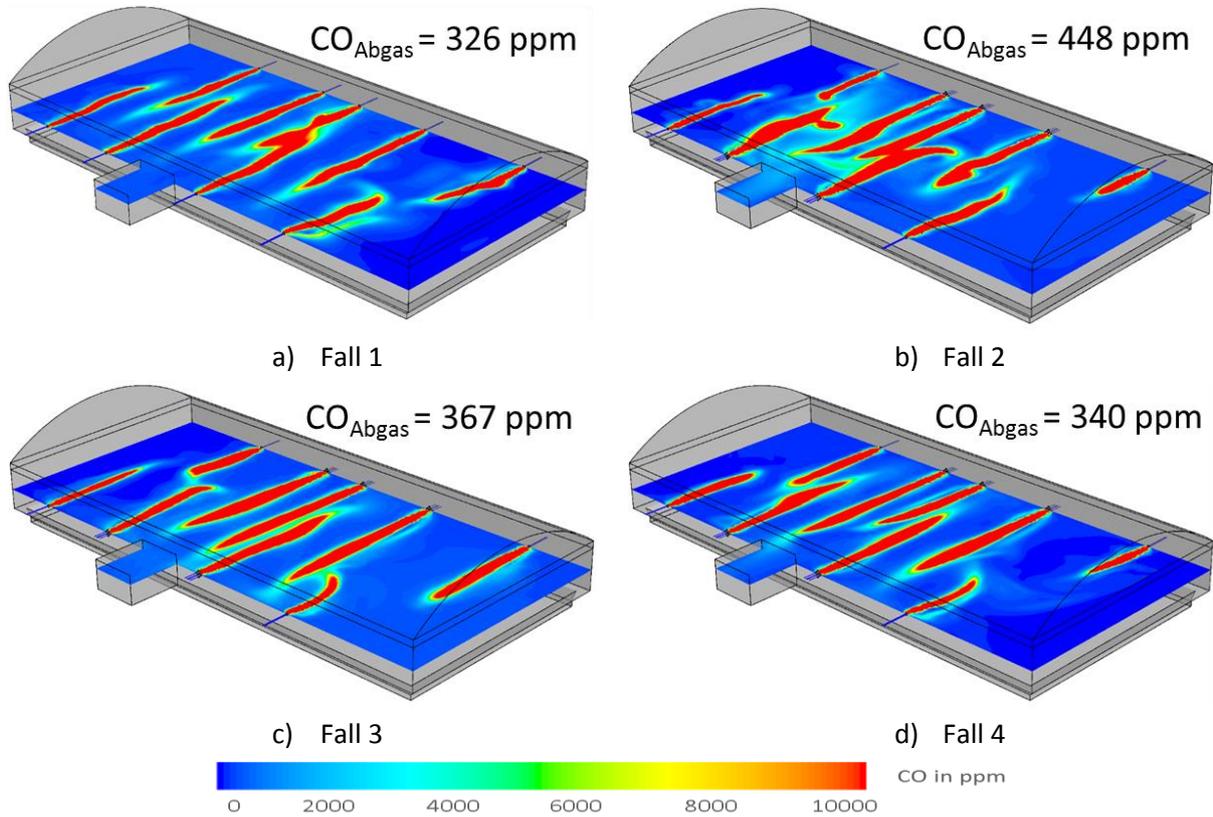


Abbildung 3.34: Simulierte CO-Konzentrationsverteilung in der Brennerebene der Glasschmelzwanne für die untersuchten Szenarien (Skaleneindwert 10.000 ppm)

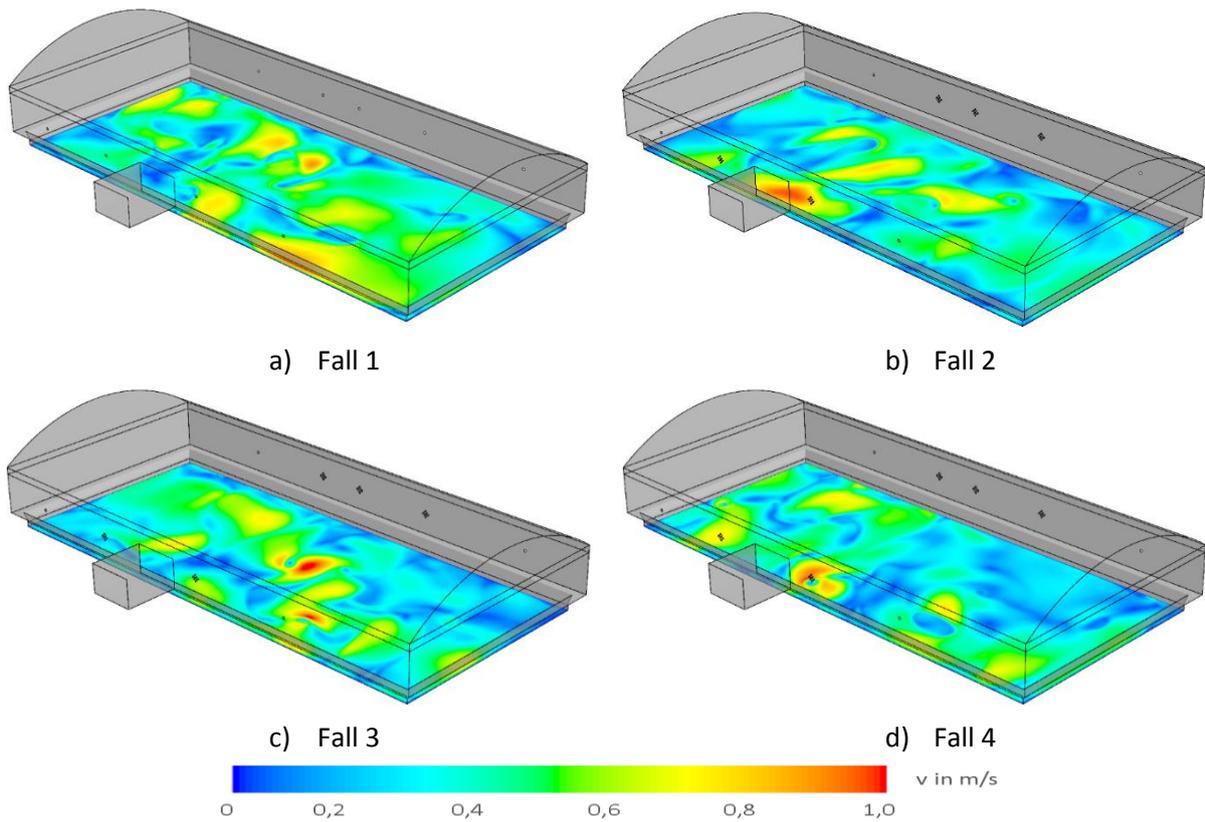


Abbildung 3.35: Simulierte Geschwindigkeitsverteilung 10 mm über dem Glasbad der Glasschmelzwanne für die untersuchten Szenarien

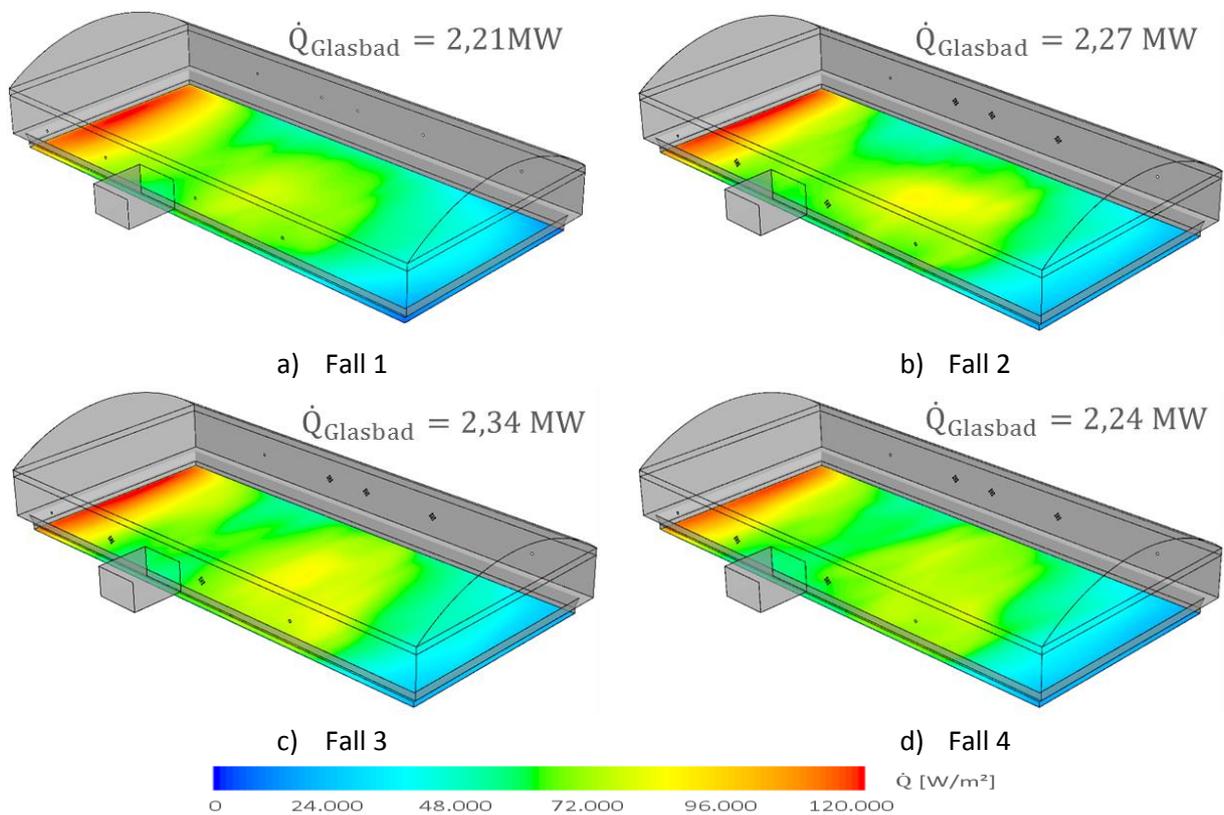


Abbildung 3.36: Simulierter Wärmeflussstrom durch das Glasbad der Glasschmelzwanne für die untersuchten Szenarien

In den **Abbildungen 3.32 bis 3.36** sind beispielhaft die numerischen Ergebnisse der Fälle mit und ohne Vorwärmung dargestellt.

Dabei werden folgende Fälle unterschieden:

Fall 1: Referenzfall (alte Brennergeometrie), ohne Medienvorwärmung,

Fall 2: Neue Brennergeometrie, ohne Medienvorwärmung,

Fall 3: Neue Brennergeometrie, mit Medienvorwärmung ($T_{\text{Vorw.}} = 380 \text{ °C}$), konstante Brennerleistung analog zu Fall 1 und 2

Fall 4: Neue Brennergeometrie, mit Medienvorwärmung ($T_{\text{Vorw.}} = 380 \text{ °C}$), angepasste Brennerleistung, so dass die gleiche Leistung (chemisch und thermisch) wie im Referenzfall in die Wanne eingebracht wird.

Der Vergleich der Fälle a und b 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 in **Abbildung 3.34** und der etwas erhöhten Wärmeübertragung in das Glasbad (**Abbildung 3.36**) sehr gut erkennbar. Die etwas höheren CO-Emissionen für diesen Fall sind auf die etwas schlechtere Mischung von Brennstoff und Oxidator zurückzuführen. Auch dies ist anhand dieser Darstellung und der entsprechenden Temperaturverteilung zu erkennen. Die Flammen weisen nicht ganz die straffe Kontur der anderen Fälle auf. Dies lässt sich durch die niedrigeren Austrittsgeschwindigkeiten von Gas und Oxidator erklären. Die Auswirkungen sind aber als sehr gering zu bezeichnen, wie dies auch anhand der Wärmeübertragung (**Abbildung 3.36**) und der Strömungsverteilung über dem Glasbad (**Abbildung 3.35**) zu erkennen ist.

Der Vergleich der Fälle mit und ohne Vorwärmung zeigt, dass auch hier der Einfluss auf die Temperaturverteilung und die Strömung innerhalb der Wanne kaum Auswirkungen hat. Im Fall 3 (Vorwärmung ohne Anpassung der Brennerleistung) ist eine leichte Erhöhung der Wärmeabgabe in das Glasbad zu erkennen. Dies bedeutet, dass eine Produktionssteigerung hier ohne Probleme durch Erhöhung der Brennerleistung realisierbar ist. Der Fall 4, Reduzierung der Brennstoffzugabe, zeigt analoge Verhältnisse in der Wanne und der Wärmeübertragung zum Fall ohne Vorwärmung. Wichtig neben der Wärmeübertragung in das Glasbad und damit auch der Glasbadtemperatur ist die Strömung unmittelbar über dem Glasbad. An einer Stirnseite der Wanne wird das staubförmige Gemenge in die Glaswanne eingebracht, 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. Anhand der Strömungsverteilung 10 mm über dem Glasbad in **Abbildung 3.35** ist zu erkennen, dass sowohl durch die neuen Brenner als auch durch die Vorwärmung keine Beeinflussung zu erwarten ist. Die numerischen Simulationen zeigen, dass mit der neuen Brennergeometrie und den geplanten Vorwärmmodulen eine Reduzierung des Energieeintrages mit sehr geringen bis keinen Beeinträchtigungen im Prozess des Glasschmelzens zu rechnen ist.

3.2.4 AS 2.5 Modifikation der Brennersysteme und Analyse der Regel- und Steuerungskette (GWI/UAS)

Mechanisch funktionierte das eingesetzte Vorwärmmodul einwandfrei. Das Übertragungsverhalten der Wärmetauscher war etwas schlechter als berechnet; wodurch hierbei für die industrielle Anwendung Anpassungen bei der Auslegung notwendig sind.

Beim Regelungssystem wurden mehrere Möglichkeiten zur Optimierung ausgemacht.

Zusammengefasst konnten im Zuge des Testlaufs am GWI-Ofen folgende Ansatzpunkte für entsprechende Modifikation des Vorwärmmoduls ausgemacht werden:

- Verhalten der Wärmeübertrager
Die heißluftseitigen Ausgangstemperaturen der Wärmetauscher waren deutlich höher als erwartet, d. h. der Wirkungsgrad der Apparate war schlechter als vom Lieferanten errechnet. Eine Anpassung der Auslegungsparameter ist somit dringend notwendig.
➔ Modifikation: Überrechnung der Apparate und Neudimensionierung
- Anpassung des Aufbaus des Vorwärmmoduls
Für einen industriellen Einsatz ist das System kompakter zu gestalten, da die Platzverhältnisse, speziell bei Mehrbrenneranlagen, ein Problem bei Bestandsanlagen darstellen.
➔ Modifikation: konstruktive Anpassung
- Durchflussregelung „heiß“
Die Regelung des Durchflusses erfolgt derzeit vor der Vorwärmeinheit. Dies bedeutet, dass bei Mehrbrenneranlagen mit Einzelbrennerregelung je eine eigene Vorwärmeinheit notwendig ist.
➔ Modifikation: Anpassung der Brennerregelung für Hochtemperatur (d. h. Anpassung der Leitungen, Komponenten und Materialien)
- Große Trägheit beim Reaktionsverhalten
Regeleinriffe 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 PH-System mit einem regelbaren Heißluftbypass am HL-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

4 Fazit

Die bisherigen Untersuchungen haben folgende Erkenntnisse erbracht:

1. Die theoretisch errechnete Brennstoffeinsparung war geringer als die tatsächlich gemessene am GWI-Versuchsofen. Dies muss den realen Anwendungsfall verifiziert werden.
2. Die Auswirkungen der Vorwärmung auf die Temperatur-, das Wärmeübertragungs-, Strömungs- und Schadstoffverhalten sind als moderat zu bezeichnen, wenn die Brennergeometrie entsprechend angepasst wird. Dies haben sowohl die Messungen als auch die numerischen Untersuchungen gezeigt. Somit ist nicht mit einer Beeinflussung des Wannenverhaltens, der Produktqualität oder der Schadstoffemissionen bei der Realisierung an der realen Anlage zu rechnen.
3. Schwachpunkte in der Auslegung, Realisierung und entsprechendem Regelverhalten der Vorwärmeinheit sind identifiziert worden und werden durch Modifikationen und Anpassungen vor dem industriellen Einsatz verbessert.

Die Umsetzung der kombinierten Oxy-Fuel-Vorwärmung wird derzeit im Rahmen eines Nachfolgeprojektes vorbereitet. Dabei sollen dann die Industrietauglichkeit, das Verhalten der Vorwärmeinheit und der Glasschmelzwanne in Langzeittests, die tatsächlich erreichbare Brennstoffeinsparung, die Auswirkungen auf die Glasqualität und das Schadstoffverhalten usw. näher untersucht werden. Abschließend wird durch eine Kosten-Nutzen-Betrachtung die Effizienz und der ROI abgeschätzt. Außerdem werden notwendige Handlungsempfehlungen für die Umrüstung von bestehenden Anlagen sowie die Berücksichtigung der Vorwärmung bei Neuauslegungen aufgestellt.

5 Literatur

- [1] 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, #DE-FC36-021D14315, USA, 2004
- [2] Wüning, J. G., Milani, A., Handbuch der Brennertechnik für Industrieöfen - Grundlagen, Brennertechniken, Anwendungen, 2. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 2011.