



HVG-DGG
SERVICE UND FORSCHUNG
FÜR DIE GLASINDUSTRIE



FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG
GASFACHLICHE WEITERBILDUNG
DVGW-PRÜFSTELLE UND SACH-
VERSTÄNDIGENSTELLE FÜR DIE
INDUSTRIELLE GASVERWENDUNG

Abschlussbericht

der Forschungsstelle(n)

1, GWI - Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

2, HVG - Hüttentechnische Vereinigung der deutschen Glasindustrie e.V.

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur

Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **IGF-Nr. 16851 N**

Auslegung, Optimierung und Nachweis der Anwendbarkeit der Verdünnten

Verbrennung an regenerativ befeuerten Glasschmelzwannen zur NO_x-

Minderung und Energieeinsparung

(Verdünnte Verbrennung II, Anschlussprojekt zum IGF-Projekt: 14755 N)

(Bevolligungszeitraum: 01.01.2011 – 31.12.2012 bzw. 30.06.2013)

der AiF-Forschungsvereinigung

Gaswärme

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	4
2.	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Aufgabenstellung	5
2.1	Anlass für den Forschungsantrag / Ausgangssituation / Stand der Forschung	5
2.2.	Erzielte Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt „Verdünnte Verbrennung“	9
3.	Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg.....	12
3.1	Forschungsziel	12
3.1.1	Angestrebte Forschungsergebnisse.....	12
3.1.2.	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	13
3.2.	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels.....	13
4.	Untersuchungs- und Messmethoden, Modelle der numerischen Simulationen	17
4.1	Messtechnische bzw. experimentelle Grundlagen.....	17
4.1.1.	Prinzip der U-Flammenwanne	17
4.1.2.	Prinzip der Querbrennerwanne	17
4.1.3.	Messtechnik.....	18
4.2	Einfache Wärmebilanzen.....	18
4.3	Berechnung des Verhaltens der Regenerativkammern.....	19
4.4	Grundlagen der numerischen Simulation reaktiver Strömungen.....	19
4.4.1.	Turbulenzmodellierung.....	20
4.4.2.	Wärmeübertragungsvorgänge.....	21
4.4.3.	Verbrennungsmodellierung	21
4.4.4.	Modellierung der NO-Bildung.....	22
5.	Ergebnisse der experimentelle Untersuchungen	24
5.1	Erfassung der Betriebsparameter an einer Querbrennerwanne zur Herstellung von Flachglas.....	24
5.2	Bestimmung der Wärmebilanzen an den untersuchten Wannen.....	32
5.2.1	Querbrennerwanne zur Floatglasherstellung	32
5.2.2	U-Flammenwanne zur Herstellung von Behälterglas	34
5.3	Kammerberechnung.....	36
5.3.1	Querbrennerwanne zur Floatglasherstellung	36
5.3.2	U-Flammenwanne zur Herstellung von Behälterglas	37
5.4	Umsetzung der Abgasrezirkulation an einer Behälterglaswanne.....	37
5.4.1	Versuch 1 im Mai 2013	38
5.4.2	Versuch 2 im Juni 2013	39
6.	Ergebnisse der numerischen CFD-Simulationen.....	42
6.1	Bestimmung der Parameter des Druckverlustes in den Regeneratoren	42
6.2	Ergebnisse der Umsetzung des porösen Mediums als Ersatz für den realen Steinbesatz in den Regeneratoren	46
6.3	Ergebnisse zu möglichen Umsetzungskonzepten der Abgasrückführung	52
6.3.1	Abgasrückführung ohne aktive Einbauten.....	52
6.3.2	Abgasrückführung mit Hilfe von aktiven Einbauten	64
6.4	Ergebnisse der Gitterstudie eines Regeneratorturms (U-Flammenwanne)	65
6.5	Verbrennungsluft- und Abgaszusammensetzungen	67
6.6	Ergebnisse der Simulationen der U-Flammenwanne ohne Regeneratoren (Ausgangszustand und mit 20 Prozent Abgasbeimischung).....	68
6.6.1	NO _x -Problematik und möglicher Lösungsansatz.....	73
6.7	Simulation der U-Flammenwanne inkl. Regeneratoren	76
6.8	Ergebnisse der Simulation der Querbrennerwanne im Ausgangszustand ohne Regeneratoren	77

6.9	Ergebnisse der Simulationen der Querbrennerwanne inkl. Regeneratoren (Ausgangszustand und mit 20 Prozent Abgasbeimischung).....	79
6.9.1	NO _x -Problematik	90
7.	Ausblick.....	91
8.	Abweichungen vom Projektplan	92
9.	Gegenüberstellung von Forschungszielen und erzielten Ergebnissen	94
10.	Nutzen der Forschungsergebnisse	95
10.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	95
10.2	Wirtschaftlicher Nutzen für KMU	96
11.	Veröffentlichungen.....	97
12.	Danksagung	98
13.	Abbildungsverzeichnis	99
14.	Tabellenverzeichnis	103
15.	Literaturverzeichnis	104

1. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes sollte die „Verdünnte Verbrennung“ durch eine externe Abgasrezirkulation an Glasschmelzwannen des Typs U-Flammenwanne realisiert werden, um die Anwendbarkeit, die NO_x-Minderung und eine eventuelle Energieeinsparung zu untersuchen. Dazu wurden verschiedene Konzepte zur Abgasrezirkulation durch unterschiedliche bauliche Maßnahmen, aktiv oder passiv, mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation betrachtet und bewertet.

Anhand von Berechnungen der Regeneratoren und Aufstellen von Wärmebilanzen der untersuchten Glasschmelzwannen durch die HVG konnten die Auswirkungen der Abgasrezirkulation an verschiedenen Typen der Regeneratoren und Glasschmelzwannen (U-Flammenwanne und Querbrennerwanne) aufgezeigt werden.

Für die Durchführung der numerischen Strömungssimulationen beider Glaswannentypen inklusive der Regeneratoren, wurde durch die Abstraktion des Steinbesatzes als poröses Medium, eine Möglichkeit geschaffen das Gesamtsystem einer regenerativ betriebenen Glasschmelzwanne in der gesamten Komplexität abzubilden.

Der Glaswannentyp Querbrennerwanne wurde in diesem Projekt hinsichtlich des möglichen Potentials der Abgasrezirkulation sowie der möglichen Auswirkungen auf das Verbrennungs-, Strömungs-, Wärmeübertragungs- und Schadstoffverhaltens mittels numerischer Strömungssimulation als Gesamtsystem inklusive aller Anbauten untersucht. Dies ist bisher einmalig bzw. den Projektpartnern nicht bekannt und gibt den Glaswannenherstellern und -betreibern die Möglichkeit an die Hand ihre Anlagen als Gesamtsystem in einer numerischen Strömungssimulation zu betrachten.

Die Umsetzung der Verdünnten Verbrennung an einer realen U-Flammenwanne wurde zum Ende des Projektes vollzogen. Die Umsetzung hatte aber Einschränkungen, da die dort verbauten Installationen zur Abgasrückführung nicht die erwünschte bzw. benötigte und im Vorgängerprojekt bestimmte rückzuführende Abgasmenge liefern konnte.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde teilweise erreicht.

2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Aufgabenstellung

2.1 Anlass für den Forschungsantrag / Ausgangssituation / Stand der Forschung

Die hohen Temperaturen, welche zum Schmelzen von Glas notwendig sind, werden bei möglichst geringem Energieverbrauch im Allgemeinen durch die Vorwärmung von Luft mittels Regeneratoren oder Rekuperatoren erreicht [1]. Regenerativ ausgerüstete Glasschmelzwannen kommen weit häufiger vor als Rekuperativwannen. Die Vorwärmung der Luft führt zu einer wesentlichen Verbesserung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades und damit zu einer Verringerung des Energieverbrauches. In einem Regenerator heizt das heiße Abgas beim Durchströmen eine Gitterung aus Feuerfeststeinen auf. Nach einer gewissen Zeit (ca. 20 - 30 min) wird der Abgasstrom abgestellt und kalte Frischluft über die erhitzten Steine geleitet und so erwärmt. Die Verbrennungsluft kann so auf sehr hohe Temperaturen (bis ca. 1400°C) erhitzt werden. Ein Nachteil der hohen Luftvorwärmtemperatur ist die damit verbundene hohe lokale Flammentemperatur, was unter anderem hohe NO_x-Emissionen zur Folge hat.

Der physikalisch-chemische Wärmebedarf variiert für Massengläser je nach Zusammensetzung und Recyclingscherbenanteil zwischen 520 und 757 kWh/t_{Glas}, der theoretisch technisch realisierbare zwischen 743 und 1081 kWh/t_{Glas}, wohingegen der reale Bedarf für Behälterglas mit neuen und optimal ausgelegten Wannen bei 1000 bis 1250 kWh/t_{Glas} liegt [2], [3]. **Abbildung 2-1** illustriert den "theoretischen" Energiebedarf und den realen Energiebedarf von Glasschmelzwannen, wobei neueste und modernste Glasschmelzanlagen zu Beginn der Wannenreise bereits sehr nahe an den technisch realisierbaren Grenzwert heran kommen (**Abbildung 2-2**).

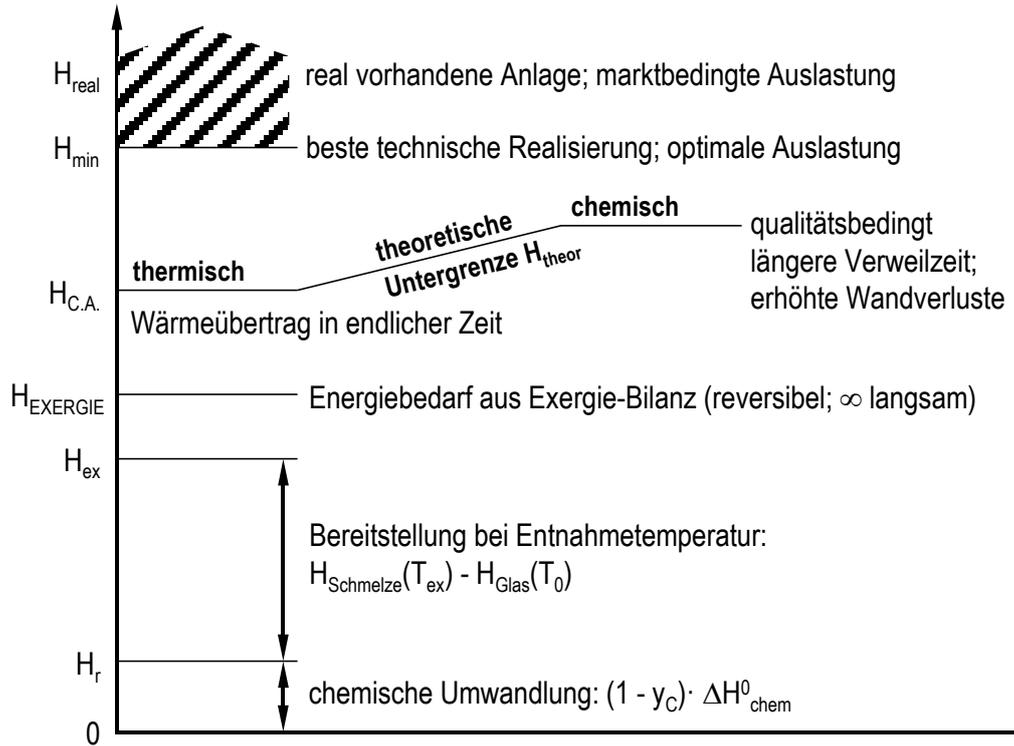


Abbildung 2-1: Zusammenfassende Darstellung der Einflussgrößen, die den tatsächlichen Energiebedarf eines real betriebenen Schmelzaggregates ausmachen [3]

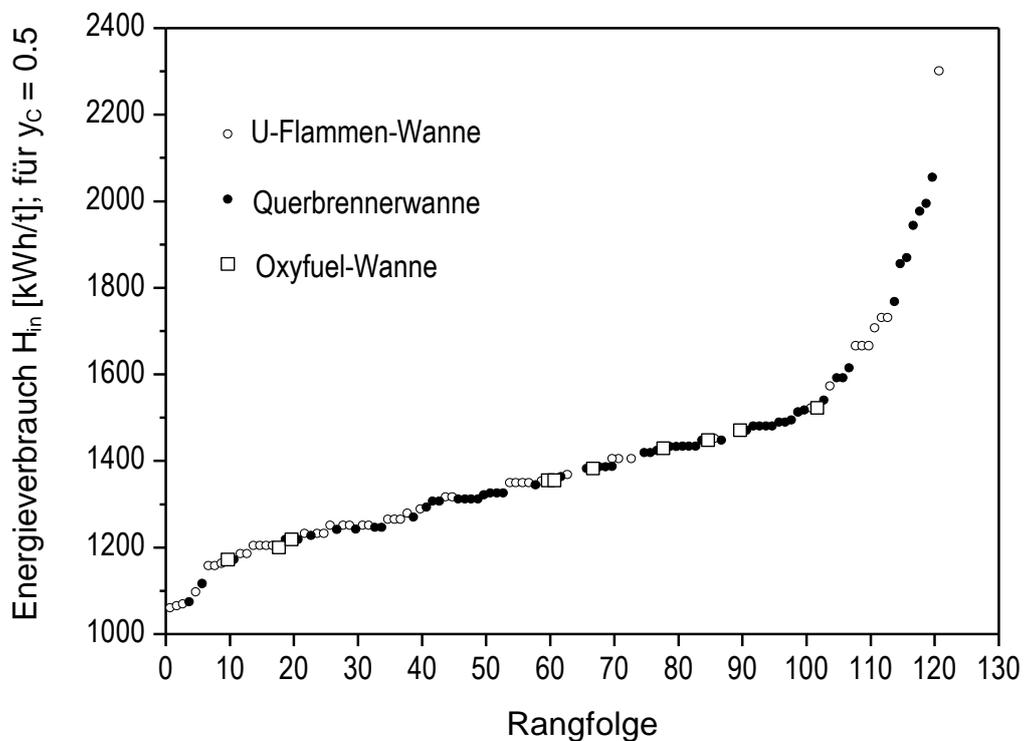


Abbildung 2-2: Energieverbrauch von 123 weltweit ausgewählten Behälterglaswannen nach [4], die Daten sind auf einen Schergehalt von 50 % normiert.

Viele der im Betrieb befindlichen Anlagen erreichen diese geringen Energieverbräuche jedoch noch nicht, da bauliche Gegebenheiten, sich verändernde wirtschaftliche Anforderungen und Randdaten, geänderte Anforderungen während der Laufzeit einer Wanne, Materialeigenschaften, Alterung und Korrosion u. a. m. eine optimale Fahrweise und Auslegung der Anlagen verhindern oder in der langen Laufzeit der Aggregate von bis zu 15 Jahren hinfällig bzw. nicht realisierbar sind.

Eine sehr gute Übersicht über die Primär- und Sekundärmaßnahmen zur NO_x -Reduktion an Glasschmelzwannen gibt Kircher in [5]. Die NO_x -Bildung in Glasschmelzwannen wird hauptsächlich durch die thermische NO -Bildung (nach Zeldovich) in der Flamme verursacht. Haupteinflussgrößen sind dabei die Flammentemperatur, der Sauerstoffgehalt in der Reaktionszone und die Verweilzeit. Andere NO_x -Bildungsmechanismen (promptes NO und Brennstoff- NO) spielen im vorliegenden Fall nur eine untergeordnete Rolle [6]. Da der Vermeidung von Schadstoffen bei gleichzeitig möglichst niedrigem Energieverbrauch der Vorrang vor anderen Maßnahmen zu geben ist, werden die Primärmaßnahmen zur NO_x -Minderung favorisiert. Hierbei müssen die NO_x -Bildung fördernden Parameter (Flammentemperatur, Sauerstoff- und Stickstoffgehalt sowie Verweilzeit) so beeinflusst werden, dass die NO_x -Entstehung reduziert wird [7–10].

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen bezüglich der NO_x -Emissionen im Bereich der Glasindustrie (TA Luft 2002) haben sich seit Oktober 2007 extrem verschärft (500 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ für Neuanlagen mit einem Abgasstrom von mehr als 50.000 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ und 800 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ für kleinere und Altanlagen bei 8 % O_2 im trockenen Abgas). Reichen Primärmaßnahmen nicht aus, um den gesetzlichen Bestimmungen zu genügen, ist die Einhaltung der Grenzwerte nur durch teure Sekundärmaßnahmen realisierbar, wie SCR- oder SNCR-Denox-Anlagen. Bei Anlagen mit regenerativer Luftvorwärmung ist diese Art der NO_x -Reduktion mit erheblichem finanziellen und technischen Aufwand verbunden (ca. 25 % der Gesamtinvestitionskosten zuzüglich der jährlichen Betriebskosten).

Bereits vor 1990 wurden am GWI grundlegende Arbeiten zur Entstehung von NO_x bei der Verbrennung von Erdgas bei hohen Temperaturen durchgeführt [11]. Hier konnte gezeigt werden, dass schon ein Rezirkulationsfaktor von 10 % zu einer Verringerung der NO_x -Konzentrationen um bis zu 40 % führt - bezogen auf den damaligen Ausgangszustand.

Neueste Veröffentlichungen zeigen, dass mehrere Wege zur NO_x -Minderung in Glasschmelzwannen verfolgt werden. Einerseits werden neue Brenner für Glasschmelzwannen entwickelt, z. B. [12 -17], die unter anderem mit Brennstoff- oder Luftstufung arbeiten und so die Parameter Sauerstoffpartialdruck und Flammentemperatur beeinflussen. Andererseits werden neue Verbrennungskonzepte, wie z. B. die Oxy-Fuel-Glasschmelzwanne umgesetzt, die gute Ergebnisse hinsichtlich NO_x -Emissionen und Energieverbrauch erzielen [18], [19]. Aufgrund der hohen Betriebskosten für die Bereitstellung des Sauerstoffs werden diese Konzepte aber überwiegend im Bereich Spezialglas eingesetzt. Diese Wege sind geeigneter für Neu- oder Umbauten von Glasschmelzwannen, da meist der Brennraum an die geänderten Bedingungen der Wärmeübertragung angepasst werden muss.

Für bestehende Anlagen, besonders mit Regeneratoren versehene U-Flammenwannen und Querbrennerwannen, die in ihrer Brenner-Brennraum-Konfiguration hinsichtlich einer optimalen Wärmeübertragung ausgereift sind, bedeuten neue Brennersysteme in ihrer Umsetzung für den Betreiber möglicherweise ein hohes Risiko (z. B. Redoxverschiebung). Herkömmliche Verfahren zur Minderung der NO_x -Emissionen in mit regenerativer Luftvorwärmung betriebenen Glasschmelzwannen, sind an ihre Grenzen gestoßen.

Bei den abgeschlossenen Forschungsprojekten IGF-Projekt 12797 N [20] und IGF-Projekt 80ZN [21] sowie im vor kurzen abgeschlossenen Vorhaben IGF-Projekt 15015 N [22] wurde unter anderem für U-Flammenwannen mit einem Konzept der ortsversetzten, gestuften Brennstoffzugabe (Sekundärgaseindüsung) gearbeitet, um eine Minderung der NO_x -Bildungsraten und der Energieverbräuche zu erzielen. Für Querbrennerwannen ist dieses untersuchte Konzept so nicht umsetzbar, sondern wird durch die spezielle Form der Wannen insofern bereits angewandt, als dort die Ansteuerung und Regelung der einzelnen Brennerlanzen eine entsprechende Verteilung des Energieträgers über der Wannenlängsachse ermöglicht. Hier muss nach anderen Möglichkeiten der NO_x -Minderung gesucht werden, um die erreichten Werte zu unterschreiten und den neuen Grenzwerten Genüge zu leisten.

In anderen Industriezweigen (Thermoprozessanlagen, Gasturbinen, Sinteranlagen, ...) wird in der letzten Zeit eine weitere Möglichkeit der Beeinflussung der NO_x -Entstehungsparameter entwickelt und eingesetzt. Es handelt sich dabei um die Abgasrezirkulation, die auch auf Verbrennungssysteme mit regenerativer Luftvorwärmung angewendet wird. Für die Abgasrezirkulation werden zwei Strategien verfolgt. Die erste Variante ist die interne Abgasrezirkulation, deren bekanntestes Prinzip die flammenlose Oxidation ist und bei der das Abgas innerhalb der Brennkammer rezirkuliert. Die Anwendung der flammenlosen Oxidation in rekuperativ beheizten Glasschmelzwannen wurde in einem vom PtJ (Projektträger Jülich) geförderten und vom BMWi finanzierten Forschungsprojekt „GlasFLOX“ [23] erfolgreich umgesetzt. Seit ca. 2 Jahren arbeiten die Brenner störungsfrei, und es wurde eine NO_x -Reduktion von ca. 50 % für diese spezielle Anlage erreicht.

Die innere Rezirkulation von Abgas im Bereich der Glasschmelzwannen wird durch eine geschickte, angepasste Geometrie des Ofenraumes zur Reduzierung der NO_x -Emissionen praktiziert. Durch eine entsprechende Flammenführung wird ein Teil des Abgases im Verbrennungsraum zirkuliert bevor es diesen verlässt und führt so zu einer Reduktion des Sauerstoffgehaltes in der Reaktionszone. Jedoch reichen, wie die Praxis zeigt, diese Maßnahmen nicht in jedem Fall aus, um die NO_x -Emissionen nachhaltig zu senken und die Grenzwerte ohne Sekundärmaßnahmen einzuhalten.

Die zweite Variante ist die externe Abgasrezirkulation, bei der ein Teil des Abgases nach Verlassen der Brennkammer der Frischluft wieder zugeführt wird. Durch die Rückführung von Abgasen wird der Sauerstoffpartialdruck in der Reaktionszone erheblich reduziert und die Verbrennung damit verdünnt (mild combustion, diluted combustion). Gleichzeitig werden Temperaturspitzen, die mitverantwortlich für höchste NO_x -Emissionen sind, abgebaut und das Temperaturprofil vergleichmäßigt [24 - 28].

Versuche mit externer Abgasrezirkulation wurden im Bereich der Glasindustrie vor einigen Jahren als Kurzzeittest durchgeführt [29]. Hierbei wurde die der Brennerlanze zugeführte Primärluft durch rezirkuliertes Abgas ersetzt. Eine NO_x -Minderung konnte nicht wirklich festgestellt werden (siehe auch Ergebnisse des Vorgängerprojektes „Verdünnte Verbrennung“). Jedoch zeigte sich bezüglich der Energieeffizienz eine leichte Verbesserung.

Seit der Antragstellung des Vorgängerprojektes 2004 hat sich der Stand der Forschung bezüglich der NO_x -Minderung in regenerativ befeuerten Glasschmelzwannen nicht grundlegend geändert [7]. An Glasschmelzwannen mit regenerativer Luftvorwärmung wird die Technologie der Abgasrezirkulation oder -rückführung bisher noch nicht praktiziert, da viele Fragestellungen bezüglich der Rand- und Nebeneffekte auf den Glasschmelz- und Herstellungsprozess noch nicht geklärt sind.

Aufgrund der auftretenden NO_x -Emissionen bei der Glasherstellung, die durch die notwendigen hohen Schmelztemperaturen entstehen, der Verschärfung der Grenzwerte, des entsprechend hohen Energieverbrauchs und den damit verbundenen CO_2 -Emissionen, ist der Forschungsbedarf für Glasschmelzwannen weiterhin gegeben und aktuell.

Deshalb wurde im Rahmen des Vorgängerprojektes (IGF-Projekt 14755 N) [30], aufbauend auf den Kenntnissen der NO_x -Entstehung und deren Beeinflussung, ein relativ einfaches primäres Konzept der Abgasrezirkulation zur NO_x -Reduzierung und Energieeinsparung an regenerativ beheizten Glasschmelzwannen entwickelt und untersucht.

2.2. Erzielte Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt „Verdünnte Verbrennung“

Im Vorgängerprojekt „Energieeinsparung und NO_x -Minderung an regenerativ befeuerten Glasschmelzwannen durch verdünnte Verbrennung (Verdünnte Verbrennung)“ (IGF-Projekt 14755 N, Abschlussbericht liegt auf CD vor) [30], wurden drei verschiedene Konzepte der Abgasrezirkulation auf ihre Eignung und auf ihr NO_x -Minderungspotenzial hin untersucht und analysiert und zwar, die interne Abgasrezirkulation und die externe Abgasrezirkulation mit den Untervarianten Zumischung zur Luft und Zumischung zum Brennstoff. Durch eine Kombination von numerischer Simulation und experimentellen Untersuchungen sowohl am GWI-Hochtemperaturversuchssofen als auch an zwei produzierenden Glasschmelzwannen, konnte auf effektive Weise eine geeignete Variante der Abgasrezirkulation herausgearbeitet werden, die eine deutliche Reduzierung der NO_x -Emissionen bewirkt. Diese wurde dann experimentell am GWI-Versuchssofen überprüft und im letzten Schritt numerisch auf die untersuchten Glasschmelzwannen übertragen. In **Abbildung 2-3** sind die NO_x -Minderungsraten aufgetragen, die für die Versuche am GWI-Versuchssofen numerisch vorhergesagt und experimentell erreicht wurden. Die erzielte NO_x -Reduktion liegt bei ca. 45 %, bei einem Ausgangswert von 1700 ppm am Ausgang des Verbrennungsraumes und mit 8 Vol.-% Restsauerstoff am GWI-Versuchssofen.

Weitere Kriterien für eine gute Anwendbarkeit der Abgasrezirkulation sind,

1. dass die Wärmeübertragung in der Wanne nicht grundsätzlich beeinflusst wird, d. h. die Flammenform und Temperaturverteilung ist ähnlich zum Ausgangszustand und
2. dass ein vollständiger Ausbrand gewährleistet wurde.

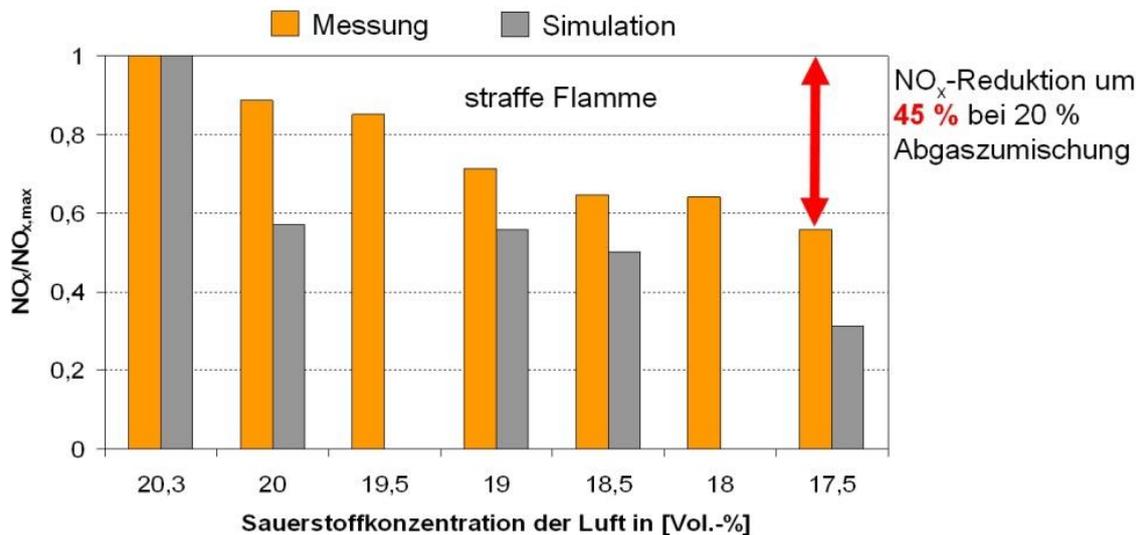


Abbildung 2-3: Vorhergesagte und erreichte NO_x-Minderung durch die „Verdünnte Verbrennung“ am GWI-Hochtemperaturversuchsofen

Diese Kriterien werden durch die Zumischung von Abgas zur Luft weitgehend erfüllt. Die numerische Übertragung der Abgasrezirkulation auf die untersuchten Glasschmelzwannen zeigt eine mögliche NO_x-Reduktion von ca. 40 - 45 %. Diese Reduktionsraten sind natürlich abhängig vom Ausgangszustand der NO_x-Emissionen. Bei einer schon sehr gut eingestellten Glasschmelzwanne sind die Minderungsraten geringer.

Bei der Auswertung und Zusammenstellung der Ergebnisse (siehe Abschlussbericht Kapitel 5) [30] wurden jedoch Fragen aufgeworfen, die einer weitergehenden Untersuchung bedürfen, bevor das Konzept der Abgaszumischung zur Luft an einer produzierenden Wanne umgesetzt werden kann. Die Beeinflussung der Regeneratoren ist in den bisherigen Betrachtungen nicht berücksichtigt worden. Gemeint ist die Änderung des Druckverlustes, der Wärmeübertragung und Auswirkungen einer eventuellen erhöhten Staubbeladung durch die Erhöhung des Luftvolumenstromes durch Zumischung von bis zu 20 % Abgas. Weiterhin zeigt eine Analyse der Wärmeströme, dass hier noch Untersuchungsbedarf gegeben ist, da bisher das gesamte System der Glasschmelzwanne einschließlich Regenerator nicht betrachtet wurde. Somit kann eine Aussage über eine Einsparung an Brennstoff, das Strömungs- und Wärmeübertragungsverhalten in den Regeneratoren bei bis zu 20 % mehr Abgasvolumenstrom oder die Beeinflussung der Glasqualität noch nicht getroffen werden.

Eine Anpassung der Randbedingungen (Temperatur- und Emissionsgradverteilung auf dem Glasbad) bei den numerischen Simulationen an die realen Verhältnisse zeigte in neuesten Berechnungen, dass durch die Erhöhung des rezirkulierenden Abgasvolumens der Wär-

mestrom in das Glasbad erhöht werden kann. Hierzu sind jedoch vertiefende Betrachtungen notwendig, die nur im Rahmen eines Forschungsprojektes durchgeführt werden können.

Weiterhin wurde im Vorgängerprojekt „Verdünnte Verbrennung“ bisher nur der Glasschmelzwannentyp „U-Flammenwanne“ untersucht. Die Übertragung auf andere regenerative Glasschmelzwannenarten, wie die querbefeuerte Glasschmelzwanne, steht noch aus und soll u. a. Inhalt des aktuellen Projektes sein.

Die Resonanz der Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses zur Weiterführung des Themas in Form eines Nachfolgeprojektes war durchweg positiv, und die beteiligten Glaswannenbetreiber haben ihre Bereitschaft zur Untersuchung der Umsetzung der Abgasrezirkulation an ihren Wannen zur Vorhersage der Einflüsse auf den Glasschmelzprozess signalisiert (siehe Interessenbekundungen). Weiterhin konnten durch die Veröffentlichung der bisherigen Ergebnisse weitere Glaswannenbetreiber für diese hochaktuelle Thematik zur Mitarbeit im projektbegleitenden Ausschuss gewonnen werden.

3. Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

3.1 Forschungsziel

Hauptziel des Forschungsvorhabens ist der Nachweis der Anwendbarkeit, der Funktionstüchtigkeit und der Vorteile des im Vorgängerprojekt untersuchten Konzeptes der Abgasrezirkulation zur NO_x-Minderung und Energieeinsparung in regenerativ befeuerten Glasschmelzwannen. Dieses Konzept der externen Abgasrezirkulation (Abgaszumischung zur Luft), welches hinsichtlich der NO_x-Reduzierung bei regenerativ befeuerten Glasschmelzwannen Erfolg versprechend scheint, soll durch Tests an produzierenden Glasschmelzwannen die generelle Anwendbarkeit der Methode nachweisen. Dazu sind neben weitergehenden Untersuchungen hinsichtlich der Auslastung der Regeneratoren (Druckverlust, Wärmeübertragung, Staubbelastung, Korrosionsmechanismen, Lage der Kondensationszone, Veränderung der Feuerbelastung der feuerfesten Materialien etc.) auch energetische Betrachtungen des Gesamtprozesses des Glasschmelze notwendig. Die Wärmebilanzen, CFD-Simulationen und physikalisch-chemischen Betrachtungen müssen sicherstellen, dass es bei der Umsetzung des Konzeptes der externen Abgasrezirkulation zu keinen Schädigungen der Anlage kommt und die Glasqualität nicht beeinträchtigt wird.

Ein weiteres Ziel des Forschungsprojektes ist die Untersuchung der Anwendung der externen Abgasrezirkulation auf querbefeuerte Glasschmelzwannen. Hierfür muss nach geeigneten Lösungswegen zur Umsetzung gesucht werden.

3.1.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Folgende Forschungsergebnisse werden angestrebt:

- a) Die Bereitstellung eines Konzeptes zur NO_x-Reduzierung, welches gerade für Alt- aber auch für Neuanlagen in der Glasindustrie relativ einfach umsetzbar ist und den Glaswannenbetreiber, meist klein- und mittelständische Unternehmen, in die Lage versetzt, die NO_x-Grenzwerte der aktuellen gesetzlichen Vorgaben ohne teure Sekundärmaßnahmen einzuhalten. Dabei muss die Betriebs- und Prozesssicherheit jederzeit gewährleistet werden.
- b) Aufzeigen der Auswirkungen auf den Wärmehaushalt der Glasschmelzwanne durch Gesamtwärmebilanzen und Darstellung der Energieeinsparpotenziale (z. B. durch eine verbesserte Wärmeübertragung mittels erhöhter Strahlung, auf-grund des höheren CO₂- und H₂O-Anteils im Abgas bzw. durch Steigerung des konvektiven Anteils).
- c) Übertragung der Forschungsergebnisse auf einen weiteren regenerativen Glaswannentyp - die querbefeuerte Glasschmelzwanne - zur Darstellung der allgemeingültigen Anwendbarkeit der externen Abgasrezirkulation. Bei einem ähnlichen vorhergesagten NO_x-Minderungspotential, wie bei der U-Flammenwanne, soll die Abgaszumischung zur Luft für diesen Typ der Regenerativwannen ebenfalls durch Tests an produzierenden Glasschmelzwannen nachgewiesen werden.

3.1.2. Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Die angestrebten Forschungsergebnisse liefern folgenden innovativen Beitrag:

- a) Aus ökonomischer Sicht wird mit diesem Forschungsprojekt, aufbauend auf den Ergebnissen des Vorgängerprojektes, ein Verfahren weiterentwickelt, das, im Gegensatz zur jetzigen Technologie (DeNOx-Anlagen, aufwändige Brenner- (Regel- und Mess-) technik etc.), technisch einfach und preiswert zu realisieren ist. Durch die Abgaszumischung zur Luft nach dem Regenerator abgasseitig bzw. vor Eintritt in den Regenerator luftseitig, können hier einfache Materialqualitäten, ausgelegt für den Niedertemperaturbereich (400 – 600 °C), zum Einsatz kommen. Dies wiederum garantiert niedrige Material- und Anlagenkosten. Es können schon bekannte und bewährte Anlagen- und Maschinenelemente aus dem Wannenbau verwendet werden. Dadurch ist dieses neue Verfahren insbesondere für kleine und mittelständische Wannenbetreiber aus Kostengründen lukrativ, die somit die Investitionskosten für teure DeNOx-Anlagen und die laufenden Betriebskosten dafür einsparen.
- b) Aus energetischer Sicht soll durch eine Erhöhung der strahlenden Komponenten CO₂ und H₂O im Abgas und eine Erhöhung des konvektiven Anteils der Wärmeübertragung der Energieeintrag ins Glasbad intensiviert werden. Weiterhin wird durch eine Verlagerung des „Hot-Spots“ der Flamme, die Energie näher an den Quellpunkt der Glasschmelze gebracht, was wiederum eine Steigerung der Wärmeübertragung beinhaltet. Die Steigerung der Effektivität wird durch Einsparungen auf der Brennstoffseite ausgeglichen und führt somit gleichzeitig zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen.
- c) Aus ökologischer Sicht wird ein Konzept angeboten, das in anderen Industriebranchen eine NO_x-Minderung von 40 - 50 % erreicht. Im Vorgängerprojekt wurde für die Anwendung im Glasbereich an einer halbtechnischen Versuchsanlage ebenfalls eine NO_x-Minderung in dieser Größenordnung erzielt. Bei einem Nachweis der Anwendbarkeit an industriellen Produktionsanlagen sind viele Betreiber von Glasschmelzwannen in der Lage, die aktuellen gesetzlichen Grenzwerte ohne weitere Sekundärmaßnahmen einzuhalten.

3.2. Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Die Grundlagen und Möglichkeiten der externen Abgasrezirkulation (Variante: Zumischung von Abgas zur Verbrennungsluft, NO_x-Minderungspotenzial: ca. 40 - 50 %) sind im Vorgängerprojekt erarbeitet worden. Eine Abgaszumischung zur Luft in einer Größenordnung von 10 bis 20 % scheint Ziel führend. Im Rahmen dieses geplanten Projektes sind u. a. Fragen zur Auslastung der Regeneratoren zu beantworten. Dazu müssen diese Aggregate in einem ersten Schritt gesondert betrachtet werden. Hierzu ist die Aufnahme von Daten realer Anlagen notwendig. Die Regeneratoren werden dann am Rechner mittels numerischer Simulation am

GWl bzw. mit einem hausinternen Programm der Hüttentechnischen Vereinigung der deutschen Glasindustrie (HVG) bezüglich ihrer Kapazitätsgrenzen, Druckverluste etc. beim Betrieb mit Zumischung von Abgas untersucht. Anschließend werden in enger Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss Lösungsvorschläge zum Nachweis der Anwendbarkeit der externen Abgasrezirkulation erarbeitet, vor allem im Hinblick auf die technische Realisierbarkeit und den Kostenfaktor. Diese „Umbauten“ werden im Vorfeld in ihrer Gesamtheit numerisch berechnet und bezüglich Druckverlust, Wannenbeeinflussung, Wärmeübertragung etc. analysiert. Dazu werden - ebenfalls von der HVG - wärmetechnische Berechnungen durchgeführt, die im Vorfeld exakte Messungen der zu untersuchenden Glasschmelzwannen erfordern. Dabei wird jeweils eine Wanne pro Wannentyp (U-Flammenwanne, Querbrennerwanne) detailliert betrachtet.

Im Anschluss daran wird ein geeignetes Konzept für die externe Abgasrezirkulation zum Nachweis der Anwendbarkeit an produzierenden Glasschmelzwannen ausgewählt. Dieser „Nachweis“ wird durch eine Erfassung des Ist-Zustandes, die Unterstützung während der Umbauten und eine Erfassung des Wannenzustandes und der Glasqualität nach dem Umbau durch die beantragenden Forschungsstellen begleitet. Abschließend erfolgt eine Bewertung des Umbaus und der erzielten Ergebnisse durch eine wirtschaftliche und ökologische Analyse.

Der Nachweis an produzierenden Glasschmelzwannen ist notwendig, da die Ergebnisse des GWl-Hochtemperaturversuchsofens nicht unmittelbar auf die realen Glasschmelzwannen übertragen werden können. Die Strömungs- und Wärmeübertragungsverhältnisse zwischen Versuchsofen und realer Anlagen unterscheiden sich prinzipiell. Außerdem wird am Hochtemperaturversuchsofen die Luftvorwärmung durch einen externen Lufterhitzer realisiert. Somit können die Auswirkungen auf die Regeneratoren nur an den realen Anlagen untersucht werden. Weiterhin sind Aussagen zur Beeinflussung des Produktionsprozesses, der Glasqualität, des Feuerfestmaterials etc. nur durch Praxisversuche zu überprüfen.

Zweck und Nutzen der Praxisversuche liegen in der Nachweisbarkeit der Realisierbarkeit an einer produzierenden Anlage. Damit sollen die Auswirkungen und gegenseitigen Beeinflussungen der Abgasrezirkulation auf die Regeneratoren, die Wärmeübertragung, Strömung, Energieeffizienz etc. aufgezeigt werden. Das Hauptaugenmerk liegt aber auf den Auswirkungen auf die Glasqualität und -produktion, die an einer Versuchsanlage nicht nachgestellt werden können.

Die geplanten Umbauarbeiten für den Nachweis der Anwendbarkeit der Abgasrezirkulation beinhalten die Umsetzung eines ausgewählten Konzeptes, welches im Rahmen dieses Projektes erst erarbeitet werden muss. Bei einer U-Flammenwanne lässt sich die Rezirkulation durch die räumliche Nähe der Regeneratoren leichter realisieren als bei einer Querbrennerwanne. Wie das Abgas konkret (über Injektorwirkung, extra Gebläse etc.) rezirkuliert wird, muss detailliert untersucht werden und kann zu diesem Zeitpunkt nicht dargelegt werden. Die Mengen die für die Rezirkulation gebraucht werden, können in Größenordnungen bis zu 2.000 m³_N/h Abgas liegen. Da das konkrete Konzept noch nicht ausgewählt wurde, kann auch

über den Umfang der Umsetzung der Praxisversuche (d. h. die benötigten Rohrleitungen, Armaturen, Einbindung in Regelstrecke, etc.) noch keine konkrete Aussage getroffen werden. Hier ist die Mitarbeit der beteiligten Firmen gefordert. Bei den Umbauarbeiten werden sowohl GWI als auch HVG beratend zur Seite stehen. Es werden vor als auch nach den Umbauarbeiten ausführliche Messungen durchgeführt, um die Auswirkungen der Abgasrezirkulation abschätzen zu können. Die zeitliche Nähe der Praxisversuche an zwei oder mehr Glasschmelzwannen kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht gewährleistet werden, da die Umbauarbeiten von Wartungs- und Stillstandszeiten der jeweiligen Glasschmelzwanne abhängig sind und diese sind jetzt noch nicht definierbar. Weiterhin müssen diese Versuche und Arbeiten im Rahmen der laufenden Produktion eingetaktet werden und müssen einen Produktionsausfall oder Qualitätsverluste soweit wie möglich reduzieren.

Da diese Versuche nur die Realisierbarkeit und die Auswirkungen der Abgasrezirkulation demonstrieren sollen, sind für eine kommerzielle Umsetzung sowie Optimierungen bezüglich Effizienz weiterführende Arbeiten notwendig, die im Rahmen des Projektes zwar aufgezeigt, aber nicht umgesetzt werden sollen. Die durchgeführten Umbauarbeiten haben damit den Charakter der Vorwettbewerblichkeit, da keine marktreife Installation eingesetzt wird, sondern der zeitlich begrenzte Versuchsstatus erhalten bleibt.

Parallel zu den oben genannten Arbeitsschritten soll ein weiterer Typ der regenerativ befeuerten Glasschmelzwannen - die Querbrennerwanne - für die Eignung der externen Abgaszumischung zur Luft untersucht werden. Hierzu müssen die Auswirkungen auf NO_x -Minderung, Ausbrand, Flammenverhalten, Glasqualität, Wärmebilanz, Feuerfestmaterial und Regenerator ebenfalls betrachtet und analysiert werden, da die Ergebnisse der externen Abgasrezirkulation von der U-Flammenwanne (Vorgängerprojekt) nicht ohne weiteres übertragbar sind. Die querbefeuerte Wanne besitzt mehrere Ports auf jeder Seite und in einigen Fällen einen Regenerator ohne Kammertrennung.

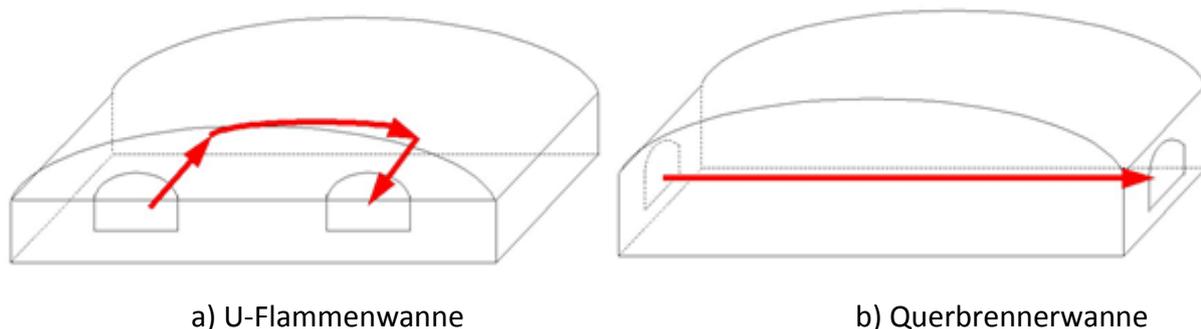


Abbildung 3-1: Prinzipskizzen verschiedener regenerativer Glasschmelzwannentypen

Durch den gegenüberliegenden Lufteintritt und Abgasaustritt ist das Strömungs- und Wärmeübertragungsverhalten (Konvektion und Strahlung) einer querbefeuerten Wanne gänzlich anders als bei einer U-Flammenwanne, siehe **Abbildung 3-1**. Dazu müssen im Vorfeld numerische Simulationen, basierend auf der messtechnischen Erfassung des IST-Zustandes einer realen Querbrennerwanne, durchgeführt werden, um Aussagen über die zu erwartende NO_x -

Minderung, das Ausbrandverhalten, den Wärmehaushalt etc. zu erhalten. Anschließend wird die oben genannte Vorgehensweise in Zusammenarbeit mit der HVG bezüglich des Erarbeitens von Lösungsansätzen sowie des Nachweises der Anwendbarkeit durchgeführt. Somit ist durch den Nachweis an verschiedenen regenerativen Glasschmelzwannentypen die Forderung der Vorwettbewerblichkeit erfüllt.

Zum Erreichen des Forschungsziels ist eine enge Verknüpfung der numerischen Simulation, wärmetechnischer Berechnungen und experimenteller Untersuchungen geplant und notwendig.

Die Planung, Auslegung und Umsetzung der externen Abgasrezirkulation wird in enger Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt. Einerseits wird so das vorhandene Know-how der Mitglieder genutzt und andererseits die technische Realisierbarkeit jederzeit gewährleistet sowie Schwierigkeiten und Probleme bei der Umsetzung vermieden bzw. im Vorfeld erkannt und gelöst.

4. Untersuchungs- und Messmethoden, Modelle der numerischen Simulationen

In diesem Kapitel werden Arbeiten der einzelnen Arbeitsschritte u. a. die Grundlagen der durchgeführten messtechnischen bzw. experimentellen Untersuchungen sowie die Modellbeschreibung der durchgeführten numerischen Simulationen dargestellt.

4.1 Messtechnische bzw. experimentelle Grundlagen

Zur Validierung der numerischen Strömungssimulationen (CFD) und zum Abgleich der Berechnungen der HVG wurden experimentelle Untersuchungen an produzierenden Glasschmelzwannen des Typs Querbrennerwanne und U-Flammenwanne, die nachfolgend kurz vorgestellt werden, durchgeführt.

4.1.1. Prinzip der U-Flammenwanne

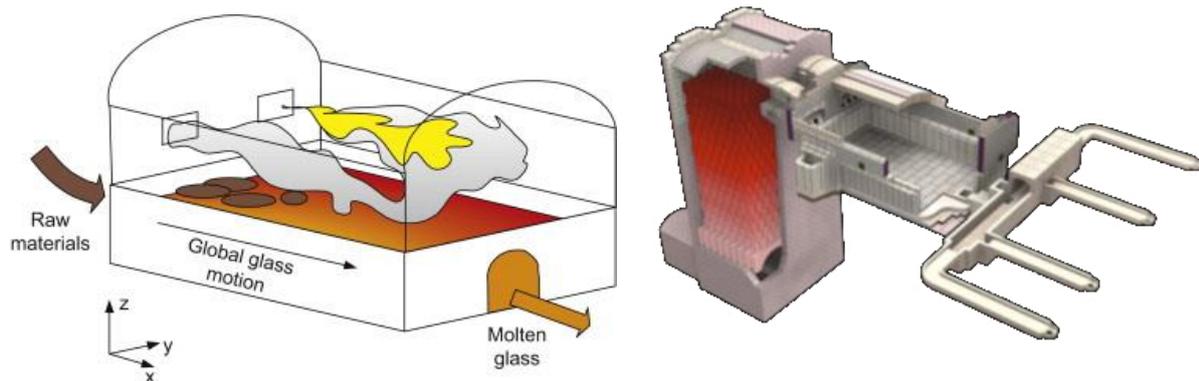


Abbildung 4-1: Schema und CAD-Aufbau (©TECOGLAS) einer U-Flammenwanne

4.1.2. Prinzip der Querbrennerwanne

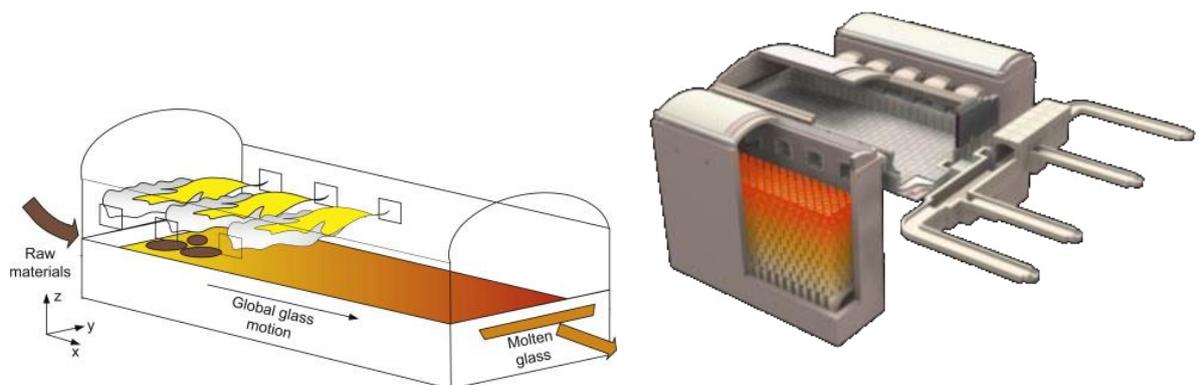


Abbildung 4-2: Schema und CAD-Aufbau (©TECOGLAS) einer Querbrennerwanne

4.1.3. Messtechnik

4.1.3.1 Temperaturmessung

Die Messung der Prozesstemperaturen erfolgt wie auch schon im Vorgängerprojekt über Pt/Rh-Pt Thermoelemente des Typs B und Typs S. Diese Thermoelemente können bei Temperaturen bis zu 1800 bzw. 1650 °C eingesetzt werden. Das Thermoelement kann mit Thermo- bzw. Ausgleichsleitungen verlängert werden, die direkt an das Messgerät angeschlossen werden. Für weitere Informationen siehe Vorgängerprojekt unter der IGF-Nummer 14755 N. Um die Temperaturen der Medien Abgas und vorgewärmte Luft zu erfassen, wird ein Absaugthermoelement verwendet. Hierbei wird der Strahlungseinfluss aus der Umgebung der Messstelle möglichst niedrig gehalten und so die Medientemperatur selbst ermittelt.

Die Außentemperaturen der Anlage (Gewölbe, Boden, Kammerwände, ...) werden mit jeweils geeigneten Pyrometern oder Wärmebildkameras, die in ihrer Wellenlänge der Detektoren der jeweiligen Messaufgabe angepasst sind, gemessen.

4.1.3.2 Emissionsmessung

Die Analyse der Abgaskonzentrationen beinhaltet neben der Temperaturerfassung die Messung der CO-, CO₂, NO-, NO₂-, NO_x-Konzentrationen mit zusätzlicher Aufnahme des O₂-Gehaltes. Die Absaugung des Abgases geschieht mit einer speziellen, wassergekühlten Abgassonde. Die Bestimmung der Abgaskonzentrationen von CO, CO₂, NO, und NO₂ findet mit Hilfe eines mikroprozessorgesteuerten Gasanalysators vom Typ BINOS 1001 statt, der ein NDIR- und ein NDUV-Photometer zur Konzentrationsbestimmung nutzt. Für weitere Informationen siehe Vorgängerprojekt unter der IGF-Nummer 14755 N.

4.2 Einfache Wärmebilanzen

Mit Hilfe weniger ergänzender Messungen, vor allem zusätzliche Temperaturwerte werden benötigt, können die Betriebsdaten aus der Messwarte bzw. dem Wannenleitsystem genutzt werden, um einfache Wärmebilanzen des Schmelzaggregates zu erstellen. Diese einfachen Wärmebilanzen liefern erfahrungsgemäß Ergebnisse zu den wesentlichen Energieströmen, die durch eine ausführliche Wärmebilanz in ihrer Größenordnung üblicherweise bestätigt werden, aber sie erlauben noch keine detaillierten Aussagen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen die einfachen Wärmebilanzen der HVG eigentlich nur helfen, die mit dem Kammerprogramm der HVG errechneten Werte zu kontrollieren bzw. die Randparameter für das Kammerprogramm zu ermitteln. Die Modellierung des GWI gibt dann detaillierte Auskunft über das wärmetechnische Verhalten der Schmelzaggregate.

4.3 Berechnung des Verhaltens der Regenerativkammern

Die Wärmerückgewinnung durch regenerative Luftvorwärmung hat bei den kontinuierlich arbeitenden Glasschmelzöfen eine lange Tradition. Sie ist nötig, um die zum Glasschmelzen erforderlichen hohen Flammentemperaturen zu erreichen. Heute werden Regeneratoren trotz ihrer hohen Investitionskosten auch deswegen eingesetzt, um Energie zu sparen und damit die Umwelt zu entlasten. Moderne Regeneratoren haben einen sehr hohen Wirkungsgrad, so dass eine weitere Vergrößerung der Anlage kaum noch Verbesserungen bringt.

Um die Fragen nach Aufwand und Nutzen für konkrete Anwendungsfälle zu beantworten, wurde bei der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie vor rund 25 Jahren ein Rechenprogramm entwickelt. Dieses Programm simuliert die elementaren Wärmeübergangsvorgänge in den einzelnen Teilen des Regenerators und im Ofenraum mit einem Differenzenverfahren und erlaubt somit den direkten Vergleich verschiedener Auslegungsvarianten im Hinblick auf ihre Energieeffizienz.

Für die Berechnungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens musste das Programm an einigen Stellen ergänzt werden. Die Zusammensetzung des Oxidators (Luft) berücksichtigte bisher nur Stickstoff und Sauerstoff als Komponenten. Dies war bisher völlig ausreichend. Für Berechnungen im Rahmen der verdünnten Verbrennung musste nun die Zusammensetzung des Oxidators erweitert und sowohl Kohlendioxid als auch der dampfförmige Wassergehalt integriert werden. Auch die Berechnung der Oxidatoreigenschaften (z. B.: Wärmekapazität), die für den Wärmeübergang in den Regeneratorkammern von Bedeutung sind, musste an die neuen Gegebenheiten angepasst werden.

4.4 Grundlagen der numerischen Simulation reaktiver Strömungen

Einen großen Part an den im Projekt durchgeführten Arbeiten nehmen die numerischen Strömungs- und Verbrennungssimulationen ein. Diese werden im Vorfeld zur Analyse der Potenziale und Auswirkungen der externen Abgasrezirkulation auf den Prozess genutzt und später zur Validierung durch die aufgenommenen Messwerte herangezogen.

Im nachfolgenden werden kurz die allgemeine Programmstruktur einer numerischen Strömungssimulationssoftware (CFD – Computational Fluid Dynamics) sowie die in unseren Fällen verwendeten Modelle für die Allgemeine-, Turbulenz- und Verbrennung-Berechnung näher erläutert.

Die Geometrieerzeugung und Gittergenerierung erfolgte mit Hilfe der Software ANSYS GAMBIT. Die numerischen Strömungssimulationen wurden dann mit dem CFD-Programmsystem ANSYS FLUENT in den Programmversionen 13, 14 und 14.5 durchgeführt. Dem Programm ANSYS FLUENT liegt die Berechnung mittels der Finite-Volumen-Methode zur Grunde. Zur Lösung der Strömungs- und Wärmeübertragungsaufgabenstellungen wurden hybride Gitter generiert.

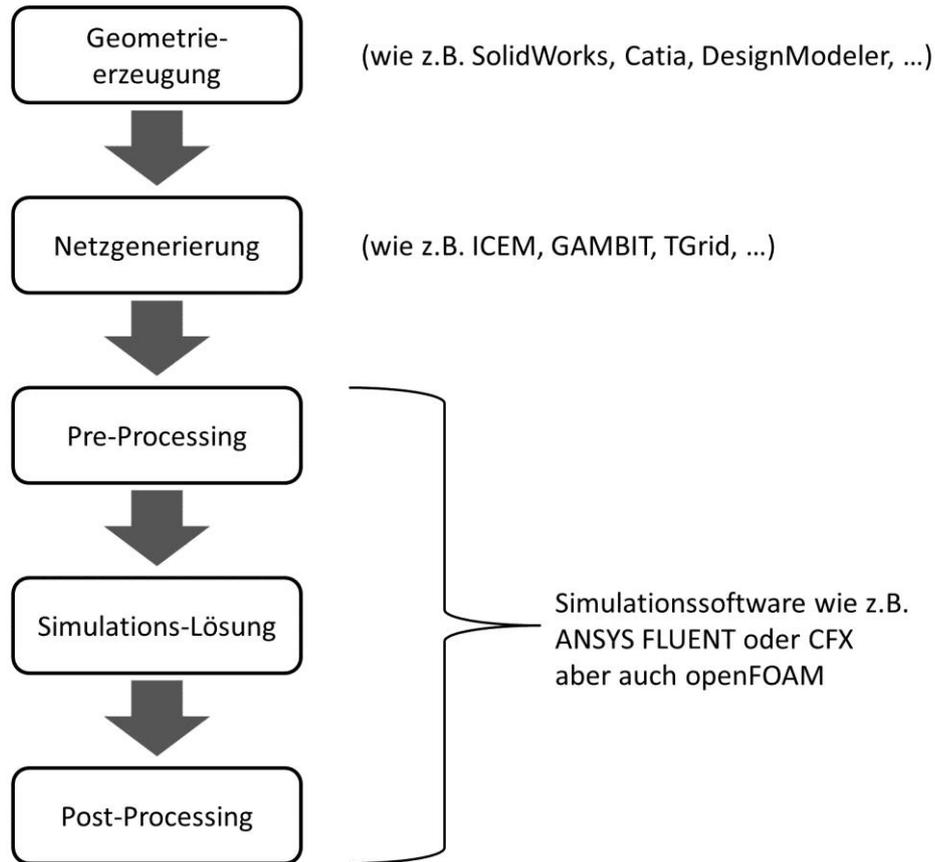


Abbildung 4-3: Allgemeine Ablaufstruktur einer numerischen Strömungssimulation

Die Basis der mathematischen Modellierung zur Bestimmung der Strömungs- und Wärmeverhältnisse in ANSYS FLUENT bilden die partiellen Differentialgleichungen für die Bilanzen der Massen-, Stoff-, Impuls- und Enthalpieströme. Dieses Gleichungssystem wird in jeder Zelle des diskretisierten Berechnungsraumes iterativ mit Hilfe numerischer Algorithmen gelöst. Für detaillierte Ausführungen wird auf die entsprechende Literatur verwiesen [33], [34].

4.4.1. Turbulenzmodellierung

In Natur und Technik kommen hauptsächlich turbulente Strömungen und Flammen vor. Im Gegensatz zu laminaren sind turbulente Strömungen wirbelbehaftet und instationär.

Turbulente Strömungen sind nicht bestimmbar und nicht reproduzierbar. Diese Prozesse, bei denen die zu beschreibenden Größen zufällige Funktionen von Ort und Zeit sind, nennt man stochastische Prozesse. Bei der Beschreibung turbulenter Strömungen besteht ein Schließungsproblem. Die Grundgleichungen enthalten unbekannte Terme, für die keine Gleichungen abgeleitet werden können, in denen keine neuen Unbekannten vorkommen. Ein geschlossenes Gleichungssystem ist somit nicht abzuleiten. Alle bisher bekannten Methoden, das Gleichungssystem zu schließen, beruhen auf zum Teil starken Vereinfachungen und Hypothesen. Auf der untersten Stufe wird die Schließung des Gleichungssystems durch Bezie-

hungen zwischen den scheinbaren Spannungen und dem mittleren Geschwindigkeitsfeld bewerkstelligt. Diese halbempirischen Beziehungen stellen Turbulenzmodelle dar, die die Form von algebraischen Beziehungen oder von Differentialgleichungen annehmen können und die nach der Zahl der Differentialgleichungen eingeordnet werden.

Im Programmsystem ANSYS FLUENT stehen Turbulenzmodelle für verschiedenste Verwendungen oder Anwendungszwecke zur Verfügung. Im Rahmen der hier durchgeführten Berechnungen wurde das k - ω -SST-Modell [35] zur Abbildung der in Glasschmelzwannen ablaufenden Prozesse genutzt, da es die Vorteile der guten Abbildung der Wärmeübertragungsvorgänge im Wandnahbereich (k - ω) und der turbulenten Strömung im freien Strömungsfeld (k - ϵ) mit einander kombiniert. Hierfür werden die Gleichungen für die turbulente kinetische Energie und die spezifische Dissipationsrate oder auch charakteristische Frequenz (Frequenz der energietragenden Wirbel) gelöst.

4.4.2. Wärmeübertragungsvorgänge

Bei Verbrennungsprozessen wird lokal unterschiedlich viel thermische Energie freigesetzt. Infolgedessen treten unterschiedliche Temperaturen auf, wodurch ein Austausch von Wärme durch Leitung innerhalb der Gasphase erfolgt. Neben der Wärmeleitung findet ein konvektiver Transport der heißen Verbrennungsabgase durch den Ofenraum statt. Dabei findet eine Wärmeübertragung an das Wärmegut und an die Ofenraumwände statt. Weiterhin steht in der Gasphase jedes Kontrollvolumen im Strahlungsaustausch mit allen übrigen Kontrollvolumina sowie den Ofenraumwänden. Für Gasfeuerungen sind dies die wesentlichen Wärmeübertragungsmechanismen [36]. Zur Berechnung der Wärmeübertragung wird in FLUENT eine Energiegleichung eingeführt, in der Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung berücksichtigt werden.

Bei Gasfeuerungen ist die Energieübertragung zwischen der Flamme und den Ofenraumwänden durch den Wärmeaustausch mittels thermischer Strahlung dominant gegenüber dem durch Konvektion und Leitung. Zur Modellierung der Strahlung sind in ANSYS FLUENT unterschiedliche Modelle vorhanden.

Das Discrete-Ordinate-Modell [37] löst die Strahlungstransportgleichung für eine endliche Anzahl von diskreten festen Winkeln. Anzahl und Wahl dieser diskreten Winkel bestimmen wiederum die Genauigkeit des Verfahrens. Das Discrete-Ordinate-Modell transformiert eine Transportgleichung für Strahlungsintensität in den räumlichen Koordinaten (x , y , z). Es umspannt den ganzen Bereich von optischen Dicken und kann Probleme der Festkörper-, aber auch der Gasstrahlung sowie die Strahlung durch semi-transparente Medien lösen

4.4.3. Verbrennungsmodellierung

Den Abbrand zu beschreiben, bedeutet für die wesentlichen, an der chemischen Umsetzung beteiligten Spezies, Konzentrationsverteilungen anzugeben. Um die Konzentrationsvertei-

lung von Spezies zu berechnen, müssen Bilanzgleichungen für diese aufgestellt und gelöst werden, die alle physikalischen und chemischen Vorgänge beinhalten, die die Konzentrationen beeinflussen. Dies sind Konvektion, Diffusion und die chemische Reaktion selbst. Für einen schnellen und vollständigen chemischen Umsatz müssen die Reaktionspartner auf molekularer Ebene möglichst gut vermischt werden, da ein Molekül nur dann reagieren kann, wenn es mit seinem Reaktionspartner kollidiert. Ist die Mischungsbedingung erfüllt, läuft die Reaktion mit einer reaktionskinetisch bestimmten Geschwindigkeit ab. Der Abbrand des Brennstoffes kann nun durch die Mischung oder die eigentliche chemische Reaktion limitiert sein. Man spricht dann von mischungs- oder von kinetisch-kontrollierter Umsetzung. Zur Charakterisierung der vorliegenden Verhältnisse dient die Damköhlerzahl. Da, die als Verhältnis zwischen einem turbulenten Zeitmaß, das eine entsprechende Mischzeit beschreibt und einer charakteristischen Reaktionszeit definiert ist. Detailliertere Informationen und Grundlagen werden in [36], [38] gegeben.

Die oben beschriebene Vorgehensweise zur Modellierung der Reaktion wird in ANSYS FLUENT „generalized finite rate formulation“ genannt. Es werden Transportgleichungen für alle Spezies gelöst, die an der chemischen Umsetzung beteiligt sind. Die Bestimmung der Reaktionsraten kann über den Arrhenius (finite rate)- oder mit dem Eddy Dissipation Ansatz [39, [40] geschehen, wobei der Arrhenius-Ansatz für eine kinetisch- und der Eddy Dissipation Ansatz für eine mischungskontrollierte Umsetzung steht. Bei diesem Verfahren müssen die Reaktionsgleichungen und Reaktionsparameter in ANSYS FLUENT definiert werden. Durch diese komplexe Vorgehensweise können meist nur Ein- oder Zweischrittmechanismen von Einzelbrennstoffen, z. B. Methan anstelle von Erdgas, berücksichtigt werden. Über die so genannten Konstanten A und B für die Berechnung der Reaktionsraten kann die Flammenform sowie der Ausbrand angepasst werden. Durch eine Kopplung der beiden Ansätze wird jeweils der die Reaktion limitierende Ansatz zur Berechnung der Konzentrationsverläufe gewählt.

4.4.4. Modellierung der NO-Bildung

Da ein Schwerpunkt die Untersuchung der Reduzierung der NO_x -Bildung ist und diese Untersuchungen unter anderem mittels der numerischen Simulation durchgeführt wurden, wird an dieser Stelle kurz darauf eingegangen. Unter dem Begriff der Stickstoffoxide (auch Stickoxide genannt) werden hauptsächlich die Verbindungen Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) zusammengefasst. Diese Stickstoffoxide treten bei der Verbrennung unter hohen Temperaturen durch Oxidation der im Brennstoff gebundenen Stickstoffverbindungen, des elementaren Stickstoffes der Verbrennungsluft oder des Brennstoffs auf. Bei Verbrennungsprozessen liegen Stickoxide vornehmlich als Stickstoffmonoxid (NO) im Abgas vor. Generell unterscheidet man drei Bildungsmechanismen von Stickoxiden. Die thermische, die prompte und die Stickoxidbildung aus brennstoffgebundenen Stickstoff [41]. Der letztere Bildungsmechanismus spielt bei der Verbrennung von Erdgas keine relevante Rolle. Die Mo-

dellierung der thermischen NO-Bildung basiert auf Mechanismen nach Zeldovich und die der prompten NO-Bildung auf Mechanismen von Fenimore. Nähere Informationen zu den Berechnungsgleichungen sind u. a. in [41] enthalten.

5. Ergebnisse der experimentelle Untersuchungen

5.1 Erfassung der Betriebsparameter an einer Querbrennerwanne zur Herstellung von Flachglas

Um die Anwendung der externen Abgaszumischung zur Luft als NO_x -Minderungsmaßnahme auch für andere regenerative Glasschmelzwannen als der U-Flammenwanne nachzuweisen, wurde daher im Rahmen dieses Projektes eine querbefeuerte Glasschmelzwanne untersucht. Es wurde dafür eine Wanne ausführlich messtechnisch erfasst. Unter anderem gehören dazu die Aufnahme der Rand- und Eintrittsparameter, Abgasanalyse, Messung von Konzentrationen und Temperaturen im Brennraum der Wanne, etc.

Diese Daten bilden die Grundlage für die Randbedingungen der späteren numerischen Simulationen im Kapitel 6 und wurden zudem für einen Abgleich des Ist-Zustandes zwischen Messung und Simulation herangezogen.

Folgende Kenndaten liegen der untersuchten Querbrennerwanne zu Grunde:

Leistung:	48.000 kW
Luftzahl:	1,05
Vorwärmtemperatur der Luft:	1400 °C (im Regeneratorkammerkopf)
Brennstoff:	Erdgas H

Die Abbildungen 5-1 und 5-2 veranschaulichen die Messpositionen, an denen die Messwerte der Temperatur, Sauerstoff (O_2), Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2) und Stickoxide (NO_x) erfasst wurden.

Zur Aufnahme der Messwerte wurden vorhandene Schaulochöffnungen genutzt. Die Messwerte wurden dabei in zwei verschiedenen Einschubtiefen in den jeweiligen Regeneratoren (Rechts und Links) dokumentiert. Dabei soll der kleinere Einschubtiefenwert (20 cm) die Temperatur in der Nähe der Wand wiedergeben, während die große Einschubtiefe (150 cm) die Temperatur an einer mittleren Position des Regenerators repräsentiert.

Zusätzlich wurden die Wandtemperaturen entlang des Schmelzaggregates bis zur Übergabe der Schmelze an die Formgebung und der Regeneratoren aufgenommen. Diese mittels Thermografie gewonnenen Daten werden genutzt, um die Randbedingungen der Simulationen einzustellen und dabei den wärmetechnischen Durchgang durch die Wände möglichst gut abbilden zu können.

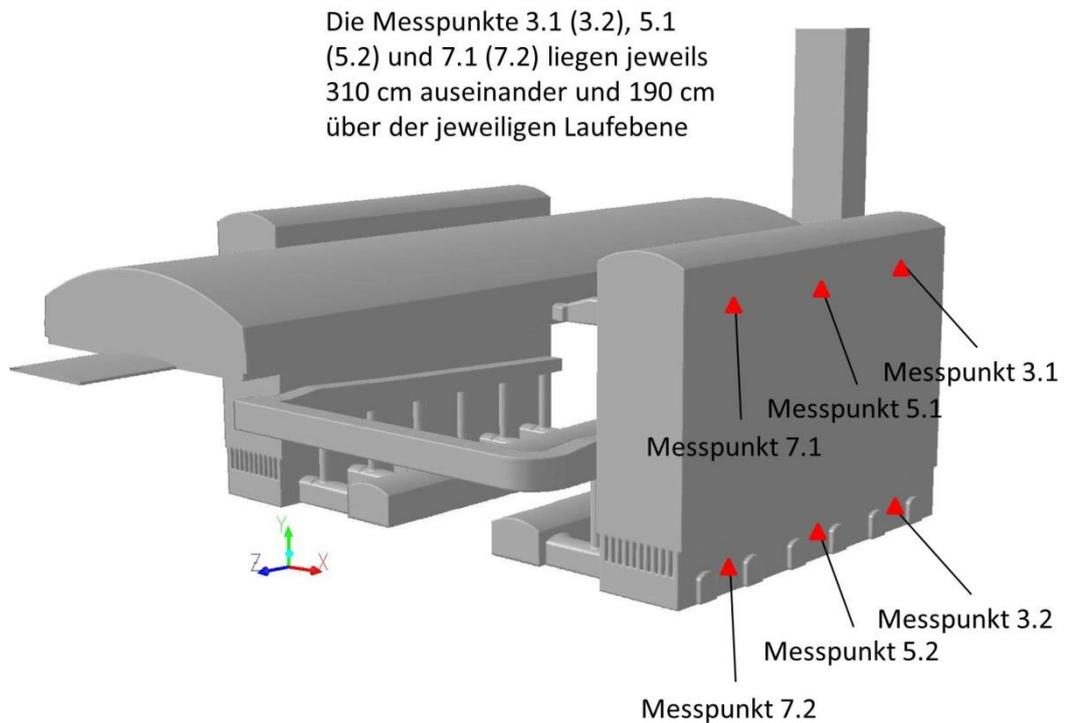


Abbildung 5-1: Messpunkte an der Querbrennerwanne (Ansicht 1)

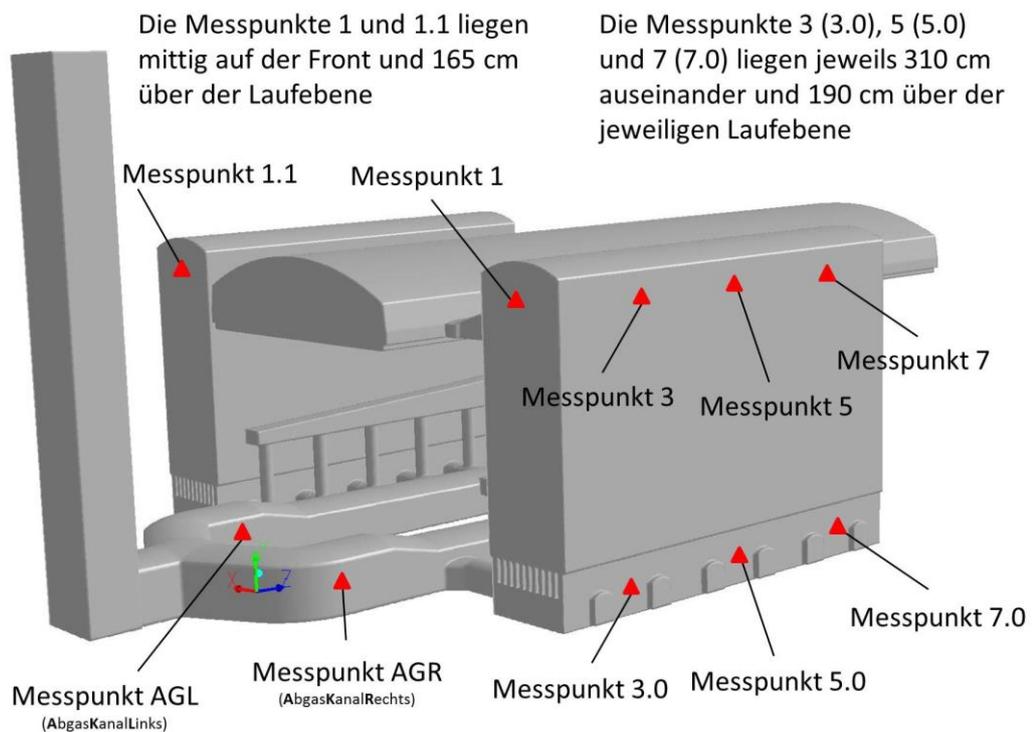


Abbildung 5-2: Messpunkte an der Querbrennerwanne (Ansicht 2)

Die **Abbildungen 5-3** und **5-4** visualisieren die Bezeichnungen „Feuer Links“ und „Feuer Rechts“.

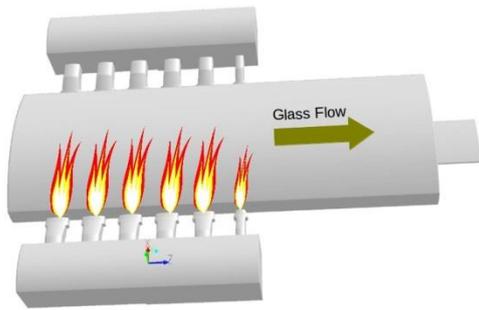


Abbildung 5-3: „Feuer Links“

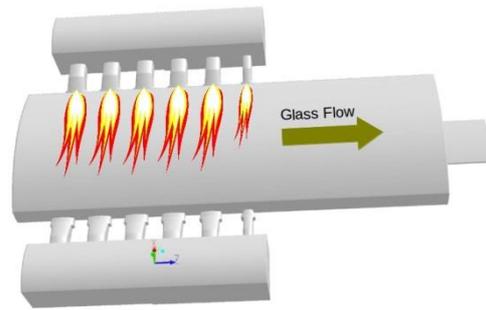


Abbildung 5-4: „Feuer Rechts“

In den **Tabellen 5-1** bis **5-3** wird ein Teil der von den Projektpartnern aufgenommenen Messwerte an verschiedenen Messpunkten beispielhaft wiedergegeben und jeweils für die Feuerung von links und von rechts zusammengestellt.

Im linken Teil der Tabellen sind der Messpunkt, die Einschubtiefe und die jeweilige Seite der Feuerung dargestellt. Im rechten Teil sind die Werte aufgeführt, die von den Messwerterfassungssystemen vor Ort aufgezeichnet wurden. Die Werte zwischen dem Regeneratorkopf bzw. -boden unterscheiden sich nicht viel, wenn man auf derselben Messpunkteebene bleibt. Zum Beispiel beträgt die Differenz der Messwerte bei einer Einschubtiefe von 20 cm an den Messpunkten 3.1 und 3.2 nur ca. 30 ppm, was im Messfehlerbereich liegt.

Eine Begründung für die jedoch relativ hohen NO_x -Werte ist der Einsatz von Alkali-Nitraten aus glastechnologischen Gründen. Anhand dieser Daten ist jedoch auch hier noch einmal deutlich zu erkennen, dass ein Einhalten der neuen geforderten Grenzwerte ohne zusätzliche Maßnahmen nicht unmittelbar möglich zu sein scheint.

Tabelle 5-1: Messdaten vom Regeneratorkopf Links

Pos.	Tiefe cm	Feuer		Sondentemperatur			O ₂ [Vol.-%]	CO ₂ [Vol.-%]	CO [ppm]	NO _x [ppm]
				in [°C] nach						
		Links	Rechts	2 min	10 min	20 min				
1.1	20	L		1413	1388	1370	21	-	-	-
1.1	20		R	1394	1421	1433	2,5	16,9	35	1663
1.1	150	L		1429	1404	1386	21	-	-	-
1.1	150		R	1434	1460	1471	1,5	18,3	72	1550
3.1	20		R	1432	1463	1468	0,3	17	1550	1485
3.1	20	L		1415	1380	1359	21	-	-	-
3.1	150		R	1434	1465	1473	0,33	17,2	3800	1465
3.1	150	L		1409	1373	1351	21	-	-	-
5.1	20	L		1412	1368	1343	21	-	-	-
5.1	20		R	1425	1464	1477	1,1	13,9	150	1410
5.1	150	L		1417	1378	1351	21	-	-	-
5.1	150		R	1445	1479	1493	1,01	12,8	115	1315
7.1	20		R	1348	1387	1405	6,9	8,6	17	1195
7.1	20	L		1349	1310	1282	21	-	-	-
7.1	150		R	1350	1390	1409	7,8	7,9	14	1175
7.1	150	L		1354	1312	1284	21	-	-	-

Tabelle 5-2: Messdaten vom Regeneratorboden Links

Pos.	Tiefe cm	Feuer		Sondentemperatur			O ₂ [Vol.-%]	CO ₂ [Vol.-%]	CO [ppm]	NO _x [ppm]
				in [°C] nach						
		Links	Rechts	2 min	10 min	20 min				
7.2	150	L		297	233	210	21	-	-	-
7.2	150		R	558	599	625	7,4	8,4	11	1255
7.2	20	L		166	118	110	21	-	-	-
7.2	20		R	-	476	500	8,9	7,4	11	1140
5.2	150		R	507	557	591	5,3	10,2	8	1285
5.2	150	L		253	190	173	21	-	-	-
5.2	20		R	319	378	402	9,1	7,8	7	910
5.2	20	L		347	218	199	21	-	-	-
3.2	150		R	513	574	599	2,4	15	5	1420
3.2	150	L		254	187	164	21	-	-	-
3.2	20		R	401	518	539	1,5	16	3	1420
3.2	20	L		330	264	250	21	-	-	-
2.2	150		R	491	550	581	0,95	17,4	2,5	1540
2.2	150	L		328	327	213	21	-	-	-
2.2	20		R	350	471	488	3,7	15,5	5	1465
2.2	20	L		359	304	286	21	-	-	-

Zusätzlich wurden auch noch einmal die Abgaswerte in den jeweiligen Abgaskanälen gemessen und dokumentiert. Dabei konnte man gut erkennen, dass beide Seiten sehr ähnlich Abgaswerte hervorbringen. Dies spricht für eine gut eingestellte Feuerung von beiden Seiten.

Tabelle 5-3: Messdaten vom Abgas- bzw. Frischluftkanal

Pos.	Tiefe cm	Feuer		Sondentemperatur			O ₂ [Vol.-%]	CO ₂ [Vol.-%]	CO [ppm]	NO _x [ppm]
				in [°C] nach						
		Links	Rechts	2 min	10 min	20 min				
AKL	150	L		293	227	200	21	-	-	-
AKL	150		R	475	526	555	5,7	11,8	9	1160
AKL	190	L		315	224	198	21	-	-	-
AKL	190		R	480	530	562	5,7	11,8	9	1160
AKR	170	L		473	520	548	5,7	11,8	7	1165
AKR	170		R	320	225	206	21	-	-	-

In **Abbildung 5-5** ist exemplarisch der gemessene Temperaturverlauf innerhalb des Regenerators an einem Messpunkt 3.1 über der Zeit einer Feuerdauer (20 min) dargestellt. Zu sehen sind dabei die gemessenen Werte für eine Eindringtiefe von 20 und 150 cm der wassergekühlten Messlanze. Die Buchstaben L und R stehen dabei jeweils für Feuerung von Links und Feuerung von Rechts. Die Graphen mit dem Kürzel R zeigen die Aufheizkurve der Atmosphäre im Regenerator, wenn Abgas von oben durch die Kammer strömt, während L die Abkühlkurve auf Grund der Vorwärmung der Verbrennungsluft darstellt.

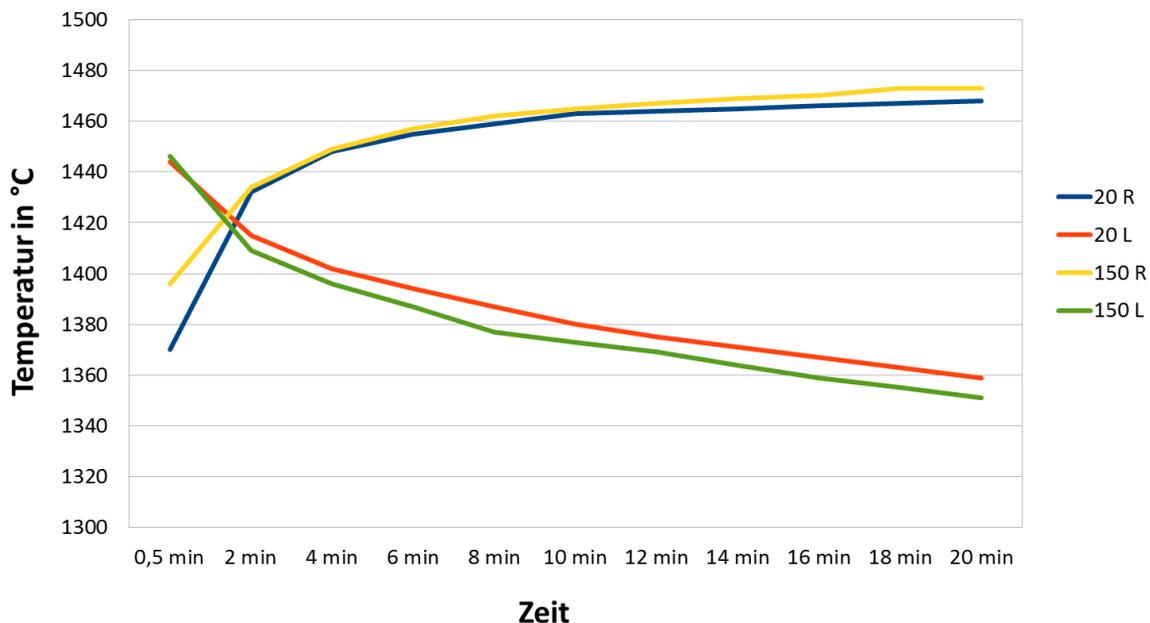


Abbildung 5-5: Verlauf der Temperatur am Messpunkt 3.1 über einen Feuerwechsel für beide Einschubtiefen

Abbildung 5-6 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf innerhalb des Regenerators einer Querflammenwanne an einem ausgewählten Port über die den kompletten Zeitraum eines Feuerwechsels dargestellt. Die Gesamtzeit des Feuerwechsels setzt sich aus einer jeweils 20 Minuten langen Kalt- und Warmperiode zusammen. Zu sehen sind dabei die gemessenen Werte für eine Eindringtiefe 150 cm der wassergekühlten Messlanze, was ungefähr der Mitte der Tiefe des Regenerators entspricht. Die Farben der Graphen entsprechen dabei der Temperatur im oberen Gewölbe (Blau mit Temperaturskala Links) und im Boden des Regenerators (Rot mit Temperaturskala Rechts). Die Graphen zeigen in den ersten 20 Minuten des Diagramms die Aufheizphase der Atmosphäre im Regenerator in der das heiße Abgas von oben durch die Kammer strömt, während die zweite 20 minütige Phase nach dem markierten Feuerwechsel die Abkühlphase darstellt, bei der die kalte Frischluft die Kammer zur Vorwärmung der Verbrennungsluft von unten nach oben durchströmt.

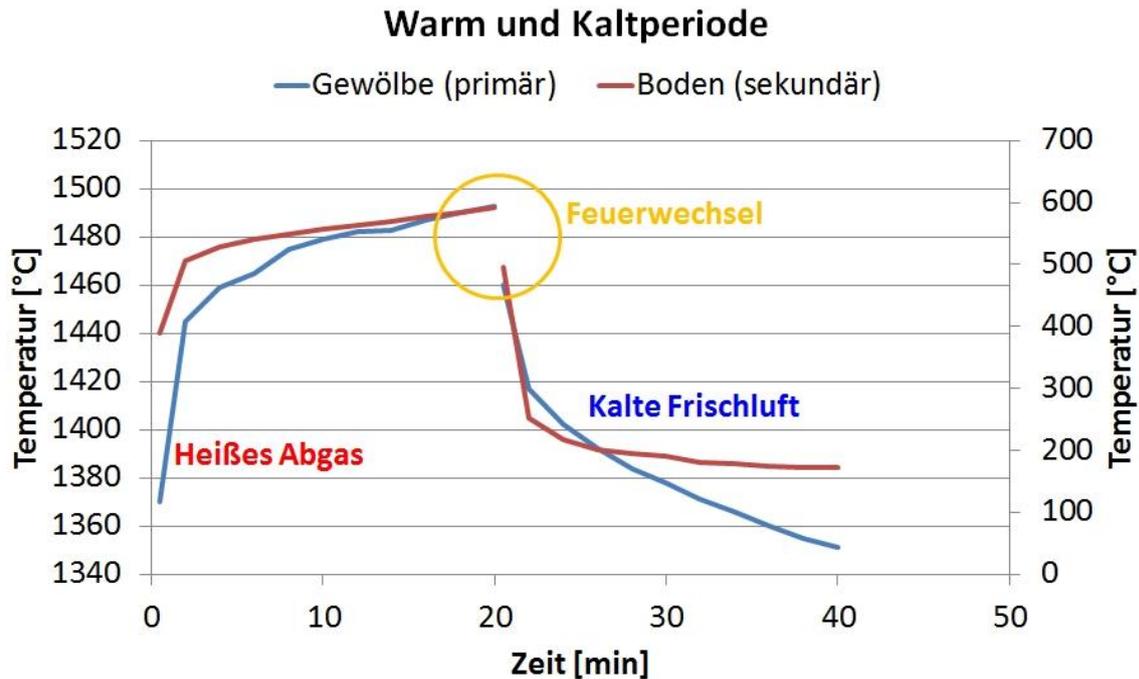


Abbildung 5-6: Temperaturverlauf über den kompletten Zeitraum eines Feuerungswechsel (2 mal 20 min)

Die beiden nachfolgenden Diagramme, dargestellt in den **Abbildungen 5-7** und **5-8**, veranschaulichen die Auslastungsverteilung des Regenerators auf der vermessenen linken Seite. Über den Bereich der Messpunkte 1.1 bis 5.1 ist die Auslastung scheinbar relativ gleichmäßig, da sich sowohl in der Aufheizphase als auch in der Abkühlphase die Werte auf einem ähnlichen Niveau befinden. Zudem liegt die Differenz zwischen den aufgezeichneten Temperaturen zu Beginn und zum Ende eines Feuerungszyklus bei diesen Messpunkten im gleichen Rahmen. Am Messpunkt 7.1 sieht dies im Vergleich zu den vorher beschriebenen drei Messpunkten anders aus. An diesem Messpunkt sind die Temperaturen sowohl in der Aufheiz- als auch in der Abkühlphase auf einem niedrigen Temperaturniveau. Das ist damit zu erklären, dass an der untersuchten, deutlich mehr als 10 Jahre alten Querbrennerwanne die Brenner im letzten Port (am weitesten vom Einleger entfernter Port) inaktiv sind. Daher wird vom Wannenbetreiber die zugeführte Frischluft oder im umgekehrten Fall das abgeführte Abgas größtenteils durch den Bereich der Messpunkte 1.1 bis 5.1 geschleust. Dies ist natürlich keine optimale Vorgehensweise, um den Regenerator auszulasten, erfüllt aber die Anforderungen des Glasschmelzwannenbetreibers.

Regeneratorgewölbe Links - Feuer Rechts - Aufheizphase

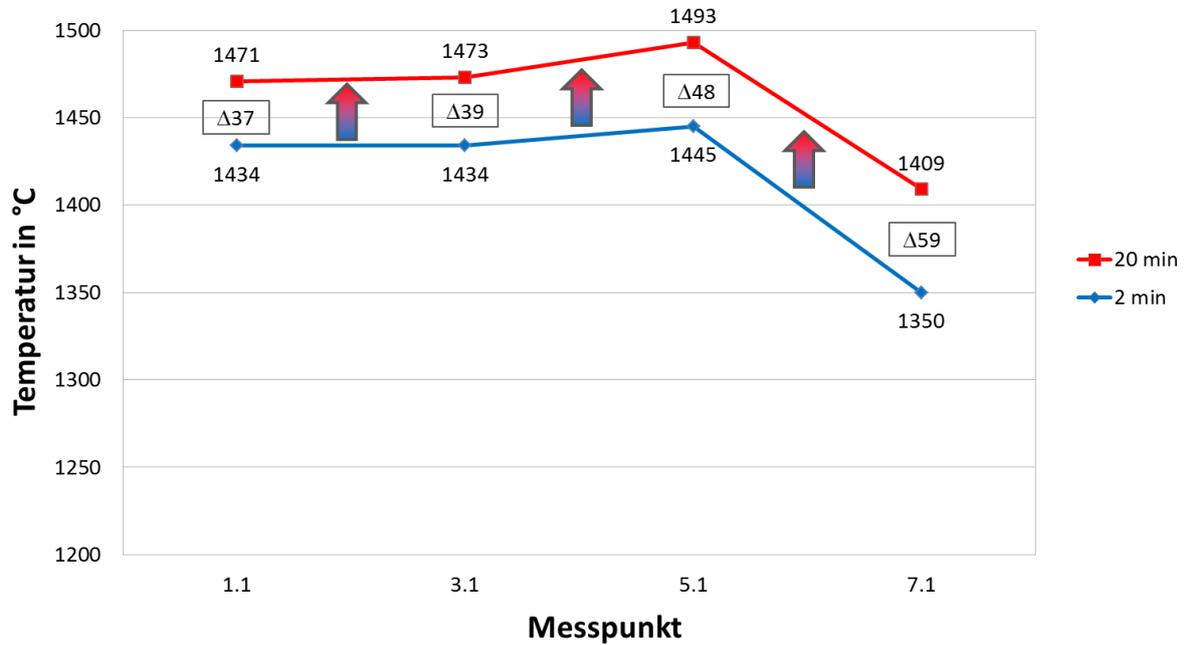


Abbildung 5-7: Temperaturen im Regeneratorgewölbe zu Beginn und Ende einer Aufheizphase

Regeneratorgewölbe Links - Feuer Links - Abkühlphase

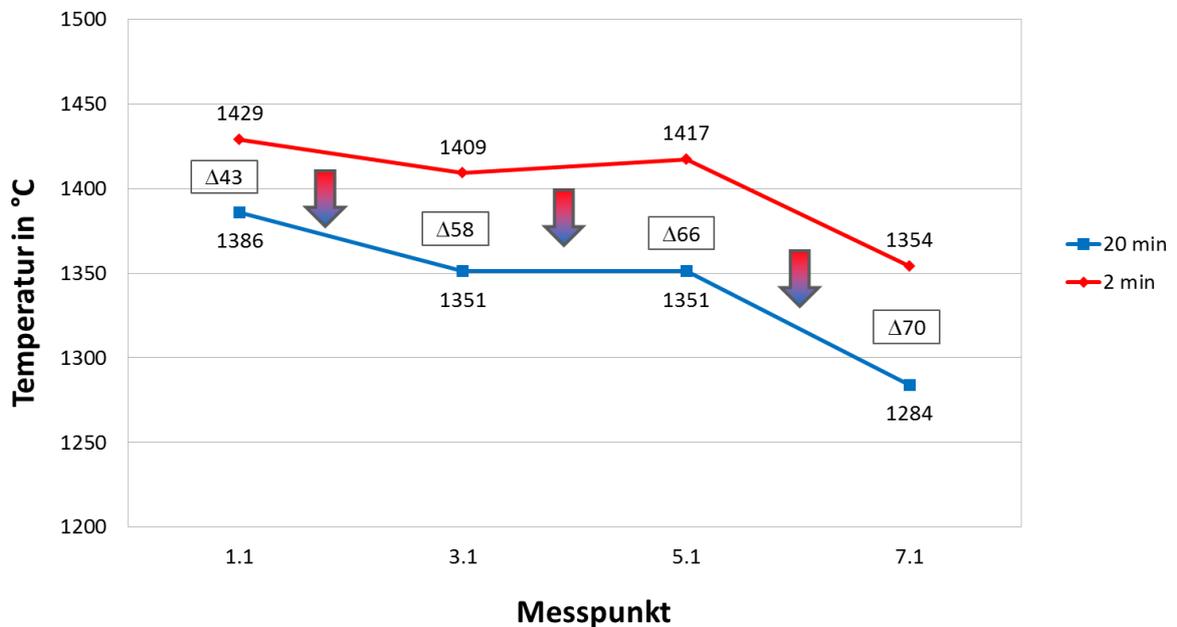


Abbildung 5-8: Temperaturen im Regeneratorgewölbe zu Beginn und Ende einer Abkühlphase

Eine weitere Aufgabe war es bei der Messung vor Ort einen guten Überblick über die äußeren Wandtemperaturen der gesamten Anlage, also Glasschmelzwanne, Regenerator etc., zu erhalten. Dafür wurden die Oberflächentemperaturen mittels Infrarotkamera-

aufnahmen an allen zugänglichen Stellen gemessen. Exemplarisch werden hierfür im Nachfolgenden die Temperaturverteilung eines vermessenen Bereiches (Regeneratorfuß im Keller an der Frontseite) im Foto mit eingetragenen Messwerten und die dazu passende Infrarotaufnahme wiedergeben (siehe **Abbildungen 5-9** und **5-10**).

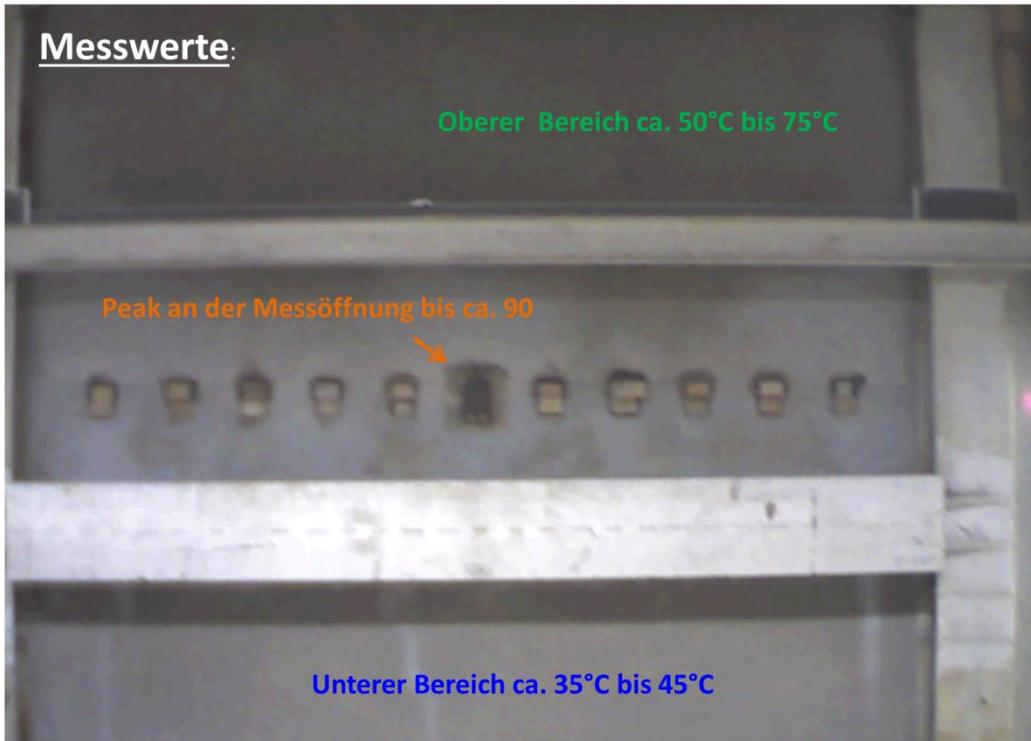


Abbildung 5-9: Gemessene Temperaturbereiche

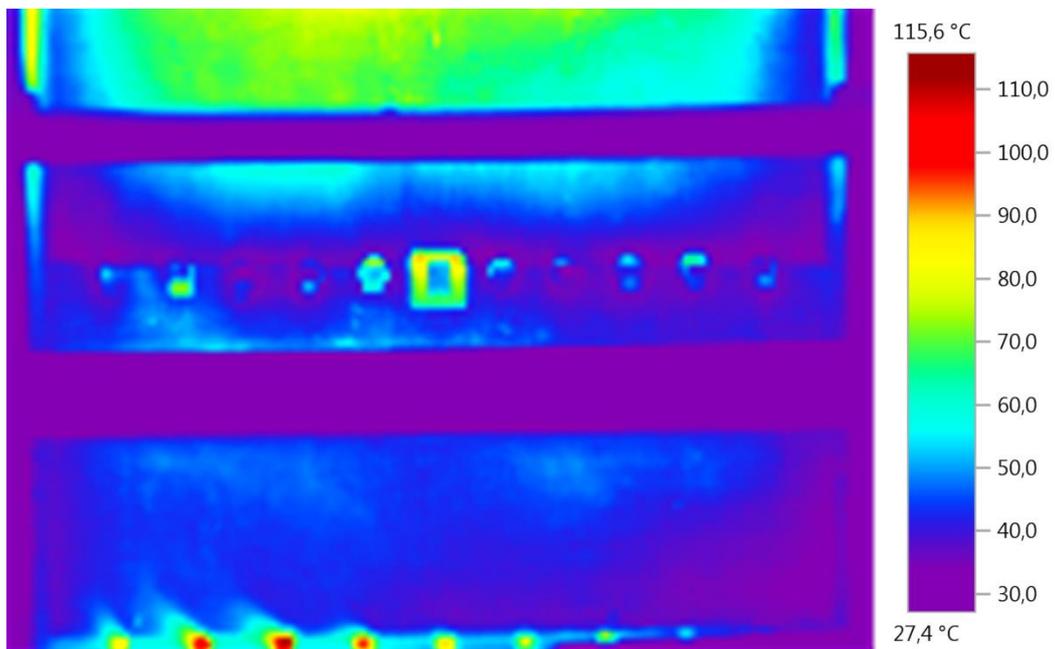


Abbildung 5-10: Temperaturen in der eingefärbten Infrarotbildaufnahme

5.2 Bestimmung der Wärmebilanzen an den untersuchten Wannen

Die Wärmebilanzen geben den Zustand zum Zeitpunkt der vorgestellten Messungen wider. Eigentlich ist eine wesentliche Randbedingung für eine Wärmebilanz, dass ein stabiler, quasi-stationärer Zustand erreicht ist und während der Messung keine Änderungen am System vorgenommen werden. An einer industriellen Produktionsanlage ist dies nie wirklich gegeben. Selbst wenn die Tonnage der Anlage konstant ist, werden immer kleinere Änderungen bzw. Regelvorgänge zum Einhalten der Sollwerte durchgeführt und führen zu kleineren Korrekturen von Betriebsparametern. Auch wenn sich der Verbrennungsraum scheinbar sehr schnell, in Minuten, auf diese Änderungen einstellt, werden zum Erreichen neuer und stabiler Temperaturverläufe in der Ausmauerung eigentlich Zeiten von 24 Stunden und mehr, je nach Wandaufbau und Steindicke, benötigt. Die Messungen für eine Wärmebilanz ziehen sich je nach Aufwand und Anlagengröße über bis zu 4 Tage oder sogar mehr hin. Das bedeutet, dass die Ergebnisse der Wärmebilanz mit einem entsprechenden „Messfehler“ versehen sind. Die Genauigkeit der Ergebnisse liegt daher bei ca. ± 1 % des Messwertes oder sogar darüber.

Aus Gründen der Vertraulichkeit der absoluten Werte sind bei den Wärmebilanzen die Energieströme nur in % der freigesetzten Energie angegeben und nicht in MWh/t_{Glas}. Auch im Säulendiagramm zum Vergleich der Energieflüsse in und aus dem System sind die Einheiten der Achsenbeschriftung entfernt worden.

Die Systemgrenzen sind durch die „Außenhaut“ der Schmelzwanne und der Regeneratoren gegeben. Der Einlegebereich, der Durchlass bzw. die Einschnürung, sowie der Abgaskanal am Kammerfuß und die Brennerdüsen sind für die entsprechenden Massenströme maßgebend.

5.2.1 Querbrennerwanne zur Floatglasherstellung

Die Messungen der Temperaturen rund um das Schmelzaggregat und der Zusammensetzung der Abgase und des Oxidators in den Regenerativkammern für die Wärmebilanzen und als Stützpunkte für die Modellierung benötigten 8 Arbeitstage. Die Tonnage der Wanne war in dieser Zeit relativ konstant.

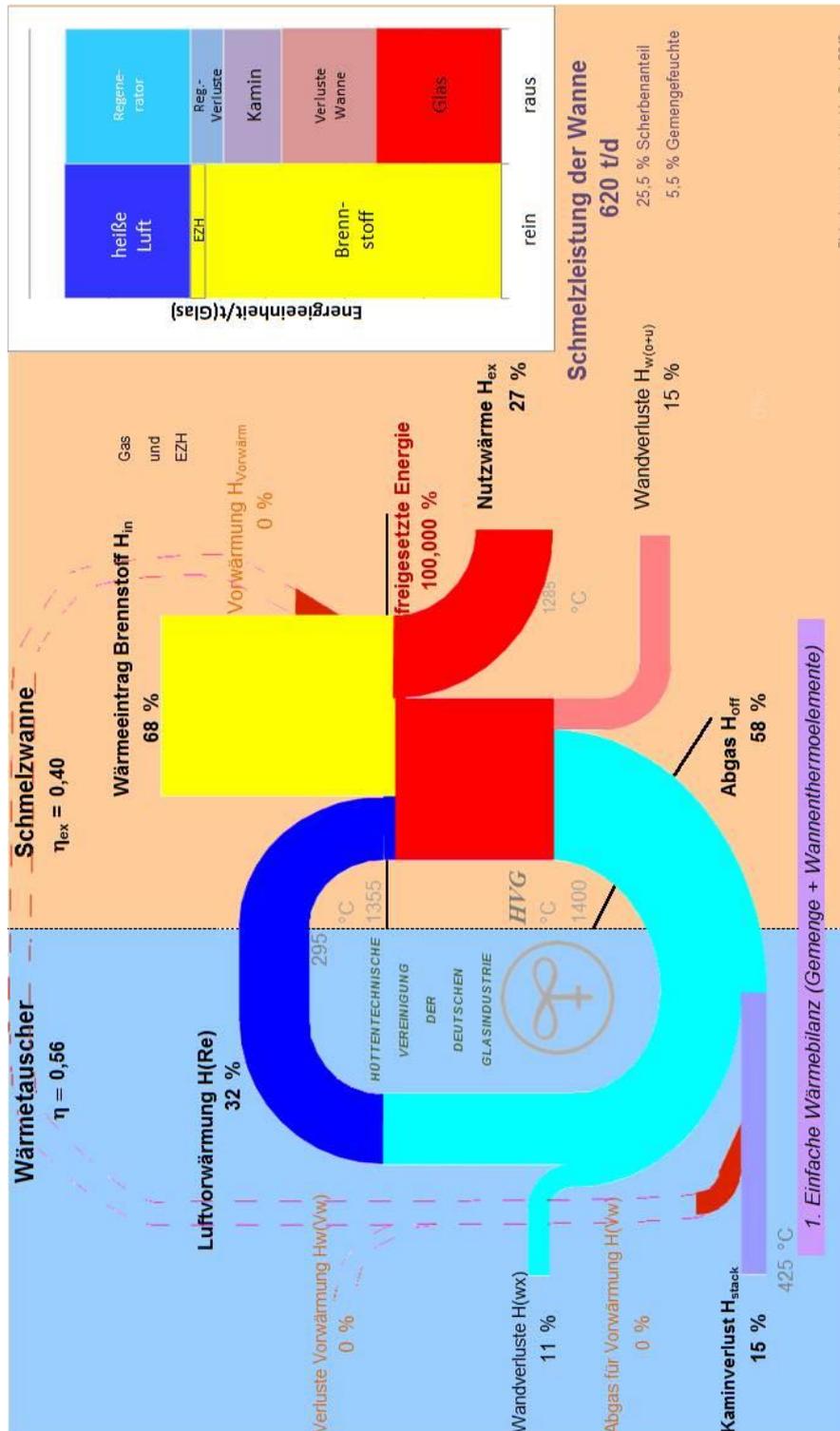


Abbildung 5-11: Einfache Wärmebilanz einer Querbrennerwanne zur Herstellung von Floatglas

Abbildung 5-11 zeigt das Sankey-Diagramm der Wärme- bzw. der Energieströme in der untersuchten Querbrennerwanne einschließlich der Regeneratoren. Die Wanne hat bereits deutlich über 10 Jahre Laufzeit zum Zeitpunkt der Messung.

5.2.2 U-Flammenwanne zur Herstellung von Behälterglas

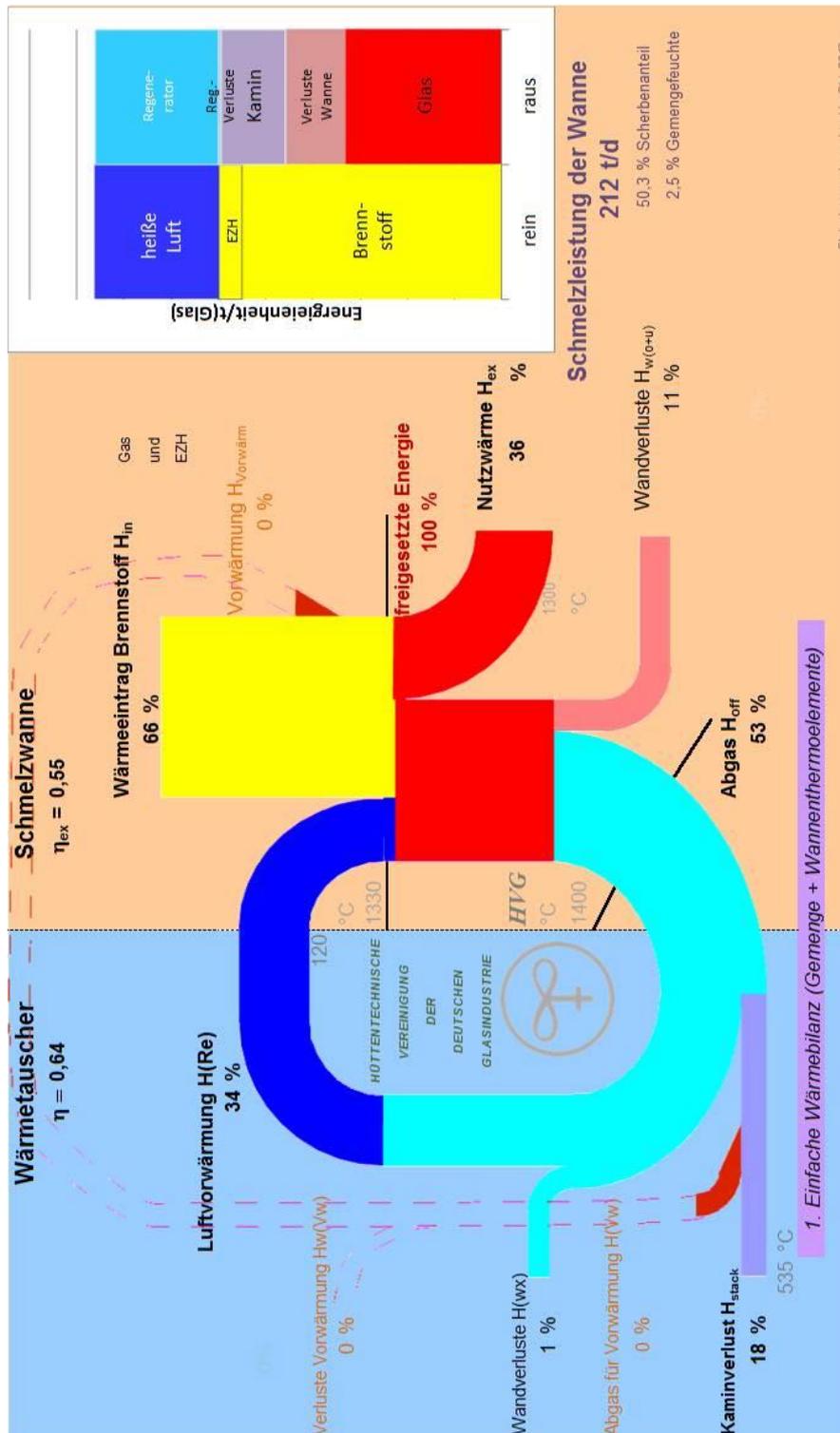


Abbildung 5-12: Einfache Wärmebilanz einer Behälterglaswanne im Grundzustand

Abbildung 5-12 zeigt das Sankey-Diagramm der Wärme- bzw. der Energieströme in der untersuchten U-Flammenwanne einschließlich Regeneratoren im Grundzustand (ohne Abgasrückführung). Die Wanne hat zum Zeitpunkt der Messung eine Laufzeit von knapp einem Jahr.

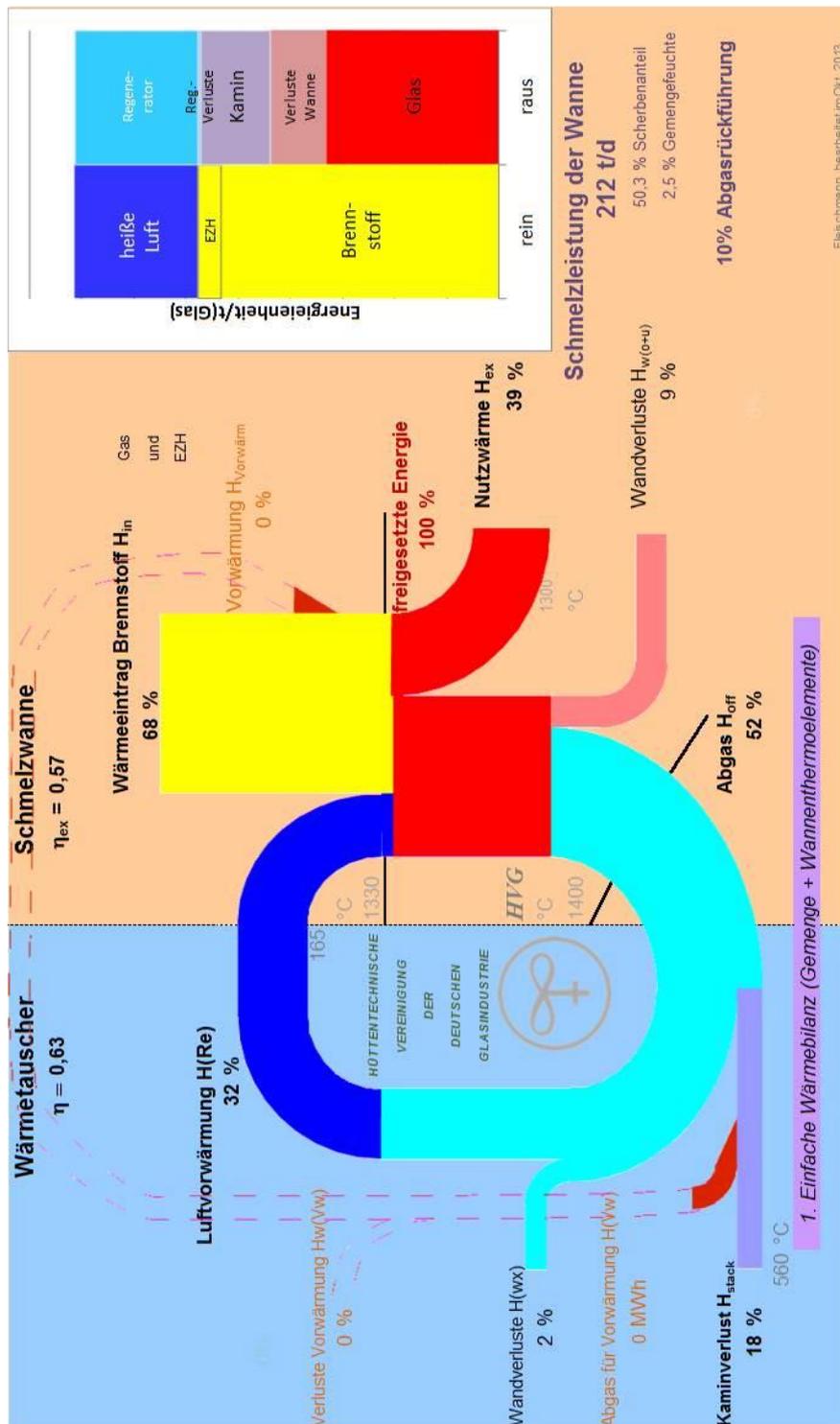


Abbildung 5-13: Einfache Wärmebilanz einer Behälterglaswanne mit 10 % Abgasrückführung

Abbildung 5-13 zeigt das Sankey-Diagramm der Wärme- bzw. der Energieströme in der untersuchten Behälterglaswanne einschließlich einer Abgasrückführungsquote von 10 %. Die Messungen wurden am selben Tag vorgenommen, wie die Erfassung der Daten für den Grundzustand. Vergleichbare Daten mit einer etwas höheren Tonnage liegen ebenfalls vor, zeigen aber keine wesentlichen Abweichungen der Ergebnisse. Diese Messdaten stammen aus dem Zeitraum, an dem die industrielle Umsetzung der Abgasrezirkulation an einer Glasschmelzwanne zum ersten Mal realisiert wurde.

5.3 Kammerberechnung

5.3.1 Querbrennerwanne zur Floatglasherstellung

Die gemessenen Betriebsdaten wurden auch zur Berechnung der Regeneratorauslastung durch die HVG herangezogen. Berechnet wurden der Grundzustand, entsprechend den Messungen im Dezember 2011, und zwei unterschiedlich angenommenen Mengen an rezirkuliertem Abgas. Die zurückgeführten Mengen von 10 und 20 % der Abgasmenge orientieren sich an der Umsetzung im industriellen Maßstab (siehe Kap. 5.4) sowie an den Ergebnissen der Modellierungen vom Vorgängerprojekt „Verdünnte Verbrennung I“ (IGF-Vorhabens-Nr.: 14755 N), die zu entsprechender NO_x-Minderungen in den Simulationen führte.

Aus Gründen der Vertraulichkeit der genutzten Betriebsdaten sind in den folgenden **Tabellen 5-4** und **5-5** keine absoluten Zahlen angegeben, sondern die Abweichung vom Grundzustand, die sich bei der Berechnung der einzelnen Fallbeispiele ergibt, wird dargestellt.

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens der Regeneratoren für eine Querbrennerwanne zur Herstellung von Flachglas

	10 % Abgasrückführung		20 % Abgasrückführung	
	Luft	Abgas	Luft	Abgas
Temperaturdifferenz zum Referenzfall im Kammerkopf in K	-7	+3	-12	+6
Temperaturdifferenz zum Referenzfall im Kammerfuß in K	+46	+27	+88	+53
Massenstromdifferenz zum Referenzfall in m ³ _N	5.665	5.570	11.429	11.249

Der wesentliche Aspekt sind die erhöhten Temperaturen des Abgases im Kammerkopf und im Kammerfuß. Auf Grund der veränderten spezifischen Wärmekapazität der Abgase (höherer Anteil an CO₂), deren erhöhtem Volumen und der damit verbundenen erhöhten Strömungsgeschwindigkeit wird die Wärmeübertragung zum Speichermaterial (Kammerbesatz) verändert. Damit ändert sich auch die Wärmemenge, die zur Erwärmung der Luft zur Verfügung steht. Die Vorwärmtemperatur der Luft ist unter den berechneten Bedingungen leicht gefallen, obwohl die Eintrittstemperatur des Oxidators (Luft + rezirkuliertes Abgas) durch das Einmischen warmer Abgase in die Luft ansteigt. Auch hier spielen bei der Wärmeübertragung vom Kammerbesatz an den Oxidator die veränderten Strömungsgeschwindigkeiten und physikalischen Eigenschaften eine entsprechende Rolle.

5.3.2 U-Flammenwanne zur Herstellung von Behälterglas

Die Berechnungen des wärmetechnischen Verhaltens der Regenerativkammern einer U-Flammenwanne zur Herstellung von Behälterglas sind in **Tabelle 5-5** wiedergegeben. Die verwendeten Betriebsdaten entsprechen den Versuchen in Kapitel 5.4.2.

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens der Regeneratoren für eine U-Flammenwanne zur Herstellung von Behälterglas

	10 % Abgasrückführung		20 % Abgasrückführung	
	Luft	Abgas	Luft	Abgas
Temperaturdifferenz zum Referenzfall im Kammerkopf in K	-11	+2	-19	+4
Temperaturdifferenz zum Referenzfall im Kammerfuß in K	+47	+26	+91	+52
Massenstromdifferenz zum Referenzfall in m ³ _N	1.119	1.100	2.255	2.217

5.4 Umsetzung der Abgasrezirkulation an einer Behälterglaswanne

Die industrielle Umsetzung der verdünnten Verbrennung an einer Glasschmelzwanne war mit das wichtigste Arbeitspaket des Projektes. Im Zeitraum des Forschungsvorhabens wurde erst zu Ende der regulären Laufzeit eine Wannenreparatur an einer der vorgesehenen Wannen durchgeführt. Nur im Rahmen einer Wannenreparatur ist es aber möglich, die vorbereitenden Arbeiten zur Installation der technischen Voraussetzungen für eine Abgasrückführung zu schaffen. Zu Beginn der Wannenreise wird das Schmelzaggregat „eingefahren“ und es findet eine Abnahme statt. Erst wenn diese Phase abgeschlossen ist, ist es sinnvoll, Versuche an dieser Wanne durchzuführen. Auf Grund der verzögerten Wannenreparatur konnte nur durch eine kostenneutrale Verlängerung der Laufzeit die Umsetzung des Konzepts der Verdünnten Verbrennung ermöglicht werden. Der erste Versuch fand daher erst im Mai 2013 und ein zweiter Test im Juni 2013 statt. Bei beiden Testfahrten wurde zuerst der Ist-Zustand mit den aktuellen Betriebsparametern (Tonnage, Erdgasverbrauch, NO_x-Gehalts des Abgases, ...) messtechnisch erfasst und dokumentiert, und erst danach wurde die Rezirkulation des Abgases zugeschaltet.

5.4.1 Versuch 1 im Mai 2013

Beim ersten Testlauf wurden die Rezirkulation sehr vorsichtig und langsam in Betrieb genommen, um die Auswirkungen auf das Aggregat klein zu halten und keine Störung des Produktionsprozesses zu riskieren. Weiterhin sollte dadurch die Funktionstüchtigkeit der involvierten Anlagenteile, die bis dahin nicht in Betrieb waren, überprüft werden und im Bedarfsfall relativ zügig in den Ausgangszustand zurückgeschaltet werden können.

Sehr schnell zeigte sich, dass die Erfassung des rezirkulierten Abgasvolumenstromes mit Problemen behaftet war. Der angezeigte Volumenstrom konnte nicht mit den Ergebnissen der Messung des Kohlendioxids im Oxidator im Kammerkopf vor Eintritt in den Verbrennungsraum korreliert werden. Es stellte sich dann heraus, dass die eingebaute Messvorrichtung zur Erfassung des rezirkulierten Abgasvolumenstroms defekt bzw. beschädigt war. Der rezirkulierte Abgasvolumenstrom wurde deshalb nachfolgend anhand des CO₂-Gehaltes im Oxidator bestimmt. Zwischen den beiden Versuchsterminen wurden entsprechende Reparaturarbeiten vorgenommen.

Der maximal erreichte Grad der Rezirkulation betrug, abgeschätzt mit Hilfe des CO₂-Gehaltes im verdünnten Oxidator, beim ersten Test ca. 7,8 %. Dieser Wert wurde jedoch nur sehr kurze Zeit erreicht. Abbildung 5-14 zeigt den Zusammenhang zwischen CO₂-Gehalt im Oxidator und der rezirkulierten Abgasmenge.

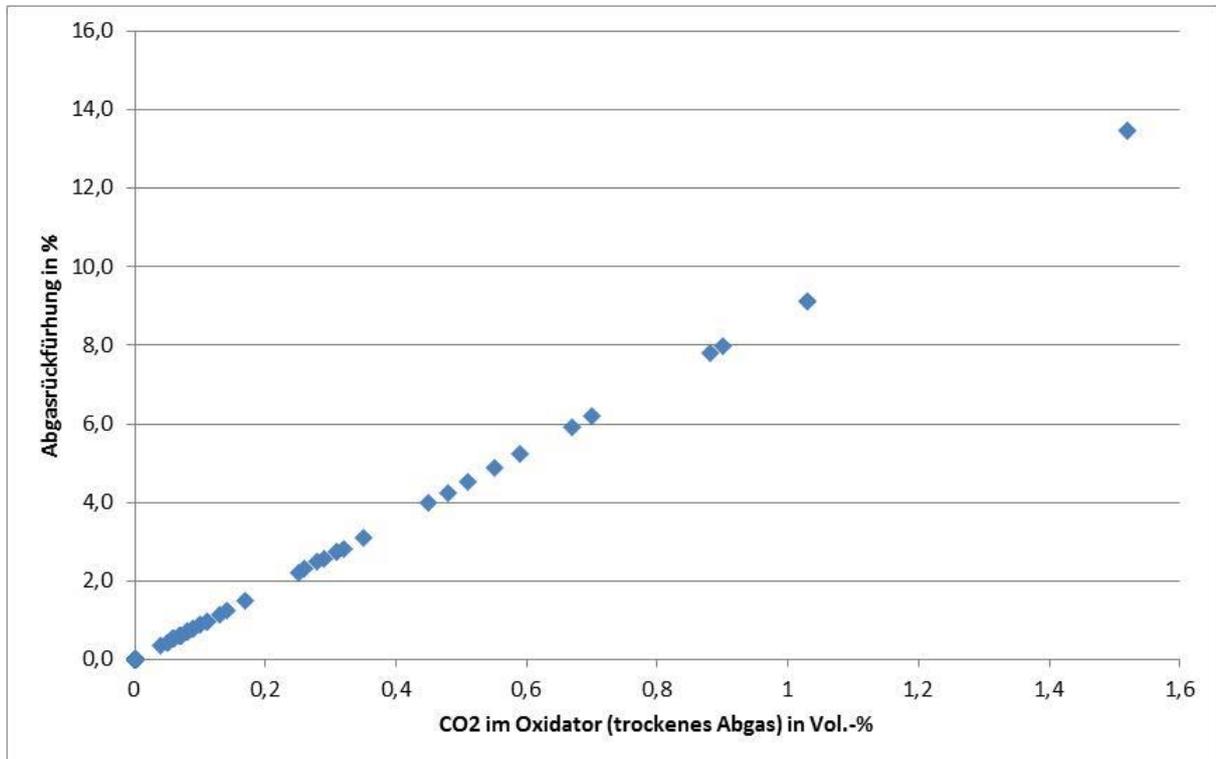


Abbildung 5-14: Zusammenhang zwischen CO₂-Gehalt des Oxidators und Anteil der Abgasrückführung unter den Randbedingungen der Versuche

Während des Testlaufes wurde, wie schon vorher bei der Ermittlung des Ausgangszustandes, die Zusammensetzung des Abgases und des Oxidators im Kammerkopf als auch die Zusammensetzung des Abgases im Fuchs (Abgaskanal) ermittelt. Die Temperaturen der gasförmigen Medien wurden ebenso dokumentiert wie weitere relevante Betriebsparameter.

Auf Grund der sich ständig ändernden Randbedingungen (Einstellung des rezirkulierten Abgases war nicht exakt und stabil möglich) während der Umsetzung der verdünnten Verbrennung ist eine Aussage zu den Auswirkungen der Rezirkulation des Abgases mit diesen Testergebnissen des ersten Versuchszeitraums nicht möglich. Um die Probleme mit dem Messfühler genauer eingrenzen und die einzelnen Anlagenkomponenten in ihrer Funktionstüchtigkeit überprüfen zu können, wurden viele verschiedene Einstellungen an der Fahrweise der Wanne durchgetestet. Daraus folgend waren keine konstanten oder quasistationären Zustände vorhanden bzw. konnten unter diesen Bedingungen erreicht werden.

Bei diesem Testlauf wurde das vorhandene Expertensystem, das die Wannenregelung und -optimierung nur durch Vorgabe der Sollwerte der wichtigsten Prozesstemperaturen ohne Zutun des Wannenführers vornimmt, außer Betrieb genommen, um auf eventuelle Veränderungen schnell und direkt reagieren zu können. Ein Eingreifen durch das Aufsichtspersonal war jedoch nicht von Nöten, da keine unerwarteten oder negativen Auswirkungen zu beobachten waren bzw. auftraten.

5.4.2 Versuch 2 im Juni 2013

5.4.2.1 Allgemein

Es wurden die Messdaten für den neuen Ausgangszustand (veränderte Tonnage und entsprechend angepasste Betriebsparameter) und anschließend für unterschiedlich hohe Abgasrückführungsquoten erfasst. Der Volumenstrom des rezirkulierten Abgases wurde stufenweise erhöht und jeweils für einige Zeit konstant gehalten, so dass die ersten Auswirkungen auf den Verbrennungsvorgang anhand der Zusammensetzung des Abgases und des Oxidators dokumentiert werden konnten. Auch bei diesem Versuch gilt: ein quasistationärer Zustand des Aggregates bezüglich sich neu eingestellter Temperaturen in der Regenerativkammern wurde nie erreicht, da sich solch ein Zustand erst nach mehr als 12 bis 24 h einstellt.

Auch eine Abgasrezirkulation von mehr als ca. 13 % (am besten wären 20 % nach Aussage der Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt) konnte mit Hilfe des installierten Heißgasventilators nicht realisiert werden, da dieser für kleinere Volumenströme ausgelegt war. Die Messung des Volumenstromes musste auch beim zweiten Versuch mit Hilfe des CO₂-Gehalts im Oxidator erfolgen, da der Messfühler inzwischen zwar funktionierte, in der Signalauswertung aber noch Probleme infolge einer falsch hinterlegten Bezugstemperatur auftraten. Da eine Kontrolle immer nur bei Betrieb der Abgasrückführung möglich ist, konnte die Lösung des Problems nur parallel bzw. während des Versuchs vorgenommen werden, so dass die Funktionstüchtigkeit der Messeinheit leider erst am Ende der Versuche sicher gestellt war.

5.4.2.2 Stickoxidgehalt

Bei der Aufnahme der Daten für den Ausgangszustand (siehe 0 % Abgasrückführung in **Abbildung 5-15**) wurden durch unterschiedliche Brenneinstellungen Verbrennungszustände realisiert, die zum Teil extrem niedrige NO_x -Werte beinhalten. Nicht alle diese Zustände lassen sich jedoch als Langzeiteinstellung für eine Glasproduktion mit niedrigem Energieverbrauch und hoher Ausbeute nutzen bzw. für den Dauerbetrieb umsetzen. Die Ausgangszustände für die beiden Versuchszeiträume wurden jedoch so gewählt, dass die aktuellen, von der TA-Luft vorgegebenen Grenzwerte aller Schadgase eingehalten, der Energiebedarf möglichst niedrig und die Ausbeute des Schmelzaggregates dabei so hoch wie möglich ist. Dies entspricht auch der Zielvorstellung des Glasherstellers. Die damit erreichten NO_x -Werte liegen im Mittelfeld der in **Abbildung 5-15** angezeigten Messergebnisse für den Zustand ohne Abgasrückführung. Es ist außerdem anzumerken, dass sich die beiden Regenerativkammern leicht unterschiedlich verhalten und daher auch eine gewisse Schwankungs- und Streubreite der Messergebnisse gegeben ist.

Wie in **Abbildung 5-15** zu erkennen ist, hat die Abgasrückführung bis zu einem Anteil von bis zu 8 % der anfänglichen Abgasmenge keine erkennbare Auswirkung auf den NO_x -Gehalt der Abgase im Fuchs. Laut Modellierung im Vorgängerprojekt soll die NO_x -Minderung auch erst ab Abgasrezirkulationsraten > 15 % einsetzen bzw. sich bemerkbar machen und zu einer deutlichen Minderung führen.

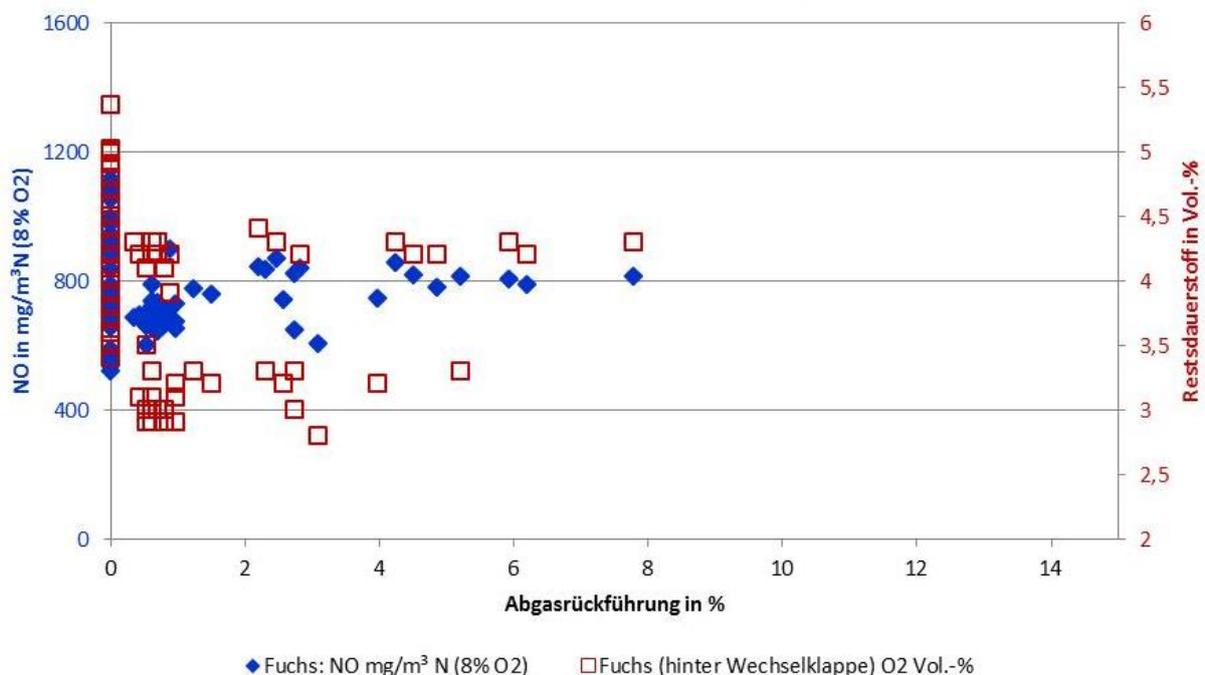


Abbildung 5-15: NO_x im Fuchs als Funktion der Abgasrückführungsquote in Vol.-% (bezogen auf 8 % O_2 im trockenen Abgas) und Restsauerstoff in Vol.-%

Eine Erhöhung des NO_x -Gehalts konnte während des Versuchs allerdings auch nicht zu beobachtet werden.

5.4.2.3 Energieverbrauch

Bei der zweiten Umsetzung der Abgasrückführung wurde das Expertensystem, das zur Regelung der Energiezufuhr (Erdgas und elektrische Zusatzheizung) sowie zur optimierten Regelung der Kontrolltemperaturen im Wannenofen (Verbrennungsraum und Glasschmelze) genutzt wird, nicht wie beim ersten Testlauf abgeschaltet. Beim zweiten Test wurde die Abgasrückführung in Betrieb genommen, ohne am Prozessleitsystem etwas zu verändern, so dass die „Antwort“ des Schmelzaggregates mit allen seinen Komponenten „unverfälscht“ zu beobachten war. Vor dem Einsatz der Abgasrückführung betrug der Energieeintrag durch die EZH (Elektrozusatzheizung) ca. 7,75 % des Gesamtenergieeintrags in die Schmelzwanne. Solange die Abgasrezirkulation in Betrieb war, senkte das Expertensystem sowohl die Erdgasmenge als auch die EZH langsam ab. Kurz vor dem Abschalten der Rückführung war der EZH-Anteil auf 7,55 % gesunken. Der Erdgasverbrauch sank bis zum Ende der Versuchszeit (fast 4 Std.) um 3,6 % und der Gesamtenergieverbrauch demnach um ca. 3,7 %. Nach Abschalten der Abgasrezirkulation stieg der Energieverbrauch recht schnell (2 bis 3 Std.) wieder auf das Ausgangsniveau von vor dem Testlauf an.

Eine Erklärung für das Verhalten des Expertensystems ist eine geringe Erhöhung der Temperaturen der Flamme zum Durchlass hin. Durch den leicht verzögerten Ausbrand wird die Flamme etwas länger ohne die Stirnwand zu berühren und die Temperaturen über der freien Badoberfläche im letzten Drittel der Wanne steigen geringfügig an. Das bedeutet, dass die Kontrolltemperatur im Gewölbe mit etwas weniger Energie erreicht wird. Da auch der Energieeintrag in die Weißglasschmelze verbessert wird (durch die Verlagerung des „Hot Spots“), kann das Expertensystem auch den Energieeintrag der EZH vermindern, ohne dass die Temperaturen der Schmelze dadurch verändert werden.

5.4.2.4 Temperaturen

Eine Veränderung der Temperaturen der Medien Oxidator und Abgas im Kammerkopf war im Rahmen der Schwankungen einer industriellen Anlage nicht zu beobachten. Dies steht im Gegensatz zu den Berechnungen mit dem Kammerprogramm der HVG und zu den Modellierungen des GWI, siehe nachfolgende Kapitel. Allerdings geht sowohl die Kammerberechnung als auch die Modellierung von einem quasistationären Zustand im Gleichgewicht aus, was an einer Glasschmelzanlage mit fast täglich wechselnden Tonnagen selten erreicht wird. Die relativ kurze Versuchszeit von ca. 4 Stunden und die hohe Wärmespeicherkapazität der Regeneratoren führen dazu, dass diese im Gegensatz zu den Vorgängen im Verbrennungsraum noch nicht auf die geänderten Bedingungen reagieren konnten. Um die Pufferwirkung der Kammersteine zu neutralisieren bzw. das neue Gleichgewicht der Energie- und Wärmeströme zu erreichen, muss die verdünnte Verbrennung mindestens 24, noch besser mehr als 48 Stunden laufen. Dann dürften sich die Medientemperaturen auch so einstellen, wie es die verschiedenen Berechnungstools vorhersagen.

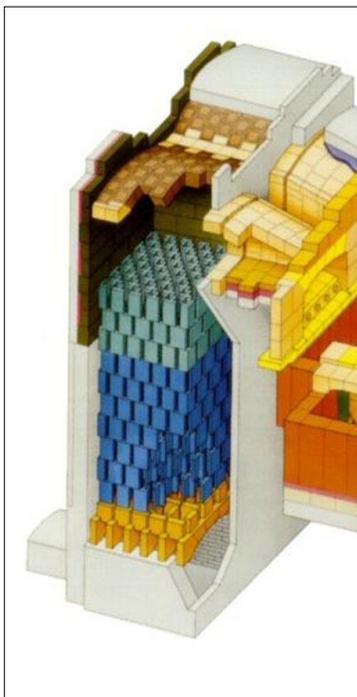
6. Ergebnisse der numerischen CFD-Simulationen

Zu Beginn der numerischen Untersuchungen wurden grundlegende Simulationen und Voruntersuchungen zu den Möglichkeiten und Parametern der Umsetzung der externen Abgasrezirkulation von Seiten des GWI vorgenommen. Weiterhin wurde untersucht, wie sich die Abgasrezirkulation auf andere Ausführungen von Glasschmelzwannen, z. B. eine Querbrennerwanne auswirkt.

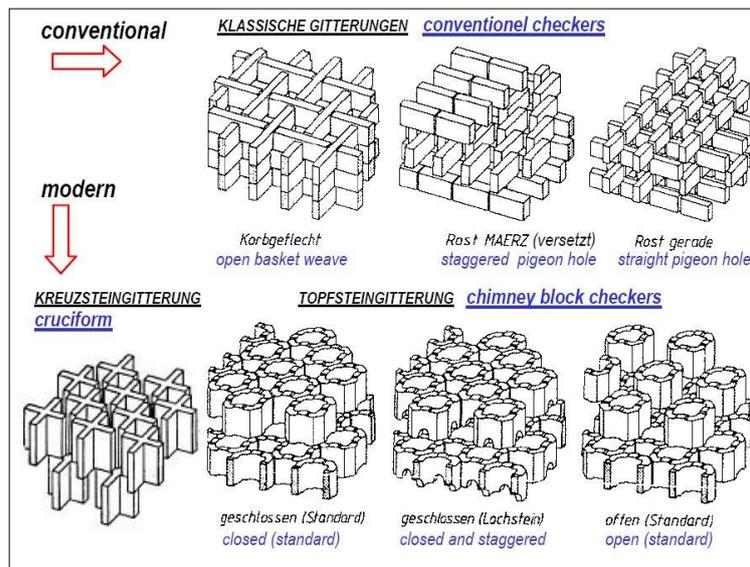
6.1 Bestimmung der Parameter des Druckverlustes in den Regeneratoren

Im ersten Schritt wurden die Auswirkungen der externen Abgasrezirkulation auf die Regeneratoren untersucht. Die Daten der Regeneratoren, welche die Grundlage der Simulationen liefern, wurden von den beteiligten Firmen (Glaswannenbetreibern) zur Verfügung gestellt. Sie beinhalteten unter anderem die Temperaturen der ein- und austretenden Luft- und Abgasströme, die Geometrieparameter und weitere Randbedingungen wie z. B. die Leistung der Wanne, Materialdaten der Steine etc.

Als erstes wurde der IST-Zustand nachgebildet und anschließend die entsprechende Zumischung des Abgases zur Luft simuliert. Es sind dabei numerische Untersuchungen der Aufheizung der Speichermedien notwendig geworden, da die komplexe Struktur eines solchen Regenerators (siehe **Abbildung 6-1**) sehr aufwändig für eine numerische Simulation ist und instationäre Vorgänge sehr zeitintensiv sind.



a) Regenerator einer U-Flammenwanne [31]



b) Beispiele für Regeneratorsteine [32]

Abbildung 6-1: Regenerataraufbau und -steine

Daher wurde sich zuerst darauf konzentriert, die Stoffdaten, den Druckverlust und die Wärmespeicherung der realen Steine auf ein poröses Medium als Ersatzmodell zu übertragen. Dies ist notwendig, da sonst die Regeneratoren als Ganzes nicht „so einfach“ zu simulieren wären und aufgrund der sehr hohen Zellenzahl und der damit einhergehenden benötigten Rechenkapazität die Simulationsdauer unverhältnismäßig lang sein würde.

Anhand der Berechnungen sollen Aussagen zur Änderung der Wärmeübertragung, des Druckverlustes und der Kapazitätsgrenzen gewonnen werden. Die Ergebnisse werden analysiert, um dann darüber zu entscheiden, ob die zu rezirkulierende Abgasmenge eine Überlastung der Regeneratoren hervorruft oder nicht.

Zur Bestimmung des Druckverlustes wurde ein definierter Teilausschnitt aus der Geometrie eines Regeneratorturms einer U-Flammenwanne übernommen. An diesem Teilstück, welchem die reale Gitterstruktur im Regenerator zu Grunde liegt, wurde der Druckverlust bei verschiedenen Temperaturen des durchströmenden Fluids bestimmt. **Abbildung 6-2** veranschaulicht die in den Simulationen benutzte Geometrie. Die gelben Bereiche geben die Steinbesetzung wieder, die roten Bereiche den freien Raum für die Strömung und Grau die Seitenränder des Turmes mit entsprechenden Parametern.

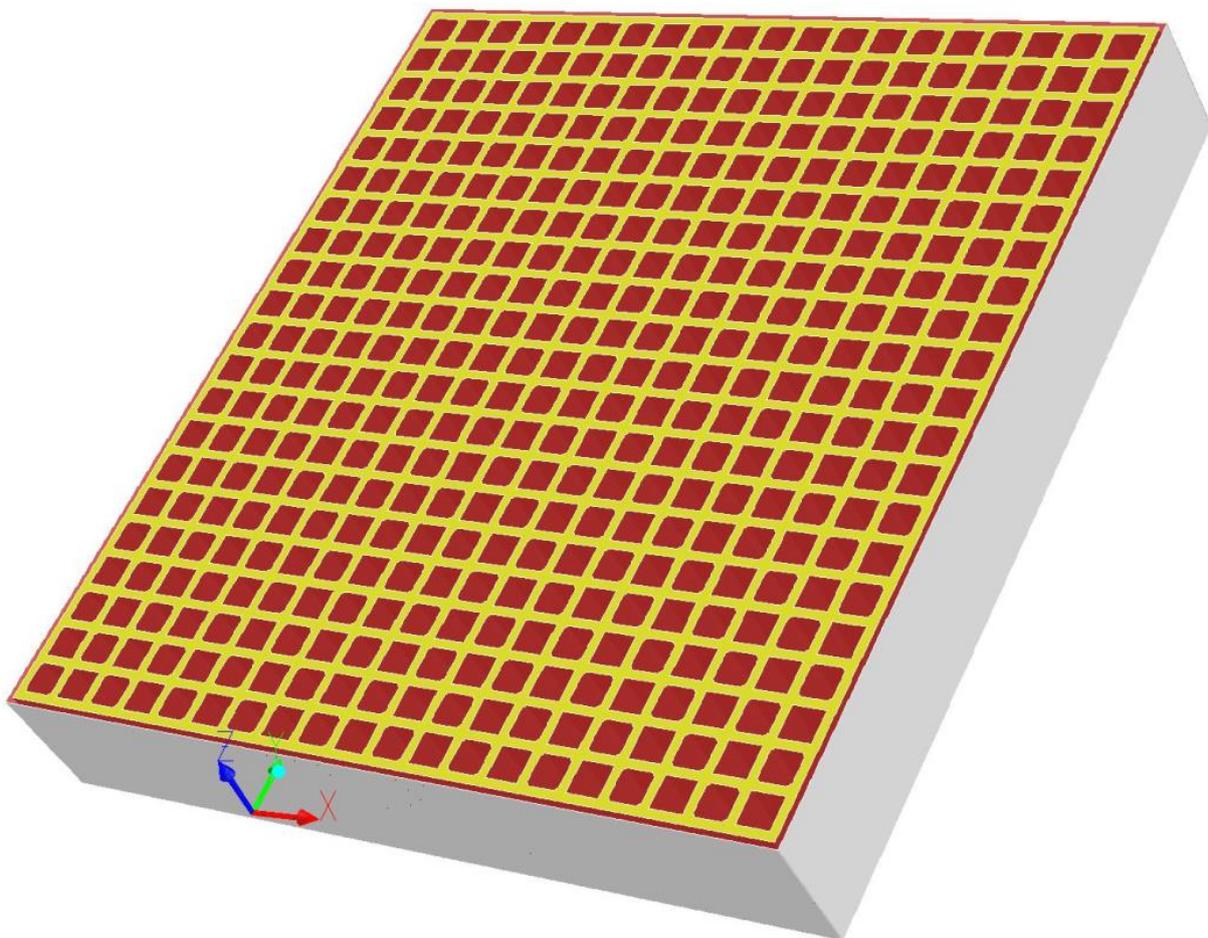


Abbildung 6-2: Steingitterung im Teilausschnitt des Regenerators

Abbildung 6-3 zeigt den Verlauf des Druckverlustes über der Temperatur des durchströmenden Mediums mit dem entsprechenden Polynom für die folgenden Simulationen.

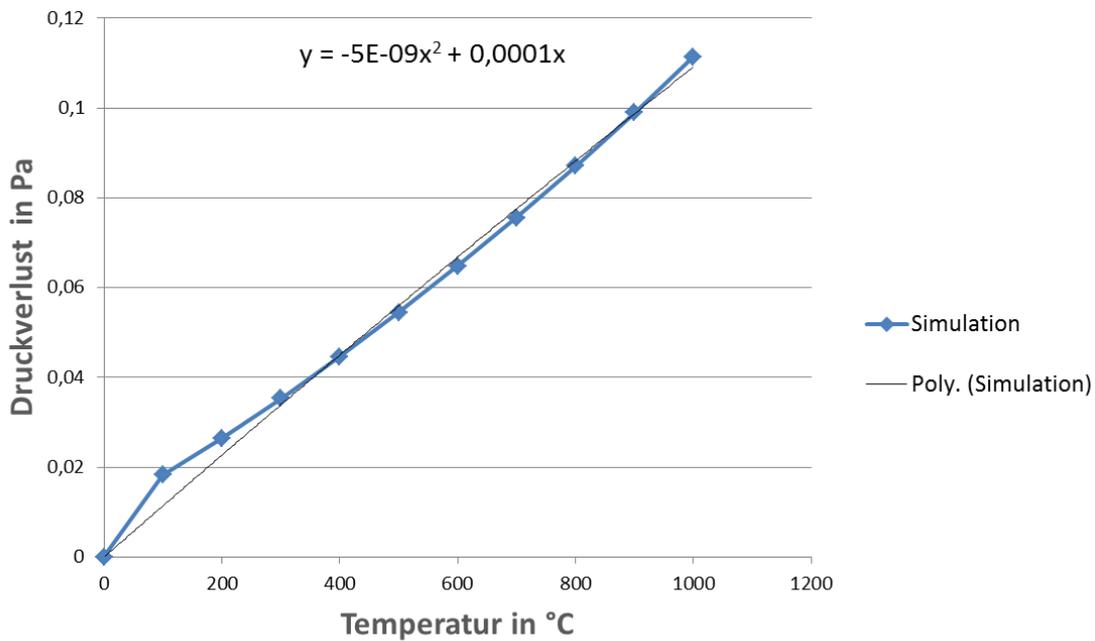


Abbildung 6-3: Druckverlust des Regenerators bei konstantem Durchfluss über der Temperatur

Mit den Druckverlusten und gemittelten Geschwindigkeiten aus den Simulationen des Ausschnittes der realen Geometrie, folgte die Berechnung des Alpha-Wertes α für das ersatzweise genutzte poröse Medium zur Reduzierung der Modellgröße der Gesamtsimulationen. Zusätzlich wurden zwei weitere Einstellungen berücksichtigt, welche das Verhalten des porösen Mediums beeinflussen. Zum einen wurde die Porosität der Fläche (offene zur gesamten Querschnittsfläche) berechnet und mit eingepflegt, sowie zum anderen durch Anpassung von Parametern die Strömung des Fluides im porösen Medium quer zur Hauptströmungsrichtung behindert und in den Simulationen mit porösem Medium berücksichtigt.

Die von den Betreibern gelieferten Materialdaten wurden ebenfalls in Polynome umgesetzt und als Materialeigenschaften für die Simulation hinterlegt. In den **Abbildungen 6-4** und **6-5** sind die Diagramme mit den Verläufen der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität über der Temperatur für die jeweilige Sorte der Regeneratorsteine aufgezeichnet.

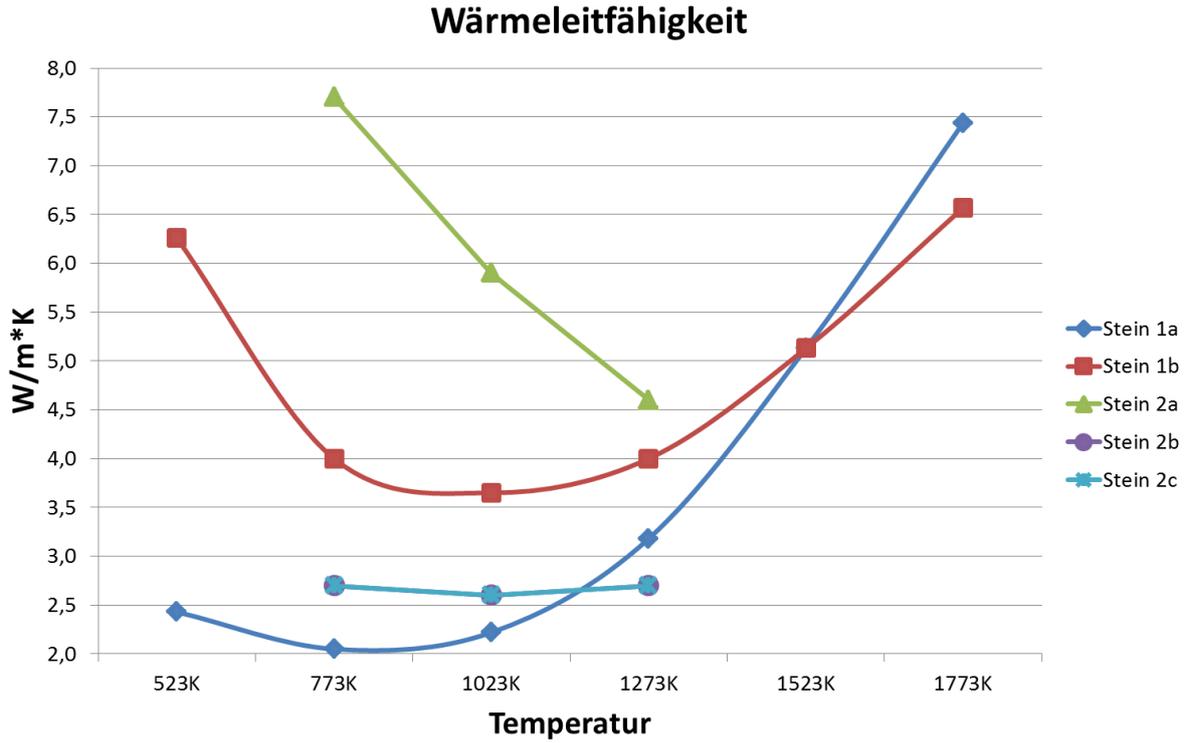


Abbildung 6-4: Wärmeleitfähigkeit der Materialien des Kammerbesatzes als Funktion der Temperatur

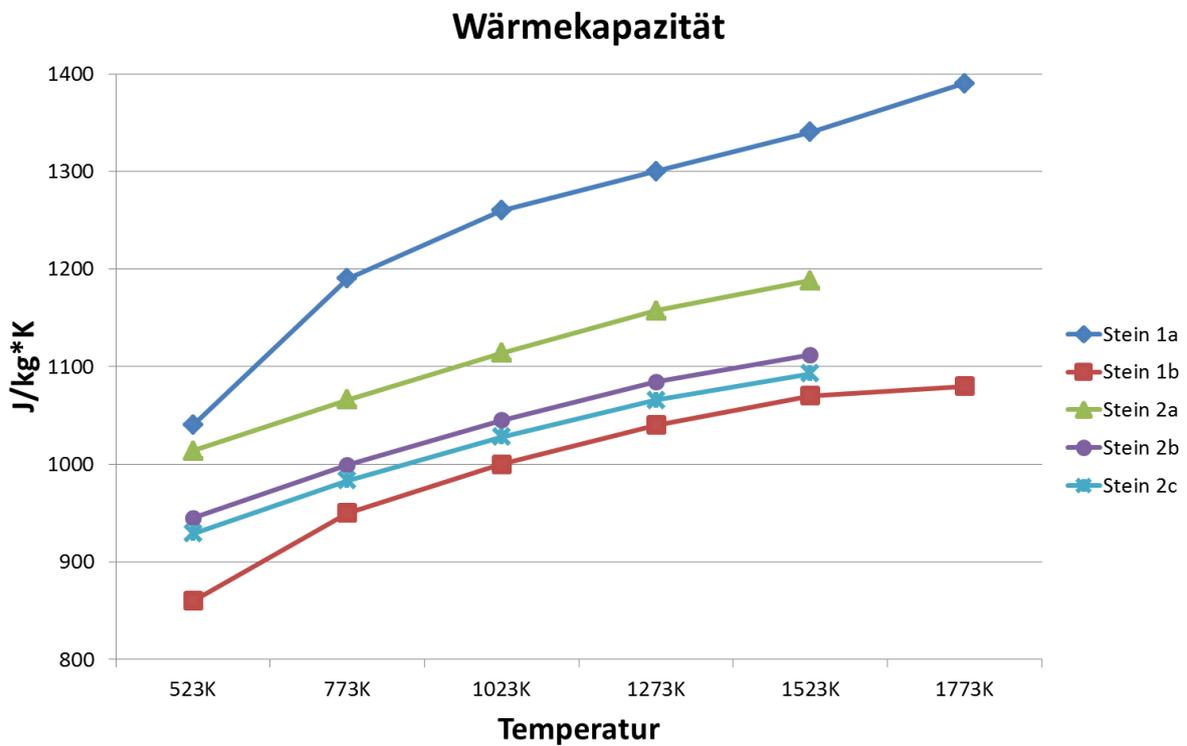


Abbildung 6-5: spezifische/mittlere Wärmekapazität der Materialien des Kammerbesatzes als Funktion der Temperatur

6.2 Ergebnisse der Umsetzung des porösen Mediums als Ersatz für den realen Steinbesatz in den Regeneratoren

Als erstes wurde hierbei ein Regeneratorturm einer U-Flammenwanne mit der realen Steinbesatzgeometrie in ein Simulationsmodell überführt und bei gegebenen Randbedingungen inklusive des Wärmeübergangs des heißen Abgases an die Regeneratorsteine berechnet.

Abbildung 6-6 zeigt die Verteilung der Temperatur (°C) für eine stationäre Simulation mit Einbindung der realen Steingeometrie in die Simulation. Als kennzeichnende vorgegebene Randbedingungsgrößen sind dabei die heiße Abgastemperatur, die Materialparameter der Regeneratorsteine und die Wärmeverluste durch die Wände zu nennen.

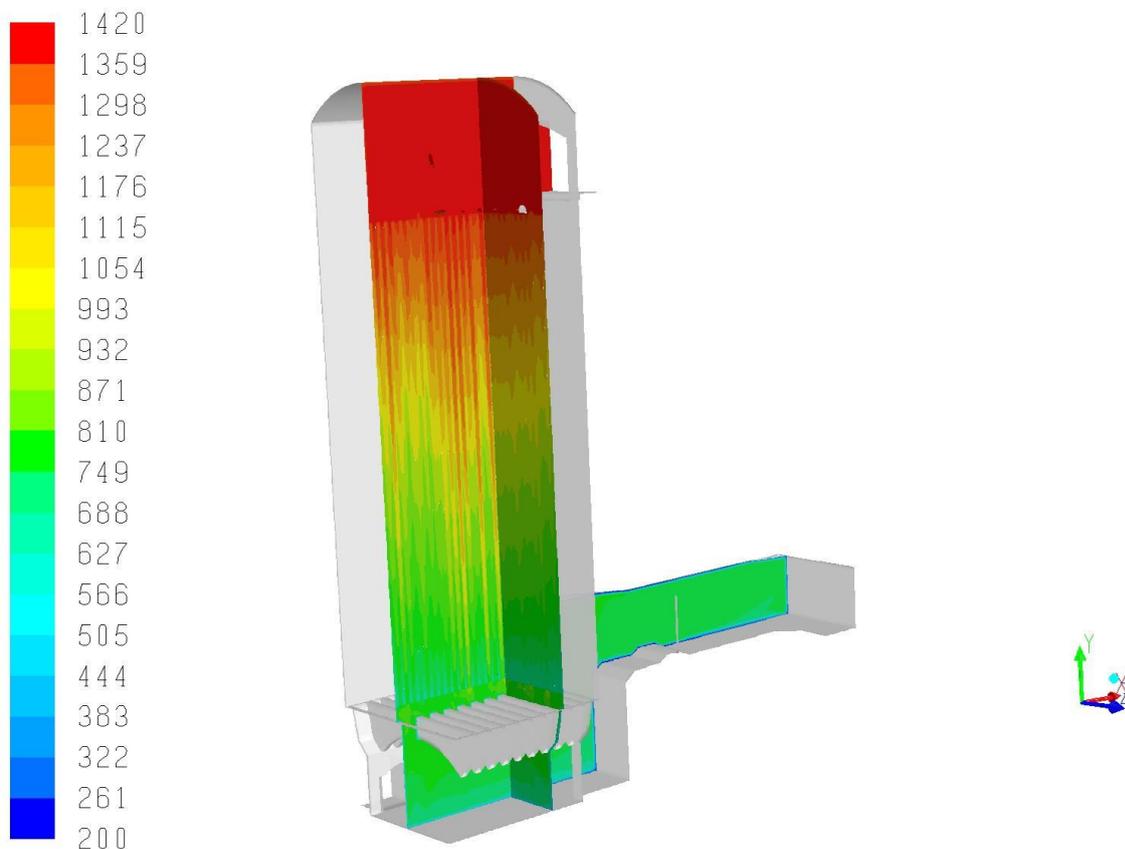


Abbildung 6-6: Temperaturverteilung auf Schnittflächen durch den Regeneratorturm mit Steinbesatz

Im Anschluss daran wurde im Simulationsmodell die reale Steinbesatzgeometrie durch ein poröses Medium ersetzt, welches ein ähnliches Ergebnis der Temperaturverteilung über die Länge bzw. Höhe des Steinbesatzes wiedergeben sollte. Gleichzeitig wurde der zweite Regeneratorturm mit in die Simulation eingebunden, da durch den Einsatz eines porösen Mediums Berechnungszellen gespart werden können und sich somit die Gesamtgittergröße nicht wesentlich verändert hat.

Um nun die Aufheizung bzw. Abkühlung der jeweiligen Regeneratortürme zu simulieren, ist es von Nöten dem einen Regeneratorturm eine gewisse Wärmemenge im Volumenbereich des porösen Mediums zuzuführen und dem Anderen zu entziehen. Dafür wird eine bestimmte Wärmemenge (W/m^3) dem linken Turm, welcher sich in der Aufheizphase befindet, im Bereich der Steingitterung in Form von Senkentermen entzogen und dem rechten Turm, welcher sich in der Abkühlphase befindet, in gleicher Menge als Quellterme hinzugefügt (siehe **Abbildung 6-7**), so dass sich am Ende eine ungefähr gleiche Temperaturverteilung im Regeneratorturm einstellt, wie bei der Simulation mit der realen Steingitterung. Die zu bestimmende Wärmemenge ist dabei für jeden Einsatzfall einzeln und neu zu bestimmen. Die normalerweise durch ständige Messung und Kontrolle bei den Betreibern vorhandenen Temperaturen im Regeneratorkopf und -boden stellen für die jeweilige Bestimmung der Wärmemenge gute Randbedingungen dar.

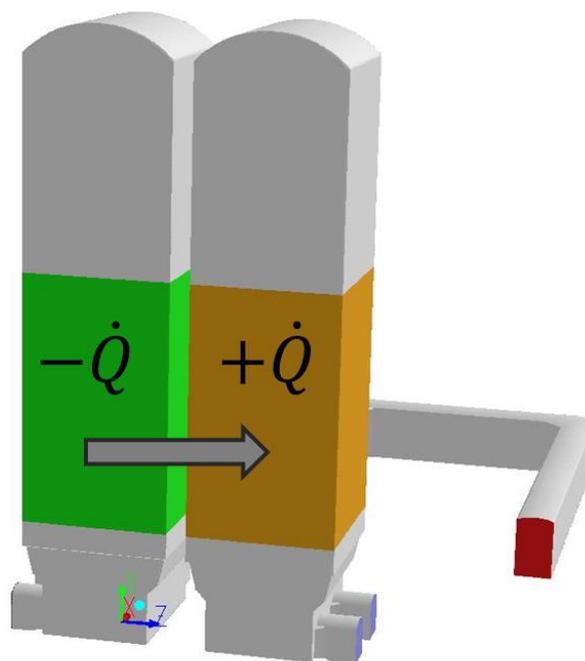


Abbildung 6-7: Übergabe bzw. Entnahme und Zugabe der Wärmemenge aus den Regeneratortürmen

In den **Abbildungen 6-8 und 6-9** ist die Temperaturverteilung ($^{\circ}C$) als Ergebnis einer stationären Simulation bei der Durchströmung der Regeneratortürme mit heißem Abgas (Aufheizphase) bzw. kalter Frischluft (Abkühl- bzw. Vorwärmphase) unter Zuhilfenahme des porösen Mediums als Ersatzdarstellung für die reale Steinbesatzgeometrie im Simulationsmodell in zwei Ebenen dargestellt.

Der Vergleich zu **Abbildung 6-6** (Simulation mit realem Steinbesatz) zeigt kaum einen Unterschied in den Temperaturverläufen auf der Aufheizseite. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass nichts gegen den Einsatz eines porösen Mediums in den Simulation als Ersatz für reale Steinbesatzgeometrie unter den vorher genannten Randbedingungen spricht.

Die unterschiedliche räumliche Verteilung der Temperaturen innerhalb des porösen Mediums in den jeweiligen hier untersuchten Türmen ergibt sich zum Hauptteil durch die unterschiedlichen Anströmungsbedingungen und Temperaturen der Fluide im Kopf und Boden des Regeneratorturms. Das heiße Abgas hat eine höhere Viskosität wie die kalte Frischluft und kommt zudem noch durch eine breite Öffnung aus dem Brennraum der U-Flammenwanne in den Regeneratorkopf und kann dann nur durch die Steingitterung im Regenerator abfließen. Daher ist dort eine relativ gleichmäßige Verteilung der Strömung in den Steinbesatz gegeben. Während hingegen die Frischluft durch zwei Eingänge verteilt in den Regeneratorboden eintritt und auch noch die Möglichkeit hat sich ein wenig in den Abgaskanal hinein zu bewegen. Daraus resultiert eine etwas ungleiche Verteilung der Strömung in den Steinbesatz hinein, welche sich auch nicht durch die vorgegebenen Bedingungen im Regeneratorturm ausgleichen kann. Denn eine Querströmung wird nicht zugelassen, da die Steingitterung dies auch in der Realität verhindert.

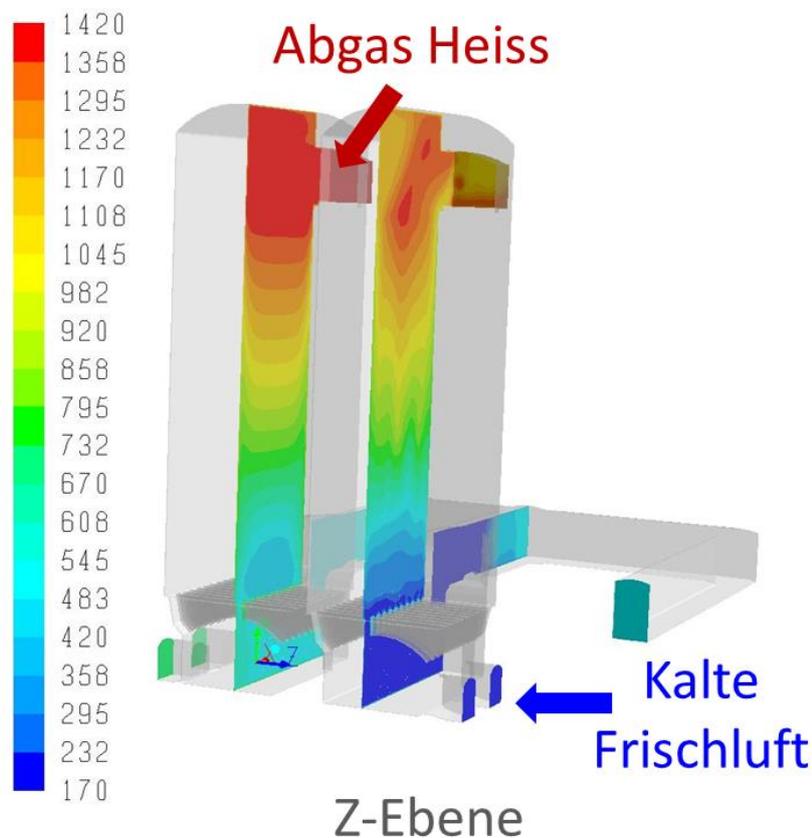


Abbildung 6-8: Temperaturverteilung auf Schnittflächen durch die Regeneratortürme (linke Seite mit Abgas und rechte Seite mit Frischluft)

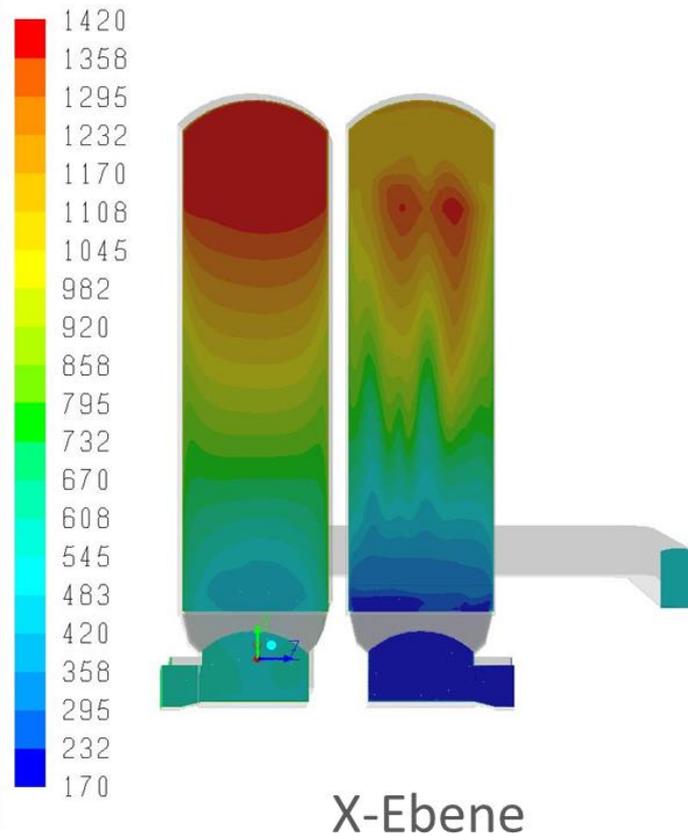


Abbildung 6-9: Temperaturverteilung auf Schnittflächen durch die Regeneratortürme (linke Seite mit Abgas und rechte Seite mit Frischluft)

Anschließend wurde der Druckverlust der Regeneratoren untersucht, welcher sich durch die gewünschte Zumischungsmenge des Abgases zum Frischluftstrom zwangsweise ergeben wird. Dafür sind 3 Simulationen des Regenerators mit unterschiedlichen Gemischkombinationen durchgeführt worden. Einmal reine Frischluft, Frischluft mit 10 % Abgasbeimischung und Frischluft mit 20 % Abgasbeimischung. Das Ergebnis ist in **Abbildung 6-10** aufgezeigt. Dabei wird der Grundzustand mit reiner Frischluft als 100 % angenommen.

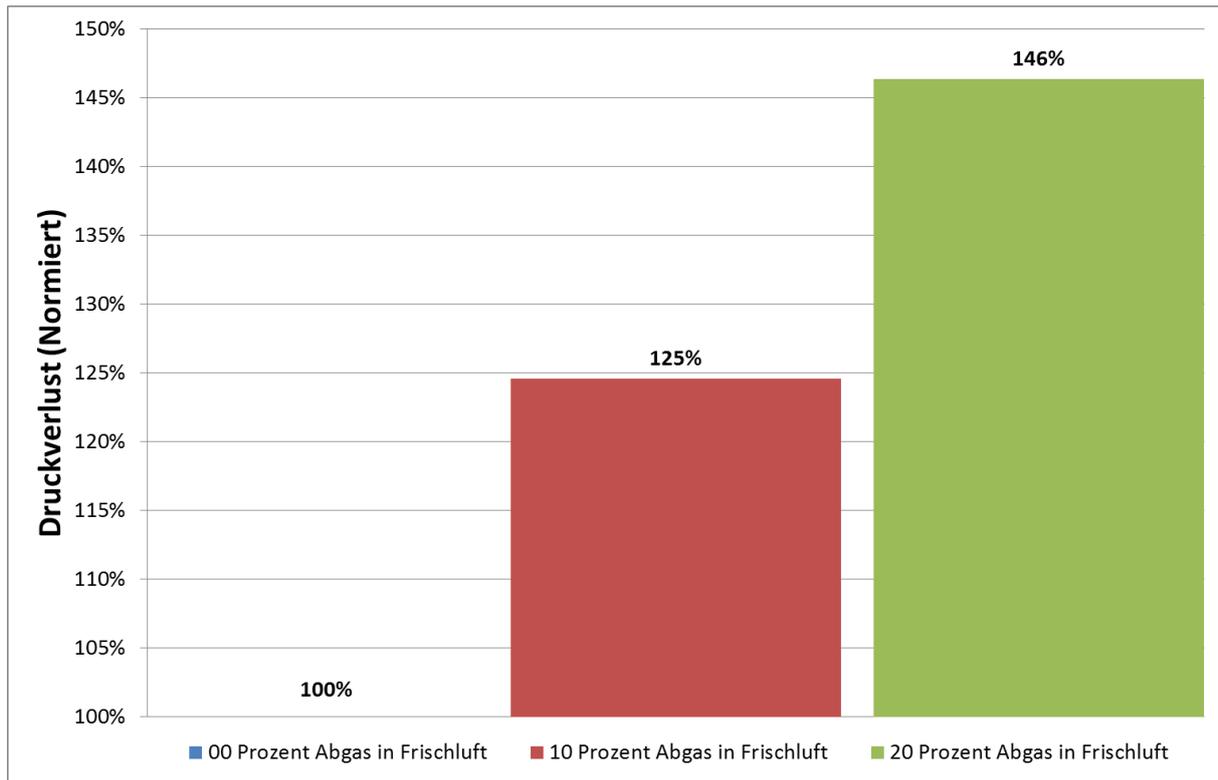


Abbildung 6-10: Druckverlust des Regenerators bei Zumischung von Abgas zu Frischluft

Der Druckverlust steigt mit der Beimischung von Abgas zur Frischluft an, da nun eine größere Volumenmenge durch den Regenerator transportiert werden muss. Die Erhöhung des Druckverlustes beträgt in diesem Fall bei einer 20 % Abgasbeimischung ca. 46 %.

Außerdem wurde zu Beginn des Projektes auf Anfrage des PbA die Möglichkeit untersucht, die Aufheizphase bzw. die Vorwärmphase eines Regeneratorturms instationär zu simulieren. Dafür wurde das vorhandene Modell für eine instationäre Simulation umgestellt und berechnet.

Einen Ergebnisauszug der instationären Berechnungen zum Abgleich der stationären Simulationsergebnisse zeigt **Abbildung 6-11**. Dargestellt ist die Temperaturverteilung nach ca. 7 min der Aufheizphase auf zwei Schnittflächen durch den Regenerator mit Steinbesatzgeometrie. Die Abkühlung des heißen Abgases ist gut zu erkennen, wobei gesagt werden muss, dass der Regeneratorturm zu Beginn der Simulation als kalt angenommen worden ist. Für eine gute und verlässliche Vorhersage des zeitlichen Verhaltens eines Regenerators muss die instationäre Simulation mehrere Aufheiz- und Abkühlphasen durchlaufen bis sich ein wiederholendes Muster einstellt.

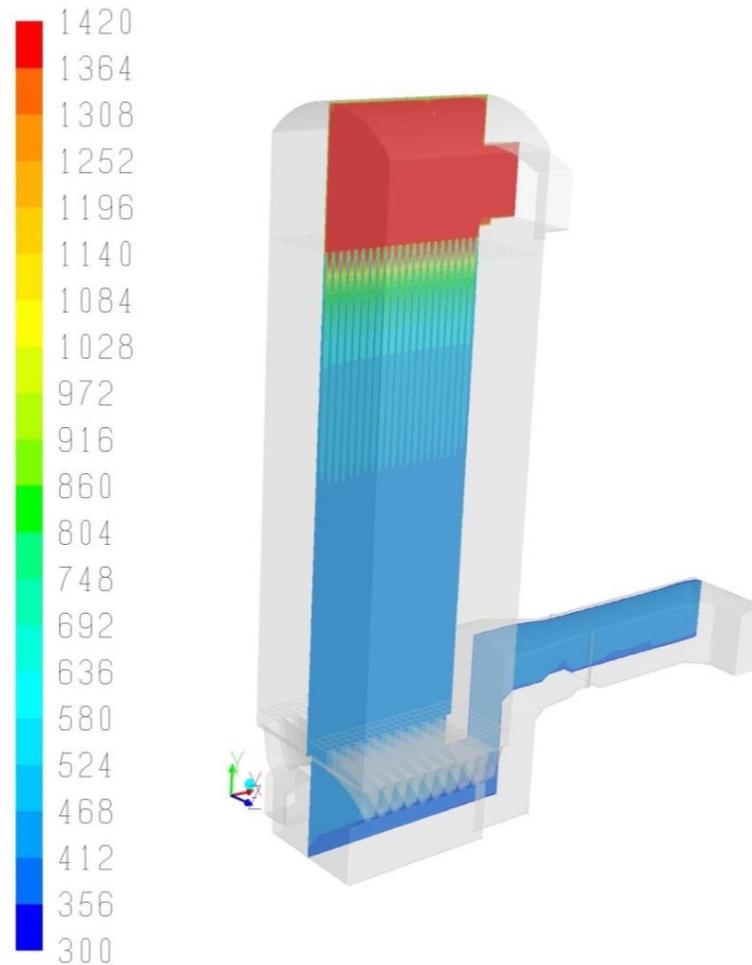


Abbildung 6-11: Temperaturverteilung nach ca. 7 min einer Aufheizperiode in einer Schnittfläche durch den Regeneratorturm mit Steinbesatzgeometrie

Dabei musste festgestellt werden, dass die instationäre Abbildung der Aufheizung oder Abkühlung des Regenerators für die hier vorzunehmenden nicht zielführend ist, da die instationären Simulationen zu diesem Zeitpunkt ein Vielfaches der Rechenzeit und Rechenleistung in Anspruch nahmen als die stationären Simulationen.

Weitere Verbesserungen der Möglichkeiten zur Durchführung von instationären Simulationen kompletter Regeneratortürme mit Abbildung des realen Steinbesatzes sind im Laufe des Projektes (siehe Kapitel 6.5) herausgearbeitet worden und geben einen Anhaltspunkt, solche Simulationen durchzuführen zu können, wieder.

6.3 Ergebnisse zu möglichen Umsetzungskonzepten der Abgasrückführung

Die Auslegung der möglichen Abgasrezirkulationskonzepte erfolgte mit Hilfe der numerischen Simulation. Wobei zuerst die Möglichkeit der Abgasrückführung ohne aktive Einbauten, wie zum Beispiel Heißluftgebläse oder Ähnliches, untersucht wurde, da ein Wunsch des PbA gewesen ist, am besten ohne zusätzliche Betriebskosten oder Energieverbrauch die Abgasrückführung zu realisieren.

6.3.1 Abgasrückführung ohne aktive Einbauten

Es sollten daher im Rahmen des Projektes Konzepte untersucht werden, die auf dem Prinzip der Injektorwirkung basieren oder über unterschiedliche Druckverluste funktionieren, d. h. eine Realisierung ohne zusätzliche aktiv zu betreibende Komponenten, sondern die Realisierung durch geometrische Anpassungen an den Regeneratoren.

Die Simulationen dafür wurden mit dem kompletten Regeneratorkonstruktion einer U-Flammenwanne durchgeführt und die Steingitterung, wie im Kapitel 6.2 beschrieben, durch ein poröses Medium ersetzt.

Die Umlenkung des Abgases macht nur Sinn, wenn diese im unteren Teil des Regenerators, dem Regeneratorkörper, stattfindet, da das heiße Abgas aus dem Verbrennungsraum der Glasschmelzwanne dort schon wesentlich abgekühlt ankommt, das heißt seine Wärme an den Steinbesatz abgegeben hat, und sich damit besser mit der verhältnismäßig kalten Frischluft mischen lässt. Das heiße Abgas hat dann eine Temperatur von circa 600 °C und die Frischluft ca. 200 °C, da diese meist aus der Umgebung der heißen Glasschmelzwanne angesaugt wird. Dies sind gute Voraussetzungen zum Mischen der zwei Stoffströme. Im Regeneratorkopf ist dies viel schwieriger möglich, da das heiße Abgas und die vorgewärmte Frischluft dort jeweils auf Grund der hohen Temperaturen viel höhere Viskositäten aufweisen, was das Mischen erschwert. Zudem müssten die verwendeten Materialien für die zusätzlichen Einbauten deutlich temperaturbeständiger sein als im Regeneratorkörper, was wiederum eine Kostenerhöhung mit sich führen würde.

In den nachfolgenden **Unterkapiteln 6.3.1.1, 6.3.1.2 und 6.3.1.3** werden drei untersuchte Konzepte vorgestellt und Ergebnisse beschrieben sowie beurteilt.

Die **Abbildungen 6-12, 6-13 und 6-14** veranschaulichen die Konzepte auf einen Blick.

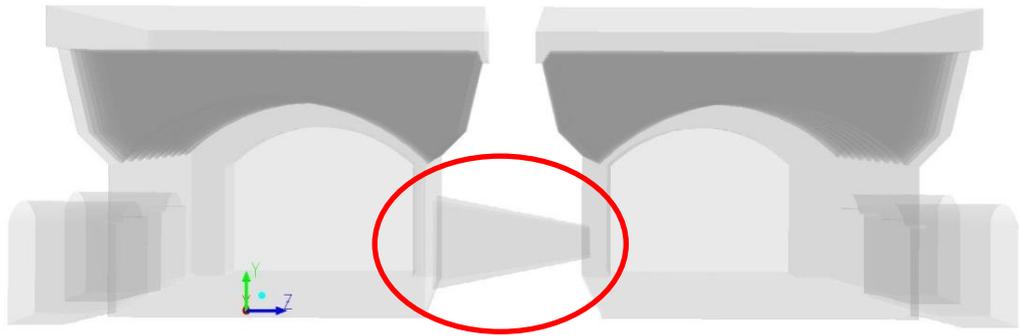


Abbildung 6-12: Konzept 1 der Abgasrückführung mittels eines Kegelstumpfes

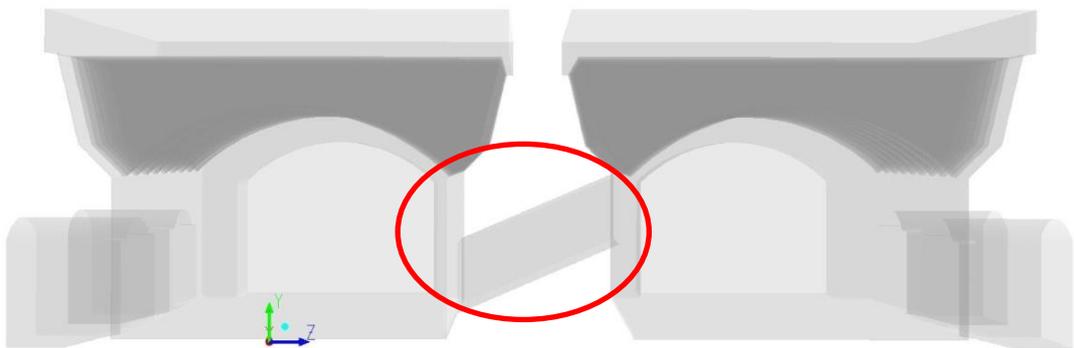


Abbildung 6-13: Konzept 1 der Abgasrückführung mittels eines Schrägkanals

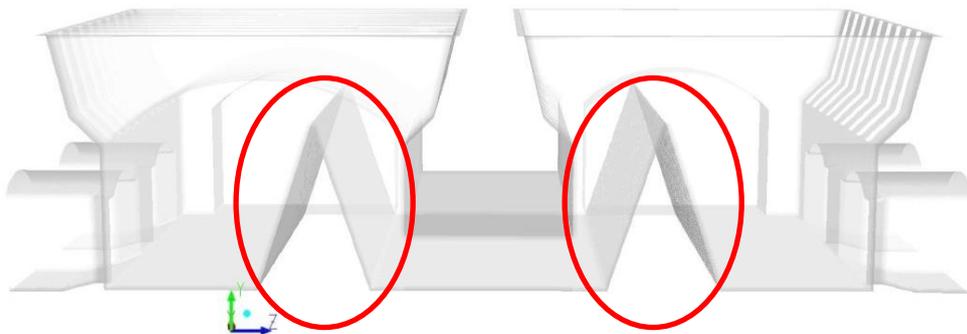


Abbildung 6-14: Konzept 1 der Abgasrückführung mittels Dreieckseinbauten und Verbindungskanal

Für einen Teil der Auswertungsabbildungen der Simulationen von den drei nicht aktiv betriebenen Konzepten der externen Abgasrezirkulation sind in **Abbildung 6-15** die Auswerteebenen dargestellt. Diese gehen jeweils mittig durch die Einlässe der Frischluft (rechte Seite).

Die Ebene in blau wird nachfolgend als „Schnitt1“ bezeichnet und die Rote als „Schnitt 2“.

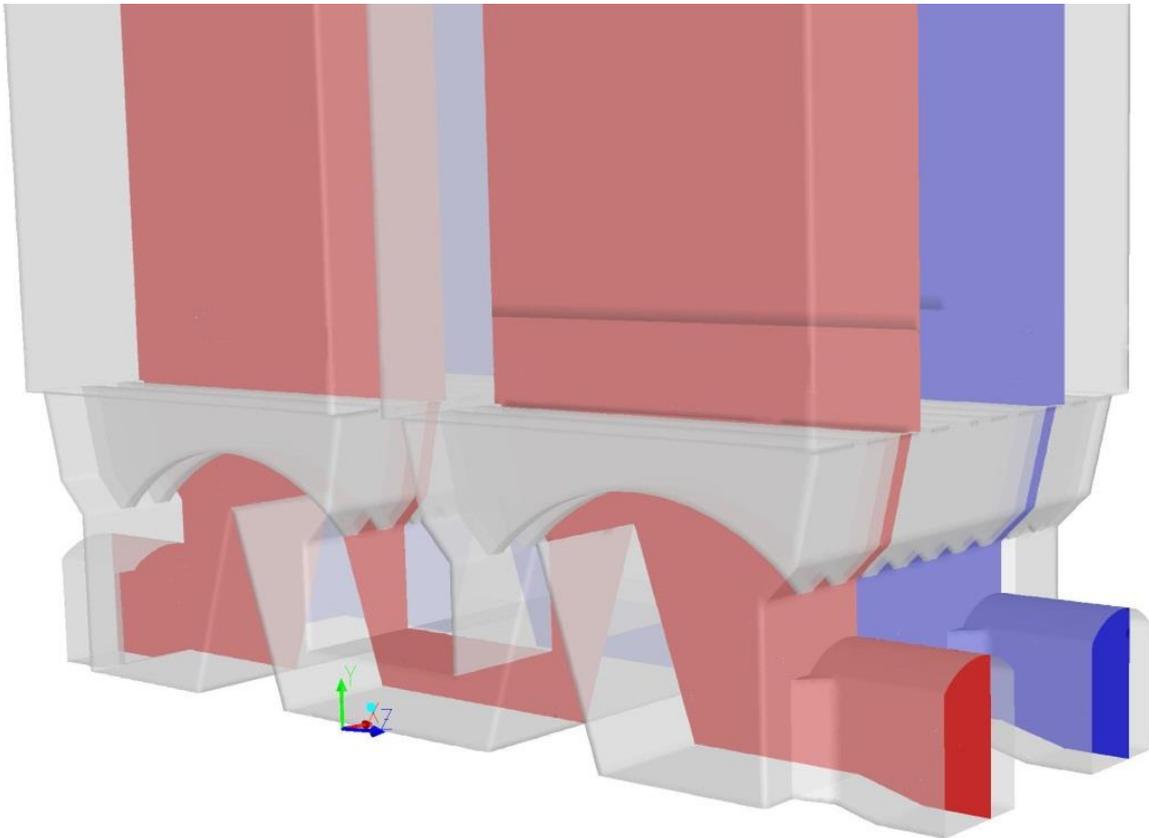


Abbildung 6-15: Geometrie der Regeneratoren mit den zwei Auswerteebenen

6.3.1.1. Konzept 1 der Abgasrückführung mittels eines Kegelstumpfes

Das erste Konzept basiert auf der Verbindung der beiden Regeneratoren durch einen Kegelstumpf, der den Impuls des durch den Regenerator nach unten strömenden heißen Abgases nutzt, um diesen in den Regenerator mit der Frischluft umzulenken.

In den beiden nachfolgenden **Abbildungen 6-16** und **6-17** sind die Ergebnisse der Strömungssimulation einmal als Kontour-Plot und einmal als detaillierter Vektor-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s auf einem mittig verlaufenden vertikalen Schnitt durch die Regeneratoren dargestellt. Der schwarze Rahmen im Kontour-Plot stellt den im Vektor-Plot detaillierter veranschaulichten Bereich dar.

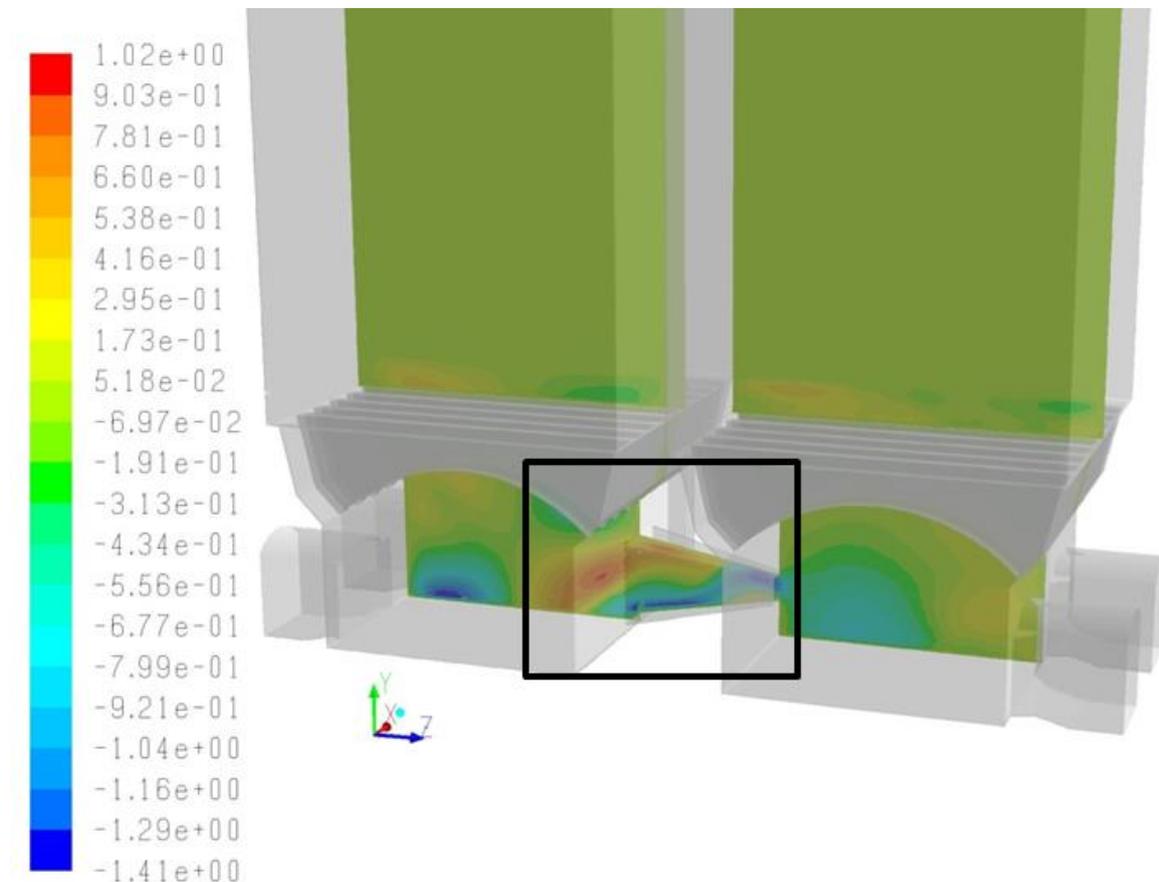


Abbildung 6-16: Kontour-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s für das Abgasrückführkonzept 1

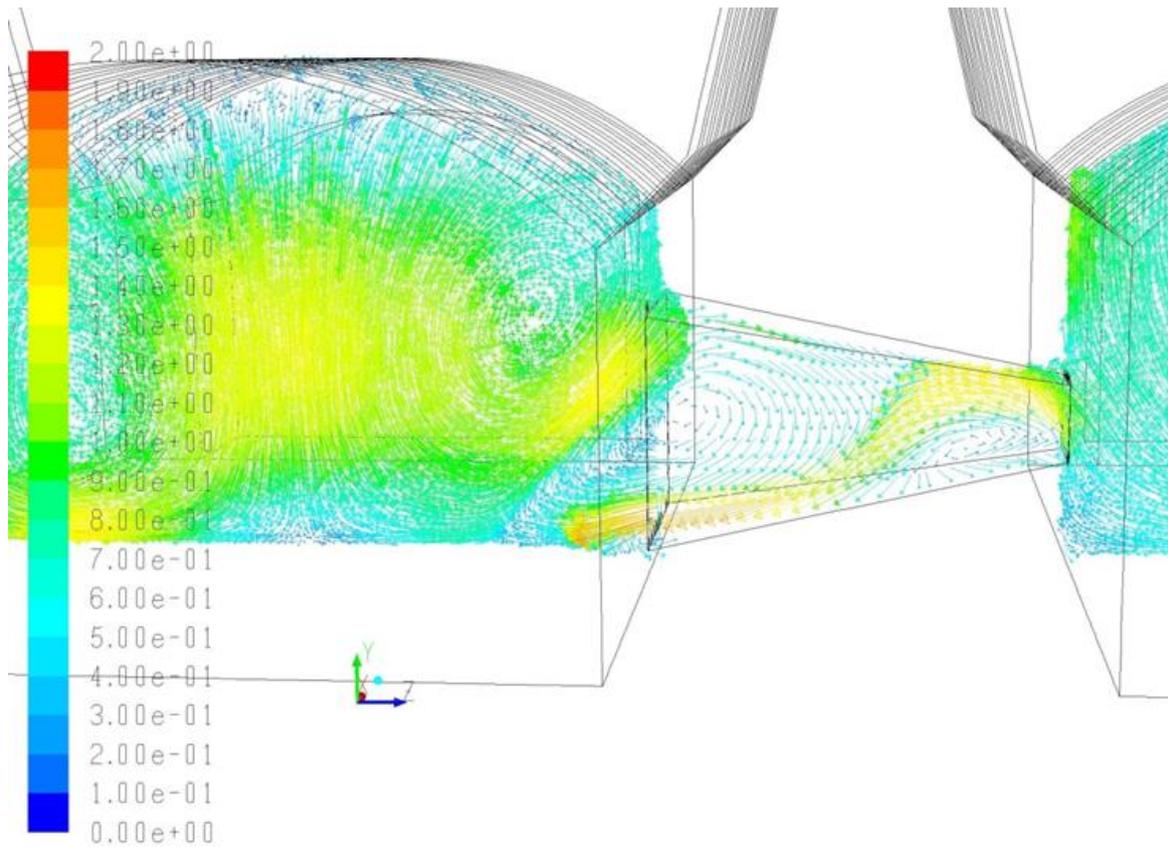


Abbildung 6-17: Vektor-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s am Kegelstumpf

Das Ergebnis dieses Konzeptes war nicht zufriedenstellend. Es wird ein kleiner Teil des heißen Abgasstromes in die größere Kegelstumpföffnung hineingezogen, aber dieser wird wieder nach ungefähr der Hälfte der Strecke durch den in die kleine Kegelstumpföffnung einströmenden kühlen Frischluftstrom umgelenkt und zurückgedrängt. Dies liegt sicherlich auch daran, dass die kühle Frischluft in direkter Linie auf die kleine Öffnung des Kegelstumpfes strömt, wohingegen der heiße Abgasstrom umgelenkt werden muss.

Daher wird dieses Konzept nicht weiterverfolgt.

6.3.1.2. Konzept 2 der Abgasrückführung mittels eines Schrägkanals

Das zweite Konzept basiert auf der Verbindung der beiden Regeneratoren durch einen Schrägkanal, der ebenfalls wieder den Impuls des durch den Regenerator nach unten strömenden heißen Abgases nutzen soll, um diesen in den Regenerator mit der Frischluft umzulenken.

Abbildungen 6-18 und **6-19** zeigen die Ergebnisse der Strömungssimulation einmal als Kontour-Plot und einmal als detaillierter Vektor-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s auf einem vertikalen Schnitt durch die Regeneratoren. Der schwarze Rahmen im Kontour-Plot stellt den im Vektor-Plot detaillierter veranschaulichten Bereich dar.

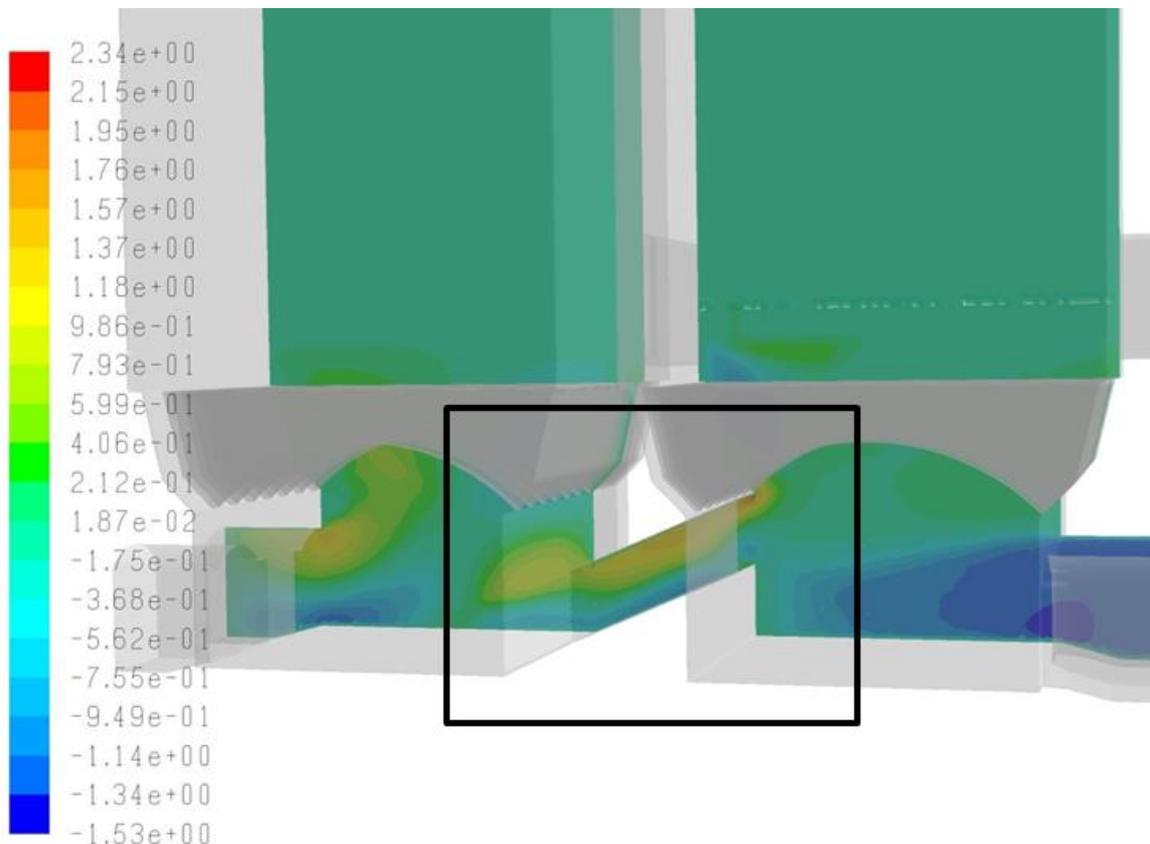


Abbildung 6-18: Kontour-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s für das Abgasrückführkonzept 2

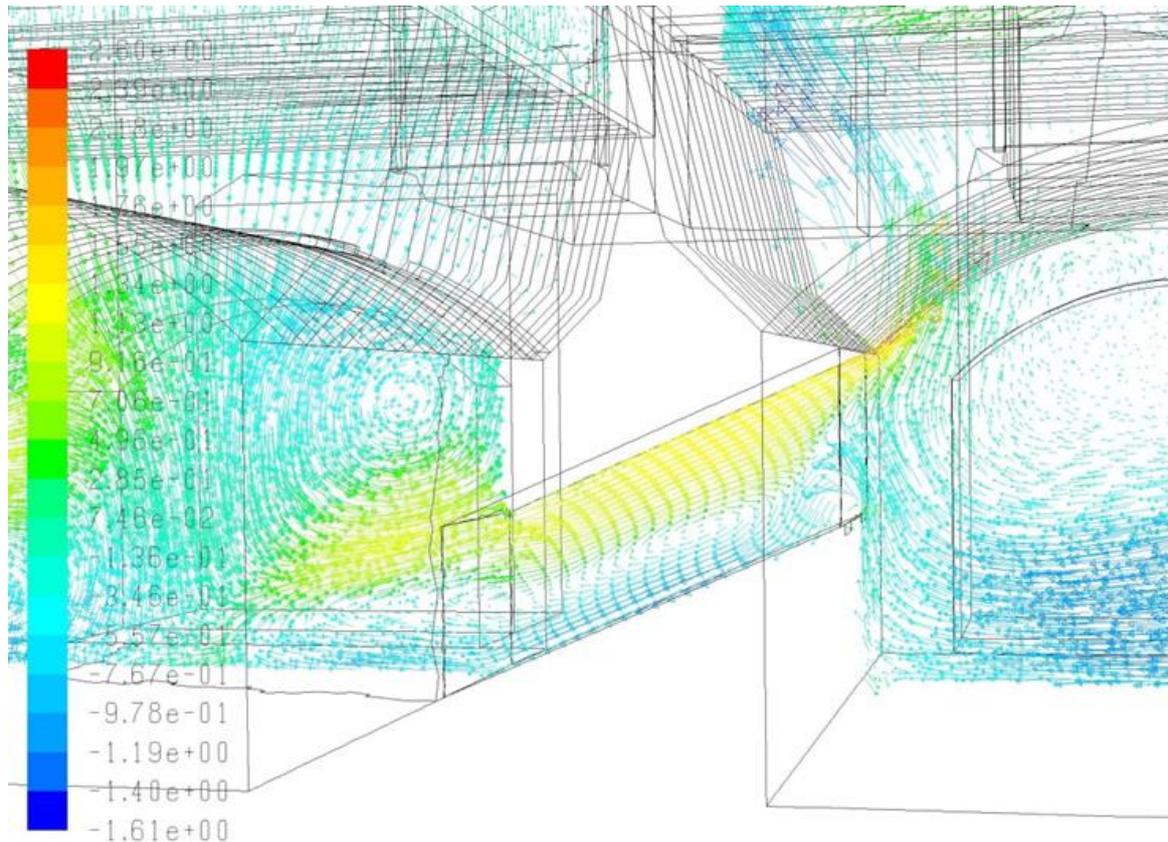


Abbildung 6-19: Vektor-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s am Schrägkanal

Das Ergebnis dieses Konzeptes ist zwar deutlich besser als das vorherige, erreicht aber noch nicht das geplante Ziel.

Ein Teil des heißen Abgasstromes wird in den Schrägkanal an der Oberseite hineingezogen und strömt auf der anderen Seite hinaus. Gleichzeitig strömt aber ein Teil des kühlen Frischluftstromes auf der Unterseite des Schrägkanals auf die Aufheizseite. Daher wird der gewünschte Effekt, nur den heißen Abgasstrom umzulenken, nicht erreicht. Aber die Vermutung aus der Erfahrung des ersten Konzeptes bestätigt sich, da der Frischluftstrom nun von der gegenüberliegenden Seite erstmal nach oben umgelenkt wird und zumindest einen Teil des heißen Abgasstromes mitreißt.

Die Untersuchung dieses Konzept ergab weitere Hinweise wie die Verbindung eventuell gestaltet werden müsste, um das erwünschte Ziel zu erreichen.

6.3.1.3. Konzept 3 der Abgarrückföhrung mittels eines Kanals und Dreieckseinbauten

Mit den Erfahrungen der vorangegangenen zwei Konzepte wurde ein drittes Konzept erarbeitet, welches nicht nur eine Verbindung der beiden Regeneratorböden miteinander beinhaltet, sondern auch zusätzliche passive Einbauten zu Umlenkung von Fluidströmen. In **Abbildung 6-20** wird das Konzept mit dem erwünschten Strömungsverhalten in der Entwicklungsphase dargestellt. Der heiöe von oben einströmende Abgasstrom (rote Pfeile, linke Seite) wird durch einen dreiecksförmigen Einbau im Regeneratorboden in zwei Teile aufgespalten, wovon einer durch den Abgaskanal abgeleitet wird (der normale Weg heraus aus dem Regenerator) und der Andere durch den geraden, am Boden verlaufenden, Verbindungskanal hinüber in den anderen Regenerator. Die kühlte Frischluft (blaue Pfeile) trifft ebenfalls auf den dreieckförmigen Einbau und wird nach oben in den Regenerator zur Vorwärmung umgelenkt und vermischt sich zum Teil mit dem von der heißen Seite her kommenden Abgasstrom. Die Einbauten müssen auf beiden Seiten gleich sein, damit beim Feuerwechsel identische Verhältnisse geschaffen werden.

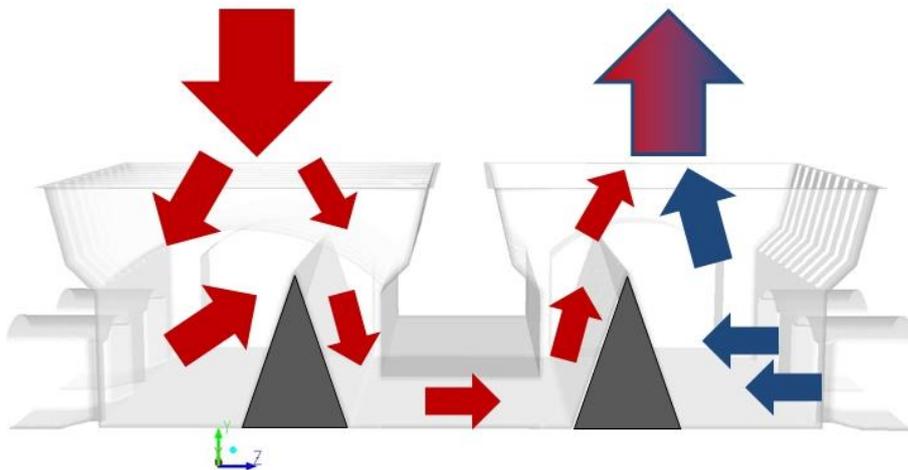


Abbildung 6-20: Konzept und gewünschter Strömungsverlauf durch Einbauten und Verbindungskanal

In den nachfolgenden **Abbildungen 6-20** bis **6-23** werden die Ergebnisse der Strömungssimulation mit dem neuen Konzept 3 als Kontour- und Vektor-Plot auf einem vertikalen Schnitt durch die Regeneratoren dargestellt. **Abbildungen 6-24** und **6-25** zeigen die Strömungslinien ausgehend von den Eintrittten der jeweiligen Fluidströme. Die Stromlinien stellen den Weg dar, dem virtuelle masselose Partikel in der Strömung folgen würden. Dabei dient die Farbgebung der Strömungslinien nur zur Verfolgung der masselosen Partikel und trägt keine Aussage über irgendeinen Wert wie z. B. die Temperatur mit sich.

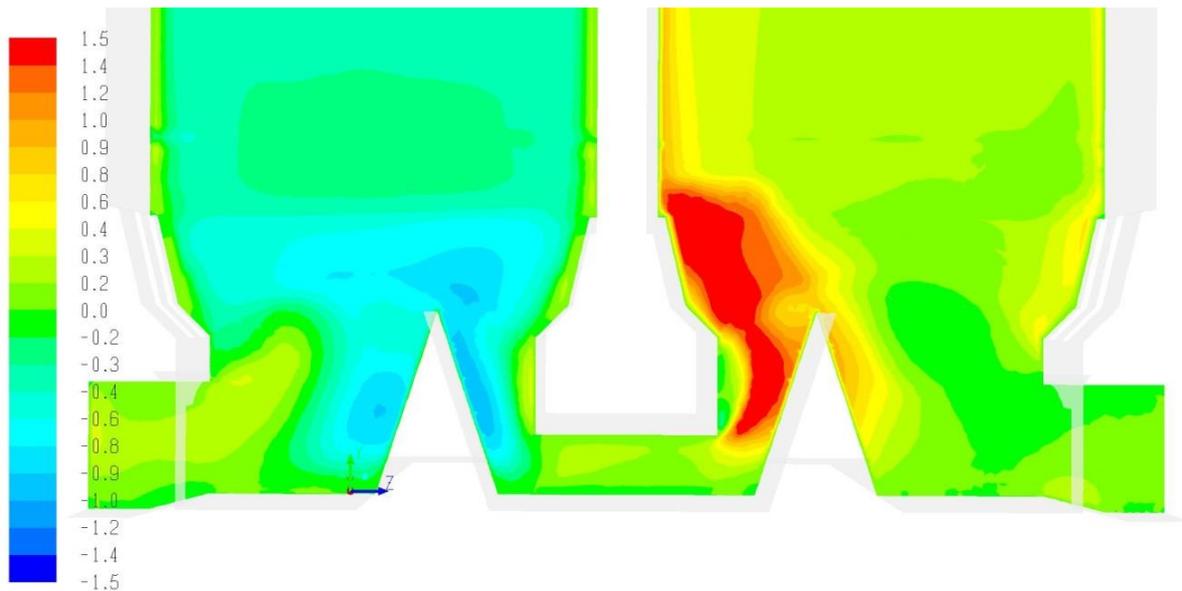


Abbildung 6-21: Kontour-Plot (Schnitt 2) der Strömungsgeschwindigkeit in X-Richtung (vertikal) in m/s
(Rot von unten nach oben und Blau von oben nach unten)

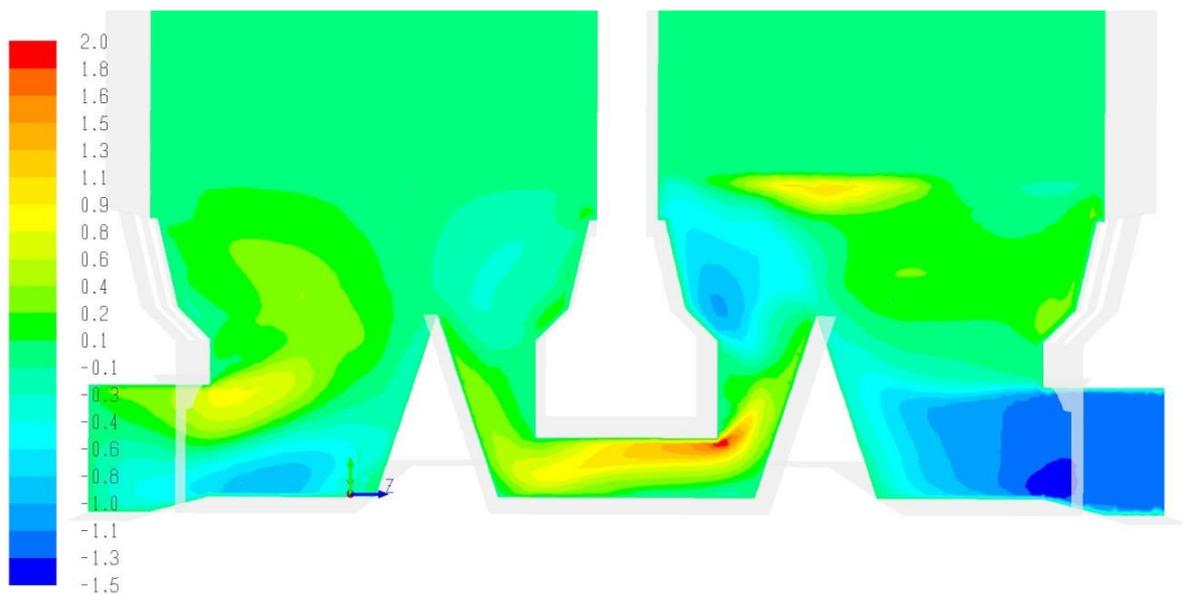


Abbildung 6-22: Kontour-Plot (Schnitt 2) der Strömungsgeschwindigkeit in Z-Richtung (horizontal) in m/s
(Rot von links nach rechts und Blau von rechts nach links)

Die **Abbildungen 6-21** und **6-22** veranschaulichen gut den vom Konzept erwünschten Effekt. Es wird ein Teil des von oben einströmenden heißen Abgases (linke Seite in den Abbildungen) durch den dreieckigen Einbau im Regeneratorboden abgespalten und in den Verbindungskanal geleitet. Auf der anderen Seite wird dieser dann wiederum durch den dreieckigen Einbau nach oben umgelenkt, wo er sich dann teilweise mit dem von rechts eintretenden Frischluftstrom mischt und zur Vorwärmung weiter hoch in den Regenerator strömt.

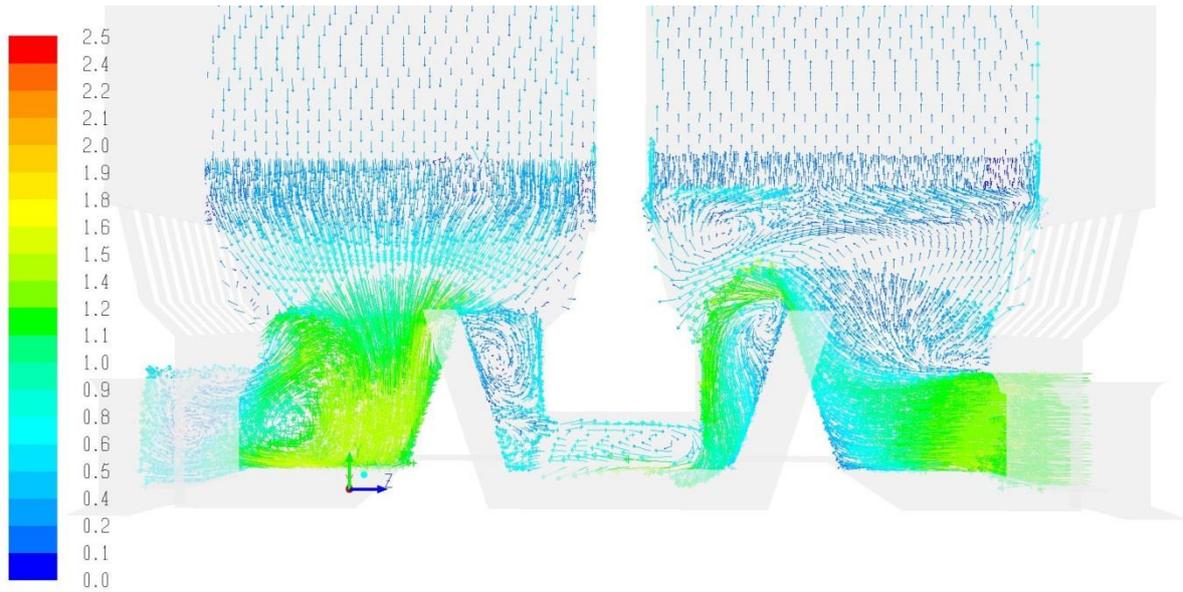


Abbildung 6-23: Vektor-Plot (Schnitt 1) des Strömungsgeschwindigkeit in m/s

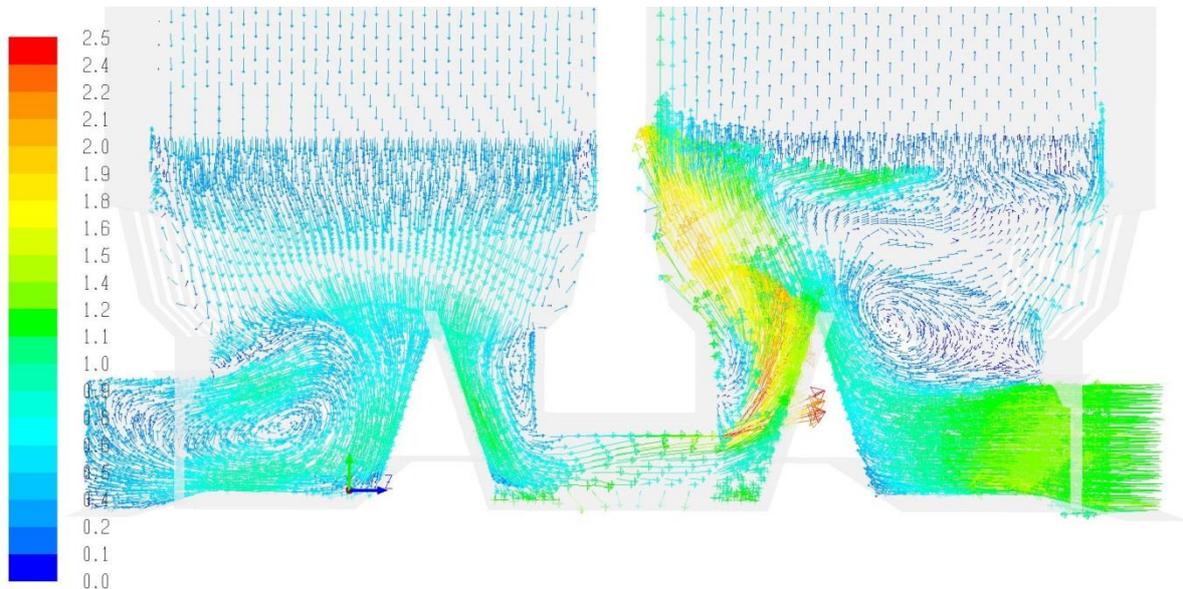


Abbildung 6-24: Vektor-Plot (Schnitt 2) der Strömungsgeschwindigkeit in m/s

In **Abbildung 6-23** und **6-24** sind die Strömungsprofile auf den beiden Auswerteebenen dargestellt, und es ist anhand der Farben und Vektoren zu erkennen, dass der Teil des Abgases, welcher rezirkuliert werden soll, nicht gleichmäßig über die gesamte Breite abgezweigt wird, sondern mehr im vorderen Bereich des Schnittes 2 (**Abbildung 6-24**). Diese Beobachtung lässt sich durch den Aufbau des Regeneratorbodens mit seinem rückwärtigen Abgasabgang erklären. Denn in der Nähe des Abgangs wird durch dessen im hinteren Bereich stärkeren Saugeffekt das Abgas dorthin umgelenkt (**Abbildung 6-23**, linke Hälfte). Im vorderen Bereich ist der Einfluss wesentlich geringer und die von oben nach unten kommende Abgasströmung wird relativ sauber aufgeteilt (**Abbildung 6-24**, linke Hälfte). Dadurch ergeben sich auch die Strömungsverhältnisse im Verbindungskanal und im Teil, wo das zu rezirkulierende Abgas auf der Frischluftseite aufsteigt (**Abbildung 6-23** und **6-24**, rechte Hälfte).

Ebenso spiegeln die **Abbildungen 6-25** und **6-26** das gewünschte Ergebnis wieder. Ein Teil des noch heißen Abgasstromes wird abgespalten, umgelenkt und der Frischluftseite zugeführt (**Abbildung 6-25**). Der seitlich zugeführte kühle Frischluftstrom strömt aber nicht auf die Abgasseite (**Abbildung 6-26**). Dieser zirkuliert zum Teil im Verbindungskanal und wird dann aber wieder mit dem heißen Abgasstrom zurück auf die Vorwärmseite genommen.

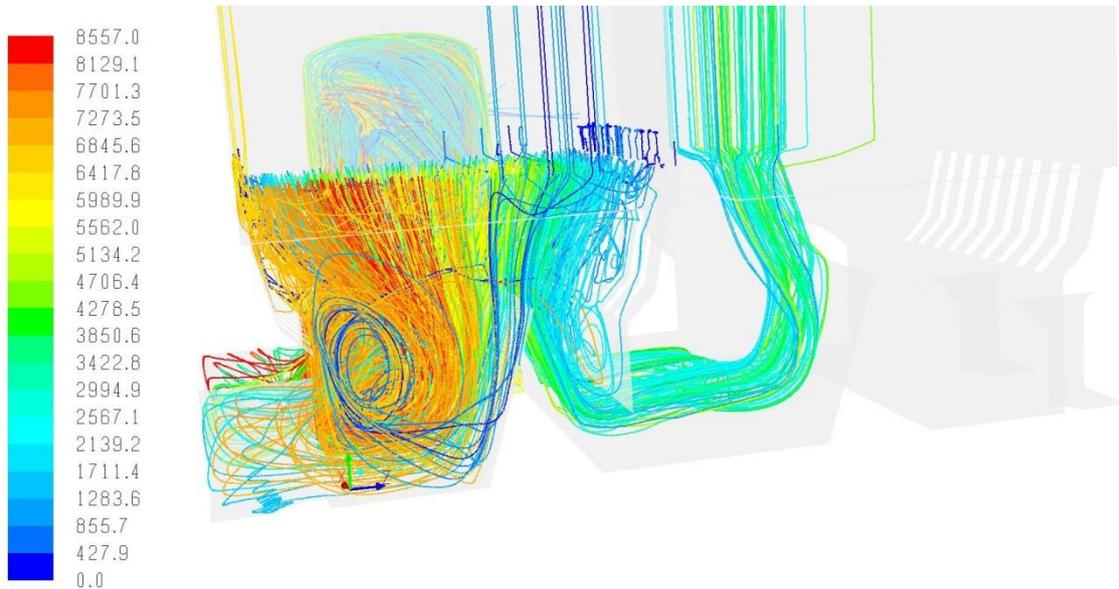


Abbildung 6-25: Strömungslinien des heißen Abgasstromes

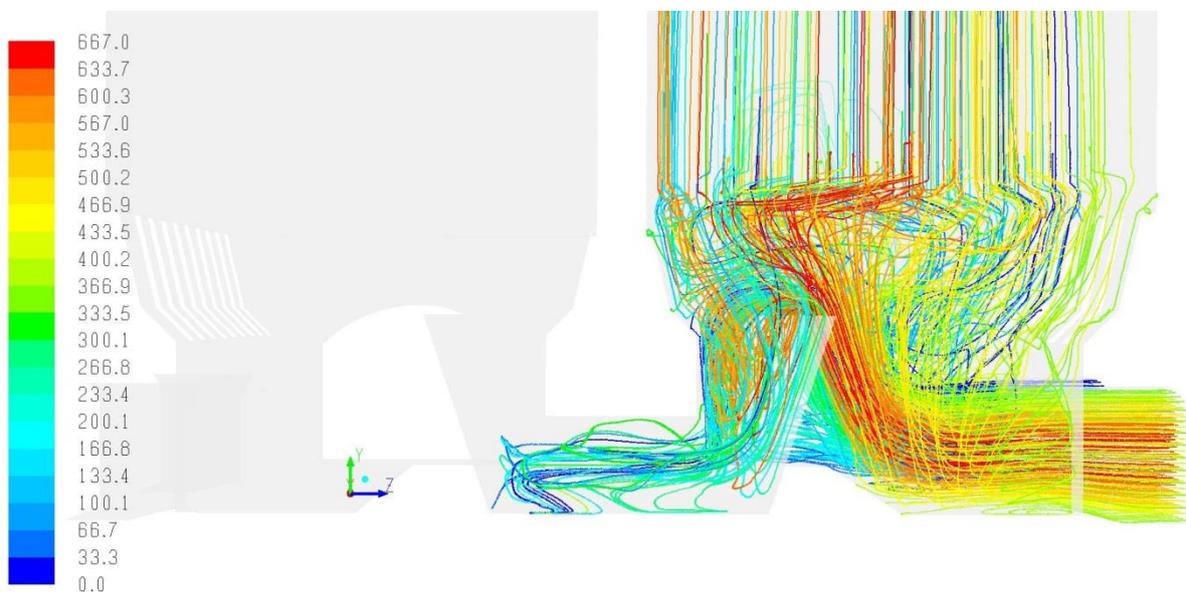


Abbildung 6-26: Strömungslinien des kühlen Frischluftstromes

Mit diesem Konzept konnte der gewünschte Effekt einer externen passiven Abgasrezirkulation erreicht werden. Mit der hier untersuchten Geometrie konnte circa 11 % des Abgasstromes in bzw. zu dem Frischluftstrom umgelenkt werden.

Mit Anpassung von Geometrieparametern wie z. B. der Höhe des Verbindungskanals oder der Dreiecksgestaltung der Einbauten, wie z. B. Winkeländerungen, kann diese Menge beeinflusst werden. Möglichkeiten der Umsetzung durch zusätzliche Schieber, welche die umzuleitende Menge Abgas beeinflussen können, wurden in diesem Projekt nicht weiter untersucht, da gezeigt wurde, dass es prinzipiell möglich ist einen Abgasstrom ohne aktive Einbauten umzuleiten und jeder Fall für sich einzeln betrachtet werden muss.

Auf Grund dieses sehr positiven Ergebnisses kamen dann weitere Fragen des PbA auf. Diese werden kurz und in einer Aufzählung gelistet, bleiben aber im Rahmen dieses Projektes unbeantwortet.

- Wie lässt sich zum Beispiel die sichere gute Vermischung der beiden Fluidströme realisieren, so dass eine gleichmäßige Auslastung des Steinbesatzes gewährleistet ist?
- Was bedeutet es für die Druckverteilung im Regenerator?
- Wie könnte man das Konzept so ändern, dass es sich den jeweiligen Produktionsprozessen anpassen lässt ohne Einbauten austauschen zu müssen?

6.3.2 Abgasrückführung mit Hilfe von aktiven Einbauten

Die „einfachste“ Realisierung der Abgasrückführung ist der Einsatz eines Heißgasgebläses oder eines Heißgasventilators, wie er auch im Rahmen der Untersuchungen, die im Kapitel 5 beschrieben wurden, eingesetzt wurde. Diese Möglichkeit ist aber mit ständigen Betriebskosten verbunden, welche den Nutzen dieser Art der Abgasrezirkulation rechtfertigen müssen. Ein Vorteil ist auf jeden Fall die gute bzw. bessere Durchmischung der Frischluft und des zurückgeführten Abgasstromes, da dies in einen relativ kühlen Bereich des Regenerators stattfindet. Außerdem können durch den Einsatz eines Heißgasgebläses unterschiedliche Volumenströme umgeleitet und so eine weitere Regelmöglichkeit geschaffen werden. Zudem beeinflusst der längeren Weg bis zum Eintritt in den Steinbesatz des Regenerators, da den beiden Stoffströmen mehr Zeit für die Durchmischung zur Verfügung steht.

Eine skizzenhafte Darstellung, wie diese Realisierung mit einem Heissluftgebläse oder Ventilator aussehen könnte, ist in **Abbildung 6-27** wiedergegeben.

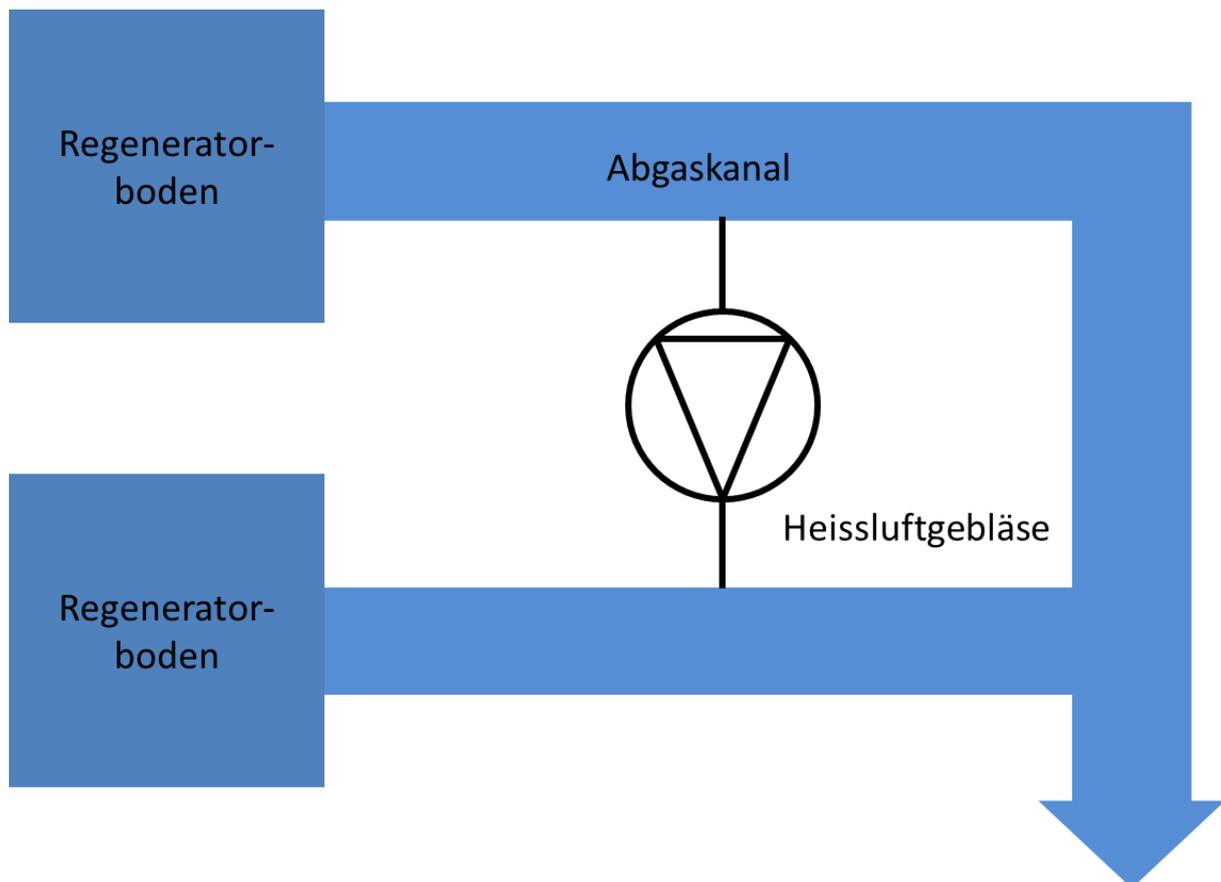


Abbildung 6-27: Skizze der Abgasrezirkulation durch ein Heissluftgebläse oder -ventilator

6.4 Ergebnisse der Gitterstudie eines Regeneratorturms (U-Flammenwanne)

Ergänzend und abschließend wurde eine Gitterstudie von einem Regeneratorturm einer U-Flammenwanne durchgeführt. Diese sollte Hinweise für spätere Simulationen dieser Art liefern mit der Aussage, ob eine vereinfachte und schnelle instationäre Simulation der Aufheizung bzw. Abkühlung eines Regeneratorturms durchführbar ist. Zudem sollte diese auch zeigen, dass der Druckverlust bei geringerer Zellzahl im Strömungsbereich korrekt durch das Simulationsmodell wiedergeben konnte.

Dafür wurden drei Berechnungsgitter erstellt, welche sich in der zu berechnenden Zellzahl und damit auch in der Größe des einzelnen Berechnungselementes unterscheiden. Die Größe der 3 Berechnungsgitter lag bei 5.800.000 Zellen, 2.100.000 Zellen und 550.000 Zellen.

Die wichtigste Aussage zu den Ergebnissen der Gitterstudie ist, dass das Modell mit der geringsten Zellzahl ähnliche Ergebnisse vorhersagt, wie das Modell mit der größten Zellzahl.

Beleg dafür ist der sehr ähnliche Verlauf der Temperaturen bei der stationären Durchströmung eines Regeneratorturms mit heißem Abgas, welcher in der folgenden **Abbildung 6-28** dargestellt ist.

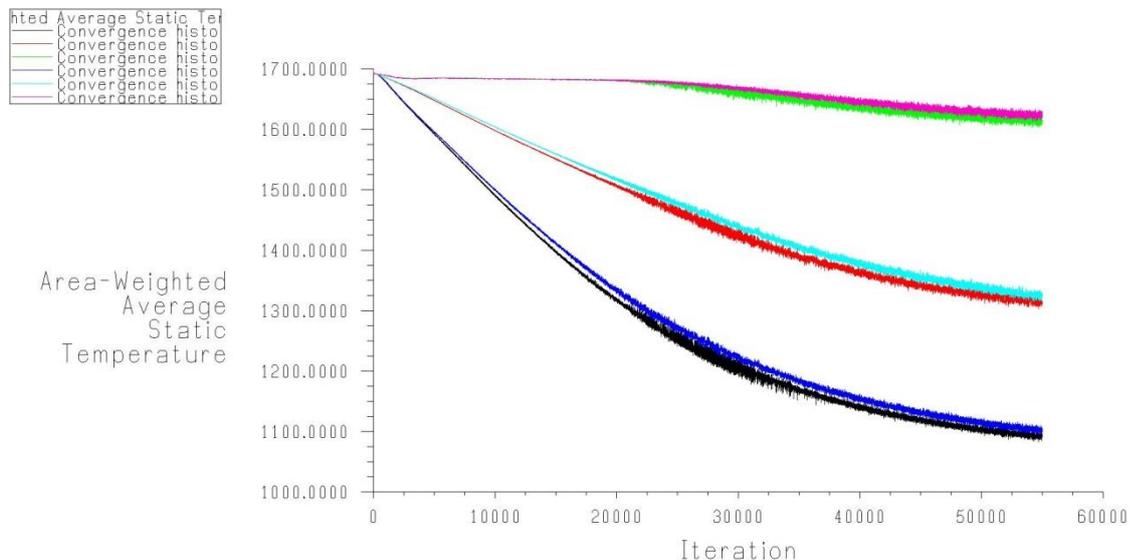


Abbildung 6-28: Temperaturverlauf stationäre Aufheizung auf Querschnittsflächen durch den Regeneratorturm (Oben, Mitte und Unten des Steinbesatzes)

Abbildung 6-29 zeigt exemplarisch die Temperaturverteilung im Regeneratorturm bei den stationären Simulationen der Gitterstudie, welche sich auf Grund der vorher beschriebenen Ergebnisse nicht wesentlich unterscheiden.

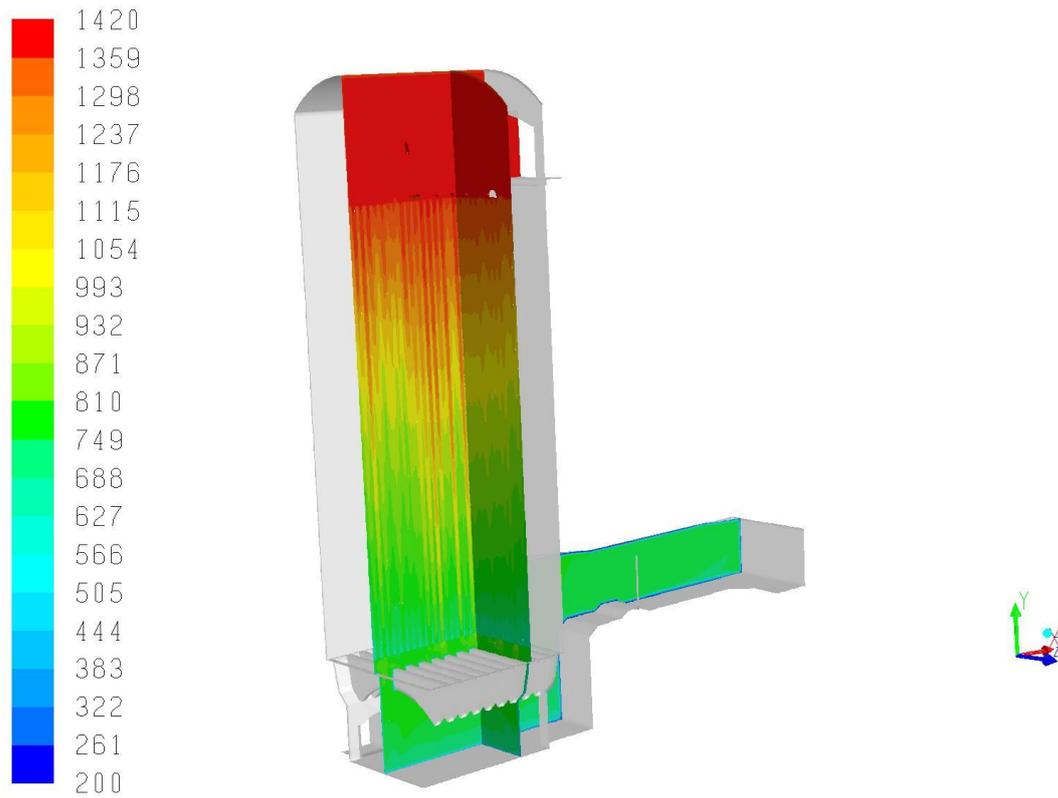


Abbildung 6-29: Temperaturverteilung einer Aufheizperiode in zwei Schnittflächen durch den Regeneratorturm mit Steinbesatzgeometrie

Auch die Vorhersage des Druckverlustes ist durch die Verringerung der Zellzahl zur Abbildung des Steinbesatzes und des umgebenden Strömungsraums nicht wirklich beeinflusst. Die Druckverluste liegen bei allen drei Simulationen im ungefähr gleichen Wertebereich mit einer maximalen Differenz von ca. 1 Pascal.

6.5 Verbrennungsluft-- und Abgaszusammensetzungen

In **Tabelle 6-2** ist die Zusammensetzung der Verbrennungsluft einmal ohne Abgasbeimischung und einmal mit Einmischung von 20 % Abgas in den Frischluftstrom aufgeführt. Die entsprechende Abgaszusammensetzung orientiert sich an einer vollständigen Verbrennung mit einer Luftzahl von 1,1 (U-Flammenwanne) bzw. 1,05 (Querbrennerwanne) und ist in **Tabelle 6-1** wiedergegeben.

Tabelle 6-1 : Rechnerische Abgaszusammensetzung bei vollständiger Verbrennung

Rechnerische Abgaszusammensetzung			
U-Flammenwanne für $\lambda=1,1$		Querbrennerwanne für $\lambda=1,05$	
Komponente	Vol.-%	Komponente	Vol.-%
O ₂	1,7267	O ₂	0,9075
N ₂	70,9238	N ₂	70,6192
CO ₂	8,7209	CO ₂	9,1435
H ₂ O	18,6284	H ₂ O	19,3298

Tabelle 6-2: Verbrennungsluftzusammensetzung

	Beide Wannen	U-Flammenwanne	Querbrennerwanne
	Luft	Luft + 20% Abgas	Luft + 20% Abgas
O ₂	21	17,5	17,62
N ₂	77,7	77,75	76,75
CO ₂	0	1,58	1,51
H ₂ O	1,3	3,17	4,12

Durch die Rezirkulation von Abgas sinkt der Sauerstoffanteil in der Verbrennungsluft auf bis zu 17,5 bzw. 17,65 Vol.-% bei einer Zumischrate von 20 % des jeweiligen Abgases. Der Anteil der zugemischten Abgasmenge bezieht sich auf die eingebrachte Luftmenge. In den Simulationen der U-Flammen- und Querbrennerwanne ohne Einbindung der Regeneratoren wird von einer vollständigen idealen Vermischung von Abgas und Luft und einer konstanten Luftvorwärmung von ca. 1400 °C ausgegangen, welche als Randbedingung den Simulationen aufgeprägt wird. Bei den Simulationen der Querbrennerwanne mit Regeneratoren und Frischluft- bzw. Abgaskanal stellt sich eine Temperaturverteilung der Luftvorwärmung orts aufgelöst automatisch ein.

6.6 Ergebnisse der Simulationen der U-Flammenwanne ohne Regeneratoren (Ausgangszustand und mit 20 Prozent Abgasbeimischung)

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der Simulationen der U-Flammenwanne ohne Einbindung der Regeneratoren dargestellt und jeweils kurz erläutert.

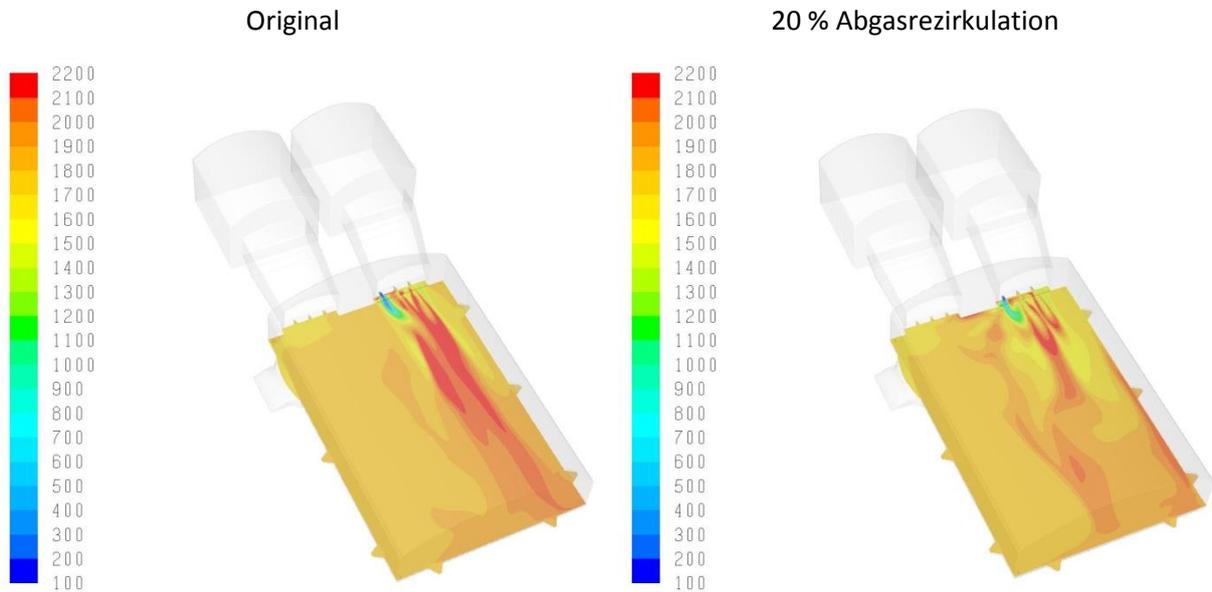


Abbildung 6-30: Temperaturverteilung auf der horizontalen Brennerebene in Grad Celsius

In **Abbildung 6-30** ist zu erkennen, dass durch die externe Abgasrezirkulation die Bereiche höherer Temperaturen im Brennraum verkleinert werden und sich somit das gesamte Temperaturfeld allgemein homogenisiert.

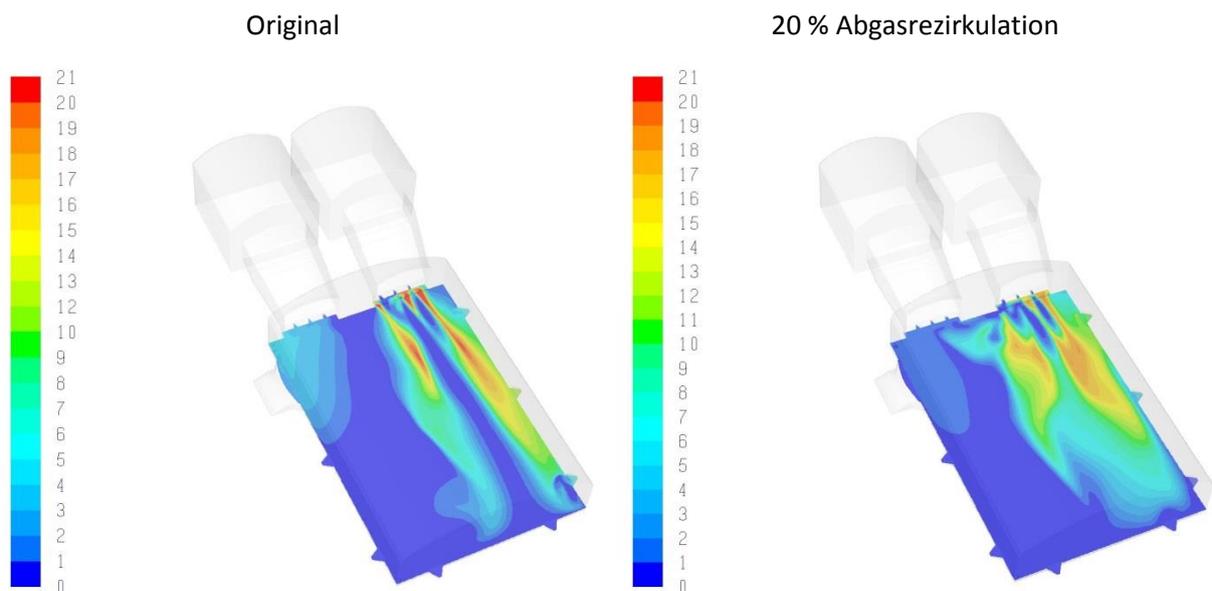


Abbildung 6-31: O₂-Konzentrationsverteilung (trocken) auf der horizontalen Brennerebene in Vol.-%

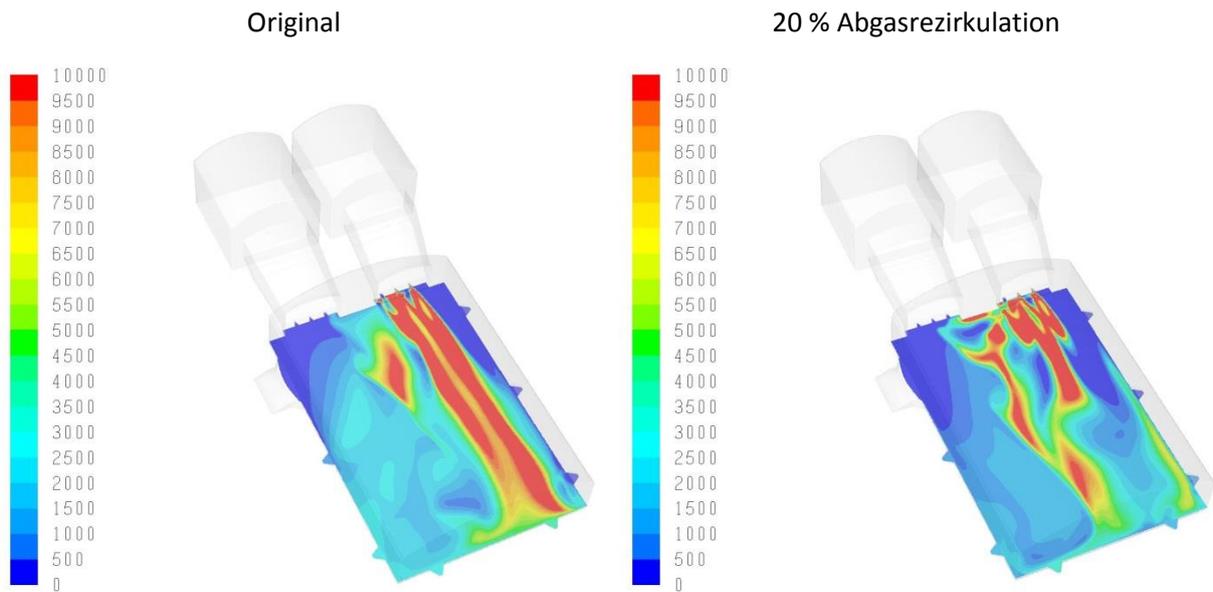


Abbildung 6-32: CO-Konzentrationsverteilung (trocken) auf der horizontalen Brennerebene in ppm

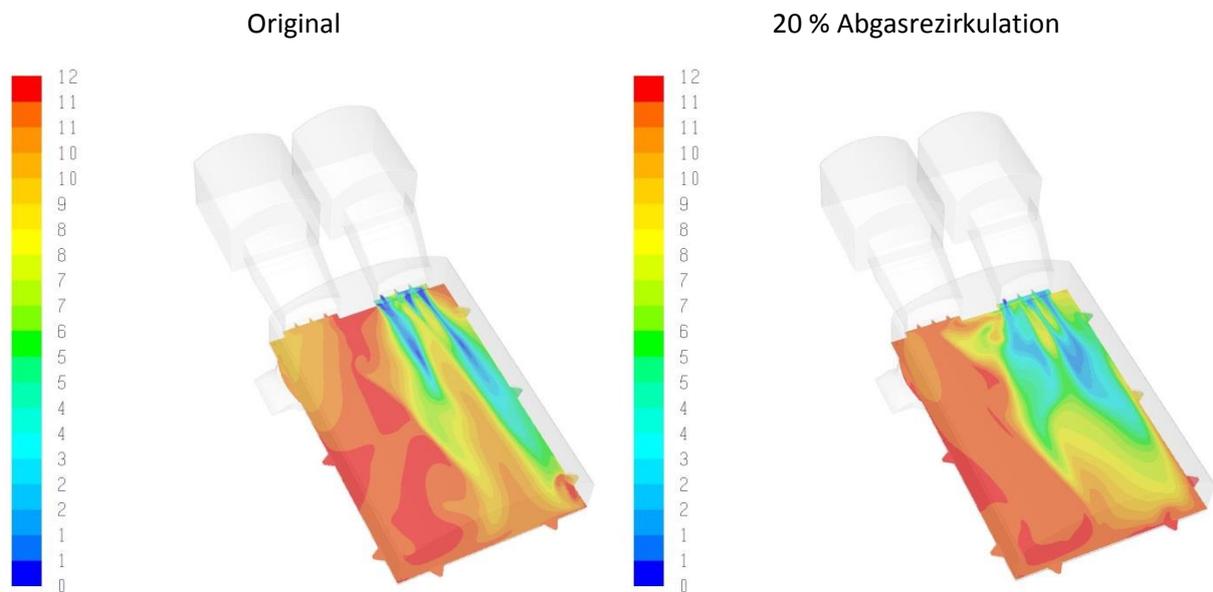


Abbildung 6-33: CO₂-Konzentrationsverteilung (trocken) auf der horizontalen Brennerebene in Vol.-%

Abbildungen 6-31 bis 6-33 gibt die Verteilung der O₂-, CO- und CO₂-Konzentration wieder, welche verdeutlichen, dass die externe Abgasrezirkulation zu einem Verschmieren der jeweiligen Konzentration führt, welches das Ziel der Verdünnten Verbrennung ist. Ebenso wird dies durch die **Abbildung 6-34** unterstützt, welche eine Isofläche der CO-Konzentration (Türkis) bei 6000 ppm trocken wiedergibt und kann als ein Indiz für die Flammenform hinzugezogen werden. All dies spricht für eine gute Umsetzung der externen Abgasrezirkulation in den Simulationsmodellen.



Abbildung 6-34: CO-Isosfläche (6000 ppm trocken) im Originalzustand ohne Abgasrezirkulation

Zusätzlich werden zur Beurteilung der Stabilität und Qualität der Glaswannen oft die Geschwindigkeit über dem Glasbad sowie die Wärmeverteilung bzw. die Temperaturen auf dem Glasbad als weitere wichtige Anzeiger herangezogen.

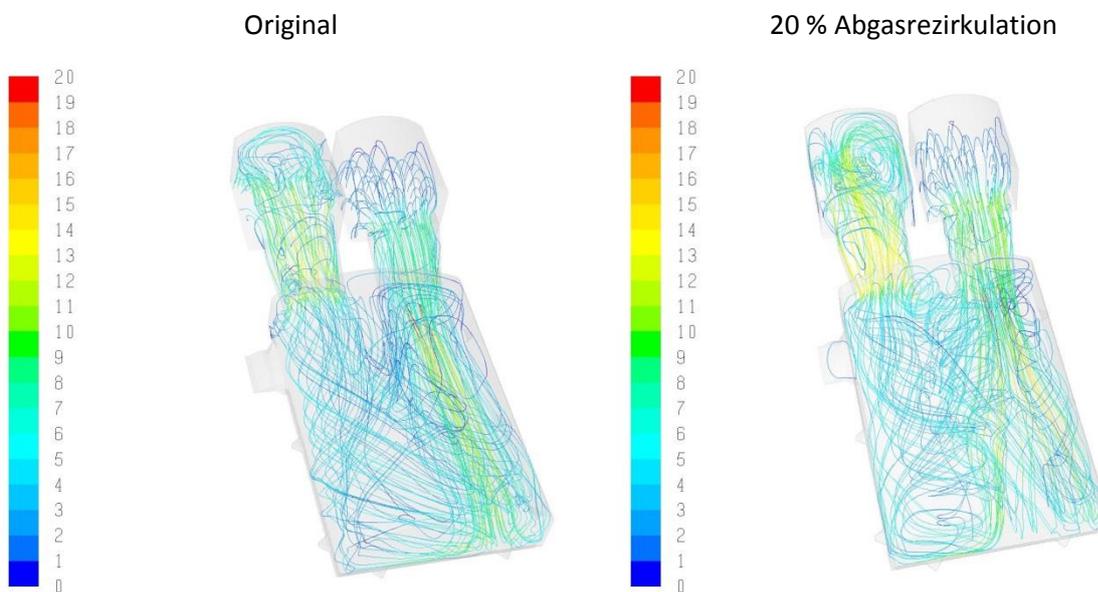


Abbildung 6-35: Strömungslinien der eintretenden Luft eingefärbt mit der Geschwindigkeit in m/s

In **Abbildung 6-35** sind die Stromlinien der Verbrennungsluft aus dem Regenerator eingefärbt mit der Geschwindigkeit zu sehen. An Hand der Stromlinien kann man einen guten Eindruck über die Strömungsverhältnisse in der Glasschmelzwanne bzw. in die eventuell eintretenden Veränderungen durch die Zugabe von Abgas. Das generelle Strömungsverhalten innerhalb der Glasschmelzwanne verändert sich kaum. Die Geschwindigkeit der in die Glas-

schmelzwanne eintretenden Verbrennungsluft bzw. des austretenden Abgases nimmt bei der 20 %-igen Abgasrezirkulation etwas zu, da dort der Massenstrom der Verbrennungsluft erhöht ist und dieser durch denselben Querschnitt in die Wanne ein bzw. austreten muss. Dies führt unter anderem dazu, dass die Rezirkulation im Gewölbe der Wanne verstärkt wird, was den Effekt der Verdünnten Verbrennung begünstigt.

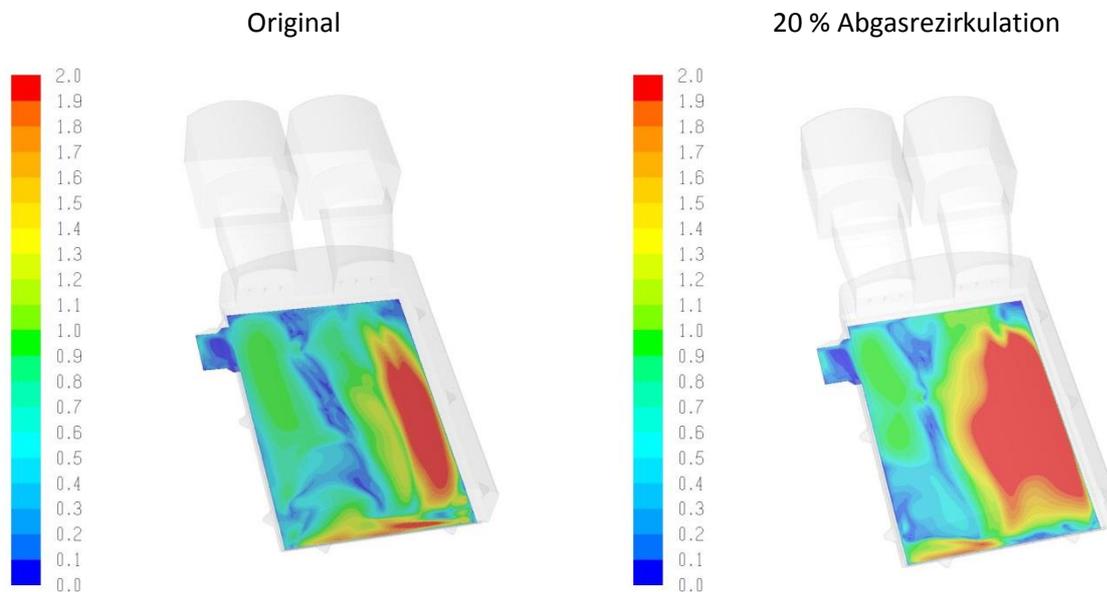


Abbildung 6-36: Geschwindigkeitsverteilung 5 mm über der Glasbadoberfläche in m/s

Die Geschwindigkeitsverteilung in **Abbildung 6-36** unmittelbar über dem Glasbad macht eine Aussage darüber, ob eventuell mehr Staub vom Einleger durch die Abgasrezirkulation aufgewirbelt wird. Dies ist aber nicht der Fall, da die Geschwindigkeit im Einlegebereich der Wanne in beiden Fällen im gleichen Bereich liegt und kein zusätzlicher Staubaustrag des Gemenges zu erwarten ist.

In den **Abbildungen 6-37 und 6-38** sind die Temperaturverteilung auf und der Wärmeeintrag in das Glasbad dargestellt. Auch hier ist die Homogenisierung der Temperaturverteilung durch die externe Abgasrückführung zu erkennen und dass gleichzeitig das Gebiet mit den höchsten Temperaturen um 30 bis 40 °C abgemildert wird, was positiv für die thermische NO_x-Bildung ist.

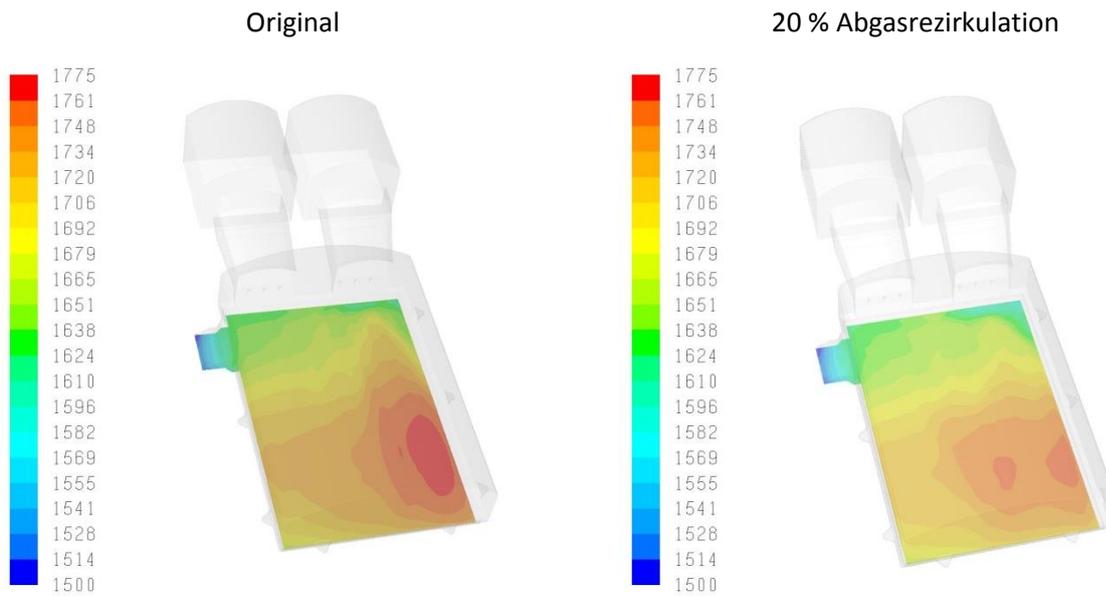


Abbildung 6-37: Temperaturverteilung auf der Glasbadoberfläche in °C

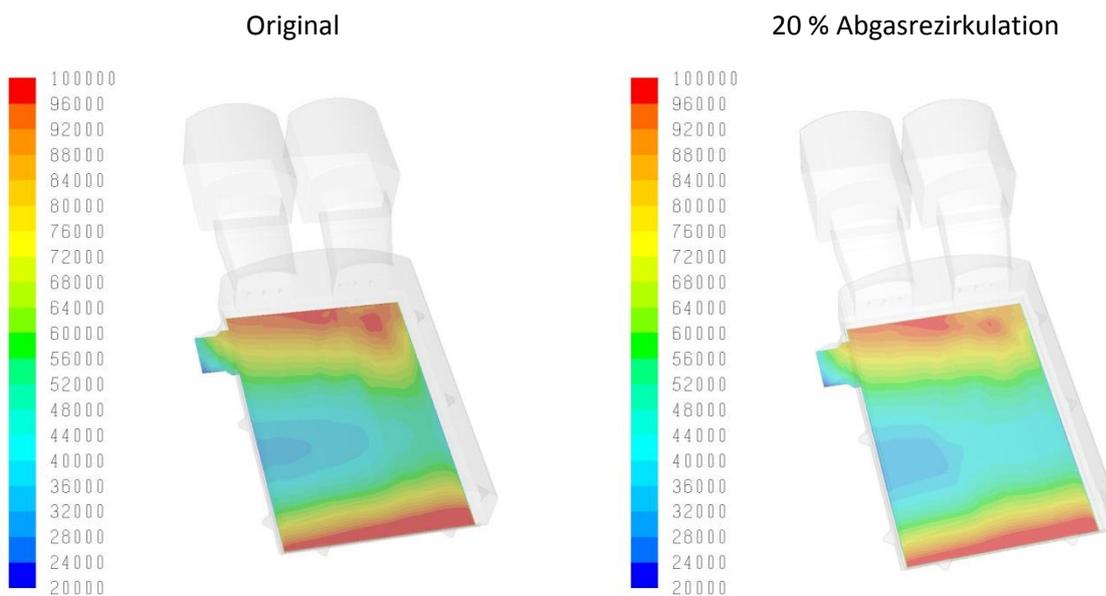


Abbildung 6-38: Gesamtwärmestromverteilung auf der Glasbadoberfläche in W/m²

Es spricht also vieles für die im Vorgängerprojekt gemachten Aussagen einer guten NO_x-Reduzierung durch die externe Abgasrückführung von mindestens 15 bis 20 % der gesamten Abgasmenge. Doch dies ist in den neuen Simulationen nicht so einfach darzustellen, wie vorher gedacht. Gründe dafür werden im nächsten Unterkapitel näher erläutert.

6.6.1 NO_x-Problematik und möglicher Lösungsansatz

Für die weitere Erklärung bezüglich der Problematik mit den NO_x-Simulationen wird in **Abbildung 6-39** die Position der in den Simulationen beobachteten Auswertefläche dargestellt. Auf der in lila/pink eingefärbten Fläche wurden während der gesamten Simulationsdauer die flächengemittelten Werte der Temperatur, O₂, CO und CO₂ mitgeschrieben. Diese werden im weiteren als sogenannte DOAPs (Design Or Assessment Parameter) bezeichnet.

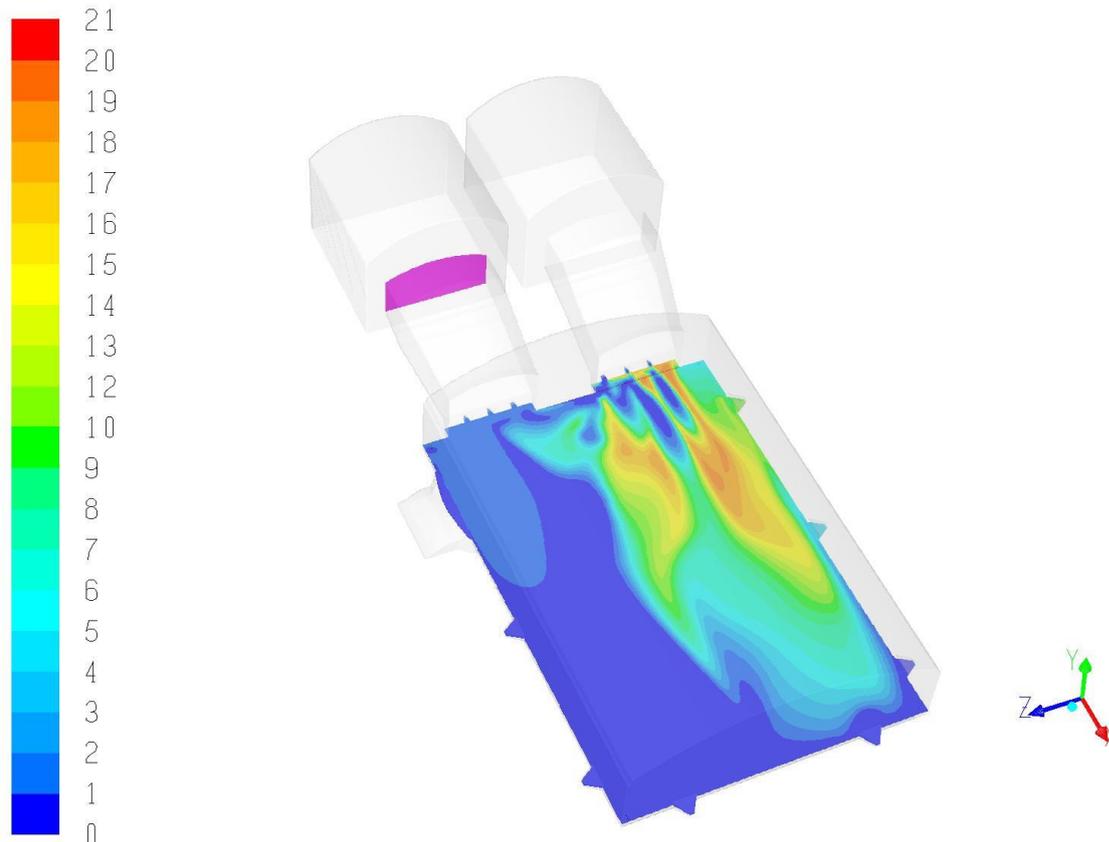
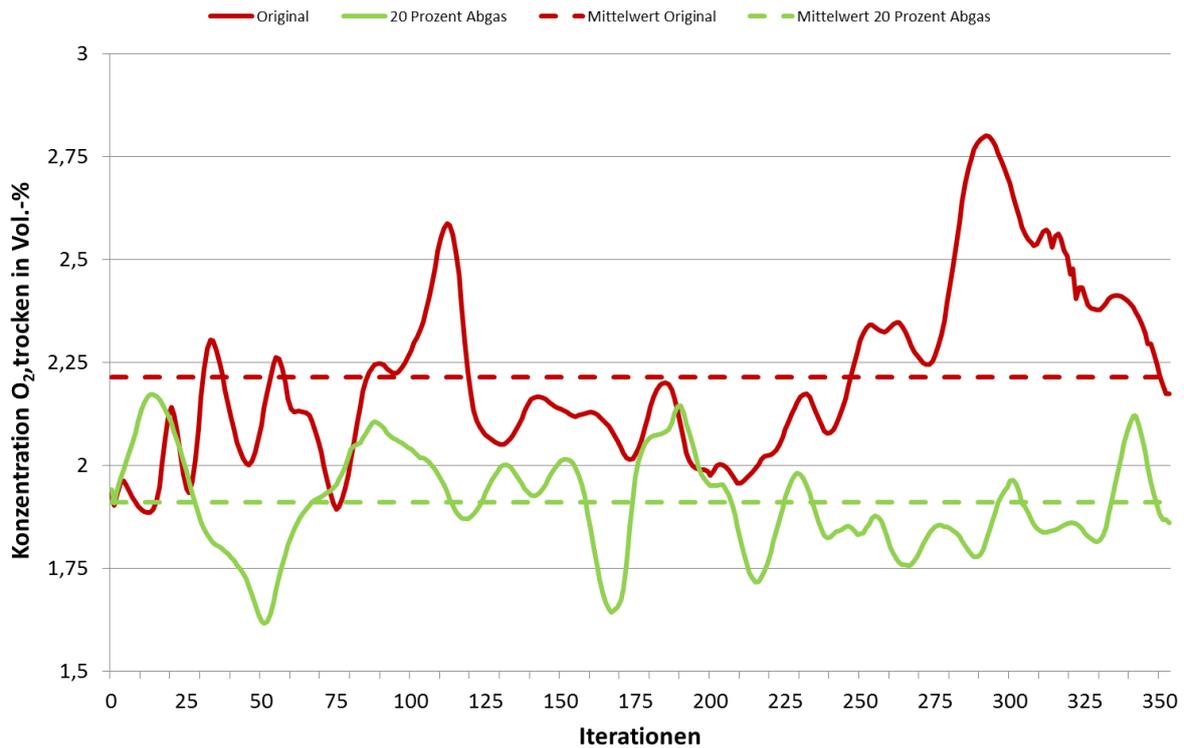


Abbildung 6-39: Position der Auswerteebene (Lila/Pink) für die DOAPs

In **Abbildung 6-40** ist beispielhaft der Iterationsverlauf des flächengemittelten DAOPs der Auswertefläche von O_{2,trocken} für die beiden ausgewählten Simulationen (Ohne und mit 20 % Abgasrezirkulation) dargestellt. Dieser stark über den Iterationsverlauf schwankende Verlauf ist bei allen auf der Auswertefläche beobachteten DOAPs der Simulationen zu erkennen. Normalerweise sollte der Verlauf eines beobachteten DOAPs auf einen stationären sich nicht mehr über den Iterationsverlauf veränderten Wert hinführen, so dass angenommen werden kann, dass ein quasistationärer Zustand der Simulation erreicht ist. Nur ist bei den in diesem Projekt durchgeführten Simulationen der U-Flammenwanne kein solcher Verlauf zu erkennen bzw. zu erreichen.

Abbildung 6-40: Verlauf des Wertes von O_{2,trocken}

Die schwankenden Werte weisen auf Instationaritäten der eigentlich stationär durchgeführten Simulationen hin. Die naheliegende Erklärung dafür besteht aus drei wesentlichen Faktoren. Ein Einflussfaktor ist die Art und Form der Flamme, welche in der Realität wie auch in den Simulationen weich und wabernd ist. Dies ist von den Glasschmelzwannenbetreibern wegen der guten Strahlungsübertragung auch so gewünscht. Der zweite Punkt ist die Gittergröße bzw. die Auflösung des Gitters, da das in diesem Projekt verwendete Gitter, verglichen mit dem aus dem Vorgängerprojekt, fast doppelt so groß ist und damit eine bessere Auflösung ermöglicht. Nur führt dieses in Kombination mit dem dritten Faktor, den in den jetzt durchgeführten Simulationen benutzten und in den letzten Jahren stark verbesserten Algorithmen höherer Ordnung, zu den schwankenden Werten der DOAPs. Und daraus ergibt sich die Problematik für die Simulationsberechnung der NO_x-Werte.

Da die Berechnung der NO_x-Simulationen jeweils auf einem Zustand der Simulation basieren, also sozusagen den gerade jetzt aktuellen Zustand abbilden, verändern sich die Ergebnisse der NO_x-Berechnung je nach Startbedingung der Simulation.

Die über den Iterationsverlauf gemittelten Werte (z. B. von Sauerstoff, trocken) repräsentieren wiederum gut den erwarteten Wert aus der Berechnung einer vollständigen Verbrennung (siehe **Abbildung 6-40** und **Tabelle 6-3**).

Tabelle 6-3: Werte des Volumenanteils von Sauerstoff, trocken im Abgas

		Sollwert vollst. Verbrennung	Mittelwert Simulation
O _{2,trocken} in Vol.-%	Original ohne Abgasrückführung	2,20	2,21
	Mit 20 % Abgasrückführung	1,91	1,91

Die Ergebnisse der NO_x-Simulationsberechnungen der U-Flammenwanne können daher keinen so eindeutigen Aussagen machen, wie im Vorgängerprojekt „Verdünnte Verbrennung“. Die NO_x-Werte der Simulation mit der 20 %-igen Abgasrezirkulation liegen im Vergleich zu denen mit der Originaleinstellung nur unwesentlich niedriger. Wobei wie auch schon vorher erwähnt dies vom Startpunkt und den dort vorherrschenden Bedingungen der Berechnung abhängt und variiert. Zur Veranschaulichung dieser Aussage sind die Ergebnisse von 3 NO_x-Simulationsberechnungen des Originalzustandes mit 2 Werten der NO_x-Simulation mit 20 %-Abgasrückführung angeführt. Die Werte wurden jeweils der Auswerteebene entnommen und sind in **Tabelle 6-4** dargestellt.

Tabelle 6-4: Vergleich NO-Werte der Simulationen

	Original 1	Original 2	Original 3	20% Abgas 1	20% Abgas 2
NO in ppm	3330	3119	3672	3129	3269

Ein möglicher, aber noch nicht begangener Lösungsweg wäre, dass man immer nach einem gewissen Iterationsintervall in den Simulationen bestimmte Felder abspeichert, welche für die NO_x-Simulation unabdingbar sind und diese dann z. B. mit Excel mittelt. Explizit wären es das Temperaturfeld, das Geschwindigkeitsfeld, das Dichtefeld und die räumliche Speziesverteilung. Diese gemittelten Felder würden dann in die Simulation eingelesen und auf diesen Bedingungen eine NO_x-Berechnung durchgeführt. Dies könnte dann unter den neuen Bedingungen (verbesserte Algorithmen und höhere Rechenleistung) ein guter Ausgangspunkt sein, um die Simulationen (inklusive NO_x) mit und ohne externe Abgasrezirkulation miteinander zu vergleichen.

Leider ließen sich auch keine Ergebnisse der experimentellen Messungen (**Kapitel 5.4**) zum Vergleich heranziehen, da der Heizgasventilator bei den Versuchen nicht die benötigte Leistung erbringen bzw. den benötigten Volumenstrom umwälzen konnte. Dies bleibt ein Punkt zum untersuchen.

6.7 Simulation der U-Flammenwanne inkl. Regeneratoren

Es wurden keine Simulationen der U-Flammenwanne mit Einbindung der Regeneratoren erstellt und durchgeführt, da die Geometrie der neu aufgebauten Wanne (welche in diesen Projekt vermessen wurde) inklusive deren Regeneratoren nicht rechtzeitig von den Industriepartnern zur Verfügung gestellt werden konnte, um ein Simulationsmodell bzw. eine Simulation innerhalb des Zeitplanes des Projektes umzusetzen.

Es wurde daher, als dies im Projekt absehbar war, mehr Aufwand in den Aufbau des Simulationsmodell der Querbrennerwanne gesteckt, da die Geometrie bekannt war und die Umsetzung der externen Abgasrezirkulation definitiv nur durch eine Lösung mit einem Einbau eines aktiven Aggregates möglich zu sein scheint. Grund dafür ist, dass bei den regenerativ betriebenen Querbrennerwannen die Verbrennungsluft meistens durch ein großes Gebläse unterhalb der Wanne angesaugt und in die Luftzuführungskanäle eingeleitet wird, so dass es relativ einfach umzusetzen ist, einen Teil des relativ kühlen Abgases aus dem Abgaskanal abzu ziehen und durch das Gebläse mit in die Luftzuführung einzuspeisen.

Die in den nachfolgenden Unterkapiteln aufgeführten Ergebnisse der Querbrennerwannensimulation werden grundlegend veranschaulichen, dass es möglich ist so große komplexe Systeme der Glasschmelzindustrie mit Hilfe der numerischen Strömungssimulationen abzubilden und Untersuchungen wie den Einfluss der externen Abgasrezirkulation durchzuführen.

6.8 Ergebnisse der Simulation der Querbrennerwanne im Ausgangszustand ohne Regeneratoren

Parallel zu den Simulationen mit der U-Flammenwanne wurde mit dem Aufbau eines Simulationsmodells für eine Querbrennerwanne begonnen. Zuerst wurde nur der obere Bereich der Querbrennerwanne simuliert, welcher die Melter- und Refiner-Area sowie den Teil der Regeneratoren oberhalb der Steinbesatzung enthält. In **Abbildung 6-41** ist die Geometrie des oberen Teils der Querbrennerwanne dargestellt, welche für die ersten Simulationen herangezogen wurde.

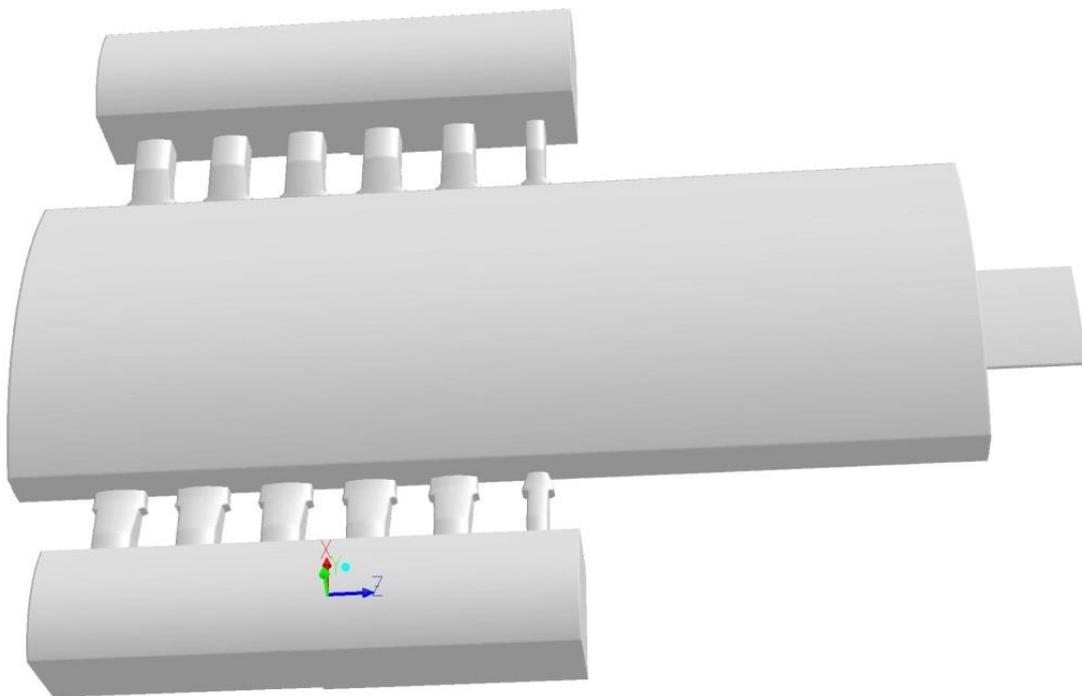


Abbildung 6-41: Geometrie der Querbrennerwanne (oberer Teil)

In den beiden folgenden **Abbildungen 6-42** und **6-43** werden die Zwischenergebnisse einer dieser Simulationen abgebildet. Dabei zeigt **Abbildung 6-42** den Temperaturverlauf bei der Feuerung von der linken Seite der Querbrennerwanne in Kelvin. **Abbildung 6-43** gibt die damit einhergehende Geschwindigkeitsverteilung in m/s wieder.

Nachdem die erste Simulation des oberen Teiles einer querbefeuerten Glasschmelzwanne durchgeführt worden war, wurde direkt mit der Erweiterung des Simulationsmodelles auf das gesamte System der Querbrennerwanne inklusive der Regeneratoren sowie der Luft- bzw. Abgasabführung begonnen. Die Verschiebung des Fokus der Simulationen auf die gesamte Querbrennerwanne wurde vorgenommen, da sich die Problematik der Beschaffung der neuen Geometrie der U-Flammenwanne im Projekt ergeben hatte (siehe **Kapitel 6.7**).

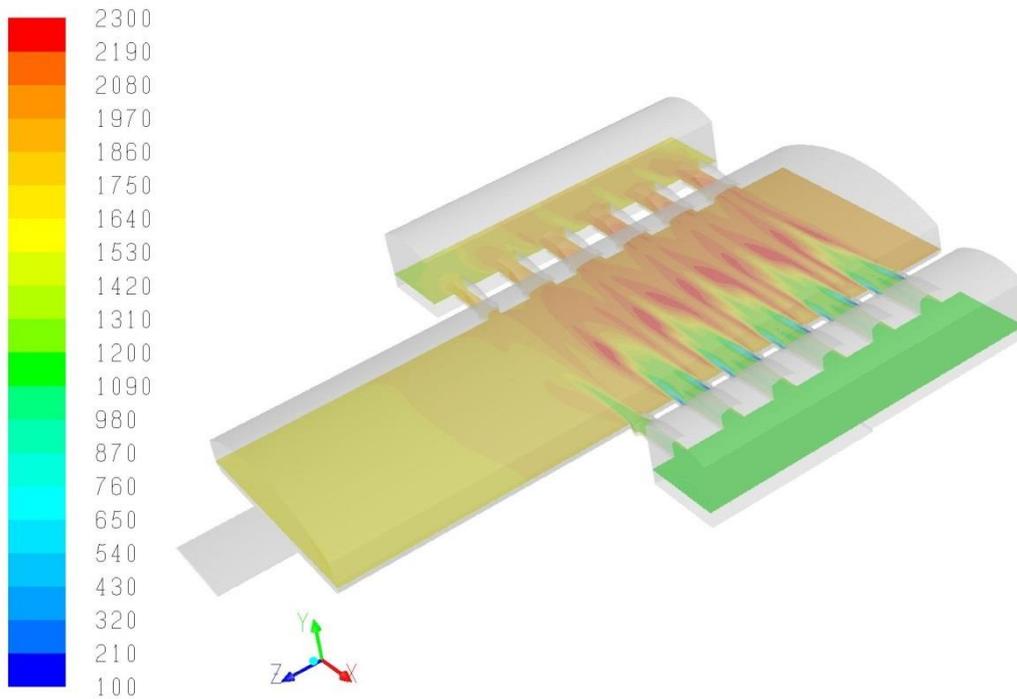


Abbildung 6-42: Temperaturverlauf durch den oberen Teil einer Querflammenwanne

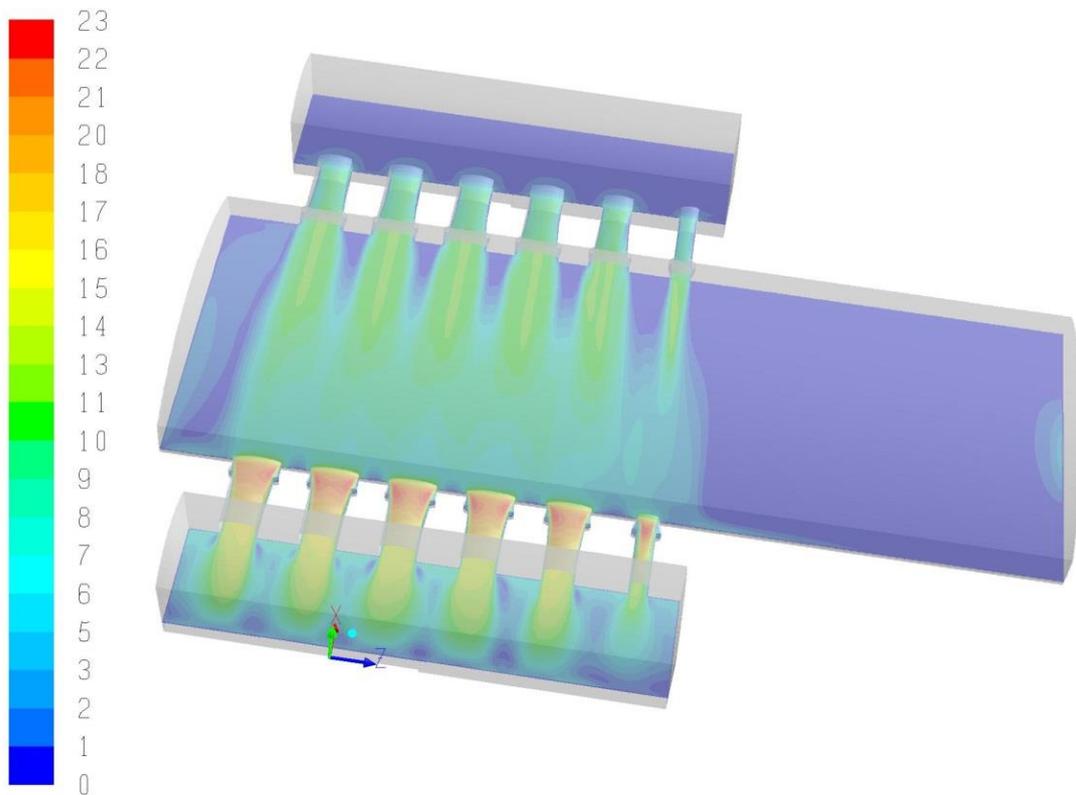


Abbildung 6-43: Geschwindigkeitsverteilung durch den oberen Teil einer Querflammenwanne

6.9 Ergebnisse der Simulationen der Querbrennerwanne inkl. Regeneratoren (Ausgangszustand und mit 20 Prozent Abgasbeimischung)

Auf Grund der in den vorherigen Unterkapiteln bereits erwähnten und beschriebenen Problematik der Geometrie der U-Flammenwanne wurde der Fokus im Projekt bei den Simulationen auf die Querbrennerwanne verschoben. Dafür wurde das Simulationsmodell der Querbrennerwanne auf das gesamte System erweitert. Dazu gehören die gesamten Regeneratoren, der Abgaskanal und die Frischluftzufuhr. Die Regeneratoren wurden hierbei jeweils durch das im Projekt angepasste Modell des porösen Mediums ersetzt, da eine reale Abbildung der Steingitterung bei der Größe des Simulationsmodells zurzeit unrealistische Rechenzeiten erfordern würde.

Das Simulationsmodell ermöglicht es die gesamte Komplexität der Strömung und Wärmeverteilung inklusive der Verbrennung innerhalb einer kompletten Querbrennerwanne detailliert abzubilden. Die hierfür erstellte Geometrie besteht in ihrer Vollständigkeit aus einem Berechnungsgitter von ca. 10 Millionen Zellen.

Dies ist eine Neuheit, da den Projektpartnern keine Veröffentlichung bekannt ist, in der das Gesamtsystem einer Querbrennerwanne inklusive aller Anbauten in einem numerischen Simulationsmodell abgebildet wurde.

Weiterhin ist damit die Möglichkeit gegeben, die Einspeisung des Abgases für die externe Abgasrezirkulation an verschiedenen Stellen in das Gesamtsystem anzuwenden. Dies bedeutet, dass eine Beimischung des Abgases sowohl im heißen, warmen oder kalten Bereich der Regeneratoren und des Abgaskanals möglich ist. Im nachfolgenden wird sich auf die Zumischung des Abgases in die Frischluftzuführung beschränkt. Dies stellt eine sehr einfache und schnell zu installierende Möglichkeit für viele Querbrennerwannen dar, da dort die Verteilung der Verbrennungsluft über ein Kanalsystem mit Hilfe eines großen Gebläses läuft. Hier könnte man vergleichsweise einfach das relative kühle Abgas (200°C – 300°C) aus dem Kamin absaugen, der Verbrennungsluft durch das Gebläse beimischen und durch die Kanalstruktur verteilen lassen.

Die aus den experimentellen Messungen an einer Floatanlage gewonnenen Daten (siehe Kapitel 5.1) können als Referenz für den Originalfall herangezogen werden.

Die **Abbildungen 6-44** und **6-45** zeigen die hierfür erzeugte Geometrie des Gesamtsystems der Querbrennerwanne. Die Auswerteflächen für die folgende Ergebnisdarstellung sind in den **Abbildungen 6-46** und **6-47** farblich wiedergegeben. Dabei sind in **Abbildung 6-46**, die in Grün und Lila dargestellten Auswerteebenen vertikale Schnitte durch die jeweiligen Regeneratoren, in Rot die Auswerteebene für die DOAPs, in Ocker ein vertikaler Schnitt durch den Brennraum und den Kamin, sowie in Hellblau ein horizontaler Schnitt durch die Brennerebene und in Lachsfarben ein horizontaler Schnitt durch den Abgaskanal. In **Abbildung 6-47** ist in Türkis die Auswerteebene oberhalb und in Violett unterhalb des Steinbesatzes abgezeichnet.

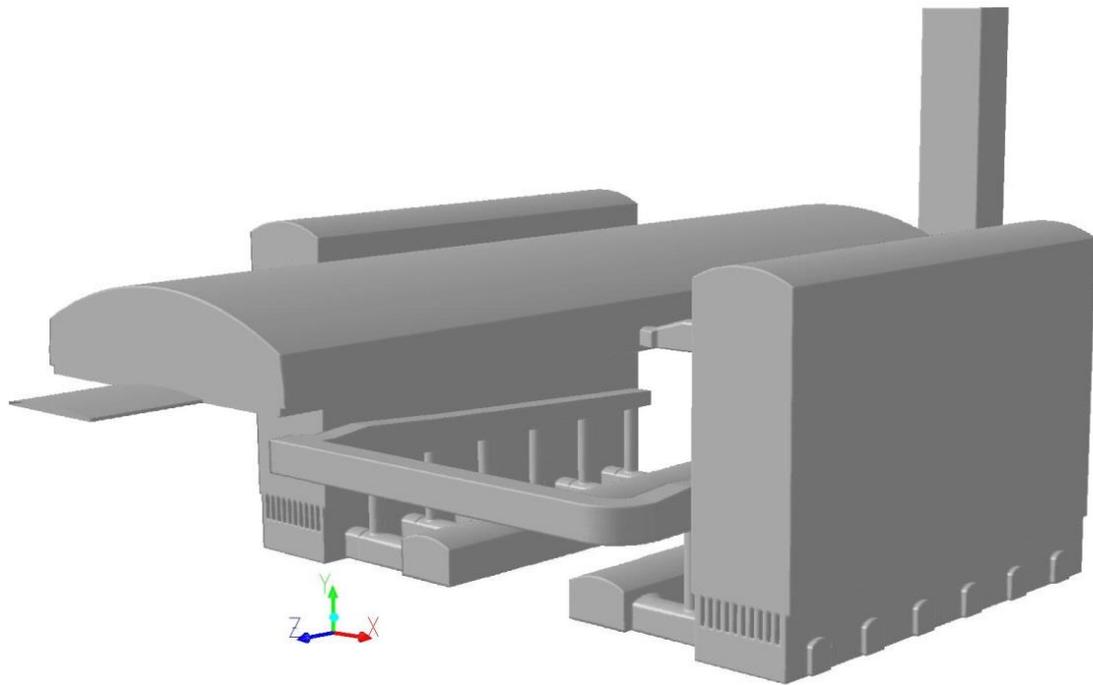


Abbildung 6-44: Geometrie der gesamten Querbrennerwanne – Ansicht 1

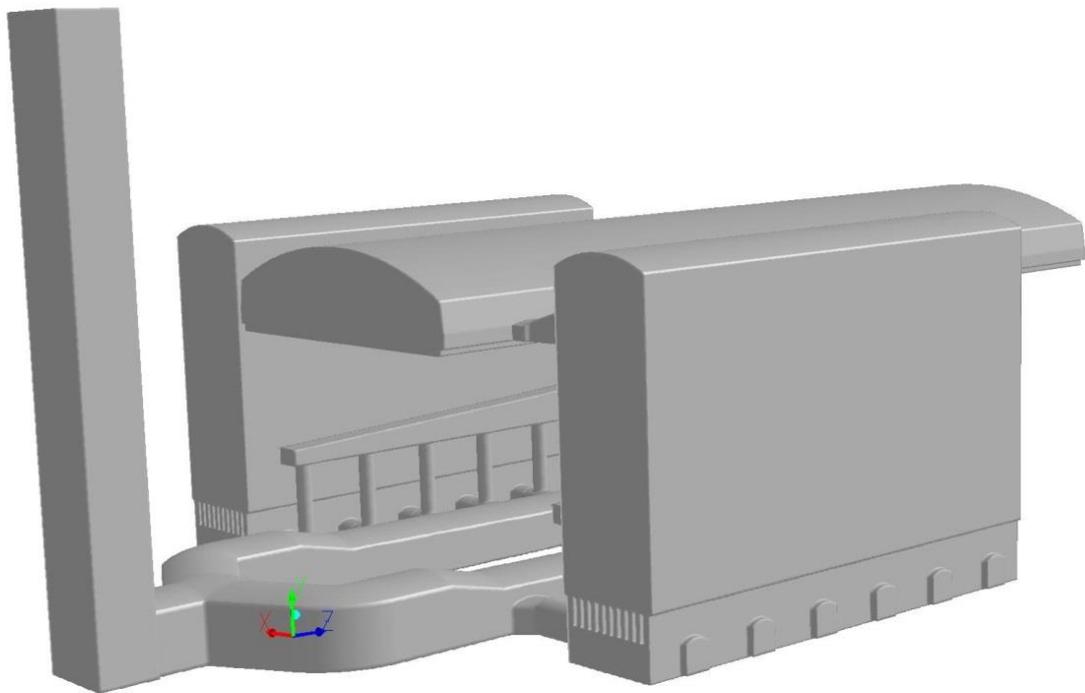


Abbildung 6-45: Geometrie der gesamten Querbrennerwanne – Ansicht 2

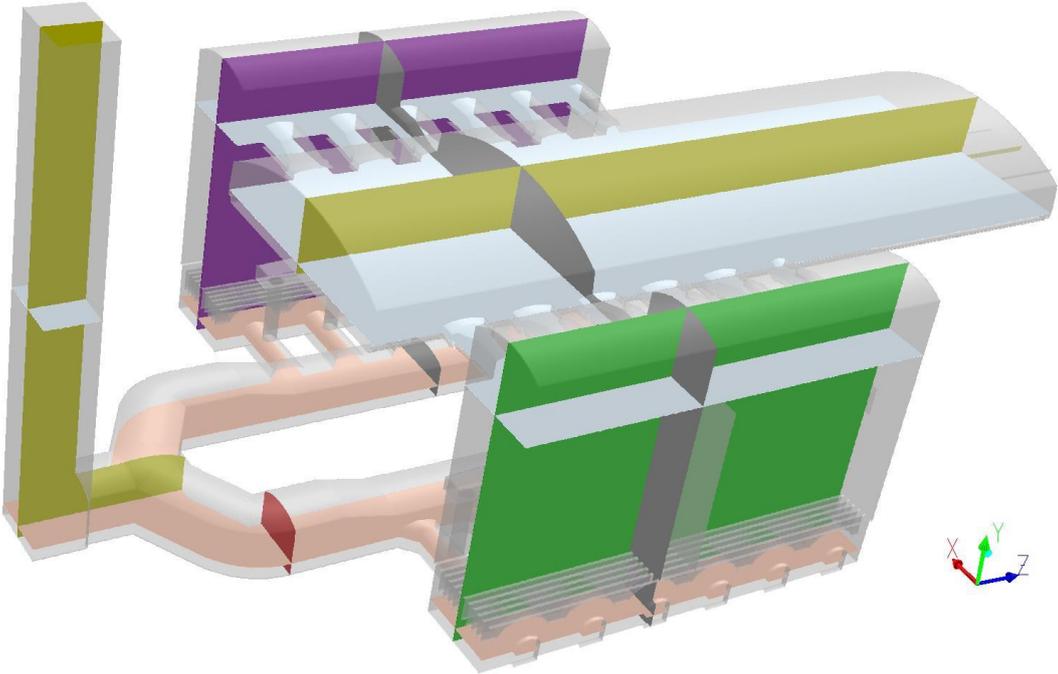


Abbildung 6-46: Positionen der Auswerteflächen im Gesamtsystem Querbrennerwanne

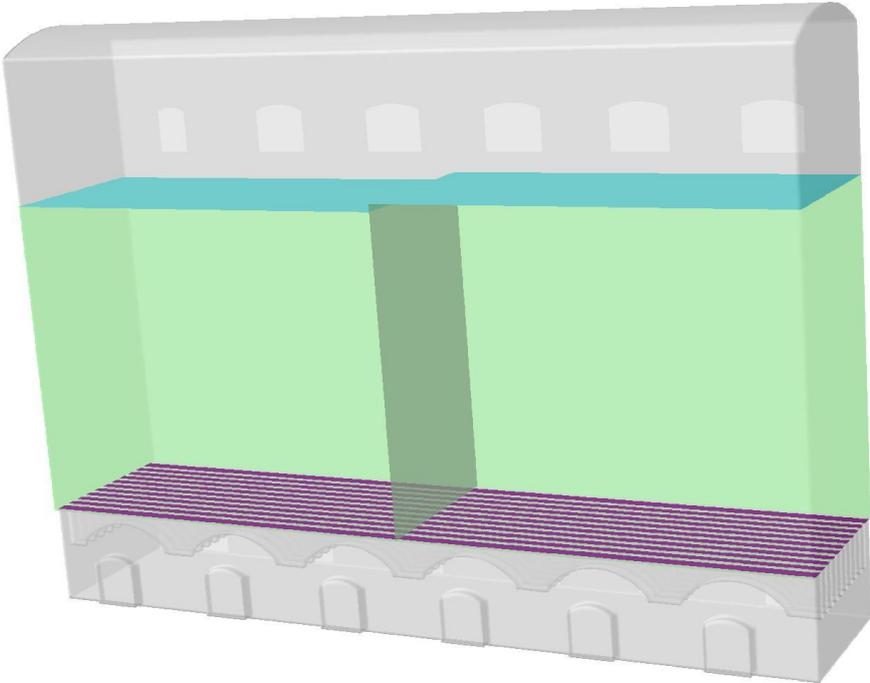


Abbildung 6-47: Detailansicht Auswerteflächen im Regenerator

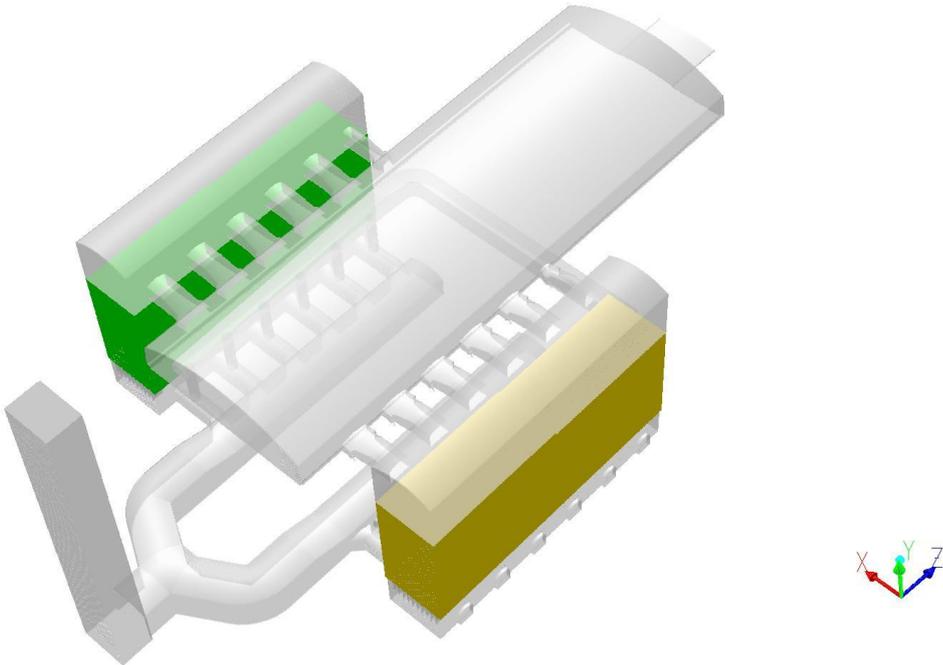


Abbildung 6-48: Position der Regeneratoren im System

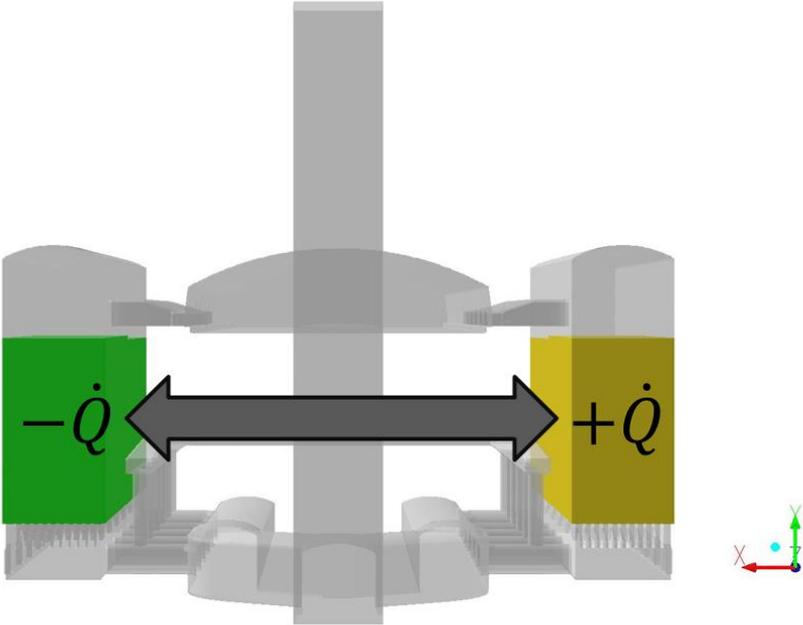


Abbildung 6-49: Entnahme bzw. Zugabe der Wärmemenge aus den Regeneratoren der Querbrennerwanne

Der simulierte Wärm austausch der Regeneratoren der Querbrennerwanne ist in den **Abbildungen 6-48** und **6-49** visualisiert. **Abbildung 6-48** zeigt die Position des im Simulationsmodell als poröses Medium abstrahierten realen Steinbesatzes in den Regeneratoren. Das Prinzip wird nochmal in **Abbildung 6-49** verdeutlicht (siehe auch **Kapitel 6.2**).

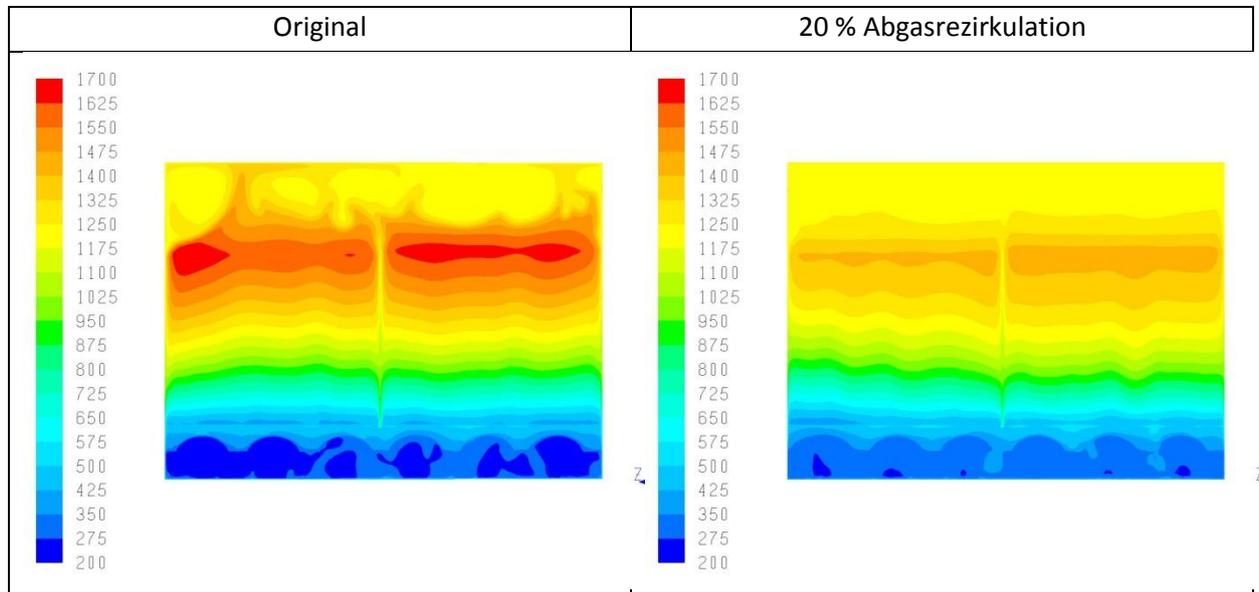


Abbildung 6-50: Temperaturverlauf vertikaler Schnitt durch den Regenerator in °C – Aufheizung (Skala gleich)

Die Temperatur der Verbrennungsluft steigt durch die im Bereich des porösen Mediums eingebrachte Wärme von eingespeisten 200°C im Regeneratorboden bis auf 1700°C im Regeneratorkopf (**Abbildung 6-50**). Die gemittelte Temperatur am Austritt des oberhalb Steinbesatzes liegt im Original bei ca.1560°C und bei 20 %-iger Abgasbeimischung bei ca.1380°C. Dieser Abfall der Verbrennungsluftvorwärmtemperatur lässt sich durch den erhöhten Massenstrom der Verbrennungsluft bei der 20 %-igen Abgasbeimischung erklären, sowie dass der Wärmeeintrag durch das poröse Medium bei beiden Simulationen gleich gehalten worden ist und nicht weiter angepasst wurde. Im gegenüberliegenden Regenerator baut sich die Temperatur des Abgases von 1700°C bis auf ca. 300°C ab, indem das Abgas die Wärme an das poröse Medium abgibt (**Abbildung 6-51**). Die gemittelte Temperatur am Austritt des Abgases unterhalb des porösen Mediums fällt bei den Originaleinstellungen bis auf 480°C und bei der 20 %-igen Abgasbeimischung nur bis auf 630°C. Auch dies liegt wiederum daran, dass der Wärmeaustrag durch das poröse Medium bei beiden Simulationen gleich gehalten worden ist und nicht an den erhöhten Massenstrom angepasst wurde.

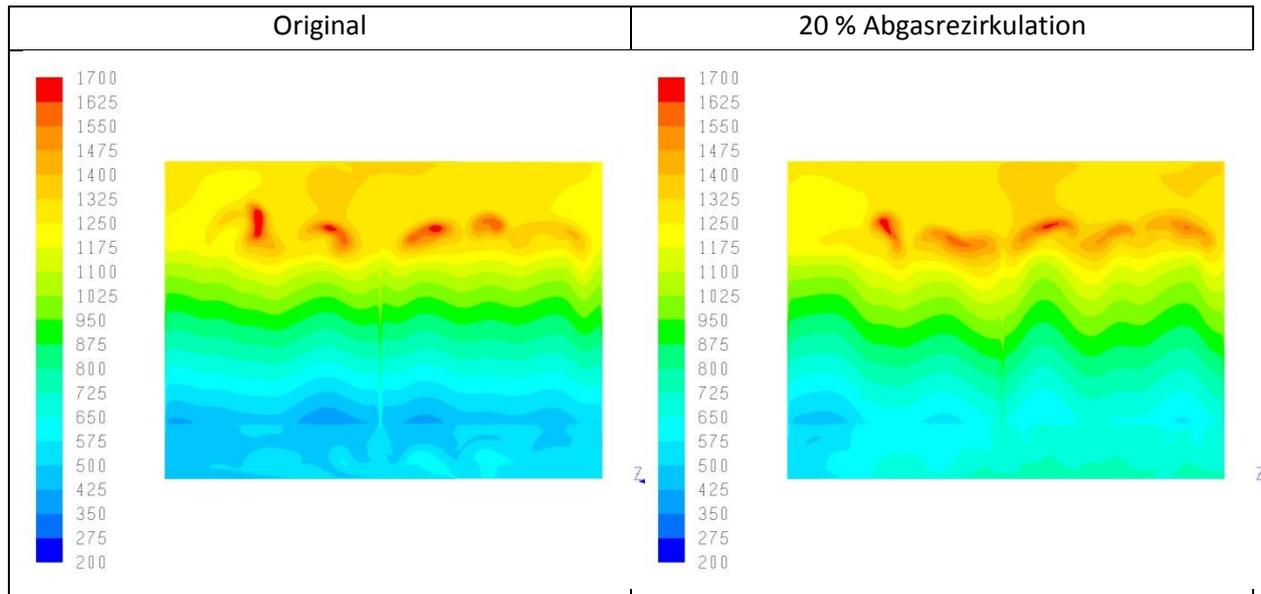


Abbildung 6-51: Temperaturverlauf vertikaler Schnitt durch den Regenerator in °C –Abkühlung (Skala gleich)

Die Temperaturverteilung auf dem horizontalen Schnitt der Brennebene ist auf den **Abbildungen 6-52** und **6-53** dargestellt. Einmal mit der maximalen Temperatur von 2300°C (Maximum vom Original) und einmal mit 2100°C (Maximum von der 20 %-igen Abgasbeimischung). Dies verdeutlicht einen prägnanten Unterschied in den Ergebnissen zwischen den beiden Simulationen und zeigt die erwartete Veränderung der Verbrennung durch die Verdünnung mit der Abgasbeimischung.

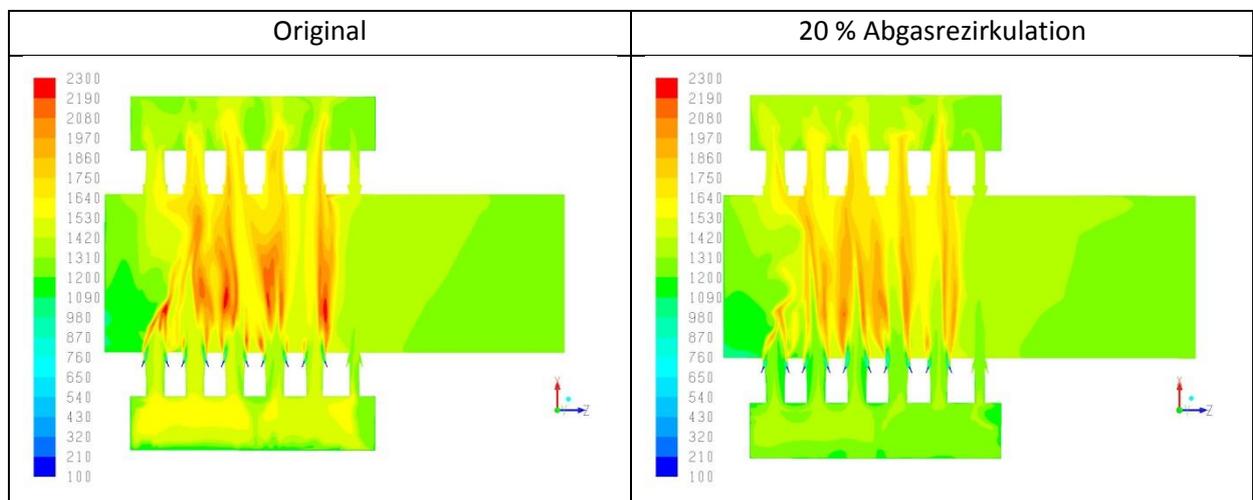


Abbildung 6-52: Temperaturverlauf horizontaler Schnitt Brennebene – Skala bis 2300°C

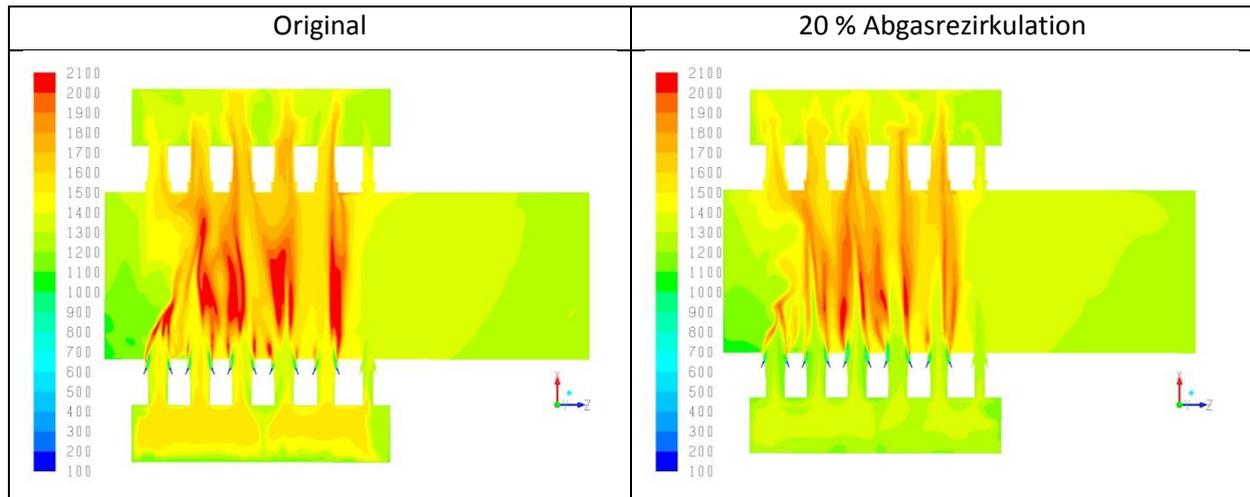


Abbildung 6-53: Temperaturverlauf horizontaler Schnitt Brennebene – Skala bis 2100°C

In den nachfolgenden drei **Abbildungen 6-54 bis 6-56** sind die Geschwindigkeit, der Wärme-freisetzung der Verbrennung und die trockene CO-Konzentrationsverteilung abgebildet. Diese Abbildungen geben zusammen gesehen einen guten Eindruck über die Form und Länge der Flamme im System. Die Flammenform bei der 20 %-igen Abgasrückführung verändert sich geringfügig in dem Maße, dass eine Art Kurzschluss zwischen den beiden Regeneratoren entsteht. Schon im Original ist die Flamme sehr lang, da es gewünscht ist, die Flamme über der gesamten Breite des Glasbades zu haben.

Mehrere Faktoren haben Einfluss auf diese Veränderung der Flamme und Verbrennung. Es sind durch die Abgasrückführung mehr Inerte in der Verbrennungsluft, welche die Verbrennung verlangsamen und eine Raumausbreitung der Flamme fördern, der Massenstrom der Verbrennungsluft ist größer und daher ist die Strömungsgeschwindigkeit im Brennraum und Übergang in den Regenerator höher sowie dass die adiabate Flammentemperatur um ca. 150°C niedriger ist, was ebenfalls Einfluss auf die Verbrennungsgeschwindigkeit hat. All das führt dazu, dass die Temperatur im Eintritt des Regenerators zur Abkühlung des Abgases beim Fall der 20 %-igen Abgasrückführung leicht höher (ca. 30 Kelvin) ist als beim Originalfall, trotz der niedrigeren Vorwärmtemperatur der Verbrennungsluft durch den anderen Regenerator. Diese Einstellung muss in der Realität verhindert werden, da eine zu lange Flamme und ein eventuell daraus folgender Kurzschluss der Regeneratoren unerwünscht ist. Aus diesem Grund müssen Veränderungen an den Einstellungen der Brenner (Anstellwinkel, Düsenöffnungen etc.) bei Altanlagen vorgenommen werden, um die Umsetzung der Abgasrückführung durchzuführen zu können. Bei der Neuplanung einer Anlage sind diese Erkenntnisse ebenfalls mit in Betracht zu ziehen. Die numerischen Simulationen können in beiden Fällen einen großen Beitrag dazu liefern, die richtigen Einstellungen für das Gesamtsystem zu finden.

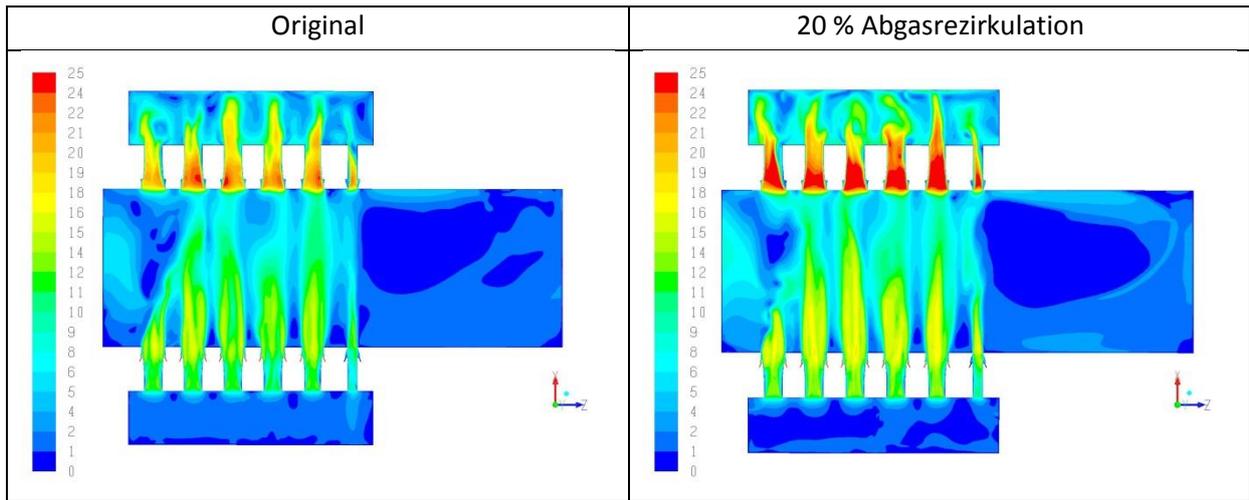


Abbildung 6-54: Geschwindigkeitsverteilung horizontaler Schnitt Brennerebene in m/s

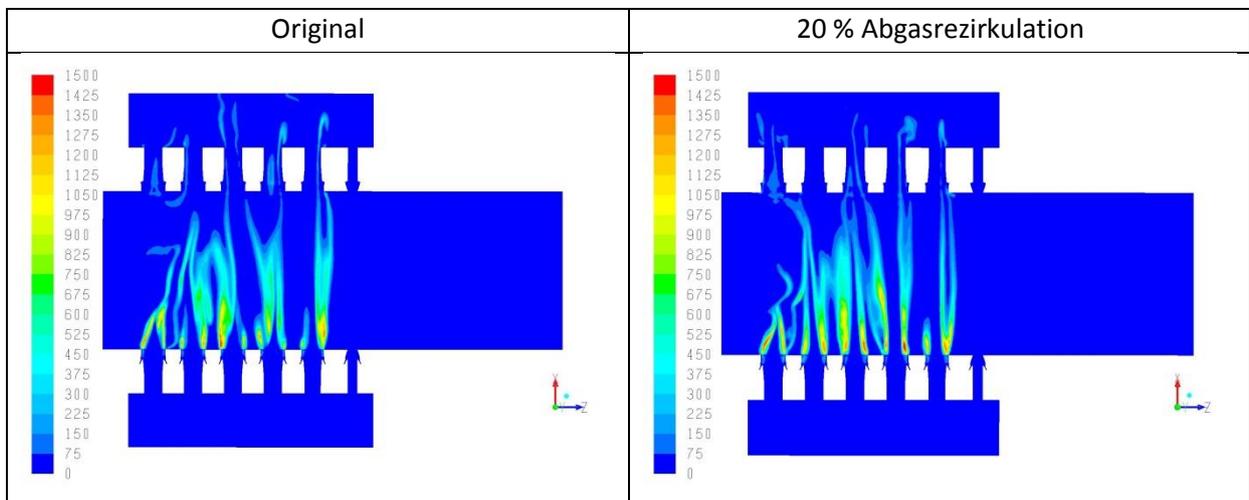


Abbildung 6-55: Wärmefreisetzung der Verbrennung horizontaler Schnitt Brennerebene in W

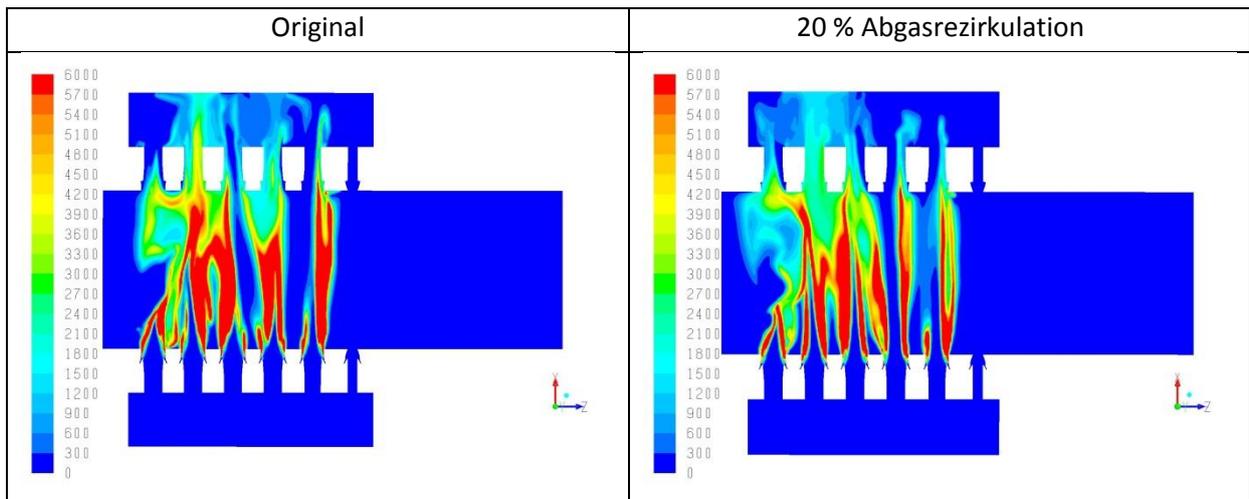


Abbildung 6-56: CO-Konzentrationsverteilung horizontaler Schnitt Brennerebene in ppm

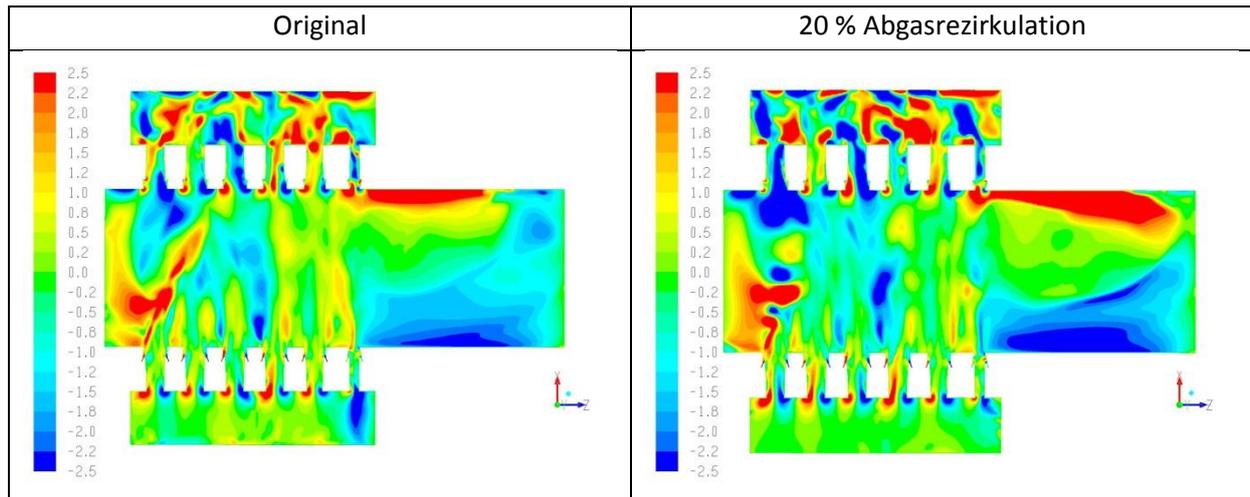


Abbildung 6-57: Z-Geschwindigkeitsverteilung horizontaler Schnitt Brennebene in m/s

Im Bereich des Einlegers ist in beiden Simulationen ein Wirbel zu erkennen. Die **Abbildung 6-57** zeigt die Geschwindigkeit in der Brennebene in die positive und negative Z-Richtung, welche den Wirbel (im Gegenuhrzeigersinn) im vorderen Bereich des Einlegers zeigt als auch einen weiteren großen Wirbel (im Uhrzeigersinn) Bereich des Refiners.

Die Geschwindigkeitsverteilung 5mm über dem Glasbad (**Abbildung 6-58**) zeigt, ob eventuell mehr Staub vom Einleger durch die Abgasrezirkulation aufgewirbelt wird. Dies ist aber wie auch schon bei der U-Flammenwanne nicht der Fall, da die Geschwindigkeit im Einlegebereich der Wanne in beiden Fällen im gleichen Bereich liegt und daher kein zusätzlicher Staubaustrag des Gemenges zu erwarten ist.

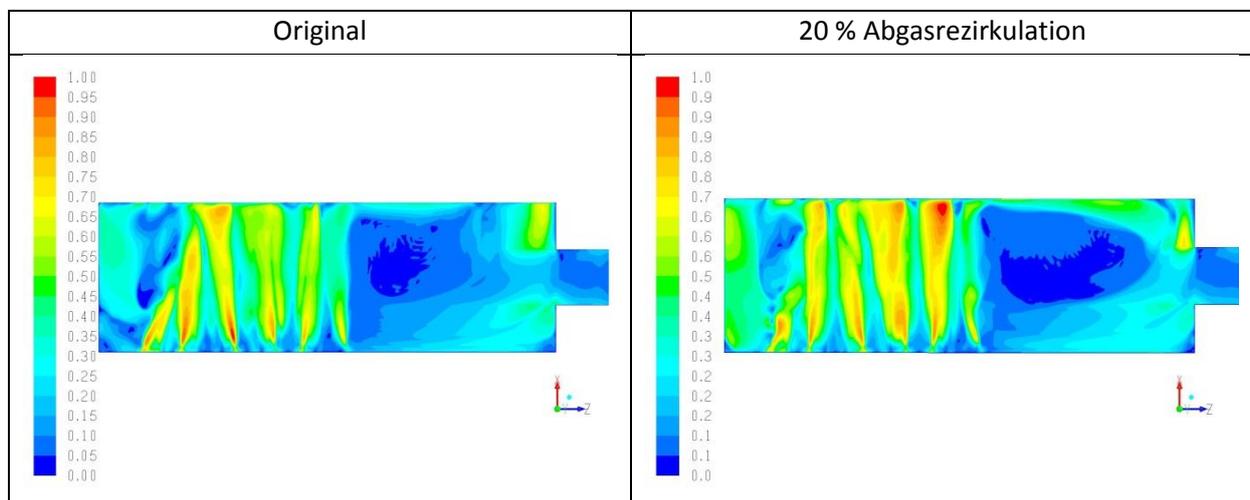


Abbildung 6-58: Geschwindigkeitsverteilung horizontaler Schnitt 5mm über dem Glasbad

In den **Abbildungen 6-59** und **6-60** sind die Temperaturverteilung auf und der Wärmeeintrag in das Glasbad dargestellt. Hier ist bei der Temperaturverteilung kaum ein Unterschied zwischen dem Originalzustand und bei der externen Abgasrückführung zu erkennen. Die Wärmestromverteilung ist im Bereich des Einlegers am höchsten, da dort die Temperatur des Gemenges den größten Unterschied zur Temperatur im Brennraum hat. Bei Fall der 20 %-

igen Abgasrückführung ist zudem zu sehen, dass der Wärmeeintrag in der Nähe der Brennerports niedriger ist als beim Originalfall. Insgesamt ist der Wärmeeintrag in das Glasbad bei dieser Konfiguration der Simulationen im Fall der 20 %-igen Abgasrückführung ca. 15% niedriger als beim Original. Dies wäre in der Realität nicht akzeptabel, da der Wärmeeintrag auch bei der Verdünnten Verbrennung gleich bleiben sollte. Dies kann aber den nicht angepassten Parametern bei der Simulation mit der 20 %-igen Abgasrückführung geschuldet sein. Weitere Untersuchungen sind daher nötig.

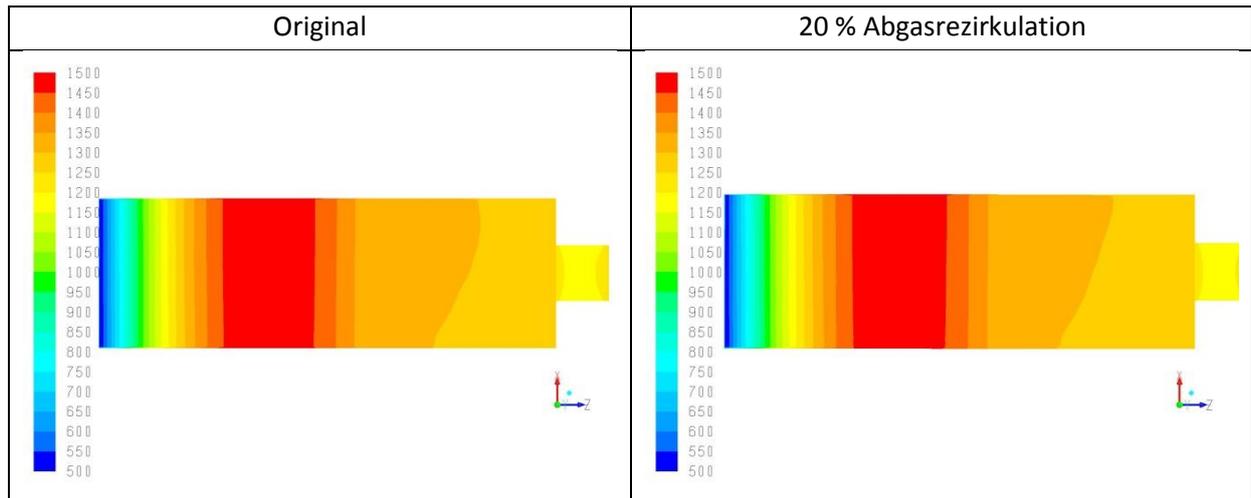


Abbildung 6-59: Temperaturverteilung auf der Glasbadoberfläche in °C

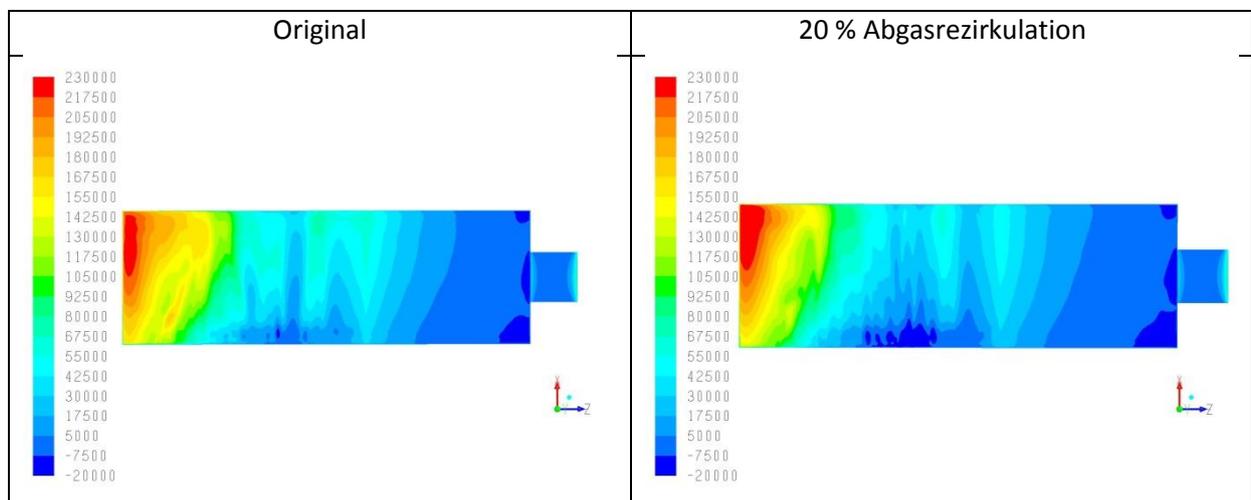


Abbildung 6-60: Gesamtwärmestromverteilung auf der Glasbadoberfläche in W/m^2

Die beiden folgenden Abbildungen sollen einmal der Übersicht der Strömung im Brennräum und Abgaskanal dienen (**Abbildung 6-61**), wobei die Farbgebung der Strömungslinien nur die einzelnen Linien identifiziert, sowie der Visualisierung der Temperaturverteilung im Gesamtsystem der Querbrennerwanne (**Abbildung 6-62**).

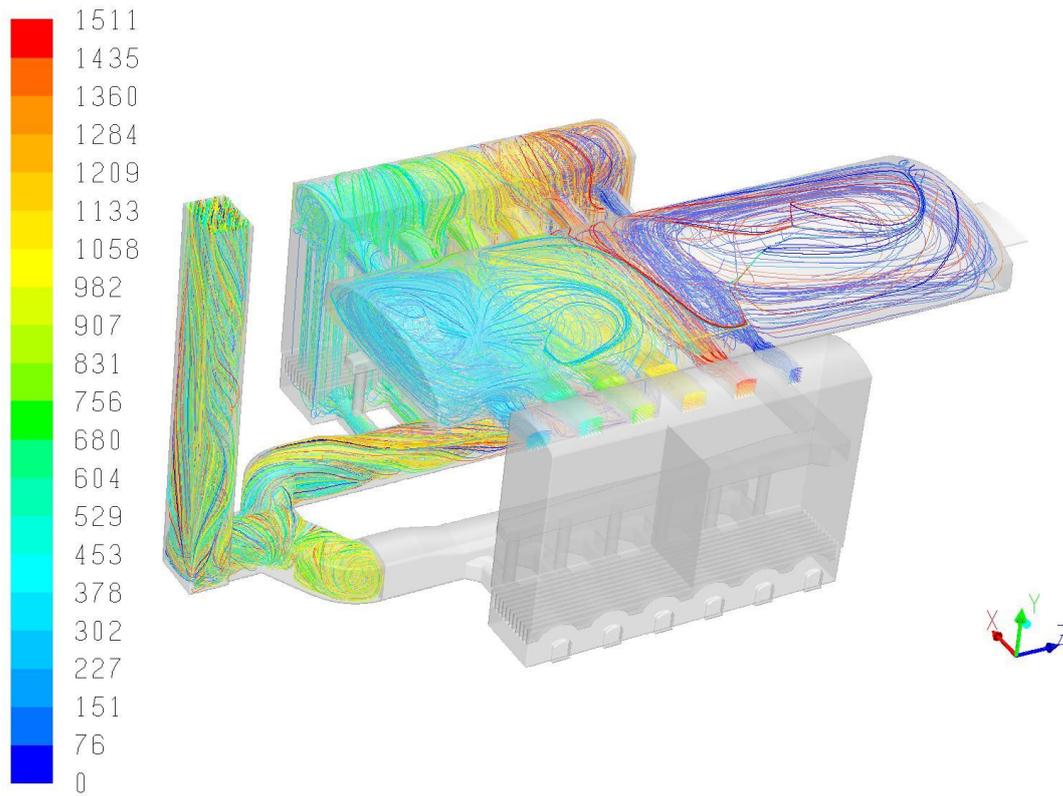


Abbildung 6-61: Strömungslinien Querbrennerwanne eingefärbt mit der Strömungslinien-ID

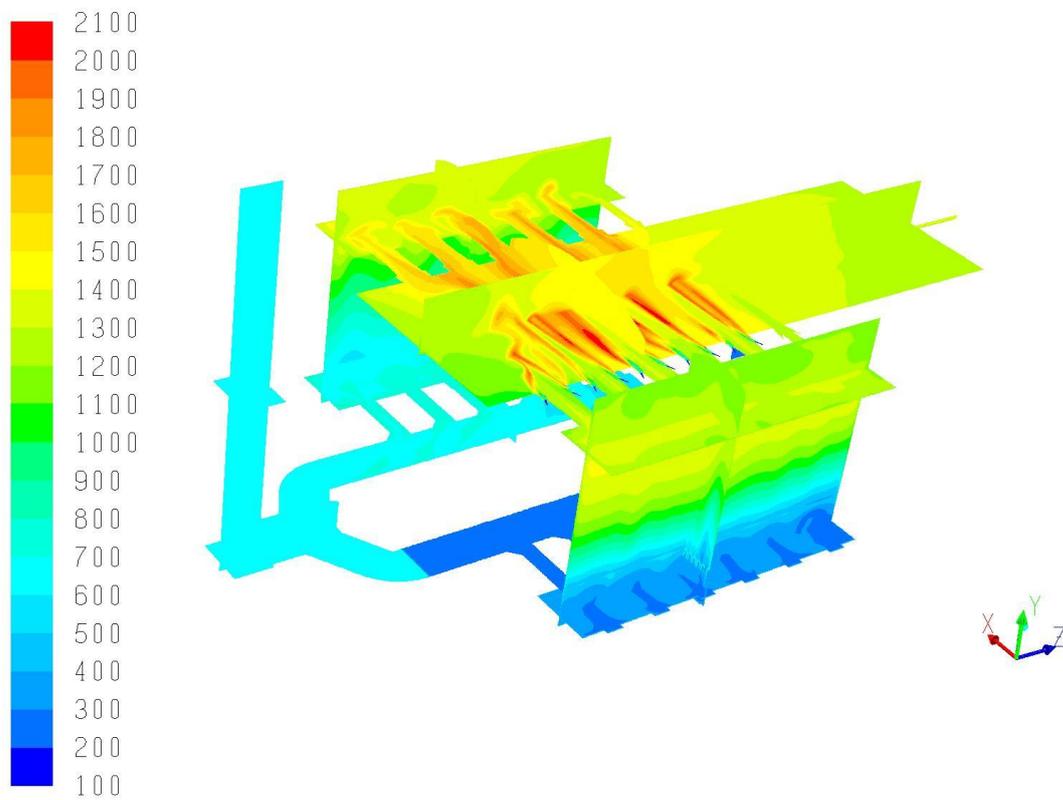


Abbildung 6-62: Temperaturverteilung Querbrennerwanne in °C

6.9.1 NO_x-Problematik

Die Problematik der Simulation der NO_x-Werte bei der Querbrennerwanne ist die gleiche wie bei der U-Flammenwanne, welche ausführlich im **Kapitel 6.6.1** erörtert wurde. Es wird daher hier nur noch einmal kurz die Ergebnisse der NO_x-Simulationen der Querbrennerwanne dargestellt. Die auf der roten Auswertebene (siehe **Abbildung 6-46**) aufgezeichneten DOAPs zeigen das gleiche instationäre Verhalten wie bei den Simulationen der U-Flammenwanne.

Die Ergebnisse der NO_x-Simulationsberechnungen der Querbrennerwanne können daher auch keine eindeutigen Aussagen über das Potential der Verdünnten Verbrennung treffen und bedürfen weiterer Untersuchungen.

Die NO_x-Werte der durchgeführten Simulation mit der 20 %-igen Abgasrezirkulation liegen im Vergleich zu denen mit der Originaleinstellung um ca. 10 % niedriger, aber auf einem hohen Niveau. Diese Aussage darf nicht als fest angesehen werden und muss weiter untersucht werden, da die Einstellungen der Simulation mit der 20 %-igen Abgasrückführung weiterer Anpassungen an das System benötigen (Wärmeeintrag- und -austrag durch das poröse Medium als Ersatz des Steinbesatzes der Regeneratoren, Strömungsführung, Brennereinstellungen etc.).

Ein Vergleich zu den experimentellen Messergebnissen aus **Kapitel 5.1** ist daher im Moment nur schwer möglich.

7. Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass für die Glasindustrie die Rezirkulation von Abgas in die eintretende Verbrennungsluft eine Möglichkeit zur NO_x -Reduzierung darstellen kann.

Dies gilt sowohl für bestehende Altanlagen von regenerativ beheizten Wannen als auch für Neubauten in der Zukunft.

Jedoch wurde in den Ergebnissen dieses Projektes aufgezeigt, dass in vielen Bereichen noch weitere Untersuchungen notwendig sind.

Deshalb ist wiederum ein Nachfolgeprojekt geplant, welches die hier aufgeworfenen Fragen und Probleme adressiert, wie zum Beispiel die Simulation der NO -Abgaswerte oder die rechnerische Kopplung der Regeneratoren innerhalb der numerischen Simulation, um die Simulationen noch näher an die Realität zu bringen.

Es fehlt zudem noch die der Abgleich der Simulationen zu der Umsetzung der Abgasrezirkulation an einer realen Glasschmelzwanne, da die im Projekt gemachten Versuche an der umgebauten U-Flammenwanne nicht ergebnisführend waren.

Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses sind an einer weiteren Fortführung der Arbeiten sehr interessiert und haben ihre Mitarbeit im Nachfolgeprojekt zugesagt, da nun durch die im Projekt gemachten Erfahrungen und Ergebnisse, die Möglichkeit besteht das gesamte komplexe System einer Glasschmelzwanne zu simulieren und detailliert zu analysieren.

Die Möglichkeit einer weiteren Mess- und Testphase der Abgasrezirkulation an der U-Flammenwanne wurde in Aussicht gestellt, wenn die Einbauten die gewünschte Leistung für die Verdünnte Verbrennung erbringen, da die NO_x -Reduzierung und die Energieeinsparung immer treibende Faktoren in der Glasindustrie sind.

8. Abweichungen vom Projektplan

Der ursprüngliche Zeitplan für das Projekt „Verdünnte Verbrennung II“ (siehe **Abbildung 8.1 Fehler! erweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) sah eine Projekt-laufzeit von Januar 2011 bis Dezember 2012 vor. Dieser Zeitplan konnte jedoch nicht eingehalten werden.

Arbeitschritte	2011												2012												2013					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
1 Einfluss der Abgasrezirkulation auf die Regeneratoren von U-Flammenwannen			★																											
2 Übertragung der Abgasrezirkulation auf Querbrennerwannen								★																						
3 Erarbeitung der Konzepte für Nachweis der Anwendbarkeit an Glasschmelzwannen																														
4 Festlegung der Lösungsstrategien mittels numerische Simulation																														
5 Umbau der Glasschmelzwannen/ Regeneratoren und Durchführung der Praxistests															★															
6 Analyse der Ergebnisse unter wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten																														
7 Aufstellen von Kriterien für Umbau Altanlage und Neubau einer Wanne																														
8 Abschlussbericht																														

- geplante Meetings
- ★ Kick-off-Meeting
- ★ Zwischenmeetings
- ☆ Abschlussmeeting

Abbildung 8-1: Zeitplan des Projektes „Verdünnte Verbrennung II“

Aufgrund fehlender Vergleichbarkeit zwischen der ursprünglich zu vermessenden U-Flammenwanne und dem an gleicher Stelle geplanten Neubau konnten die Messungen nicht zeitplanmäßig durchgeführt werden. Die Messungen an der U-Flammenwanne mussten aus verschiedensten Gründen mehrfach verschoben werden. Zuerst wurde die Messung in das 2. Quartal 2012 und schließlich in das 2. Quartal 2013 geschoben, um dann den gerade fertiggestellten Neubau vor und nach dem Einbau/Inbetriebnahme der externen Abgasrezirkulation zu vermessen. Dafür verantwortlich waren hauptsächlich 2 Punkte. Einerseits hatte die zu Beginn des Projektes bestehende Wanne mit dem im 2. Quartal 2012 durchgeführten Neubau kaum noch Ähnlichkeit. Deshalb ist ein Vergleich bzgl. Energieeffizienz und weiteren Auswirkungen der Abgasrezirkulation zu diesem Zeitpunkt nicht möglich gewesen, da nur mit gleichen bzw. sehr ähnlichen Aggregaten solche Vergleiche und allgemeinen Aussagen getroffen werden können. Zweitens musste auf Grund von installations- und produktionsbe-

dingten Einschränkungen für die Tests ein Zeitfenster beim Glaswannenbetreiber gefunden werden, was keinen finanziellen und materiellen Schaden beim Betreiber hervorruft.

Diese Entscheidung wurde durch die beteiligten Forschungsstellen und Projektpartner getroffen, um ein Optimum an Vergleichbarkeit zu erreichen und somit den maximal möglichen Wissensgewinn aus den Messungen zu garantieren. Im Gegenzug wurden die Messungen an der Querflammenwanne vorgezogen.

Die geplanten Arbeiten weichen daher vom dem begutachteten und bewilligten Antrag ab und mussten aufgrund der produktionsbedingten und planerischen Gegebenheiten der industriellen Partner angepasst werden. Im gegenseitigen Einvernehmen mit der Forschungsstelle 2, der Hüttentechnischen Vereinigung der deutschen Glasindustrie (HVG) in Offenbach, und nach Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss am 17.04.2012 wurde durch das Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (GWI) eine Verlängerung des Projektes 16851 N um 6 Monate bis zum 30.06.2013 beantragt und schließlich von der AiF genehmigt.

9. Gegenüberstellung von Forschungszielen und erzielten Ergebnissen

Forschungsziel	Erzieltes Ergebnis
<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme von Messdaten der Regeneratoren von U-Flammenwannen der beteiligten Firmen (Temperaturen, Volumenströme etc.) • Numerische Simulationen der Regeneratoren 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine U-Flammenwanne wurde teilweise vermessen, Daten aufgenommen und ausgewertet • Numerische Simulationen der Regeneratoren wurden durchgeführt und analysiert
<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme von Querbrennerwandendaten (Temperatur, Spezies etc.) • Numerische Simulation der querbeheizten Wannen und Regeneratoren, Basiszustand – Abgaszuminischung 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Querbrennerwanne wurde ausführlich vermessen, die Daten aufgenommen und ausgewertet • Numerische Simulationen der kompletten Querbrennerwanne inklusive des Vergleichs sind durchgeführt worden
<ul style="list-style-type: none"> • Analyse der Daten von AS 1 und 2 • Erarbeitung von Lösungsvorschlägen zur Realisierung der Abgasrezirkulation 	<ul style="list-style-type: none"> • Lösungsvorschläge wurden für beide Wannentypen erarbeitet und aufgezeigt
<ul style="list-style-type: none"> • numerische Simulation der in AS3 erarbeiteten Lösungsvorschläge 	<ul style="list-style-type: none"> • Verschiedene Lösungsvorschläge wurden simuliert, analysiert und bewertet
<ul style="list-style-type: none"> • Begleitung des Umbaus der Glasschmelzwannen und Regeneratoren der beteiligten Firmen • Vermessung der umgebauten Wannen und wärmetechnische Berechnung nach Umbau 	<ul style="list-style-type: none"> • Der Umbau einer U-Wanne wurde von den Partnern begleitet, aber die gewünschte Menge der Rückführung des Abgases konnte auf Grund von falschen Einbauten nicht durchgeführt werden • U-Wanne wurde erneut vermessen und Wärmeberechnung wurde durchgeführt
<ul style="list-style-type: none"> • Analyse der erzielten Ergebnisse bezüglich NO_x und Energie • Erarbeitung von Lösungsvorschlägen für die Fahrweise der Glasschmelzwannen 	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Auswertung der Ergebnisse wurde präsentiert und NO_x-Problematik wurde erläutert und Lösungsvorschläge präsentiert • Fahrweisen müssen weiter untersucht werden, wenn Tests mit umgebauter Wanne unter Vollast gelaufen sind
<ul style="list-style-type: none"> • Aufstellen von Kriterien für den Umbau bestehender Anlagen • Transferstudie für Konzepte bei Neubau der Wannen 	<ul style="list-style-type: none"> • Kriterien für den Umbau wurden aufgezeigt • Konzepte für Neubauten zur Inkludierung der Verdünnten Verbrennung wurden dargestellt

10. Nutzen der Forschungsergebnisse

Zu Beginn des Projektes (Februar 2011) wurde ein Kick-off-Meeting mit dem projektbegleitenden Ausschuss zur Absprache der geplanten Arbeiten durchgeführt. Im April 2012 fand eine Sitzung des PbA in Offenbach bei der HVG statt, wo über die bis zu diesem Zeitpunkt erzielten Ergebnisse berichtet wurde.

Weiterhin fanden zahlreiche Gespräche mit beteiligten und interessierten Industrieunternehmen statt.

In den Tätigkeitsberichten des GWI, welche jährlich in der ersten Ausgabe der Zeitschrift GAS-WÄRME International erscheint, wurde jeweils über die bisher erzielten Ergebnisse berichtet (2012 und 2013). Im Beirat der HVG wurde Ende Februar 2012 über die in 2011 geleisteten Arbeiten und Ergebnisse berichtet. Im Tätigkeitsbericht der HVG (April 2012) wird allen industriellen Partnern und Mitgliedshütten über das Forschungsvorhaben Bericht erstattet.

Auf der Glasstec 2012 stellten die beteiligten Forschungseinrichtungen auf dem von der HVG-DGG organisierten Gemeinschaftstand das Projekt auf der Ausstellungsfläche des GWI einer breiten Öffentlichkeit vor.

Es wurden bereits weitere Vorträge eingereicht und zusätzliche sind in der Planung für dieses und nächstes Jahr.

10.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Der Glasindustrie wird ein Verfahren zur Verfügung gestellt, mit dessen Hilfe eine NO_x -Minderung erreicht werden kann, wobei die Größe dieser Minderung sowohl experimentell als auch mit den neusten Methoden der numerischen Strömungssimulation weiter untersucht werden muss. Die Regenerativwannenbetreiber der Glasindustrie, hier vor allem die Behälterglasindustrie mit überwiegend verwendeten U-Flammenwannen sowie die Floatglashersteller mit ihren Querbrennerwannen können diese Entwicklung direkt einsetzen. D. h., es steht eine Technologie zur Verfügung, die einfach und kostengünstig an bestehenden Wannen angebaut werden kann. Dies kann im Rahmen von turnusmäßigen Wartungsarbeiten erfolgen, ohne extra Ausfallzeiten und damit verbundenen Produktionsausfällen.

Für den Bau von Neuanlagen können die hier gewonnenen Erkenntnisse und aufgestellten Kriterien unmittelbar in die Planung und Ausführung einfließen. Andere Industriezweige, die im Hochtemperaturbereich arbeiten (z. B. Stahl, Aluminium) und weitere NO_x -Minderungsmaßnahmen durchführen möchten, können diese Technologie ebenfalls adaptieren.

10.2 Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Durch die verschärfte Gesetzgebung der TA Luft 2002 (speziell die NO_x-Emissionen betreffend), die für die Glasindustrie seit Oktober 2007 greift, sind die Glaswannenbetreiber gezwungen, diese Grenzwerte einzuhalten. Meist ist dies nur durch teure Sekundärmaßnahmen (zusätzlicher finanzieller Aufwand ca. 25 % der Investitionskosten einer Glasschmelzwanne zuzüglich jährlicher Betriebskosten) realisierbar, die die Wannenbetreiber, meist KMU, an die Grenzen der Wirtschaftlichkeit bringen. Die im Rahmen des Vorgängerprojektes entwickelte und in diesem Projekt umzusetzende Maßnahme soll den Wannenbetreiber in die Lage versetzen, ohne teure Umbauten (max. bis ca. 5 % der Investitionskosten ohne jährliche Betriebskosten) die NO_x-Grenzwerte einzuhalten. Weiterhin kann so bei Wannenumbauten auf eine Rauchgasreinigung verzichtet bzw. die entsprechenden Anlagen erheblich kleiner ausgeführt werden. Dies spart zum einen Investitionskosten und zum anderen aber auch laufende Betriebskosten. Durch die geplante Energieeinsparung bzw. Steigerung der Effizienz der Glasschmelzwannen wird den steigenden Brennstoffkosten und dem CO₂-Emissionshandel entgegen gewirkt. Weiterhin trägt eine derartige Neuentwicklung zu einer gesteigerten Wettbewerbsgerechtigkeit der KMUs bei, da im europäischen und weltweiten Ausland keine derartig streng formulierten Schadstoffgrenzwerte von den Betreibern von Glasschmelzwannen verlangt werden. Die zurzeit anhaltende Investitionszurückhaltung wegen der Wirtschaftskrise, könnte durch die Notwendigkeit der teuren Denox-Anlagen weiter verschärft werden. Durch die im Rahmen dieses Projektes erarbeitete kostengünstige Primärmaßnahme zur NO_x-Minderung wird die deutsche Wirtschaft weiter gestärkt und bestehende Arbeitsplätze erhalten. Wenn auf diesem Wege die geforderten NO_x-Grenzwerte eingehalten werden können und die Effizienz der Wannen weiterhin gesteigert wird, kann der Standort Deutschland auch für Neuinvestitionen wieder attraktiv werden und bleiben.

11. Veröffentlichungen

Die nachfolgenden Veröffentlichungen sind während der Laufzeit des Projektes publiziert worden:

- Gaswärme-Institut e. V. Essen: Tätigkeitsbericht 2011, GASWÄRME International, 01/2012
- Gaswärme-Institut e. V. Essen: Tätigkeitsbericht 2012, GASWÄRME International, 01/2013

Das Projekt wurde auf folgenden Messen präsentiert:

- Glasstec 2012, 23.-26. Oktober 2012, Düsseldorf

Weitere Veröffentlichungen und Vorträge sind sowohl für dieses Jahr eingereicht als auch geplant. Unter anderem:

- 1st Joint Meeting of DGG – ACerS GOMD 2014 in Aachen
- ESG 2014, 12th European Society of Glass ESG Conference in Parma
- GWI und DGG-Veröffentlichungen
- heat processing
- Glasstec 2014 in Düsseldorf

Ebenso wie die Bereitstellung des Abschlussberichtes im Downloadbereich der Internetseiten des GWI und der HVG sind fest eingeplant.

12. Danksagung

Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle bei den Partnern des projektbegleitenden Ausschusses, durch deren Mitarbeit und kostenlose Bereitstellung von Materialien und Personal das Projekt durchgeführt werden konnte. Der Dank gilt auch der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die finanzielle Unterstützung durch Haushaltsmittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

13. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Zusammenfassende Darstellung der Einflussgrößen, die den tatsächlichen Energiebedarf eines real betriebenen Schmelzaggregates ausmachen [3].....	6
Abbildung 2-2: Energieverbrauch von 123 weltweit ausgewählten Behälterglaswannen nach [4], die Daten sind auf einen Scherbengehalt von 50 % normiert.....	6
Abbildung 2-3: Vorhergesagte und erreichte NO _x -Minderung durch die „Verdünnte Verbrennung“ am GWI-Hochtemperaturversuchsofen.....	10
Abbildung 3-1: Prinzipskizzen verschiedener regenerativer Glasschmelzwannentypen.....	15
Abbildung 4-1: Schema und CAD-Aufbau (©TECOGLAS) einer U-Flammenwanne.....	17
Abbildung 4-2: Schema und CAD-Aufbau (©TECOGLAS) einer Querbrennerwanne.....	17
Abbildung 4-3: Allgemeine Ablaufstruktur einer numerischen Strömungssimulation.....	20
Abbildung 5-1: Messpunkte an der Querbrennerwanne (Ansicht 1).....	25
Abbildung 5-2: Messpunkte an der Querbrennerwanne (Ansicht 2).....	25
Abbildung 5-3: „Feuer Links“ Abbildung 5-4: „Feuer Rechts“.....	26
Abbildung 5-5: Verlauf der Temperatur am Messpunkt 3.1 über einen Feuerwechsel für beide Einschubtiefen.....	28
Abbildung 5-6: Temperaturverlauf über den kompletten Zeitraum eines Feuerungswechsel (2 mal 20 min).....	29
Abbildung 5-7: Temperaturen im Regeneratorgewölbe zu Beginn und Ende einer Aufheizphase.....	30
Abbildung 5-8: Temperaturen im Regeneratorgewölbe zu Beginn und Ende einer Abkühlphase.....	30
Abbildung 5-9: Gemessene Temperaturbereiche.....	31
Abbildung 5-10: Temperaturen in der eingefärbten Infrarotbildaufnahme.....	31
Abbildung 5-11: Einfache Wärmebilanz einer Querbrennerwanne zur Herstellung von Floatglas.....	33
Abbildung 5-12: Einfache Wärmebilanz einer Behälterglaswanne im Grundzustand.....	34
Abbildung 5-13: Einfache Wärmebilanz einer Behälterglaswanne mit 10 % Abgasrückführung.....	35
Abbildung 5-14: Zusammenhang zwischen CO ₂ -Gehalt des Oxidators und Anteil der Abgasrückführung unter den Randbedingungen der Versuche.....	38
Abbildung 5-15: NO _x im Fuchs als Funktion der Abgasrückführungsquote in Vol.-% (bezogen auf 8 % O ₂ im trockenen Abgas) und Restsauerstoff in Vol.-%.....	40
Abbildung 6-1: Regenerataraufbau und -steine.....	42
Abbildung 6-2: Steingitterung im Teilausschnitt des Regenerators.....	43
Abbildung 6-3: Druckverlust des Regenerators bei konstantem Durchfluss über der Temperatur.....	44
Abbildung 6-4: Wärmeleitfähigkeit der Materialien des Kammerbesatzes als Funktion der Temperatur.....	45

Abbildung 6-5: spezifische/mittlere Wärmekapazität der Materialien des Kammerbesatzes als Funktion der Temperatur	45
Abbildung 6-6: Temperaturverteilung auf Schnittflächen durch den Regeneratorturm mit Steinbesatz	46
Abbildung 6-7: Übergabe bzw. Entnahme und Zugabe der Wärmemenge aus den Regeneratortürmen	47
Abbildung 6-8: Temperaturverteilung auf Schnittflächen durch die Regeneratortürme (linke Seite mit Abgas und rechte Seite mit Frischluft).....	48
Abbildung 6-9: Temperaturverteilung auf Schnittflächen durch die Regeneratortürme (linke Seite mit Abgas und rechte Seite mit Frischluft).....	49
Abbildung 6-10: Druckverlust des Regenerators bei Zumischung von Abgas zu Frischluft	50
Abbildung 6-11: Temperaturverteilung nach ca. 7 min einer Aufheizperiode in einer Schnittfläche durch den Regeneratorturm mit Steinbesatzgeometrie	51
Abbildung 6-12: Konzept 1 der Abgasrückführung mittels eines Kegelstumpfes	53
Abbildung 6-13: Konzept 1 der Abgasrückführung mittels eines Schrägkanals.....	53
Abbildung 6-14: Konzept 1 der Abgasrückführung mittels Dreieckseinbauten und Verbindungskanal.....	53
Abbildung 6-15: Geometrie der Regeneratoren mit den zwei Auswerteebenen	54
Abbildung 6-16: Kontour-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s für das Abgasrückführkonzept 1	55
Abbildung 6-17: Vektor-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s am Kegelstumpf.....	56
Abbildung 6-18: Kontour-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s für das Abgasrückführkonzept 2	57
Abbildung 6-19: Vektor-Plot der Strömungsgeschwindigkeit in m/s am Schrägkanal.....	58
Abbildung 6-20: Konzept und gewünschter Strömungsverlauf durch Einbauten und Verbindungskanal.....	59
Abbildung 6-21: Kontour-Plot (Schnitt 2) der Strömungsgeschwindigkeit in X-Richtung (vertikal) in m/s (Rot von unten nach oben und Blau von oben nach unten)	60
Abbildung 6-22: Kontour-Plot (Schnitt 2) der Strömungsgeschwindigkeit in Z-Richtung (horizontal) in m/s (Rot von links nach rechts und Blau von rechts nach links)	60
Abbildung 6-23: Vektor-Plot (Schnitt 1) der Strömungsgeschwindigkeit in m/s	61
Abbildung 6-24: Vektor-Plot (Schnitt 2) der Strömungsgeschwindigkeit in m/s	61
Abbildung 6-25: Strömungslinien des heißen Abgasstromes.....	62
Abbildung 6-26: Strömungslinien des kühlen Frischluftstromes.....	62
Abbildung 6-27: Skizze der Abgasrezirkulation durch ein Heissluftgebläse oder -ventilator ..	64
Abbildung 6-28: Temperaturverlauf stationäre Aufheizung auf Querschnittsflächen durch den Regeneratorturm (Oben, Mitte und Unten des Steinbesatzes).....	65
Abbildung 6-29: Temperaturverteilung einer Aufheizperiode in zwei Schnittflächen durch den Regeneratorturm mit Steinbesatzgeometrie.....	66

Abbildung 6-30: Temperaturverteilung auf der horizontalen Brennerebene in Grad Celsius.	68
Abbildung 6-31: O ₂ –Konzentrationsverteilung (trocken) auf der horizontalen Brennerebene in Vol.-%.....	68
Abbildung 6-32: CO-Konzentrationsverteilung (trocken) auf der horizontalen Brennerebene in ppm.....	69
Abbildung 6-33: CO ₂ -Konzentrationsverteilung (trocken) auf der horizontalen Brennerebene in Vol.-%.....	69
Abbildung 6-34: CO-Isfläche (6000 ppm trocken) im Originalzustand ohne Abgasrezirkulation.....	70
Abbildung 6-35: Strömungslinien der eintretenden Luft eingefärbt mit der Geschwindigkeit in m/s.....	70
Abbildung 6-36: Geschwindigkeitsverteilung 5 mm über der Glasbadoberfläche in m/s	71
Abbildung 6-37: Temperaturverteilung auf der Glasbadoberfläche in °C.....	72
Abbildung 6-38: Gesamtwärmestromverteilung auf der Glasbadoberfläche in W/m ²	72
Abbildung 6-39: Position der Auswerteebene (Lila/Pink) für die DOAPs.....	73
Abbildung 6-40: Verlauf des Wertes von O ₂ , trocken.....	74
Abbildung 6-41: Geometrie der Querbrennerwanne (oberer Teil).....	77
Abbildung 6-42: Temperaturverlauf durch den oberen Teil einer Querflammenwanne	78
Abbildung 6-43: Geschwindigkeitsverteilung durch den oberen Teil einer Querflammenwanne	78
Abbildung 6-44: Geometrie der gesamten Querbrennerwanne – Ansicht 1	80
Abbildung 6-45: Geometrie der gesamten Querbrennerwanne – Ansicht 2	80
Abbildung 6-46: Positionen der Auswerteflächen im Gesamtsystem Querbrennerwanne.....	81
Abbildung 6-47: Detailansicht Auswerteflächen im Regenerator	81
Abbildung 6-48: Position der Regeneratoren im System	82
Abbildung 6-49: Entnahme bzw. Zugabe der Wärmemenge aus den Regeneratoren der Querbrennerwanne.....	82
Abbildung 6-50: Temperaturverlauf vertikaler Schnitt durch den Regenerator in °C – Aufheizung (Skala gleich)	83
Abbildung 6-51: Temperaturverlauf vertikaler Schnitt durch den Regenerator in °C – Abkühlung (Skala gleich)	84
Abbildung 6-52: Temperaturverlauf horizontaler Schnitt Brennerebene – Skala bis 2300°C .	84
Abbildung 6-53: Temperaturverlauf horizontaler Schnitt Brennerebene – Skala bis 2100°C .	85
Abbildung 6-54: Geschwindigkeitsverteilung horizontaler Schnitt Brennerebene in m/s.....	86
Abbildung 6-55: Wärmefreisetzung der Verbrennung horizontaler Schnitt Brennerebene in W	86
Abbildung 6-56: CO-Konzentrationsverteilung horizontaler Schnitt Brennerebene in ppm ...	86
Abbildung 6-57: Z-Geschwindigkeitsverteilung horizontaler Schnitt Brennerebene in m/s ...	87
Abbildung 6-58: Geschwindigkeitsverteilung horizontaler Schnitt 5mm über dem Glasbad ..	87
Abbildung 6-59: Temperaturverteilung auf der Glasbadoberfläche in °C.....	88

Abbildung 6-60: Gesamtwärmestromverteilung auf der Glasbadoberfläche in W/m^2	88
Abbildung 6-61: Strömungslinien Querbrennerwanne eingefärbt mit der Strömungslinien-ID	89
Abbildung 6-62: Temperaturverteilung Querbrennerwanne in $^{\circ}C$	89
Abbildung 8-1: Zeitplan des Projektes „Verdünnte Verbrennung II“	92

14. Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Messdaten vom Regeneratorkopf Links	27
Tabelle 5-2: Messdaten vom Regeneratorboden Links	27
Tabelle 5-3: Messdaten vom Abgas- bzw. Frischluftkanal	27
Tabelle 5-4: Ergebnisse der Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens der Regeneratoren für eine Querbrennerwanne zur Herstellung von Flachglas	36
Tabelle 5-5: Ergebnisse der Berechnung des wärmetechnischen Verhaltens der Regeneratoren für eine U-Flammenwanne zur Herstellung von Behälterglas ..	37
Tabelle 6-1 : Rechnerische Abgaszusammensetzung bei vollständiger Verbrennung	67
Tabelle 6-2: Verbrennungsluftzusammensetzung	67
Tabelle 6-3: Werte des Volumenanteils von Sauerstoff, trocken im Abgas	74
Tabelle 6-4: Vergleich NO-Werte der Simulationen	75

15. Literaturverzeichnis

- [1] PIEPER, H.: Stand der Entwicklung von Glasschmelzwannen bezüglich Energieverbrauch und Emissionsverhalten. In: *Zwischenbilanz zur rationellen Energienutzung bei Thermoprozeßanlagen, insbesondere Industrieöfen*, 1996, S. 200–224
- [2] NEBEL, R.: Der Energieverbrauch von Schmelzwannen – gestern, heute und morgen. In: , 2003, S. 3–8
- [3] CONRADT, R.; OVERATH, J.; ROGER U.; SCHAEFER-ROLLFS W.; DE HESSELLE M.: Zur Darstellung des Energieverbrauches von Glasschmelzwannen. In: *DGG Journal* (2005), Nr. 4, S. 6–9
- [4] VAN LIMPT, J.; BEERKENS, R.G.C.; Energy efficiency benchmarking of glass furnaces (2003)
- [5] KIRCHNER, U.: NO_x-Emissionen und Stand der Minderungstechnik am Beispiel der Glasindustrie. In: . Essen : Vulkan-Verlag, 1999, S. 102–116
- [6] KASPER, A.; LEYENS, G.: *Primäre NO_x-Reduzierung bei querbeheizten Flachglaswannen: Sind 800 mg NO_x/Nm³ erreichbar?*, HVG-Mitteilung (Nr. 2086)
- [7] SIMPSON, N.: Hochtemperaturverbrennung mit geringer NO_x-Produktion in Glasschmelzöfen. In: *Gaswärme International* Bd. 57 (2008), Nr. 01-02, S. 40–44
- [8] KIRCHNER, U.: *Staub- und Schadgasemissionen von Glasschmelzwannen, Glastechnischer Bericht* (Nr. 51-6), 1978
- [9] KIRCHNER, U.: *Emissionen von Glasschmelzöfen – Heutiger Stand, Glastechnischer Bericht* (Nr. 58-12), 1985
- [10] BARKLAGE-HILGEFORT, H.: *Minderung der NO_x-Emission durch feuerungstechnische Maßnahmen, Glastechnischer Bericht* (Nr. 58-12), 1985
- [11] FLAMME, M.: *Minimierung der Stickstoffoxidbildung bei der Verbrennung von Erdgas mit starker Luftvorwärmung in Hochtemperaturprozessen*, Ruhr-Universität Bochum, 1989
- [12] MALOBABIC, M.; SCHERELLO, A.: Variable Stufenbrennerlanzen für Glasschmelzwannen zur Steigerung der Effizienz und Minderung der NO_x-Emissionen. In: *Gaswärme International* Bd. 52 (2003), Nr. 6, S. 342–348
- [13] KÖSTERS, M.; FLAMME, M.; SCHERELLO, A.; KREMER, H.; BOß, M.: *Experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung des Wärmeübergangs und zur NO_x-Minderung an Glasschmelzwannen, VDI-Bericht* (Nr. 1629), 2001
- [14] WISHNICK, D. B.: Emission reducing combustion technologies for glass melting. In: *Glass* Bd. 79 (2002), S. 119–120
- [15] SCHERELLO, A.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung der Wärmeübertragungseigenschaften von Erdgasflammen im Rahmen des AiF-ZUTECH-Forschungsvorhabens Nr. 80ZN „SPEKTRAL“. In:

- [16] LAINAULT, F.; FERLIN, T.; GIESE, A.; VETTER, J.; SCHERELLO, A.: Applied Research, Development and Services for the Optimization of Natural Gas Utilization in the Field of Glass Melting Furnaces. In: . Canada, 2004
- [17] STG: EsDeNOx: The STG Energy saving Technology to reduce NOx Emission in conventional regenerative glass tank furnaces
- [18] STEIGMAN, F. N.; SNYDER, W. J.: Revisiting oxygen usage for fuel savings. In: *Glass Bd.* 78 (2001), S. 56 ff
- [19] HOKE, B. C.; INSKIP, J. L.: A comparison of oxygen-enhanced combustion technologies. In: *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. Bd. 23, 2002, S. 135–151
- [20] SCHERELLO, A.; GIESE, A.; KÖSTERS, M.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Entwicklung neuer Brenner-systeme für Glasschmelzwannen mit regenerativer Luftvorwärmung* (Abschlussbericht zum IGF-Projekt 12797 N), 2003
- [21] FLEISCHMANN, B.; BAUER, J.; BAUMANN, P.; SCHERELLO, A.; GIESE, A.; KÖSTERS, M.: *Verbesserung des Wärmeeintrags in die Glasschmelze unter Ausnutzung der spektralen Wärmestrahlung durch gezielte Brennereinstellungen zur Steigerung der Glasqualität* (Abschlussbericht zum ZUTECH-Vorhaben 80 ZN), 2005
- [22] FLEISCHMANN, B., GIESE, A.: *Verbesserung des direkten Wärmeeintrages in die Glasschmelze durch Optimierung der Verbrennungsparameter bei unterschiedlichen Befeuungsarten* (Abschlussbericht zum IGF-Projekt 15015 N), 2008
- [23] SCHERELLO, A., KONOLD, U., GÖRNER, K.: Anwendung der flammenlosen Oxidation für Glasschmelzwannen mit rekuperativer Luftvorwärmung – Glas-Flox®. In: *VDI-Bericht*. Bd. 23. Berlin, 2007, S. 421–428
- [24] KATSUKI, M.: Recent advances in combustion technology for heating processes. In: *JSME International Journal Series B, Fluids and Thermal Engineering*. Bd. 48 (2003), S. 491–499
- [25] EISEN, H. P.; HÜSIG, K. R.; KÖFLER, A.: Construction of the exhaust recycling facilities at a sintering plant. In: *Stahl und Eisen* Bd. 124 (2004), S. 37–40
- [26] BUSSMANN, W.; KARAN, J.; FENNELL, T.: New method reduces NOx emissions from heat treatment furnaces. In: *Industrial Heating* Bd. 71 (2004), S. 43–48
- [27] BÖNNEKE C.B.; WIEDMANN, U.; WULF, G.: NOx-arme Feuerungssysteme für Kesselanlagen. In: *Gaswärme International* Bd. 48 (1999), S. 362–364
- [28] MUNKO, A.; KLEINE-JÄGER, F.; KÖHNE, H.: Neue Brennertechnik für Strahlheizrohre in Thermoprozessanlagen. In: *BWK* Bd. 54 (2002), S. 1–16
- [29] BARKLAGE-HILGEFORT, H.; SIEGER, W.: *Primary measures for the NOx reduction on glass melting furnaces, Glastechnischer Bericht* (Nr. 62-5), 1989
- [30] GIESE, A.: *Energieeinsparung und NOx-Minderung an regenerativ befeuerten Glasschmelzwannen durch verdünnte Verbrennung - Verdünnte Verbrennung - IGF-Projekt 14755 N* : Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., 2008

- [31] ROSS, C. P., TINCHER, G. L., RASMUSSEN, M.: *Glass Melting Technology: A Technical and Economic Assessment* (Nr. #DE-FC36-021D14315). USA : Glass Manufacturing Industry Council / U.S. Department of Energy- Industrial Technologies Program, 2004
- [32] CONRADT, R.: *Werkstoffverarbeitung Glas*
- [33] *FLUENT User Guide*
- [34] *FLUENT Theory Guide*
- [35] Wilcox, D. C., "Turbulence Modeling for CFD," 1998.
- [36] Görner, K., *Technische Verbrennungssysteme*. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [37] Raithby, G. D., Chui, E. H., "A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media" *J. Heat Transfer*, no. 112, pp. 415–423, 1990.
- [38] Launder, B. E., Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows" *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp. 269–289, 1974.
- [39] Magnussen, B. F., Hjertager, B. H., "On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion" in *Proceedings of the 16th International Symposium on Combustion*, 1976.
- [40] Magnussen, B. F., "The Eddy Dissipation Concept: A Bridge between Science and Technology" presented at the ECCOMAS Thematic Conference on Computational Combustion, Lissabon, Portugal, 2005.
- [41] Giese, A.: *Verbrennungstechnisch bedingte Emissionen – Stickoxidbildung*. Beitrag in „Effiziente Verbrennungstechnik für die Glasindustrie“. Verlag der Deutschen Glas-technischen Gesellschaft Offenbach/Main 2011