

HVG-Mitteilung Nr. 2081

Spektrale Messung der im Verbrennungsraum von Glasschmelzwannen vorhandenen Strahlung im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 80 ZN „Spektral“

- Teil 4: Umsetzung der bisherigen Untersuchungsergebnisse an einer produzierenden Glasschmelzwanne –

B. Fleischmann, P. Baumann, HVG, Offenbach am Main
A. Scherello, GWI, Essen

Die Umsetzung der Forschungsergebnisse an einer industriellen Glasschmelzanlage zur Erhöhung des direkten Wärmeeintrags in die Glasschmelze sowie zum verbesserten Eintrag in die Glasbadtiefe geschah Anfang 2005 durch GWI und HVG. Die HVG begleitet die Verifizierung der Laborergebnisse mit verschiedenen Messtechniken. Dabei kam das Spektralradiometer, optische Pyrometer und die Emissionsmesstechnik für Gase sowie Sonden zur Sauerstoffmessung im Abgas zu Einsatz. Die Betriebsdaten des Glasschmelzaggregates werden im notwendigen Rahmen erfasst, um eine Bewertung der Maßnahmen zu ermöglichen und einen Vergleich bzw. Abgleich mit der numerischen Simulation zu gewährleisten.

Eine Umsetzung an der Grünglaswanne A war leider nicht möglich, da diese Wanne in der Zwischenzeit aus Altersgründen gelöscht wurde und nicht mehr in Betrieb geht. Es konnten daher nur an der Weißglaswanne A praktische Versuche durchgeführt werden. Hierfür stand eine Woche zur Verfügung, in der die Last nur unwesentlich verändert wurde und der Brennstoffeinsatz während der Versuchszeiten konstant war.

1. Erfassung des Ist-Zustandes an der Weißglaswanne A

Die Glasschmelzwanne ist ein handelsüblicher SORG[®] Deep Refiner mit EZH. Die Wanne war 2002 nach ihrer letzten Reparatur wieder in Betrieb gegangen und wird zur Produktion von weißem Behälterglas verwendet. Zur Beobachtung der Strahlungsemission im Verbrennungsraum wird das Schauloch auf Höhe des Walls auf der rechten Wannenseite genutzt. Das vordere Schauloch nahe der Gemengeeinlage stand auf Grund der Vorbereitung der Sekundärgaseindüsung nicht zur Verfügung und das hintere Schauloch nahe der durchlassseitigen Stirnwand blickt auf Grund seiner leicht schrägen Ausrichtung gegen dieselbe und ist für eine Beschreibung der Verbrennungsvorgänge nicht geeignet. Das genutzte mittlere Schauloch blickt auf den Teil der Reaktionszone, deren Strahlungseigenschaften durch die durchzuführenden Einstellungen bzw. Versuche verändert werden (Bild 4).

Das Spektralradiometer zur Messung der Strahlungsemission im Verbrennungsraum wurde so justiert, dass es gerade (d.h. mit einem Winkel von 90° zur Seitenwand) und waagrecht in den Verbrennungsraum blickt. Dies wurde für alle drei Versuchsreihen sichergestellt. Parallel zu den Messungen mit dem Spektralradiometer wurden alle verfügbaren Betriebsdaten aufgenommen und dokumentiert, die für die Beurteilung der Verbrennung von Interesse sind. Im Kammerkopf wurde die bestehende Absaugung der Verbrennungsprodukte genutzt, um entsprechende Messungen der Abgaszusammensetzung mit Hilfe der Messtechnik, welche die HVG bei Messaufgaben im Bereich Umwelt einsetzt, durchzuführen. Mit Hilfe dieser Messungen wird der Ist-Zustand der Verbrennung dokumentiert um die Änderungen bei den eigentlichen Versuchen zu verfolgen.

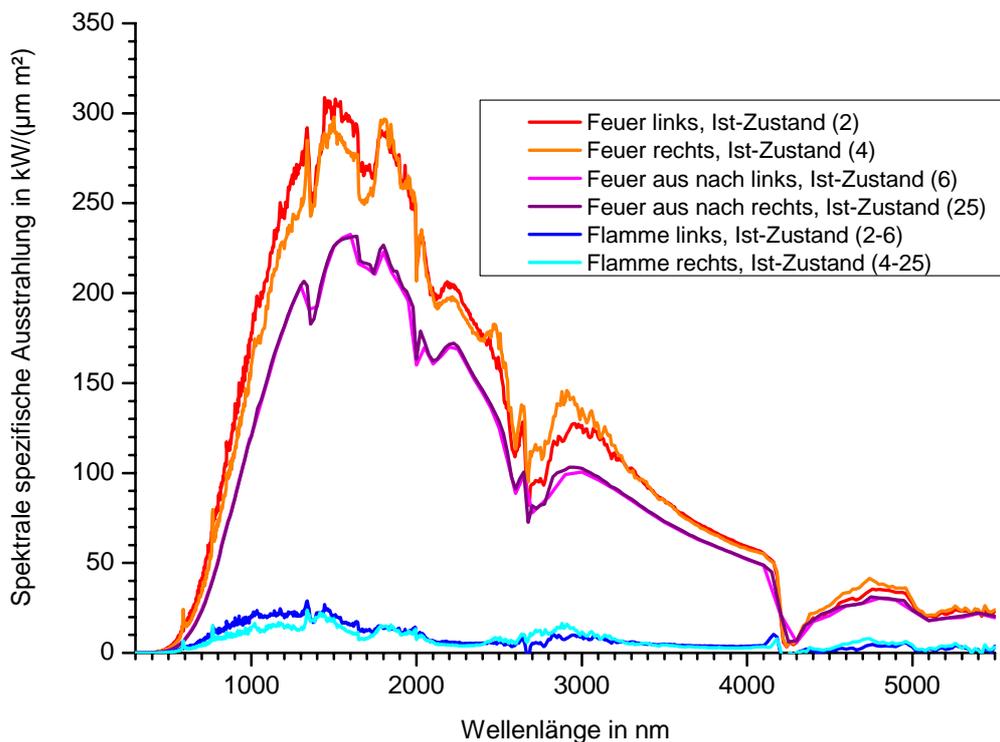


Bild 1: Ergebnisse der Messungen mit dem Spektralradiometer zur Ermittlung der Wärmestrahlung im Verbrennungsraum einer Glasschmelzwanne (Ist-Zustand).

Beschreibung der Verbrennung des Ist-Zustands: Alle 30 Minuten Feuerwechsel; asymmetrische Feuerung: der mittlere und der äußere Brenner werden jeweils mit ca. 50 % der Gasmenge beaufschlagt; die Lanzendurchmesser sind gleich; die Brennerlanzen sind leicht nach oben angestellt; die Gasgeschwindigkeit beträgt für beide Lanzen ca. 70 m/s.

Bild 1 zeigt die Ergebnisse der Messungen mit dem Spektralradiometer. Es wurde die Wärmestrahlung der linken Seitenwand des Verbrennungsraumes (Feuer aus) und die Wärmestrahlung des Verbrennungsraumes mit Flamme (Feuer links oder rechts) etwa auf Höhe des Walls gemessen. Daraus errechnet sich die Strahlung der Flamme bzw. der heißen Abgase. Anhand der daraus berechneten „Flammen“-eigenschaften von ca. 1650 °C und einem Emissionsgrad von ungefähr 0,18 lässt sich erkennen, dass die gemessene Strahlung nicht aus dem Flammenkern (heißeste Reaktionszone) kommt. Außerdem wird bei der Messung eine „Integration“ über die gesamte Wannenbreite vorgenommen, die über heißes Abgas auf der abziehenden Seite, Verbrennungsprodukte, rezirkuliertes Abgas und das Ende der Reaktionszone „mittelt“.

2. Umsetzung der Versuche zur Verbesserung des direkten Wärmeeintrages in das Glasbad an der Weißglaswanne A

An den beiden darauf folgenden Tagen wurden die Praxistests zweier Varianten durchgeführt, die sich bei den Untersuchungen als die viel versprechendsten und auch mit einfachen Mitteln umsetzbaren Möglichkeiten herauskristallisierten: Unterschießen mit 70 % in der Mitte sowie Sekundärgaseindüsung. Nach Absprache mit dem Wannenbetreiber wurden diese Versuche vom Glashersteller soweit vor Ort vorbereitet (zusätzliche

Gasleitungen legen, Brennerlanzenköpfe mit verschiedenen Durchmessern drehen, Personalbereitstellung), dass die nötigen Installationsarbeiten und Veränderungen an der Glasschmelzwanne problemlos in einer Stunde getätigt werden konnten und jeweils eine ca. 6-stündige Versuchszeit zur Verfügung stand, bevor die Wanne in den Originalzustand zurückversetzt wurde.

Die Gasmenge zur Verbrennung wurde konstant gehalten und trotz einer Produktionserhöhung von 5 % nicht verändert. Dies führte dazu, dass nach den Versuchen die Elektrozusatzheizung zum Einsatz kam, um den etwas zu geringen Energieeinsatz für die gefahrene Produktionsmenge zu kompensieren. Dadurch war jedoch eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse im Verbrennungsraum vom Ist-Zustand und den beiden Versuchen gewährleistet. Diese Erfahrung bestätigt auch die Vorhersage, dass die damit erzielbare Energieeinsparung kleiner als 5% ist. Abschätzungen und Berechnungen gehen von ca. 3% aus.

2.1. Unterschießen

Für den Versuch (70 % über Mitte – geneigt) wurden folgende Veränderungen an der Verbrennung vorgenommen:

- Alle drei Brenner werden genutzt.
- Die Brennstoffverteilung sieht ca. 60 % durch die mittlere Düse vor, die einen großen Querschnitt besitzt und jeweils 20 % über die beiden äußeren mit geringem Durchmesser.
- Die Neigungen der Lanzen wurden verändert. Die mittlere Lanze wurde um 2° gesenkt, während die beiden äußeren Lanzen um 2° angestellt und gleichzeitig leicht zur Mitte hin ausgerichtet wurden.
- Die Gasgeschwindigkeit betrug für die mittlere Lanze ca. 50 m/s und die der beiden äußeren Lanzen ca. 80 m/s.

Bild 2 zeigt die spektrale Wärmestrahlung für den Fall des Unterschießens 60 % Mitte – geneigt. Aus den Messspektren Feuer rechts und links sowie Feuer aus lassen sich die Spektren der Flamme ermitteln. Diese lassen sich durch eine Temperatur von ca. 1620 °C und einen Emissionsgrad von 0,25 an der Messstelle beschreiben. Vor allem am erhöhten Emissionsgrad erkennt man die Verlängerung bzw. die Verlagerung der rußenden Bereiche der Flamme, wobei die nicht-stöchiometrische Verbrennung zu einer leichten Temperaturenniedrigung führt. Insgesamt erreicht man durch die Verbrennungseinstellung jedoch einen vermehrten direkten Energieeintrag am Ort der Messung in die Glasschmelze. Die Integration über die Wellenlänge für alle drei Fälle, deren Ergebnis in Tabelle 1 dargestellt ist, verdeutlicht dies.

2.2. Sekundärgas

Für den Versuch Sekundärgas wurden folgende Veränderungen an der Verbrennung vorgenommen:

- Der mittlere und der äußere Brenner werden genutzt.
- Die Brennstoffverteilung sieht ca. 41 % für die mittlere und für die außenliegende Lanze vor.
- Die Neigung der Lanzen entspricht dem Basisfall, der in Kapitel 7.1 dokumentiert ist.
- Die Gasgeschwindigkeit betrug für die beiden Lanzen in der Brennerbank ca. 60 m/s.

- Ca. 18 % des Brennstoffes wurden über die Sekundärgasdüse in der Verbrennungsraumseitenwand zugegeben mit einer Geschwindigkeit von ca. 30 m/s.

Bild 3 zeigt die spektrale Wärmestrahlung für den Fall des Sekundärgaseinsatzes. Aus den Messspektren Feuer rechts und links sowie Feuer aus lassen sich die Spektren der Flamme ermitteln. Diese lassen sich durch eine Temperatur von ca. 1685 °C und einen Emissionsgrad von 0,19 an der Messstelle beschreiben. Die Überwachung von Thermo- elementen im Ofen sowie Pyrometermessungen zeigten, dass die Ofenseitenwand dabei nicht überhitzt wird. Auch der Vergleich der Messkurven „Feuer aus“ in den Bildern 1 bis 3 bestätigt, dass die Temperatur der Seitenwand bei allen drei Zuständen vergleichbar ist.

3. Zusammenfassung der Messergebnisse und Diskussion

Tabelle 1 vergleicht die „Gesamt“energie, die in Form von Strahlung im Verbrennungs- raum für die einzelnen Fälle am Messort zur Verfügung steht. Dabei wird das Mittel aus Feuer links und Feuer rechts ermittelt. Beide Varianten stellen am Messort (nähe Wall, Hot Spot) mehr Strahlungsenergie zur Verfügung als die Flamme im Ist-Zustand. Während der mehrstündigen Versuchszeit führte dies nicht zu einer Veränderung der Gewölbe- oder Seitenwandtemperatur, wie entsprechende Kontrollmessungen mit einem Pyrometer und die Thermo- elemente im Ofen bestätigen. Dies bedeutet, dass das Mehrangebot an Strah- lung von ca. 2 % vom Glas aufgenommen werden kann.

Fall	Gesamtenergie in kW/m ²
Ist-Zustand	$(584+579)/2=581,5$
Unterschießen	$(606+607)/2=606,5$
Sekundärgas	$(619+586)/2=602,5$

Tabelle 1: mit dem Spektralradiometer ermittelte Gesamtenergie im Verbrennungsraum.

Die ermittelten Temperaturwerte und das Emissionsvermögen zeigen, dass sich die Flammenlänge bzw. -lage sowie die Strahlungseigenschaften so verändert haben, wie es die Vorversuche am GWI-Hochtemperaturofen und die Berechnungen vorhergesagt haben. Die Spektren mit dem Wert n.a. waren nicht auswertbar, da die Absorption der Abgase in diesen Fällen keine Interpolation der Spektren erlaubte und nicht genügend ungestörte Stützstellen für die Auswertung zur Verfügung standen.

Summiert man die Strahlungswerte Feuer aus und Flamme von Tabelle 2 für den jeweili- gen Fall, so fällt auf, dass die Summe nicht dem Wert in Tabelle 1 entspricht.

Dies liegt daran, dass die Mehrfachreflexion der Flamme in Tabelle 2 nicht berücksichtigt wird. Die Differenz aus den Ergebnissen in Tabelle 1 und 2 gibt also den Teil der Strah- lungsenergie wider, der durch die Mehrfachreflexion der Flammenstrahlung zwischen den Seitenwänden erzeugt wird. Der prozentuale Unterschied ist im unterschiedlichen Emis- sionsvermögen der Flammen begründet, die mit der Strahlungsabsorption der Flamme ver- knüpft ist. Der Absolutbetrag wird vom Strahlungsangebot der Flamme selbst stark beein- flusst. Während der Versuche wurde im Kammerkopf das Abgas abgesaugt und nach einer entsprechenden Abgasaufbereitung mit Hilfe physikalischer Messmethoden analy- siert. Die in Tabelle 4 dargestellten Ergebnisse spiegeln den Zustand der Feuerungsfüh- rung nach ca. 5 Stunden Versuchszeit wider.

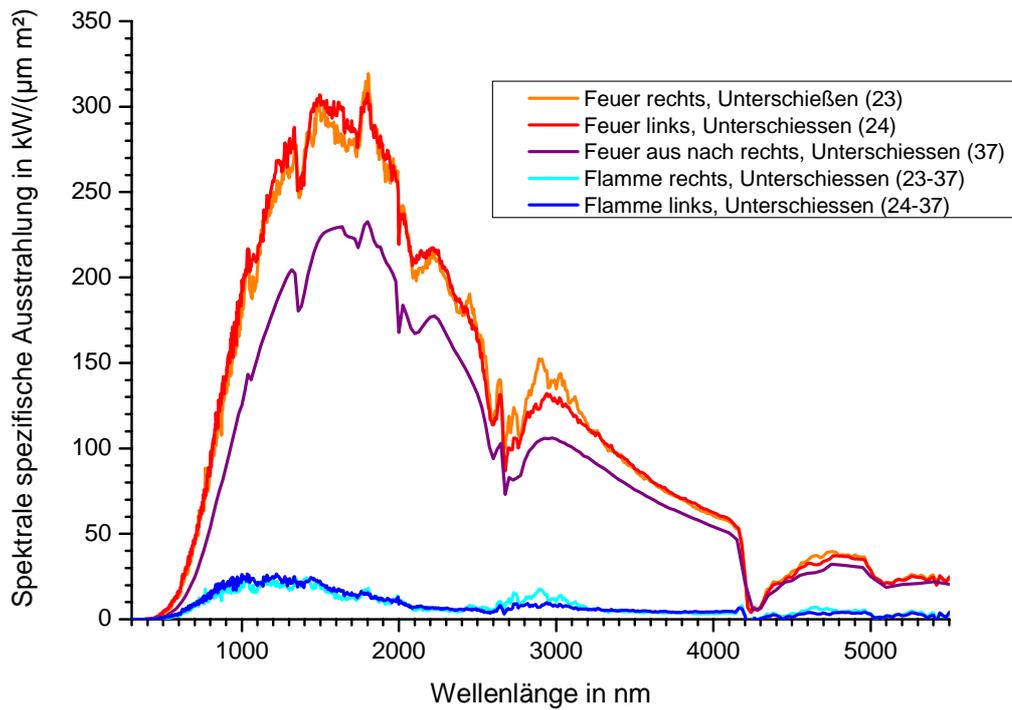


Bild 2: Ergebnisse der Messungen mit dem Spektralradiometer zur Ermittlung der Wärmestrahlung im Verbrennungsraum einer Glasschmelzwanne (Fall: Unterschießen).

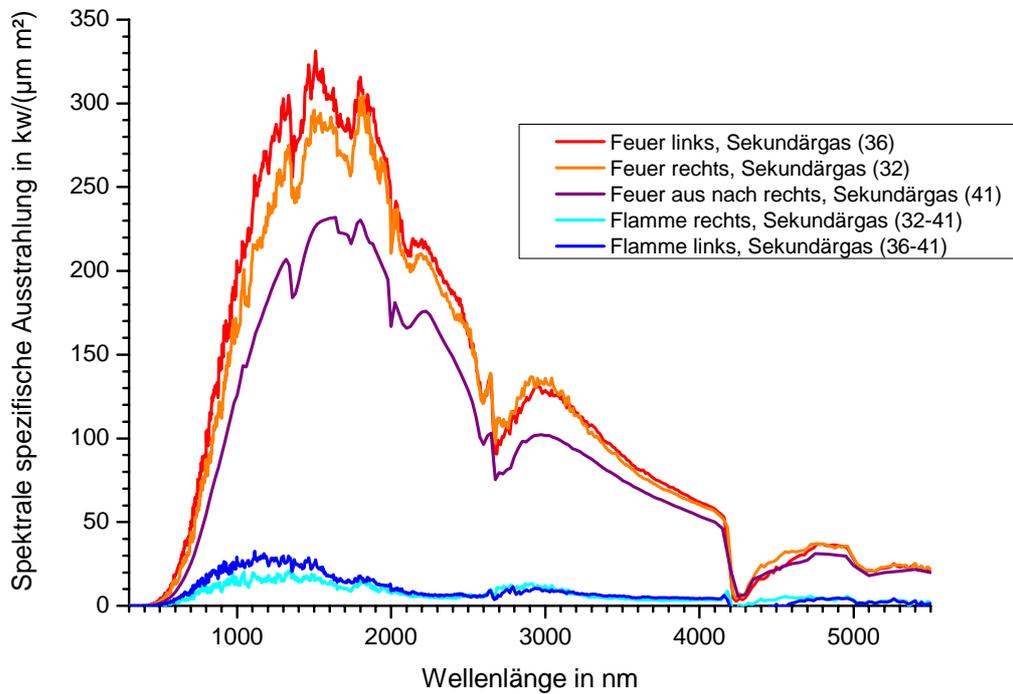


Bild 3: Ergebnisse der Messungen mit dem Spektralradiometer zur Ermittlung der Wärmestrahlung im Verbrennungsraum einer Glasschmelzwanne (Fall: Sekundärgas).

	Temperatur in °C	ε	Strahlung in kW/m ²
Feuer aus rechts, Ist-Zustand	1547	0,900	462
Feuer aus links, Ist-Zustand	1545	0,902	456
Flamme rechts, Ist-Zustand	n.a.	n.a.	35,3
Flamme links, Ist-Zustand	1641	0,174	37,7
Feuer aus rechts, Unterschießen	1535	0,966	472
Flamme rechts, Unterschießen	1621	0,248	40,7
Flamme links, Unterschießen	n.a.	n.a.	40,4
Feuer rechts aus, Sekundärgas	1539	0,935	469
Flamme rechts, Sekundärgas	1684	0,189	35,5
Flamme links, Sekundärgas	n.a.	n.a.	44,0

Tabelle 2: Temperaturen und Emissionsvermögen von Flamme und Seitenwand berechnet aus den Spektren des Spektralradiometers.

Die Verbrennungsregelung der Wanne (kombinierte CO – NO_x – Regelung) war immer in Betrieb und gibt so auch schon nach der relativ kurzen Versuchszeit deutliche Hinweise auf das Langzeitverhalten der Wanne unter Versuchsbedingungen. Zusammenfassend lässt sich dabei sagen, dass sowohl das Unterschießen als auch das Sekundärgas zu keiner Erhöhung des NO_x-Gehalts im Abgas führten und dass eine Nachverbrennung in den Regeneratorkammern auf Grund der Restgehalte an CO mit all ihren Problemen für die Wärmerückgewinnungsanlage nicht zu befürchten ist.

Bild 4 verdeutlicht die veränderte Lage bzw. Länge der Verbrennungszone für den Basisfall (rotes Oval) im Vergleich zu den beiden Varianten Unterschießen und Sekundärgas (rotes und oranges Oval). Die Verlängerung der Verbrennungszone und die Rußbildung in der zweiten Flammehälfte konnte durch Videobeobachtung der Flammen ebenfalls dokumentiert werden.

In der gesamten Versuchszeit traten keine Störungen in der Produktion auf. Lediglich während des Unterschießens wurde die Bildung von Schaumstreifen vom Wannenföhrer nicht ausgeschlossen. Da im Fall des Unterschießens auch aus anderen Gründen die Anstellwinkel der einzelnen Lanzen bei zukünftigen Einsätzen leicht variiert werden müssen (Mitnahme der Gemengehaufen durch den Impuls des mittleren Gasstrahls) kann diese Reaktion in Zukunft vermutlich ausgeschlossen werden. Elektrochemische Betrachtungen legen außerdem nahe, dass die Schaumbildung, wenn überhaupt nur kurz auftritt, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen der Atmosphäre im Verbrennungsraum und der Glasschmelze einstellt. Eine entsprechende Anpassung des Sulfatgehalts im Gemenge reduziert die Schaumbildung ebenfalls deutlich. Der Hinweis des Wannenföhrers auf mögliche Schaumbildung macht jedoch deutlich, dass die Glaschemie bei diesen Maßnahmen berücksichtigt werden muss. Hier sollte die Simulationsrechnung eigentlich entsprechende Hinweise geben. Bisher sind die entsprechenden Modelle der TNO aber noch nicht gekoppelt.

Fall	kW/m ²	Anteil an Gesamtstrahlung
Ist-Zustand	86,5	15%
Unterschießen	124,5	21%
Sekundärgas	93,5	16%

Tabelle 3: Anteil der Mehrfachreflexion der Flammenstrahlung an der zur Verfügung stehenden Strahlungsenergie.

	Feuer	Restsauerstoff [%]	CO [mg/m ³] normiert auf 8% O ₂	NO _x [mg/m ³] normiert auf 8% O ₂	SO ₂ [mg/m ³] normiert auf 8% O ₂
Ist-Zustand	Rechts	2,5	29	527	719
	Links	2,3	30	572	718
Unter-schie-ßen	Rechts	2,3	55	gleich-bleibend Tendenz fallend	1047
	Links	2,3	70		964
Sekundär-gas	Rechts	2,9	64	deutlich geringer	730
	Links	2,8	55		794

Tabelle 4: Eckdaten der Abgase, abgesaugt im Kammerkopf, für alle drei Varianten im Vergleich nach ca. 5 Stunden Betrieb.

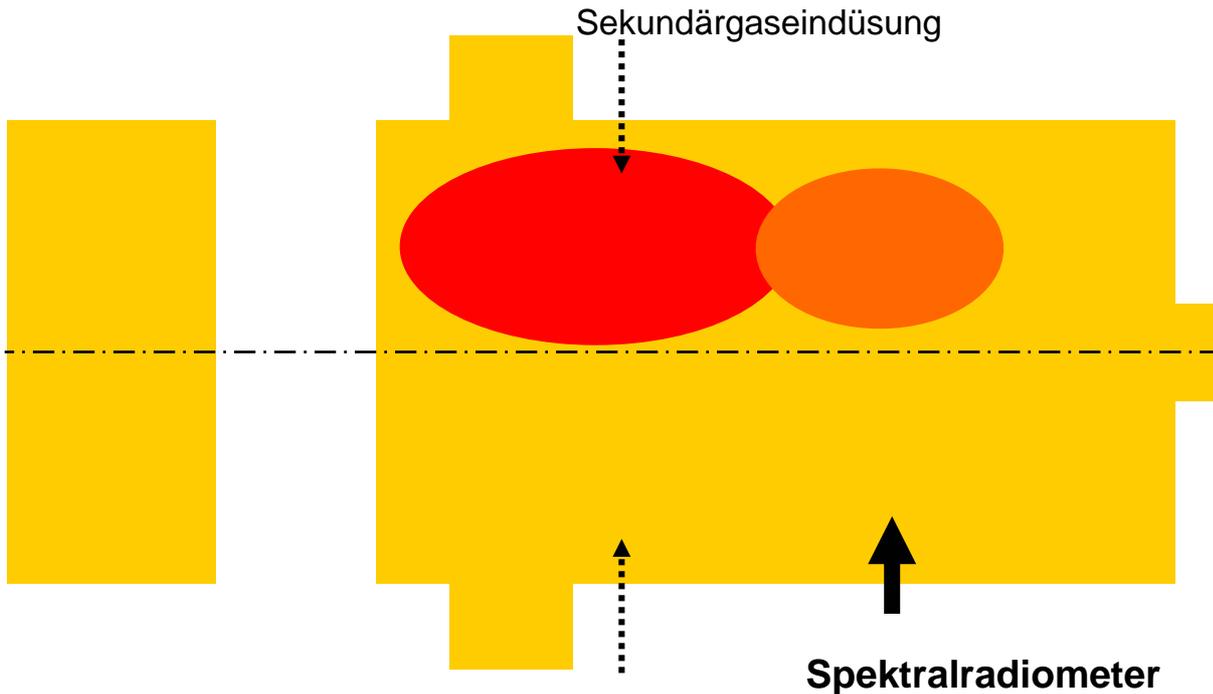


Bild 4: Skizze der Glasschmelzwanne mit Angabe des Messortes und dem Ort der Sekundärgaseindüsung sowie Markierung der Reaktionszone im Basisfall (rotes Oval) und in den beiden Varianten (rot + orange).

4. Zusammenfassung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Spektral“

Ziel des gemeinsamen Forschungsvorhabens von HVG und GWI ist es, bei regenerativ befeuerten U-Flammenwannen die Verbrennungsregelung mit bestehenden Systemen so zu verändern, dass der direkte Wärmeeintrag ins Glasbad in dem Bereich erhöht wird, in dem die Glasschmelze für das Erreichen einer guten Produktqualität diesen hohen Energieeintrag auch in der Badtiefe benötigt. Dazu wird die Verbrennungsregelung so verändert, dass die Verbrennungszone länger wird, rußende und damit strahlendere Teile der Flamme in Richtung Durchlass verlagert werden sowie eine Vergleichmäßigung der Flammentemperatur erreicht wird.

Berechnungen und Simulationen mit Reaktions- und einfachen Ofenmodellen sowie Versuche am Hochtemperaturofen des GWI erlaubten es, zwei vielversprechende Varianten zu identifizieren, die eine Umsetzung an einer produzierenden Glasschmelzanlage sinnvoll erscheinen lassen. Die Simulationsrechnung, basierend auf einer spektralen Betrachtungsweise des Energietransports in der gesamten Glasschmelzwanne (Verbrennungsraum und Glasschmelzbad) durch die TNO bestätigt die bis dahin erhaltenen Ergebnisse in ihren generellen Aussagen.

Die Umsetzung der bisherigen Untersuchungsergebnisse an einer Glasschmelzanlage in mehrstündigen Versuchen bestätigt alle Erwartungen. Sowohl das langsame Unterschließen mit mehr als 50% der benötigten Brennstoffmenge als auch die Sekundärgaseindüsung an der Oberofenseitenwand nach etwa 1/3 der Brennstrecke stellen an der Messstelle eine erhöhte Strahlungsenergie zur Verfügung. Das feuerfeste Material wird dabei

keiner zusätzlichen thermischen Belastung ausgesetzt. Die Zusammensetzung des Abgases zeigt eine leichte bis deutliche Verminderung an Stickoxiden wobei die Kohlenmonoxidbelastung der Regenerativkammern kaum ansteigt. Im praktischen Versuch zeigten sich bei jeweils 5 bis 6-stündigen Versuchen keine Produktionsprobleme.

Bei der Vorstellung der Ergebnisse im Fachausschuss II der DGG und auf Tagungen war die Resonanz der Glashersteller durchaus positiv. Mehrere Glasproduzenten zeigten Interesse diese Versuche fortzusetzen bzw. zu ergänzen und zur Einsatzreife zu bringen, wobei das Augenmerk je nach Ausgangssituation auf einem der beiden Fallstudien lag. Die bisherigen Versuche an der Glasschmelzwanne haben die grundsätzliche Tauglichkeit beider Konzepte bestätigt, zeigten jedoch auch das Verbesserungspotential auf. Die Anstellwinkel der einzelnen Lanzen müssen noch optimiert werden, die Abdichtung der Brennerdüse für die Sekundärgaseindüsung muss verbessert werden, die Aufteilung der Brennstoffströme auf die einzelnen Lanzen und die Gasgeschwindigkeiten müssen noch an die Wannenrandbedingungen angepasst werden. Generell ist zu sagen, dass die Versuche ein Erfolg waren und die Möglichkeiten von bestehenden Systemen aufgezeigt wurden, um durch eine gezielte Veränderung der Verbrennungsregelung ein optimales Zusammenspiel von Glasschmelze – Flamme und feuerfester Materialien zur Minimierung des Energieeinsatzes zu erreichen und die Qualität des Produktes sicherzustellen bzw. zu erhöhen.

*

Die Forschungsarbeiten wurden durchgeführt mit der freundlichen Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln, (AiF-Nr. 80ZN) und der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG), Offenbach am Main sowie dem Gaswärme Institut (GWI), Essen. Finanziert wurde das Projekt mit Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit, Berlin. Wir danken allen genannten Institutionen.

Außerdem danken HVG und GWI allen Firmen, die Messungen und die Durchführung von Versuchen an produzierenden Glasschmelzanlagen im Rahmen des Forschungsvorhabens ermöglichten. Insbesondere gilt es folgenden Personen Dank zu sagen: SAINT-GOBAIN OBERLAND AG, Wirges: Herrn Schumann; REXAM GLASS GERMANY GMBH, Wahlstedt: Herrn Barklage-Hilgefort, Herrn Teutsch, Herrn Schaper, Herrn Cieleback; SAINT-GOBAIN OBERLAND AG, Neuburg: Herrn Sprünken, Herrn Gawlik, Herrn Specht, Herrn Deisler.

