

Minderung der NO_x -Emission durch feuerungstechnische Maßnahmen¹⁾

Von Hansjürgen Barklage-Hilgefort, Frankfurt (Main)

(Mitteilung aus der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie, Frankfurt (Main))

(Eingegangen am 22. Oktober 1985)

An einer hochbelasteten erdgasbeheizten U-Flammenwanne zur Herstellung von weißem Hohlglas wurden gezielt Versuche zur Minderung der NO_x -Emission durch feuerungstechnische Maßnahmen durchgeführt. Folgende Parameter wurden in die Untersuchung einbezogen: Falschluff, Düsenbestückung der Brenner und Luft-/Brennstoffverhältnis. Zusätzlich wurde der Versuch

einer gestuften Verbrennung unternommen, wobei auf eine gestufte Brennstoffzufuhr übergegangen wurde. Die Reduzierung des Luftüberschusses bis hin zu einer nahstöchiometrischen Verbrennung ist die wirksamste Maßnahme zur Verringerung der NO_x -Emission; sie bringt jedoch nicht allein die angestrebte Minderung.

Decreasing NO_x emissions by means of combustion control

A series of experiments intended to decrease NO_x emissions by combustion control were made on a heavily pulled natural gas fired horseshoe flame furnace. The following parameters were involved in the investigation: secondary air, nozzle arrangement of the burners and fuel/air ratio. In addition an investigation of

stepwise combustion was undertaken in which a stepwise fuel increase was maintained. Decrease in the excess air down to almost stoichiometric combustion is the most effective way to decrease NO_x emission but, by itself, does not produce the desired reduction.

Diminution de l'émission de NO_x au moyen de techniques propres aux thermiciens

Des essais appropriés ont été faits dans un four à boucle chauffé au gaz naturel fortement chargé produisant du verre creux blanc, pour diminuer l'émission de NO_x , et cela en adoptant des techniques propres aux thermiciens. Les paramètres suivants ont été pris en compte: rentrée d'air, garnissage des brûleurs-injecteurs et rapport combustible/air. On a en plus fait l'essai d'une

combustion progressive en passant à une alimentation en combustible progressive. La réduction de l'air en excès jusqu'à une combustion presque stoechiométrique, constitue la mesure la plus efficace pour réduire l'émission de NO_x ; toutefois, elle n'apporte pas uniquement la diminution désirée.

1. Einleitung

Die allgemein üblichen hohen Betriebstemperaturen von Glasschmelzwannen in der Größenordnung von etwa 1580 °C bringen es mit sich, daß bei brennstoffbeheizten Anlagen begleitend zum eigentlichen Verbrennungsprozeß in erheblichem Umfang thermisches NO gebildet wird [1]. Der Stickstoffgehalt des Brennstoffs spielt hierbei nur eine untergeordnete Rolle. Bei Einsatz von Salpeter findet man darüber hinaus entsprechend hohe Mengen von NO_2 im Abgas.

Auch bei nachgeschalteten Minderungsanlagen, in denen z. B. eine katalytische oder nichtkatalytische Reduktion von NO_x mit Ammoniak stattfindet, kann die Verringerung der NO_x -Konzentration im Abgas durch feuerungstechnische Maßnahmen lohnend sein, da auf diese Weise die Aufwendungen für die nachgeschaltete Reduktion entsprechend geringer ausfallen.

Bei den in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Untersuchungen wurden die folgenden Parameter im

Hinblick auf ihren Einfluß auf die NO_x -Emission von Glasschmelzöfen geprüft: 1. Falschluff, 2. Düsenbestückung der Brennstoffanlagen, 3. Luft-/Brennstoffverhältnis und 4. gestufte Verbrennung (brennstoffseitig).

2. Durchführung der Messungen

Bei der untersuchten Glasschmelzwanne handelte es sich um eine regenerativ mit Erdgas L beheizte U-Flammenwanne mit einer spezifischen Belastung von 3,1 bis 3,6 t Glas/(m² d). Die Lastschwankungen wurden über die Elektrozusatzheizung abgefangen, so daß die Brennstoffmenge praktisch konstant blieb.

Die Messung der Abgaszusammensetzung erfolgte mit Infrarotabsorptionsmeßgeräten (CO_2 , CO , NO_x) und einem Magnosgerät (O_2), wie sie in [2] beschrieben sind.

Das Meßgas für die kontinuierliche Messung von O_2 , SO_2 , CO und NO_x wurde sowohl aus dem Kaminkanal wie auch aus dem abziehenden Kammerkopf entnommen. Bei der Probenahme im Kaminkanal wurde eine Entnahmesonde mit beheizter Teflon-Meßgasleitung benutzt. Bei der Probenahme im Kammerkopf wurden wassergekühlte Sonden

¹⁾ Vortrag auf dem HVG-Kolloquium über Emissionen von Glasschmelzöfen, Minderungstechnologien, am 13. November 1984 in Frankfurt (Main).

Tabelle 1. Abgaszusammensetzung im Ausgangsbetriebszustand; Probenahme im Kaminkanal

	Feuerstellung links	Feuerstellung rechts	Mittelwert	normiert auf	
				8 % O ₂	10 % O ₂
O ₂ in %	4,4	4,5	4,45	—	—
CO ₂ in %	13,4	13,5	13,45	10,5	8,9
CO in ppm (in mg/m ³ Abgas)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
SO ₂ in ppm (in mg/m ³ Abgas)	353 (1008)	352 (1005)	352,5 (1005)	276,9 (790,6)	234,3 (669,0)
NO in ppm (in mg/m ³ Abgas)	1610 (2155)	1830 (2449)	1720 (2302)	1351,1 (1808)	1143,2 (1530)
NO ₂ in ppm (in mg/m ³ Abgas)	60 (123,1)	80 (164,2)	70 (143,7)	55,0 (112,9)	46,5 (95,4)

Tabelle 2. Temperaturen (in °C) von Abgas und Luft über der Gitterung, gemessen mit dem Absaugethermoelement

	Abgas	Luft
rechts	1480	1351
links	1509	1384

und als Meßgasleitung ein PVC-Schlauch verwendet, so daß mit Sicherheit der Taupunkt unterschritten wurde. Diese Messung diente jedoch nur zur gezielten Überprüfung der Bildung von CO bei luftarmen Betriebszuständen, da, wie sich später auch zeigte, eine Nachverbrennung von CO zu CO₂ in den Regeneratoren schon durch angesaugte Falschlufteile nicht auszuschließen ist. Insgesamt wurde durch die doppelte Entnahme eine Überwachung des Emissionsverhaltens und des feuerungstechnischen Verhaltens der Anlage ermöglicht. Die Meßgase wurden in einem elektrischen Meßgaskühler mit nachgeschalteter Kondensationsstufe und Feinfilter konditioniert.

Die Bildung von thermischem NO in Verbrennungsprozessen hängt stark von den Flammentemperaturen ab, die von den Luftvorwärmtemperaturen mitbestimmt werden. Zur Festlegung des Ausgangszustandes der Anlage wurden daher auch die Abgas-eintrittstemperatur in die Regeneratoren und die Luftvorwärmtemperatur in beiden Kammerköpfen gemessen. Die Messung erfolgte mit einem wassergekühlten Metallabsaugepyrometer, das mit einem keramischen Strahlungsschutzstein und einem Pt-18-Thermolement bestückt war.

3. Ergebnisse

3.1. Charakterisierung der Ausgangssituation

Erfahrungsgemäß hängt die NO_x-Konzentration in den Abgasen von Glasschmelzöfen von einer Vielzahl von Parametern ab, so daß eine eindeutige Vorhersage nach dem derzeitigen Kenntnisstand nur

bedingt möglich ist. Neben der Brennstoffart und der hohen Prozeßtemperatur spielt offensichtlich eine Vielzahl einzelner Parameter eine Rolle, deren quantitative Auswirkungen im Einzelfall jedoch nicht festgelegt werden können. Zu Beginn der Messung wurde die in Tabelle 1 wiedergegebene Abgaszusammensetzung vorgefunden. Die darin angegebenen Daten, insbesondere für die NO-Emission, entsprechen den für erdgasbeheizte Regenerativanlagen erwarteten hohen Werten. Beobachtet wird weiterhin ein Unterschied in der NO-Konzentration zwischen rechter und linker Feuerstellung. Bei Feuer rechts ergeben sich deutlich höhere NO-Konzentrationen als bei Feuerstellung links. Als eine Ursache hierfür kann der Einlegevorbau, der sich auf der rechten Seite der Wanne (in Fließrichtung des Glases gesehen) befindet, angegeben werden. Durch die Einlegeöffnung werden offensichtlich Falschlufteile angesaugt, die direkt für einen erhöhten Sauerstoffüberschuß in der Reaktionszone der Flamme sorgen. Bei Feuerstellung links kann zwar ebenfalls ein Falschlufteile durch den Einlegevorbau angesaugt werden, der dann jedoch in die größtenteils ausreagierten Abgase eingemischt wird und somit nicht an der eigentlichen Verbrennungsreaktion teilnimmt.

Tabelle 2 gibt die Temperaturen von Abgas und Luft über der Gitterung wieder. Die Temperaturen wurden mit dem Absaugepyrometer jeweils über drei bis vier Feuerperioden hinweg gemessen. Aus der Schreiberkurve wurde jeweils der Wert für die Mitte der Periode entnommen und aus mehreren Werten dann ein Mittelwert gebildet.

3.2. Falschlufteinfluß

Unter Falschlufft ist hier insbesondere die im Bereich der Düsensteine von dem in den Ofen eintretenden Gasstrahl angesaugte Falschlufft gemeint. Hier bildet sich eine Art Ringspalt, der zusammen mit dem Gasstrahl wie eine Strahlpumpe wirkt. Die so angesaugten Falschlufftmengen sind

Tabelle 3. Einfluß der Abdichtung des Übergangs Brennstofflanze/Düsenstein auf die Abgaszusammensetzung

Feuerstellung:	Ausgangszustand		Düsenstein abgedichtet		Luftmenge gedrosselt	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
O ₂ in %	3,8	4,3	2,2 ²⁾	3,7	1,8	1,9
CO ₂ in %	14,2	13,7	15,2 ²⁾	14,1	15,8	15,5
CO in ppm	0	0	≈ 100 ²⁾	0	≈ 50	750 bis 1500
SO ₂ in ppm	380	360	—	420	—	1900
NO _x in ppm	1750	1750	1450 ²⁾	1280	850	700

²⁾ Messung im Kammerkopf.

nicht unerheblich, so daß in einem Versuch durch Abdichten des erwähnten Ringspalts das Ansaugen von Falschlufft auf diesem Wege verhindert wurde. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Es ergab sich ein sehr ungünstiges Flammenbild, es wurden starke Rückstromwalzen im Bereich der Brennerbank beobachtet. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß nach Abdichtung der Düsensteine wahrscheinlich eine Korrektur der Primärluftansaugdüsen erfolgen müßte, um das ursprüngliche Flammenbild wieder herzustellen. Mit einiger Sicherheit kann davon ausgegangen werden, daß hierdurch auch die ursprüngliche NO_x-Konzentration wieder hergestellt wird. Der Einfluß der Drosselung der Luftmenge ist erheblich, jedoch werden teilweise erhebliche CO-Mengen im Kaminkanal gemessen, so daß der hier dokumentierte Zustand bereits aus dieser Sicht nicht tragbar ist.

Durch die Wahl des Herdraumdrucksollwertes kann in erheblichem Maße das Eintreten von Falschlufft in den Oberofen beeinflusst werden. Die im Bereich des Düsensteins eintretende Falschlufft bleibt davon unberührt. Wesentlich stärker vom Herdraumdruck beeinflusst ist dagegen die durch den Einlegevorbau und durch Schauöffnungen eindringende Falschlufft. Durch Anheben des Ofenraumdrucks kann die auf diesem Weg zutretende Falschlufft ganz erheblich gedrosselt werden. In einem Versuch wurde der Herdraumdruck von 2 auf 8 Pa angehoben. Erwartungsgemäß wurde bei 8 Pa ein starkes Herausdrücken aus dem Einlegevorbau beobachtet. Wegen starker Verstaubungsgefahr ist eine solche Fahrweise daher nur bei einem sehr gut abgedichteten Dog House möglich, was jedoch einen erheblichen Wartungsaufwand mit sich bringt. Tabelle 4 gibt die bei diesem Versuch gemessenen Abgaszusammensetzungen wieder. In beiden Fällen wurde die Abgaszusammensetzung im abziehenden Kammerkopf ermittelt. Wegen der hierzu notwendigen wassergekühlten Sonden fehlen daher auch die Angaben für die SO₂-Konzentration.

Die Sauerstoffkonzentrationen zeigen im Vergleich für 2 und 8 Pa, daß die durch den Einlegevorbau angesaugte Falschlufftmenge offensichtlich erheblich ist. Die Sauerstoffkonzentration geht ins-

Tabelle 4. Einfluß des Herdraumdrucks auf die Abgaszusammensetzung (Messung im Kammerkopf)

Feuerstellung:	2 Pa		8 Pa	
	links	rechts	links	rechts
O ₂ in %	3,3	3,3	2,4	2,3
CO ₂ in %	14,5	14,6	15,2	15,5
CO in ppm	50	75	70	90
SO ₂ in ppm	—	—	—	—
NO _x in ppm	1750	2100	1750	1700

gesamt um etwa 1 % bei beiden Feuerstellungen zurück. Auf den ersten Blick überraschend ist dagegen die Entwicklung der NO_x-Konzentration bei Anhebung des Ofenraumdrucks von 2 auf 8 Pa. Während bei Feuerstellung links überhaupt keine Veränderung der NO_x-Konzentration beobachtet wird, geht diese bei Feuerstellung rechts von 2100 auf 1700 ppm zurück. Es liegt der Schluß nahe, daß nicht die Falschlufftmenge allein, sondern auch der Ort des Falschlufftzutritts einen Einfluß auf die NO_x-Bildung hat. Bei Feuerstellung rechts wird die durch den Einlegevorbau angesaugte Falschlufft direkt in die reagierenden Flammzonen eingemischt. Hierauf können die bei Feuerstellung rechts vorgefundenen höheren NO_x-Werte ohne weiteres zurückgeführt werden. Bei Feuerstellung links dagegen wird die Falschlufft in die ausreagierten Flammgase eingemischt, es findet lediglich eine Verdünnung statt und keine Beeinflussung der eigentlichen Verbrennungsreaktion.

3.3. Primärluft

Die Brennstofflanzen des Typs Jet II der Firma Körtling sind sehr verbreitet und können als Standardausrüstung für erdgasbefeuerte Anlagen bezeichnet werden. Kennzeichnend ist für diese Brennstofflanzen, daß mittels eines Injektors aus der Umgebung Luft angesaugt und mit dem Brennstoff vermischt wird, bevor dieser endgültig in den Ofenraum eintritt. Bestimmend für das Verhalten einer Brennstofflanze bezüglich Impuls und angesaugtem Primärluftanteil ist die Kombination aus Treibdüse, Ansaugdüse und Austrittsdüse. Der Durchmesser der Ansaugdüse bestimmt entscheidend die Menge

Tabelle 5. Einfluß der Größe des Durchmessers der Primärluftansaugdüse auf die NO_x-Emission

Feuerstellung:	Düse (22 mm Durchmesser) Ausgangszustand		Düse geschlossen			
			Verkleinern des Düsendurchmessers von 22 auf 15 mm (gleichzeitig verringertes Luft-/Brennstoffverhältnis)			
			Düsendurchmesser 22 mm		Düsendurchmesser 15 mm	
	rechts	rechts	links	rechts	links	rechts
O ₂ in %	4,7	4,2	2,5	2,3	2,4	2,2
CO ₂ in %	13,2	13,8	15,2	15,2	15,0	15,2
CO in ppm	0	0	0	10	0	400 bis 500
SO ₂ in ppm	290	340	350	200	400	480
NO _x in ppm	1680	1180	870	1050	895	850

Tabelle 6. Einfluß des Durchmessers der Austrittsdüsen auf die Abgaszusammensetzung; Feuerstellung links

	Düsen- durchmesser 41,5 mm	Düsen- durchmesser 53 mm
O ₂ in %	4,4	4,6
CO ₂ in %	13,4	13,4
CO in ppm	0	0
SO ₂ in ppm	345	340
NO _x in ppm	1800	1700

der angesaugten Primärluft. In einem Versuch wurden die Primärluftdüsen verschlossen, in einem weiteren Versuch die Primärluftdüsen ausgetauscht.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Tabelle 5 zusammengefaßt. Zunächst sind die Auswirkungen des Verschließens der Düse wiedergegeben. Alle anderen Einstellungen des Ofens blieben unverändert. Bereits die Abnahme des Sauerstoffgehaltes im Abgas von 4,7 auf 4,2 % zeigt, daß der Primärluftanteil einen ganz erheblichen Anteil der Gesamtluft ausmacht. Die NO_x-Konzentration verringert sich um ein gutes Drittel von 1680 auf 1180 ppm. Es muß angemerkt werden, daß durch das Verschließen der Primärluftdüsen, wie beim Abdichten des Düsensteins, sich das Flammenbild sehr unvorteilhaft veränderte. Die Flamme brannte insgesamt sehr unruhig; darüber hinaus wurden über der Brennerbank starke Rückströmungen beobachtet, so daß eine derartige Fahrweise auf die Dauer nicht tragbar erscheint. In einem weiteren Versuch wurde daher der Durchmesser der Ansaugdüse von 22 auf 15 mm verkleinert. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind ebenfalls in Tabelle 5 wiedergegeben. Gleichzeitig wurde bei diesem Versuch bereits das Luft-/Brennstoffverhältnis soweit gedrosselt, daß im Kaminkanal nur noch Sauerstoffkonzentrationen von 2,2 bis 2,5 % vorgefunden wurden. Das Ergebnis dieses Versuchs ist auf den ersten Blick widersprüchlich. Auf der linken Feuerseite ergibt sich eine Zunahme um etwa 25 ppm, auf der rechten Seite dagegen eine Abnahme von 1050 auf 850 ppm. Gleichzeitig steigt

jedoch auf der rechten Seite die CO-Konzentration im Abgas von etwa 10 ppm auf Werte zwischen 400 und 500 ppm. Da, wie bereits in Abschnitt 3.1. im einzelnen erläutert wurde, die durch den Einlegevorbau angesaugte Luft einen erheblichen Einfluß auf die NO_x-Konzentration im Abgas hat, ist zu vermuten, daß hier bei der Feuerstellung rechts durch Verkleinern des Durchmessers der Primärluftansaugdüse der Einfluß der durch den Einlegevorbau angesaugten Luft zumindest teilweise kompensiert wurde. Die Sauerstoffkonzentrationen in Tabelle 5 zeigen, daß durch Verkleinern des Durchmessers der Primärluftansaugdüse die gesamte dem Ofen zugeführte Luftmenge bereits verringert wird. Jedoch zeigt sich auch, daß der Einfluß dieser Maßnahme auf die NO_x-Konzentration im Abgas nur mäßig bleibt, solange eine saubere Verbrennung aufrecht erhalten wird. Dies wird deutlich belegt durch die Ergebnisse der Feuerstellung links.

3.4. Austrittsdüsen der Brennstoffflanzen

Bei vorgegebener Brennstoffmenge werden durch den Durchmesser der Austrittsdüsen der Mischimpuls des Brennstoffs und damit die Ausbrandgeschwindigkeit der Flamme beeinflusst. Es ist daher denkbar, daß durch eine Vergrößerung des Durchmessers der Austrittsdüsen wegen des geringen Impulses eine Absenkung der Flammenspitzen temperaturen erfolgt, die ihrerseits eine niedrige NO_x-Emission bewirkt. In einem kurzen Versuch wurden an Stelle der vorhandenen Düsen mit 41,5 mm solche mit 53 mm Durchmesser eingesetzt. Die Ergebnisse dieses Versuches sind in Tabelle 6 wiedergegeben.

Bei sonst ähnlicher Zusammensetzung des Abgases, insbesondere was die Sauerstoffkonzentration angeht, wird eine geringfügige Reduzierung der NO_x-Emission auf Werte um 1700 ppm erzielt. Insgesamt ist dieser Effekt allerdings recht klein.

Durch Vergrößerung des Durchmessers der Austrittsdüsen ist nur eine mäßige Verringerung der NO_x-Emissionen zu erreichen. Nennenswerte Veränderungen des Flammenbildes wurden nicht festgestellt.

3.5. Einstellung nahstöchiometrischer Verbrennungsbedingungen

Aus bisherigen Messungen ist bekannt, daß das Luft-/Brennstoffverhältnis einen erheblichen Einfluß auf die NO_x-Konzentration in dem den Ofen verlassenden Abgas hat. Die Reduzierung der Luftmenge ist jedoch nur in gewissen Grenzen möglich. Abhängig vom Mischungsverhalten der Brenner wird bei einem zu geringen Luft-/Brennstoffverhältnis CO im Abgas gefunden. Es besteht dann die Gefahr reduzierender Bedingungen im Oberofen, die unter Umständen eine schlechtere Glasqualität (Blasen, Gispfen, Farbänderungen durch veränderte Oxidationszustände) zur Folge haben können. Ziel der hier geschilderten Untersuchungen war zu klären, bis zu welchen Grenzen vorgestoßen werden kann. Hierzu wurde in mehreren Versuchen eine nahstöchiometrische Flammeneinstellung ermittelt, die dann für einen Tag aufrecht erhalten wurde.

Tabelle 7 gibt einen Vergleich zwischen den im Kammerkopf mit der wassergekühlten Sonde und den im Kaminkanal erhaltenen Werte. Die Sauerstoffkonzentration im Kaminkanal ist auf Grund von Undichtigkeiten um 1,3 % höher als im Kammerkopf. Entsprechend macht sich die Verdünnung durch Falschluf in der CO₂-Konzentration bemerkbar. Bei der Messung der NO_x-Konzentration ist dieser Effekt nicht zu beobachten, jedoch ist festzuhalten, daß das NO_x-Signal ohnehin einem sehr starken „Rauschen“ unterworfen war. Auffallend ist das Verhalten der CO-Konzentration: Während im Kammerkopf mit 100 bis 400 ppm ein zwar stark schwankendes, aber doch recht hohes CO-Signal vorgefunden wurde, nimmt dieses bei der Messung im Kaminkanal auf Werte um 10 ppm ab. Durch den über Undichtigkeiten eintretenden Sauerstoff wird also das den Ofenraum verlassende CO auf dem Weg durch die Regeneratoren zu CO₂ oxidiert.

Tabelle 8 gibt für beide Feuerstellungen die Abgaszusammensetzung für jeweils acht Wechsel wieder. Die hierbei gefahrene Luft-/Brennstoffeinstellung dürfte für die untersuchte Anlage das absolute Minimum darstellen. Es bestehen auffällige Unterschiede zwischen Feuerstellung links und Feuerstellung rechts. Bei Feuerstellung links werden im Mittel etwa 10 % höhere NO_x-Konzentrationen vorgefunden als bei Feuerstellung rechts. Die Unterschiede in der Sauerstoffkonzentration sind vergleichsweise gering, so daß die Sauerstoffkonzentration in diesem Bereich nicht mehr als zuverlässiger Indikator für eine gute Ofeneinstellung gelten kann. Dies zeigt sich eindrucksvoll im Verhalten der CO- und SO₂-Konzentration: Während bei Feuerstellung links kein CO nachgewiesen werden konnte, traten bei Feuerstellung rechts deutliche CO-Peaks in der Größenordnung bis zu über 500 ppm auf. Diese CO-Peaks wurden von entsprechenden SO₂-Peaks begleitet.

Tabelle 7. Vergleich zwischen den Meßwerten im Kammerkopf und Kaminkanal (Feuerstellung links)

	Kammerkopf	Kaminkanal
O ₂ in %	0,5	1,8
CO ₂ in %	16,6	15,5
CO in ppm	100 bis 400	10
SO ₂ in ppm	–	450
NO _x in ppm	880	880

Tabelle 8. Abgaszusammensetzung bei nahstöchiometrischer Fahrweise (Messung im Kaminkanal)

O ₂ in %	CO ₂ in %	CO in ppm	SO ₂ in ppm	NO _x in ppm
Feuerstellung links				
2,4	15,0	0	450	750
2,6	14,8	0	400	950
2,6	14,5	0	400	930
2,5	14,5	0	380	920
2,4	14,8	0	390	900
2,5	14,5	0	410	900
2,5	14,5	0	380	900
2,5	14,5	0	400	890
2,5 ³⁾	14,75 ³⁾	0 ³⁾	401 ³⁾	892,5 ³⁾
Feuerstellung rechts				
2,6	14,5	(< 500)	350 (580)	800
2,4	14,8	(< 500)	400 (780)	850
2,3	14,5	(< 750)	450 (740)	800
2,4	14,4	(< 400)	420 (680)	840
2,4	14,8	(< 250)	450 (600)	750
2,4	14,5	(< 400)	400 (1100)	800
2,4	14,8	(< 500)	400 (600)	840
2,5	14,5	(< 250)	400 (520)	850
2,43 ³⁾	14,6 ³⁾	(< 400 ³⁾)	409 (700 ³⁾)	816 ³⁾

³⁾ Mittelwerte. (): Spitzenwerte kurzer Dauer.

Gleichzeitig mit dem Auftreten der CO- und SO₂-Peaks nahm die NO_x-Konzentration ab. Insgesamt ergab sich bei dieser Luft-/Brennstoffverhältnisseinstellung bei Feuerstellung rechts ein sehr instabiles Verhalten der Anlage. Die weitere Reduzierung des Luft-/Brennstoffverhältnisses führte zu einem rapiden Anstieg der SO₂-Konzentration bis zu weit über 1000 ppm. Ausführliche Messungen wurden bei dieser mit Sicherheit zu knappen Lufteinstellung nicht gemacht, da hier eine Verschlechterung des Produktionsergebnisses zu erwarten wäre. Sollte man sich also zu einer luftarmen Fahrweise, wie sie in Tabelle 8 dokumentiert wird, entschließen, so sind die folgenden beiden Punkte zu beachten:

a) Die Einstellung des Ofens setzt die genaue Messung der Abgaszusammensetzung voraus. Die Sauerstoffkonzentration kann, wie Tabelle 8 zeigt, nicht mehr als Leitgröße für die Wahl des Luft-/Brennstoffverhältnisses dienen. Vielmehr müssen die CO-Konzentration und, zumindest im Falle der Sulfatläuterung, die SO₂-Konzentration genau kontrolliert werden.

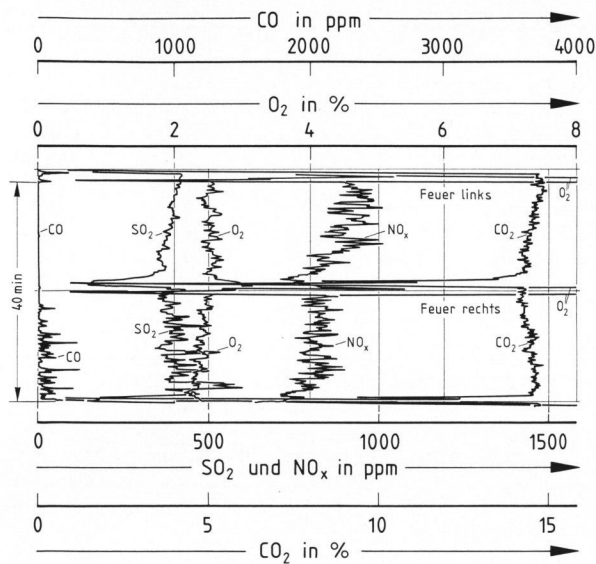


Bild 1. Zeitlicher Verlauf der Konzentrationen von O_2 , CO_2 , CO , SO_2 und NO_x .

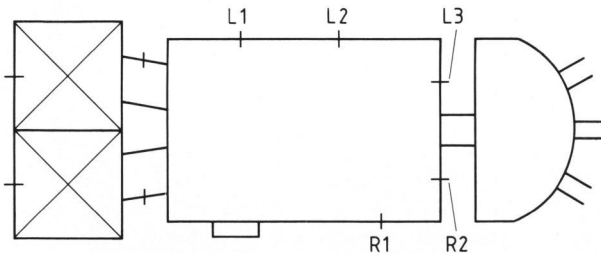


Bild 2. Schematischer Grundriß der Schmelzwanne mit Lage der Schaulöcher (rechts: R1, R2; links: L1, L2, L3).

b) Bei einer sehr knappen Lufteinstellung wirken sich Unterschiede im Verhalten der Anlage bei den beiden Feuerstellungen im Hinblick auf die CO - und SO_2 -Konzentration relativ stark aus. Während bei dem in Tabelle 8 dokumentierten Zustand bei Feuerstellung links eine geringfügige Drosselung des Luft-/Brennstoffverhältnisses und damit auch der NO_x -Bildung noch denkbar gewesen wäre, schien der kritische Punkt bei Feuerstellung rechts bereits überschritten zu sein. Es ist daher angebracht, für beide Feuerstellungen einen eigenen Sollwertgeber für die Luft-/Brennstoffverhältnisregelung vorzusehen.

Bild 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Konzentrationen der einzelnen Abgaskomponenten für beide Feuerstellungen für jeweils einen Wechsel. Während bei Feuerstellung links für CO und SO_2 ein relativ ruhiger Schrieb erhalten wird, ist dieser für Feuerstellung rechts sehr unruhig.

3.6. Einfluß des Eindüsens von Brennstoff in den Oberofenbereich

Im Kraftwerksbereich wird bereits seit geraumer Zeit mit teilweise großem Erfolg eine gestufte Verbrennung zur Reduzierung der NO_x -Emission

eingesetzt. Die gestufte Verbrennung erfolgt in diesem Bereich in der Weise, daß die Luft in verschiedene Teilströme aufgeteilt und gestuft dem Verbrennungsprozeß, entsprechend dem Ablauf der Verbrennung, zugeführt wird. Hierdurch wird der Ausbrand zeitlich verzögert, und die Flammenspitzentemperaturen werden erheblich gedrosselt. An Regenerativwanne ist eine derartige Vorgehensweise nicht durchführbar. Eine andere Möglichkeit ist jedoch, den Brennstoff gestuft, d. h., an verschiedenen Stellen, der Brennstrecke zuzuführen. Auf diese Weise wird zwar nicht das Sauerstoffangebot in den einzelnen Zonen der Flamme reduziert, jedoch werden die Flammenspitzentemperaturen durch das geringe Brennstoffangebot ebenfalls gedrosselt. Durch die verschiedenen in Bild 2 angegebenen Schaulöcher wurde mit wassergekühlten Lanzen, deren Austrittsöffnung durch einschraubbare Einsätze von 5 bis 24 mm Durchmesser variiert werden konnte, dem Oberofen Erdgas zugeführt. Gleichzeitig mit dieser Maßnahme wurde teilweise das Luft-/Brennstoffverhältnis gedrosselt.

Bei der seitlichen Zuführung von Brennstoff in den Ofenraum ist eine grobe Einteilung in zwei Gruppen möglich: In einem Fall wird der Brennstoff seitlich auf der befeuerten Seite zugeführt, im anderen Falle auf der Abgasseite der Wanne. Bei Brennstoffzugabe auf der befeuerten Seite konnte eine nennenswerte Verringerung der NO_x -Konzentration nicht nachgewiesen werden. Bei der Zugabe auf der Abgasseite wurde dagegen ein starker Einfluß des Ortes der Zugabe gefunden. Wenn bei Feuerstellung rechts der Brennstoff durch das Schauloch gegenüber vom Einlegevorbau (L1 in Bild 2) zugeführt wurde, ergab sich eine Minderung der NO_x -Konzentration von etwa 15 %, wenn etwa 15 % des gesamten Brennstoffs auf diesem Wege zugeführt wurden. Voraussetzung war weiterhin, daß der seitlich zugeführte Brennstoff mit einem so großen Impuls eingedüst wurde, daß die gegenüberliegende, befeuerte Seite erreicht wurde.

Zu allen Versuchen, die mit der Zufuhr von Brennstoff direkt in den Ofen über zusätzliche Lanzen gemacht wurden, muß angemerkt werden, daß offensichtlich der Brennstoffanteil, der über die Hilfslanze geleitet wurde, insgesamt zu gering war. Die hier angegebenen Mengen konnten jedoch auf Grund der Druckverhältnisse und der Leitungsquerschnitte nicht überschritten werden. Denkbar ist, daß bei Steigerung der Brennstoffmenge, die durch die Zusatzlanze geleitet wird, auf ein Drittel der gesamten Brennstoffmenge oder mehr die teilweise sehr schwachen Auswirkungen auf die NO_x -Konzentration größer werden können. Ungeachtet der offensichtlich meist zu niedrigen Brennstoffmengen auf der Zusatzlanze bleibt anzumerken, daß eine negative Beeinflussung des Schmelzbildes, d. h. der Gemengelage auf der Badoberfläche, in keinem Falle beobachtet wurde. Negative Auswirkungen auf das

Produktionsergebnis durch eine Verlagerung der Brennstoffzufuhr sind zumindest auf Grund der hier diskutierten Beobachtungen nicht zu erwarten.

4. Zusammenfassung

Die Versuche zur Verringerung der NO_x-Bildung durch feuerungstechnische Maßnahmen zeigen, daß die Verringerung des Luft-/Brennstoffverhältnisses von allen untersuchten Möglichkeiten die wirksamste Maßnahme ist. Die Grenzen sind hierbei durch zu stark reduzierende Bedingungen gegeben, die einen rapiden Anstieg der CO- und SO₂-Konzentration bewirken. Negative Auswirkungen auf die Glasqualität sind bei weiter verringertem Luftüberschuß mit einiger Sicherheit zu erwarten. Die entsprechenden NO_x-Konzentrationen liegen in der Größenordnung von 800 bis 900 ppm, wobei diese Aussage nach dem derzeitigen Kenntnisstand auf die untersuchte Anlage beschränkt werden muß. Die Versuche, durch eine seitliche Brennstoffzufuhr in den Oberofen eine Art gestufte Verbrennung einzustellen, zeigen, daß im gegebenen Rahmen die hierbei erzielte Verringerung

der NO_x-Bildung relativ bescheiden ist. Mehr Erfolg ist zu erwarten, wenn die seitlich zugeführten Brennstoffmengen erheblich, d. h., auf etwa ein Drittel der Gesamt-Brennstoffmenge, gesteigert werden können. Eine Abhängigkeit vom Ort der Brennstoffzufuhr ist mit Sicherheit gegeben. Vorteilhafter erscheint nach dem hier ermittelten Kenntnisstand bei U-Flammenwannen die Zufuhr von Brennstoff auf der passiven Seite und nicht auf der befeuerten Seite.

Der Autor dankt den Herren K. W. Mergler und H. Müller-Simon für die Hilfe bei der Durchführung der Messungen. Dem Betreiber der untersuchten Glasschmelzwanne gilt der Dank für die Bereitstellung des Aggregates und das Entgegenkommen sowie die Hilfsbereitschaft bei der Versuchsdurchführung.

5. Literatur

- [1] Michelfelder, S.: Prozeßtechnische Maßnahmen zur Minderung der Stickstoffoxidemission von Feuerungen. Glastech. Ber. 51 (1978) Nr. 7, S. 167–175.
- [2] Kircher, U.: Staub- und Schadgasemissionen von Glasschmelzwannen. Glastech. Ber. 51 (1978) Nr. 6, S. 139–146.

85R1548