



Publikationen des Umweltbundesamtes

BVT-Festlegung in ausgewählten industriellen Bereichen als Beitrag zur Erfüllung der Klimaschutzziele und weiterer Immissionsschutzrechtlicher Anforderungen - Teilvorhaben 02: Erarbeitung eines deutschen Beitrages zur Revision des BVT-Merkblattes für die Glas- und Mineralfaserindustrie

Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes EuE-Vorhaben 205 44 324/02

Karlheinz Gitzhofer

Februar 2007



**HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG
DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE E. V.**

Die Messstelle der
HVG
ist von der DACH
nach DIN EN
ISO/IEC 17025:2005
akkreditiert



Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes zum Globalvorhaben:
BVT-Festlegung in ausgewählten industriellen Bereichen als Beitrag zur Erfüllung
der Klimaschutzziele und weiterer immissionsschutzrechtlicher Anforderungen

Schlussbericht

Förderkennzeichen: 205 44 324/02

**Teilvorhaben 02:
Erarbeitung eines deutschen Beitrages zur Revision des BVT-
Merkblattes für die Glas- und Mineraldärfaserindustrie**

Dipl.- Ing. Karlheinz Gitzhofer

Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V. (HVG)
Offenbach am Main

Geschäftsführer: Dr.- Ing. U. Roger

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Februar 2007

Berichts-Kennblatt

| | | |
|--|--|---|
| 1. Berichtsnummer UBA-FB | 2. | 3. |
| 4. Titel des Berichts Erarbeitung eines deutschen Beitrages zur Revision des BVT-Merkblattes für die Glas- und Mineralfaserindustrie | | |
| 5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Gitzhofer, Karlheinz | 8. Abschlussdatum Februar 2007 | 9. Veröffentlichungsdatum |
| 6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V. (HVG) Siemensstraße 45 63071 Offenbach am Main | 10. UFOPLAN-Nr. FKZ: 205 44 324/02 | 11. Seitenzahl 134 |
| 7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 1406, 06813 Dessau | 12. Literaturangaben 7 | 13. Tabellen und Diagramme nicht nummeriert |
| 15. Zusätzliche Angaben | 14. Abbildungen nicht nummeriert | |
| 16. Kurzfassung Die verschiedenen Branchen der Glasindustrie, wie Behälterglas, Flachglas, Spezialglas, Wirtschaftsglas, Glasfasern bzw. Mineralwolle unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der angewandten Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien. Aus diesem Grund bedarf es einer spezifischen Betrachtung der einzelnen Sparten, um den Stand der Technik und neuere Entwicklungen im Umweltschutz zu recherchieren und zu dokumentieren. In Abstimmung mit dem UBA wurden 16 Referenzanlagen ausgewählt, zum Teil gemeinsam mit Vertretern des Umweltbundesamtes durch Betriebsbesichtigungen in Augenschein genommen und sowohl unter technischen Aspekten als auch von der Kostenseite durchleuchtet. Neben den detaillierten Angaben für die Luftreinhaltung wurden auch die Bereiche Abfälle und Abwasser betrachtet. Ferner wurden Angaben zu aktuellen Forschungstätigkeiten der HVG auf dem Gebiet der Luftreinhaltung aufgeführt. Insbesondere wurden Schmelzanlagen mit Oxy-Fuel-Feuerung bezüglich des technischen Fortschritts, der Zuverlässigkeit, der Ökologie und der Ökonomie untersucht. Hier wurde der erreichte Stand der Technik umfassend dokumentiert. Es wurde neben der Emissionssituation zu Vergleichswannen ein besonderes Augenmerk auf die Kosteneffizienz und die Effektivität hinsichtlich der Balance zwischen den Kosten für den Sauerstoff und der Höhe der Energieeinsparung gelegt. Außerdem wurden medienübergreifende Effekte wie z.B. die Auswirkungen der Filterstaubrückführung auf den Schwefelhaushalt der Glasschmelze durchleuchtet. | | |
| 17. Schlagwörter Glasschmelzwannen, Glasindustrie, BVT, Best Verfügbare Techniken, Emissionen, Oxy-Fuel | 19. | 20. |
| 18. Preis | | |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------|---|----------|
| 1 | Einleitung | 4 - 5 |
| 2 | Aufgabenstellung | 5 - 6 |
| 3 | Erkenntnisstand | 6 - 9 |
| 4 | Projektabwicklung | 9 - 12 |
| 5 | Ergebnisse des Projekts | 13 - 110 |
| | | |
| 5.1 | Behälterglas | 13 - 42 |
| 5.1.1 | Anlage 1: Oxy-Fuel-Wannen mit Abgaswärmemenutzung im Rohgas und Gewebefilter | 14 - 19 |
| 5.1.2.1 | Schmelzanlage | 14 - 15 |
| 5.1.2.2 | Abgaswärmemenutzung | 16 |
| 5.1.2.3 | Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne | 17 |
| 5.1.2.4 | Abgasreinigungsanlagen der Gemengeherstellung | 18 |
| 5.1.2.5 | Formgebung / Vergütung | 18 |
| 5.1.2.6 | Abwasser | 18 |
| 5.1.2.7 | Abfall | 19 |
| 5.1.2.8 | Bewertung der Referenzanlage 1 | 19 |

Die Unterteilung der Einzelanlagen bleibt immer gleich!

| | | |
|-------|---|---------|
| 5.1.2 | Anlage 2: Gasbeheizte Querbrennerwanne mit Rohstoffvorwärmer und E-Filter | 20 - 24 |
| 5.1.3 | Anlage 3: Schwerölbeheizte U-Flammenwanne mit Abgaswärmemenutzung und E-Filter | 25 - 34 |
| 5.1.4 | Anlage 4: Gasbeheizte U-Flammenwannen mit SCR-Anlage und E-Filter | 35 - 38 |
| 5.1.5 | Weitere Angaben zur Behälterglasindustrie | 39 - 42 |
| | | |
| 5.2 | Flachglas | 43 - 64 |
| 5.2.1 | Anlage 5: Schwerölbeheizte Gussglaswanne mit Abgaswärmemenutzung und E-Filter | 44 - 54 |
| 5.2.2 | Anlage 6: Schwerölbeheizte Floatglaswanne mit Abgaswärmemenutzung und E-Filter | 55 - 62 |
| 5.2.3 | Weitere Angaben zur Flachglasindustrie | 62 - 64 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------------|---|------------------|
| 5.3 | Spezialglas | 65 - 96 |
| 5.3.1 | Anlage 7: Elektrowannen (Borosilicatglas) mit Gewebefilter | 65 - 70 |
| 5.3.2 | Anlage 8: Oxy-Fuel-Wanne zur Herstellung von Borosilicatglas mit Gewebefilter | 71 - 74 |
| 5.3.3 | Anlage 9: Oxy-Fuel-Wanne (Borosilicatglas) mit Gewebefilter | 75 - 78 |
| 5.3.4 | Anlage 10: Oxy-Fuel-Wanne (Borosilicatglas) mit Gewebefilter | 79 - 82 |
| 5.3.5 | Anlage 11: Oxy-Fuel-Wannen (Fernsehglas) mit SNCR und Gewebefilter | 83 - 90 |
| 5.3.6 | Anlage 12: Regenerativ befeuerte Querbrennerwannen mit SCR-Anlage und E-Filter | 91 - 95 |
| 5.3.7 | Weitere Angaben zur Spezialglasindustrie | 95 - 96 |
| | | |
| 5.4 | Wirtschaftsglas | 97 - 100 |
| 5.4.1 | Anlage 13: Schwerölbeheizte U-Flammenwanne mit E-Filter | 97 - 98 |
| 5.4.2 | Anlage 14: Elektrowannen | 98 - 99 |
| 5.4.3 | Weitere Angaben zur Wirtschaftsglasindustrie | 99 100 |
| | | |
| 5.5 | Glasfasern und Mineralwolle | 100 - 111 |
| 5.5.1 | Anlage 15: Oxy-Fuel-Wanne (C-Glas) mit E-Filter | 101 - 105 |
| 5.5.2 | Anlage 16: Rekuperativwanne mit E-Filter | 106 - 109 |
| 5.5.3 | Weitere Angaben zur Glas- und Mineraalfaserindustrie | 109 |
| | | |
| 6 | Aktuelle Forschungsergebnisse der HVG auf dem Gebiet der Luftreinhaltung | 110 - 114 |
| | | |
| 7 | Oxy-Fuel-Feuerungen – Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und ökologische Aspekte | 115 - 121 |
| | | |
| 8 | Medienübergreifende Aspekte | 122 - 124 |
| | | |
| 9 | Zusammenfassung des Projektes | 125 - 133 |
| | | |
| 10 | Quellenverzeichnis | 134 |

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

1 Einleitung:

Die Ergebnisse des Informationsaustausches zwischen den Mitgliedsstaaten der EU und der betroffenen Industrie über die besten verfügbaren Techniken (BVT) für die Realisierung der integrierten Vermeidung und Minderung von Umweltverschmutzungen in der Glasindustrie, wurden im Oktober 2000 erstmals in der sog. IPPC-Richtlinie (Integrated Pollution Prevention and Control – Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry / auch Glas BREF genannt) [1] veröffentlicht. Der Informationsaustausch sollte dazu beitragen, "das Ungleichgewicht auf technologischer Ebene in der Gemeinschaft auszugleichen, die weltweite Verbreitung der in der Gemeinschaft festgesetzten Grenzwerte und der angewandten Techniken zu fördern und die Mitgliedsstaaten bei der wirksamen Durchführung dieser Richtlinie zu unterstützen".

Zur Erinnerung sind die wichtigsten allgemeinen Schlussfolgerungen der IPPC-Richtlinie aus dem Jahr 2000 für die Glasindustrie aufgeführt:

- Der Informationsaustausch war erfolgreich, und nach der zweiten Zusammenkunft der technischen Arbeitsgruppe wurde ein hoher Grad an Übereinstimmung erzielt.
- Dieser Industriezweig ist äußerst vielfältig, und in den meisten Fällen ist es nicht angebracht, eine einzige Technik als BVT anzugeben.
- In den vergangenen Jahren ist viel für die Verbesserung der durch diesen Industriezweig hervorgerufenen Umweltauswirkungen getan worden. Es werden jedoch weitere Entwicklungen/Verbesserungen erwartet, insbesondere mit Primärtechniken, aber auch durch die Anwendung von Sekundärtechniken, wie sie in anderen Branchen bereits stärker eingesetzt werden.

Die wesentlichsten Empfehlungen für die weitere Arbeit lauten wie folgt:

- Eine tiefergehende (vorzugsweise halbquantitative) Bewertung der medienübergreifenden Probleme wäre hilfreich.
- Eine gründlichere Betrachtung der Kosten der Techniken wäre zur Festlegung der BVT von Nutzen.
- Bei der Überprüfung der geleisteten Arbeit wäre eine eingehendere Bewertung der Techniken zur Verbesserung des energetischen Wirkungsgrades zweckmäßig, wobei die in jüngster Zeit gewonnenen Informationen berücksichtigt werden sollten.
- Bei der Überprüfung der geleisteten Arbeit sollten die mit Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung erzielten Fortschritte neu bewertet werden.
- Bei der Überprüfung der geleisteten Arbeit sollte eine Neubewertung solcher Techniken erfolgen, bei denen gegenwärtig bestimmte Probleme noch unbewiesen oder umstritten sind und entweder in der gesamten Glasindustrie oder in einigen Einsatzgebieten auftreten. Dies betrifft insbesondere die Schwefeldioxid-Abscheidung, die Sauerstoff-Brennstoff-Beheizung und die selektive katalytische Reduktion.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Im Jahr 2007 wird in Sevilla (Spanien) mit der Revision (Art. 13, 96/61/EC) des BVT-Merkblattes für die Glasindustrie begonnen.

2 Aufgabenstellung:

Die Hüttentecnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG) wurde vom Umweltbundesamt beauftragt, einen deutschen Beitrag für die Revision des BVT-Merkblattes für die Glasindustrie zu erarbeiten.

Dazu sind fundierte deutsche Beiträge wichtig, um einen hohen, den Entwicklungen in Deutschland gerecht werdenden Stand der Technik in dieses internationale Dokument einzubringen. Hierfür wurden neue Entwicklungen sowie die momentan besten verfügbaren Techniken in der Glas- und Mineralfaserindustrie recherchiert und dokumentiert. Besonderes Augenmerk wurde u. a. auf vergleichende Kosten-Effizienz-Betrachtungen sowie die Verifizierung von Daten, die im BVT-Merkblatt als noch nicht vollständig gesichert galten, gelegt.

Die verschiedenen Branchen der Glasindustrie unterscheiden sich signifikant hinsichtlich der angewandten Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien. Aus diesem Grund bedarf es einer spezifischen Betrachtung der einzelnen Sparten, um den Stand der Technik und neuere Entwicklungen im Umweltschutz zu recherchieren und zu dokumentieren.

In Abstimmung mit dem UBA wurden mindestens zwei geeignete Referenzanlagen je Glasbranche ausgewählt, durch Betriebsbesichtigungen in Augenschein genommen und sowohl unter technischen Aspekten als auch von der Kostenseite durchleuchtet.

Neben den detaillierten Angaben für die Luftreinhaltung waren auch die Bereiche Abfälle und Abwässer zu betrachten.

Ferner werden Angaben zu Feinstaubemissionen im Abgas von Glasschmelzanlagen gemacht sowie Angaben zu Umwelteinflüssen im Bereich des Umschlages und der Lagerung von Brenn- und Einsatzstoffen aufgeführt. Außerdem werden für mineral- und glasfaserproduzierende Anlagen die Formaldehyd-, Phenol-, Gesamt C- und NH₃- Emissionen angeben. In dieser Sparte, aber auch im Spezialglasbereich sind außerdem die Boremissionen von Interesse.

Für die Oxy-Fuel-Feuerung, das SCR und SNCR-Verfahren, den Reburning-Prozess und die Scherben-/Gemengevorwärmung wurden die neuen Entwicklungen bezüglich des technischen Fortschritts, der Zuverlässigkeit, des tatsächlichen Minderungspotentials sowie der anfallenden Kosten untersucht.

Der erreichte Stand der Technik bei Oxy-Fuel-Feuerungen wird genau dokumentiert.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Hier wird neben der Emissionssituation zu Vergleichswannen ein besonderes Augenmerk auf die Kosteneffizienz und die Effektivität hinsichtlich der Balance zwischen den Kosten für den Sauerstoff und der Höhe der Energieeinsparung gelegt.

Außerdem werden medienübergreifende Effekte wie z.B. die Auswirkungen der Filterstaubrückführung auf den Schwefelhaushalt durchleuchtet.

3 Erkenntnisstand:

Die Glasindustrie, Glasschmelzprozesse, die erforderlichen Technologien und die Auswirkungen auf die Umwelt werden in der Literatur, in vielen Veröffentlichungen der HVG bzw. der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft (DGG), der IPPC-Richtlinie und in der VDI Richtlinie 2578 "Emissionsminderung Glashütten" [2] dokumentiert.

Die Glasindustrie lässt sich grob in die Sparten Behälterglas, Flachglas, Spezialglas, Wirtschaftsglas, Glasfasern bzw. Mineralwolle einteilen. Die geschätzte Gesamtproduktion innerhalb der EU liegt bei rund 30 Millionen Tonnen pro Jahr, wobei etwa 80 % der Gesamtproduktionsmenge auf Behälterglas und Flachglas entfallen. Die Komplexität der einzelnen Sparten lässt sich am Beispiel des Spezialglases vor Augen führen, zu dem z.B. die Produktion von Fernsehglas, Glaskeramiken, optischen Gläsern, Borosilikatgläsern, Glasrohren, TFT-Gläser und Borofloatgläser gehören.

In Deutschland existieren ca. 90 Hüttenstandorte mit einer täglichen Schmelzleistung von mehr als 20 t_{Glas}/Tag. Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2004 nach Angaben des Bundesverbandes der Glasindustrie (BV GLAS) 7,15 Mio. Tonnen Glas produziert. Im Jahr 2005 ging die produzierte Menge auf 6,71 Mio. Tonnen zurück.

Die Vielzahl der produzierten Glasarten erfordert eine breite Palette von Rohstoffen, die sich aus natürlich vorkommenden Mineralien, künstlich hergestellten, anorganischen Erzeugnissen und Eigen- bzw. Recyclingscherben zusammensetzen.

Die angewandten Schmelztechniken unterscheiden sich hinsichtlich der eingesetzten Energieträger, der Art der Beheizung und des Oxydationsmediums sowie der Methode der Wärmerückgewinnung. Zum Einsatz kommen kontinuierlich betriebene Glasschmelzwannen mit regenerativer und rekuperativer Luftvorwärmung, Glasschmelzaggregate mit Rohstoffvorwärmer, Brennstoff-Sauerstoff-beheizte Schmelzaggregate (Oxy-Fuel-Wannen), Elektroöfen, Glasschmelzanlagen mit einer Kombination aus elektrischer und fossiler Beheizung sowie Spezialausführungen zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit. Ferner existieren diskontinuierlich betriebene Schmelzöfen, wie z.B. Hafenöfen oder Tageswannen. Die Hauptenergieträger sind Erdgas, schweres Heizöl, leichtes Heizöl und Elektroenergie.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Umweltprobleme der Glasindustrie konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Emissionen in die Luft und den Energieverbrauch. In geringerem Umfang spielen die Emissionen ins Wasser sowie die anfallenden festen Abfälle und Reststoffe eine Rolle. Der energieintensive Schmelzprozess zur Glasherstellung erfolgt bei sehr hohen Temperaturen.

Zu den luftverunreinigenden Stoffen gehören die partikelförmigen Emissionen einschließlich der filtergängigen Staubinhaltstoffe, Stickstoffoxide, Schwefeloxide, Chloride und Fluoride. Es kommt zur brennstoff- und rohstoffbedingten Kohlendioxidfreisetzung und in einigen Fällen auch zu Kohlenmonoxidemissionen.

Neben den angewendeten primären Emissionsminderungsmaßnahmen sind in Deutschland alle Glasschmelzaggregate mit Abgasreinigungsanlagen ausgerüstet, die meist aus Elektrofilteranlagen oder filternden Abscheidern (Gewebefilter) mit vorgeschalteter Trockensorptionsstufe und Calciumhydroxid als Absorptionsmittel bestehen.

Der abgeschiedene Filterstaub wird im Behälterglas- und Flachglasbereich vollständig und bei den restlichen Sparten in vielen Fällen in den Prozess zurückgeführt und wieder eingeschmolzen.

Am 1. Oktober 2002 ist die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) [3] in Kraft getreten. Nachfolgend sind die wichtigsten allgemeinen und die für die Glasindustrie relevanten Emissionsgrenzwerte aufgeführt.

Emissionsgrenzwerte**TA-Luft 2002**

| Komponente | Allg. Anlagen [mg/m ³] | Glasindustrie [mg/m ³] |
|---|---|--|
| Gesamtstaub | 20 | Neuanlagen: 20 Altanlagen: 20 (Gewebefilter) 30 (E-Filter) |
| 5.2.2 I (Tl, Hg) II (Pb, Co, Ni, Se) III (Sb, Cr, V, Sn) | 0,05 (0,25 g/h) 0,5 (2,5 g/h) 1 (5 g/h) | <u>Sonderregelung:</u> Bei Pb- bzw. Se-Einsatz aus Qualitätsgründen Klasse II = 3 mg/m ³ , bzw. Kl. III = 4 mg/m ³ <u>Sonderregelung:</u> Bei Fremdscherben-Einsatz (Behälterglas) Klasse II = 1,3 mg/m ³ , (0,8 mg/m ³ Pb), bzw. Kl. III = 2,3 mg/m ³ |
| 5.2.7.1.1 I (As, Cd) II (Ni) | 0,05 (0,15 g/h) 0,5 (1,5 g/h) | <u>Sonderregelung:</u> Hohlglas Kl. I = 0,5 mg/m ³ <u>Sonderregelung:</u> Spezialglas Cd = 0,2 mg/m ³ As = 0,7 mg/m ³ |

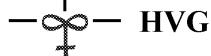
Die Übergangsfrist beträgt 5 Jahre



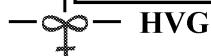
HVG

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**Emissionsgrenzwerte****TA-Luft 2002**

| Komponente | Allgemeine Anlagen [mg/m ³] | Glasindustrie [mg/m ³] | |
|-----------------|--|---|---|
| Stickstoffoxide | 350 | <u>Neuanlagen</u> 500 (> 50000 m ³ /h) 800 (< 50000 m ³ /h) 1000 (Nitratläuter.) | <u>Altanlagen</u> 800 (500 = Zielwert) 1000 (Nitratläuter.) 1200 (Nitr.< 5000 m ³ /h) |
| HF | 3 | 5 | 5 |
| HCl | 30 | 30 | 30 |
| NH ₃ | 30 | 30 | 30 |
| SO _x | 350 | 100 – 1500 je nach Glas- und Beheizungsart | 100 – 1500 je nach Glas- und Beheizungsart |

Übergangsfrist für NO_x = 8 Jahre**Emissionsgrenzwerte für die Glasindustrie****TA-Luft 2002 – SO₂ Grenzwerte**

| Glasart | Gasbe-heizt [g/m ³] | Öl-beheizt [g/m ³] | Betriebsbedingungen |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Behälter/Flach Behälterglas | 0.4 0.8 | 0.8 1.5 | - Nahstöchiometrische Verbrennung, vollständige Filterstaubrückführung, Sulfatläuterung, > 40 % Scherben |
| Flachglas | 0.8 | 1.5 | Nahstöchiometrische Verbrennung, vollständige Filterstaubrückführung, Sulfatgehalt > 0,45 % |
| Haushaltswaren | 0.2 | 0.5 | - |
| Haushaltswaren | 0.5 | 1.4 | Nahstöchiometrische Verbrennung, vollständige Filterstaubrückführung, Sulfatgehalt > 0,45 % |
| Glasfasern | 0.2 | 0.8 | - |
| Glasfasern | 0.8 | 1.4 | Vollständige Filterstaubrückführung, Sulfatgehalt > 0,45 % |
| Glaswolle | 0.05 | 0.8 | - |
| Glaswolle | 0.1 | 1.4 | Scherbenanteil > 40 % |
| Spezialglas | 0.2 | 0.5 | - |
| Spezialglas | 0.4 | 1.0 | Vollständige Filterstaubrückführung |
| Wasserglas | 0.2 | 1.2 | - |
| Glasfritten | 0.2 | 0.5 | - |



HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Emissionswerte beziehen sich bei flammenbeheizten Glasschmelzöfen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im trockenen Abgas von 8 Vol.-%, bei flammenbeheizten Hafenöfen und Tageswannen beträgt der Bezugssauerstoffgehalt 13 Vol.-%.

4 Projektabwicklung:

Das vorrangige Ziel des Projektes war es, anhand von Referenzanlagen die besten verfügbaren Techniken der Glasindustrie im Bereich des Umweltschutzes zu recherchieren und zu dokumentieren.

Als Grundlage zur Projektabwicklung wurde ein Fragenkatalog erarbeitet, der die Erfassung aller emissionsrelevanten Daten erlaubt, detaillierte Investitions- und Betriebskosten für die eingesetzten Umweltschutzmaßnahmen ausweist und die Bereiche Abfälle und Abwasser betrachtet.

Insgesamt wurden 16 Glasschmelzanlagen aus den Bereichen Behälterglas, Flachglas, Spezialglas, Wirtschaftsglas und Glasfasern untersucht, die aus dem Kenntnisstand der HVG die momentan besten verfügbaren Techniken in Deutschland widerspiegeln.

Behälterglasindustrie:

- 1:** Oxy-Fuel-Wanne mit nachgeschalteter Abgaswärmenumutzung und Gewebe-filter
- 2:** Gasbeheizte Querbrennerwanne mit Rohstoffvorwärmer und E-Filter
- 3:** Schwerölbeheizte U-Flammenwanne mit Abgaswärmenumutzung und E-Filter
- 4:** Gasbeheizte U-Flammenwannen mit SCR-Anlage und E-Filter

Flachglasindustrie:

- 5:** Ölbeheizte Querbrennerwanne mit Lambda-Regelung, Abgaswärmenumutzung und E-Filter
- 6:** Gasbeheizte Querbrennerwanne, möglichst mit 3 R-Verfahren, Abgas-wärmenumutzung und E-Filter *)

Spezialglasindustrie:

- 7:** Elektrowanne zur Borosilicatglasherstellung mit Gewebefilter
- 8:** Oxy-Fuel-Wanne zur Borosilicatglasherstellung mit Gewebefilter
- 9:** Oxy-Fuel-Wanne (Borosilicat-Floatglas) mit Gewebefilter
- 10:** Oxy-Fuel-Wanne (Glaskeramik) mit Gewebefilter
- 11:** Oxy-Fuel-Wannen (Fernsehglas) mit SNCR und E-Filter
- 12:** Regenerativ befeuerte Querbrennerwannen mit SCR und E-Filter

*) Aufgrund fehlender Daten wurde eine weitere ölbeheizte Querbrennerwanne untersucht.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Wirtschaftsglas:

- 13:** Schwerölbeheizte U-Flammenwanne mit E-Filter
- 14:** Elektrowannen

Glasfasern und Mineralwolle:

- 15:** Oxy-Fuel-Wanne (C-Glas) mit E-Filter
- 16:** Erdgasbeheizte Rekuperativwanne und E-Filter

Der von den Glashütten ausgefüllte Fragenkatalog wurde vor Ort, in vielen Fällen zusammen mit einem Vertreter des Umweltbundesamtes, mit der jeweiligen Betriebsleitung abgesprochen, konkretisiert und ggf. ergänzt oder gekürzt.

➔ Auf Anweisungen der Betreiber von Glasschmelzanlagen dürfen nur Daten ausgewiesen werden, die keine Rückschlüsse auf den Hüttenstandort oder die Schmelzwanne erlauben. Interne Informationen der HVG über Emissionsdaten oder innovative und umweltorientierte Schmelztechnologien dürfen nur nach Freigabe durch die jeweilige Betriebsführung dokumentiert werden.

Die HVG dankt allen Mitgliedsfirmen und Unternehmen, die sich bei der Recherche und Dokumentation beteiligt haben. Die Firmen werden bewusst nicht namentlich genannt, um Rückschüsse auf den Produktionsstandort auszuschließen und damit die Anonymität der Daten zu gewährleisten.

Einen besonderen Dank möchte ich auch Frau Bergmann aussprechen, die als neue wissenschaftliche Mitarbeiterin der HVG das Projektes von Anfang an mit großem Engagement begleitet hat.

Anmerkung zur Marktsituation:

Leider ging die wirtschaftlich angespannte Lage in Deutschland in den letzten Jahren nicht spurlos an der Glasindustrie vorbei.

Insbesondere die Einführung des Pflichtpfandes auf kohlensäurehaltige Getränkeverpackungen und die Substitution von Glasflaschen durch Kunststoff-Behältnisse führte im Bereich der Hohlglassindustrie zu deutlichen Produktionsrückgängen mit der Folge, dass Produktionslinien stillgelegt, Schmelzwannen abgetempert und ganze Werke geschlossen wurden. Leider befinden sich darunter auch BVT-Anlagen, wie z. B. eine Oxy-Fuel-Wanne mit Rohstoffvorwärmer, ein LowNO_x-Melter oder eine U-Flammenwanne, die ebenfalls mit Rohstoffvorwärmung betrieben wurde. Aus diesem Grund flossen seit Erscheinen der IPPC-Richtlinie im Jahr 2000 innerhalb der Hohlglassindustrie keine wesentlichen neuen Entwicklungen in den Neubau von Schmelzwannen ein, da die Funktionstüchtigkeit der bestehenden Anlagen in der Regel lediglich mit notdürftigen Reparaturmaßnahmen Aufrecht erhalten wurde.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Erst in jüngster Zeit zeichnet sich ein konjunktureller Aufschwung beim Verpackungsglas ab.

Des weiteren ist der Fernsehglasmarkt zusammengebrochen, was zur Schließung von insgesamt 5 großen Fernsehbildschirm- und Fernsehrichterwannen in Deutschland führte. Diese Anlagen waren alle mit SCR-Katalysatoren ausgerüstet.

Damit existieren zur Zeit in Deutschland nur noch drei Hüttenstandorte mit SCR-Katalysatortechnik. Es handelt sich dabei um zwei Katalysatoranlagen (Hohl- und Spezialglasindustrie) die bereits seit über zehn Jahren betrieben werden und eine weitere im Bereich der Flachglasindustrie, die Ende 2006 in Betrieb genommen wurde.

Im Spezialglasbereich fand eine nahezu vollständige Umstellung von konventioneller Beheizung auf Oxy-Fuel-Feuerung statt. Im Faserglasbereich existieren ebenfalls einige sauerstoffbeheizte Glasschmelzwannen. Damit konzentrieren sich die neuen Entwicklungen hinsichtlich Schmelztechnologie und deren Auswirkungen insbesondere auf Stickstoffoxidemissionen überwiegend auf die Oxy-Fuel-Technologie.

Aus diesem Grund wurde ein besonderes Augenmerk auf den erreichten Stand der Technik bei Oxy-Fuel-Feuerungen gelegt. Es wird neben der Emissionssituation zu konventionell beheizten Vergleichswannen auf die Kosteneffizienz und die Effektivität hinsichtlich der Balance zwischen den Kosten für den Sauerstoff und die Höhe der Energieeinsparung eingegangen.

Die Verifizierung der Daten wurden durch Informationen von Ofenbaufirmen und Anbietern von Luftzerlegungsanlagen abgesichert.

Leider können die Themen Abfall / Abwasser und insbesondere Kosten nicht immer zufriedenstellend behandelt werden. Diesbezügliche Angaben wurden von vielen Anlagenbetreibern als sehr sensibel erachtet und zum Teil nur unzureichend bis gar nicht im Fragenkatalog beantwortet.

Die Glashütten in Deutschland sind bemüht, ihre Produktionsstätten so umweltverträglich wie möglich zu betreiben und die gesetzlichen Vorgaben für die Emissionen zu unterschreiten. Bei dieser Aufgabe werden sie von der HVG umfassend vor Ort unterstützt. Die HVG ist seit 1975 als Messstelle nach § 26 BImSchG für glasspezifische Emissionen bekanntgegeben. Seit 1991 existiert die Bekanntgabe zur Kalibrierung und Funktionsprüfung kontinuierlicher Emissionsmessgeräte. Die Kompetenz der HVG hinsichtlich der Probenahme und Analytik wird unter anderem durch regelmäßige Teilnahme an Ringversuchen bestätigt. Seit Juli 2006 ist die Messstelle inkl. Labor der HVG nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditiert.

Die im Rahmen von Emissionsmessungen und Kalibermessungen sowie Forschungsvorhaben erworbene Kompetenz auf dem Gebiet des Umweltschutzes wurde in der Vergangenheit intensiv eingesetzt, um bei Grenzwertfestlegungen für Emissionen der Glasindustrie (TA-Luft) entscheidend Einfluss zu nehmen.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Erfahrungen der HVG auf dem Gebiet des Umweltschutzes fanden auch Einzug auf europäischer Ebene (IPPC) sowie im nationalen Bereich bei der VDI-Richtlinie 2578 "Emissionsminderung Glashütten".

Der Erfahrungsschatz der HVG dient als Grundlage für Emissionsprognosen und Gutachten auf dem Gebiet der Luftreinhaltung. Bei der Bewertung der Emissionen von Oxy-Fuel-Wannen wurden in jüngster Vergangenheit für viele Glashütten Emissionsbegrenzungen abgeleitet, die sich für den Anlagenbetreiber, sowie für das Zusammenwirken zwischen Anlagenbetreiber und Genehmigungsbehörde, positiv ausgewirkt haben. Die Kenntnisse und Erfahrungen aus den Arbeiten der HVG fließen u. a. in die Bearbeitung von Forschungsvorhaben mit umweltorientierten Themen. Über den Stand der Forschungsvorhaben wird regelmäßig vor dem HVG-Beirat, in den projektbegleitenden Arbeitsgruppen und in Vorträgen bei den Sitzungen des DGG (Deutsche Glastechnische Gesellschaft) - Fachausschusses „Umweltschutz“ sowie bei den Jahrestagungen der DGG berichtet. Darüber hinaus werden die Forschungsergebnisse in internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht sowie auf nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt. Mitarbeiter der HVG halten an verschiedenen Hochschulen Vorlesungen zur Glastechnologie, in denen den Studenten neben dem Stand der Technik auch die aktuellen Forschungsergebnisse vermittelt werden.

Der Fundus der HVG wird im Rahmen dieses Projektes auch dazu genutzt, Informationen bereitzustellen, die aus den Fragebögen nicht hervorgehen, beispielsweise Daten über weitere Schmelzwannen in anonymisierter Form und aktuelle Ergebnisse über laufende Forschungsvorhaben (Emissionen gasförmiger Borverbindungen - Quarzfeinstaubemissionen) zu präsentieren.

5 Ergebnisse des Projektes:

Zunächst werden die zur Verfügung stehenden Daten der Referenzanlagen branchenspezifisch detailliert dokumentiert. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Recherchen unter Beachtung von Anlagen des gleichen Industriezweiges. Damit soll die Bandbreite der installierten Glasschmelzanlagen und der Einfluss z.B. der Anlagengröße bzw. der Schmelztechnologie, der Qualitätsanforderungen oder des Brennstoffs auf umweltrelevante Aspekte aufgezeigt werden.

Des weiteren werden Kostenabschätzungen aufgestellt, die einerseits als Verifizierung von Daten der IPPC-Richtlinie dienen, andererseits den aktuellen Stand der Entwicklung, insbesondere von Oxy-Fuel-Wannen und Wannen mit SCR- bzw. SNCR Technologie widerspiegeln.

Ferner werden aktuelle Ergebnisse über laufende bzw. kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben der HVG auf dem Umweltsektor vorgestellt, z.B. über Feinstaub- und Quarzfeinstaub oder Boremissionen.

Alle Angaben zu Kosten beziehen sich auf Abschätzungen, die vermutlich einer finanziellen oder steuerrechtlichen Überprüfung nicht standhalten. Sie besitzen damit nur orientierenden Charakter.

Aufgrund der Vielzahl der Tabellen, die den jeweiligen Referenzanlage zugeordnet sind, werden diese nicht nummeriert bzw. aufgelistet.

5.1 Behälterglas:

Behältergläser werden in Deutschland überwiegend in regenerativ befeuerten U-Flammenwannen mit regenerativer Luftvorwärmung erschmolzen. Weiterhin existieren regenerativ beheizte Querbrennerwannen, wenige Oxy-Fuel-Wannen bzw. Low-NO_x-Melter. Im Bereich der Behälterglasindustrie gibt es keine Anlagen mit SNCR-Technologie, wie sie beispielsweise bei rekuperativ beheizten Schmelzwannen oder bei Wannen mit mehrstufigem Kammersystem verwendet werden können und lediglich eine Anlage mit der dem Elektrofilter nachgeschalteten SCR-Technologie.

Im Rahmen des Projektes wurden 4 Referenzanlagen aus der Hohlglasindustrie untersucht, bei denen die Emissionsbegrenzungen der TA-Luft aus dem Jahr 2002 zum Teil deutlich unterschritten werden.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.1.1 Anlage 1:****Oxy-Fuel-Wannen mit nachgeschalteter Abgaswärmevernützung im Rohgas und Gewebefilter****5.1.1.1 Schmelzanlage:**

| | Wanne 1 | Wanne 2 |
|--------------------------------------|--|-----------|
| Wannenbauart | Oxy-Fuel-Wanne | |
| Schmelzfläche / Länge/Breite | 108 m ² / L: 15 m / B: 7,2 m | |
| Gewölbehöhe über Glasbad | 3,36 m | |
| Brennstoffart | Erdgas L, H _U = 31.470 kJ/m ³ | |
| Elektrozusatzeizung (installiert) | Ohne | |
| Glasfarbe | Braun/Grün | Braun |
| Max. genehm. Schmelzleistung | 325 t/d | 325 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 2000 | Jahr 1996 |
| Geplante Wannenlaufzeit | 11 Jahre | 12 Jahre |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Nahstöchiometrische Verbrennung, Abdichtmaßnahmen, Ofenraumgeometrie, Brenneranordnung | |
| Sonstige Maßnahmen | Schwefelarme Roh- und Brennstoffe / Filterstaubrückführung | |
| Vergütungsmittel (Heißend) | MBTC | |
| Emissionsweg Heißendverg. | Filteranlage Schmelzwanne | |

| Betriebsdaten | Aktuelle Durchschnittswerte | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Schmelzleistung | 222 t/d | 280 t/d |
| Auslastung | 68 % | 86 % |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 75 % | 57 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 3,3 % | 3,3 % |
| Gasverbrauch | 1.200 m ³ /h | 1.600 m ³ /h |
| Sauerstoffverbrauch | 1.950 m ³ /h | 2.700 m ³ /h |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.590 °C | 1.585 °C |
| Spez. Schmelzleistung | 2,06 t/m ² d | 2,59 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch | 4.083 kJ/kg _{Glas} | 4.316 kJ/kg _{Glas} |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Der spez. Energieverbrauch ist stark von der Auslastung und dem Scherbenanteil abhängig. Bei Volllast wurden nach einer Laufzeit von 4 Jahren Werte von 3.250 kJ/kg_{Glas} dokumentiert.

Als Entscheidungskriterium für den Bau von Oxy-Fuel-Wannen wurden am Hüttenstandort folgende Argumente aufgeführt:

- a) Geringe NO_x-Emissionen (weniger als 500 mg/m³ bzw. 0,7 kg/t_{Glas})
- b) Reduzierung der Schmelzkosten
- c) Installation von Schmelzwannen in bestehende Hüttengebäude
- d) Reduzierung der CO₂-Emissionen.

Beide Wannen wurden mit einem sehr hohen Gewölbe ausgestattet. Vorteile verspricht man sich durch geringere Verdampfungsrate und insbesondere niedrigere NaOH-Konzentrationen im Bereich des Silica-Gewölbes. Dies reduziert maßgeblich die Korrosion, so dass eine Lebensdauer von 12 Jahren erwartet werden kann.

Im Rahmen eines Vortrages im Jahr 2005 (Titel, Zeit und Ort werden auf Grund der Anonymität nicht genannt) wurde das Konzept einer Oxy-Fuel-Wanne (350 t/d / 3412 kJ/kg_{Glas}) mit hohem Gewölbe und im Verbund mit rohgasseitiger Abgaswärmennutzung und Gewebefilter vorgestellt und mit einer konventionell beheizten Wanne (3.995kJ/kg_{Glas}) mit regenerativer Luftvorwärmung und Elektrofilter gegenübergestellt.

Angenommene Daten des Vortragenden:

| | | | |
|------------------------|-----------------------|---------------------------------|----------------|
| Elektroenergiepreis: | € 0,05/kWh | Gaspreis: | € 0,0193/kWh |
| Sauerstoffbezugspreis: | € 0,04/m ³ | O ₂ /Gas-Verhältnis: | 2:1 (Erdgas H) |
| Zinssatz: | 6 % | Lebensdauer: | 12 Jahre |

Der Vortragende berechnete (inklusive der Rückzahlung für die gesamte Anlage) für die regenerativ beheizte Anlage mit 40,2 €/t_{Glas} Gesamtkosten einen um 18 % höheren Wert gegenüber der Oxy-Fuel-Wanne, für die € 34,2/t_{Glas} aufgebracht werden müssen.

Den geringeren Investitionskosten einer Oxy-Fuel-Wanne gegenüber einer konventionellen Wanne stehen der Energieaufwand und damit die Bezugskosten für den Sauerstoff gegenüber. Die Kosten für elektrische Energie bestimmen demnach maßgeblich die Wirtschaftlichkeit.

Die Luftzerlegungsanlage zur Produktion von kryogenem Sauerstoff befindet sich auf dem Firmengelände. Nach Angaben der Betriebsleitung beträgt der **aktuelle Bezugspreis für Sauerstoff: €0,046/m³**.

Umgelegt auf die Tonnage müssen aktuell an der Wanne 1 **€9,70/t_{Glas}** und an der Wanne 2 **€10,23/t_{Glas}** für Sauerstoff aufgebracht werden.

5.1.1.2 Abgaswärmemenutzung:

| Anlage | Wanne 1 | Wanne 2 |
|--|-------------------------|-------------|
| Wärmetauscherart | Rohrbündel | |
| Wärmeträgermedium | Wasser / Dampf | |
| Nutzung der gewonnenen Energie | Ei. Strom / Druckluft | |
| Einbauort | Rohgas vor Gewebefilter | |
| Abreinigungsart | Manuell | |
| Abreinigung | Online | |
| Staubentsorgungsweg | Gemengebeimischung | |
| Verfügbarkeit | 98,6 % | |
| O ₂ -Gehalt der Abgase Eintritt | 5 % | |
| O ₂ -Gehalt der Abgase Austritt | 5,5 % | |
| Temperatur der Abgase Eintritt | 1.380 °C | |
| Temperatur der Abgase Austritt | 200 °C | |
| Wirkungsgrad | ca. 94 % | |
| Zurückgewonnene Energiemenge | 2.876 kWh/h | 3.596 kWh/h |

Angaben zu den Kosten stehen nicht zur Verfügung.

Damit werden im Mittel 0,31 kWh/kg_{Glas} an Abgaswärme zurückgewonnen.

Bei der Verstromung muss der Kraftwerkswirkungsgrad berücksichtigt werden, so dass in Form elektrischer Energie etwa 0,1 kWh/kg_{Glas} genutzt werden kann.

Abgaswärmemenutzungssysteme im Abgas von Oxy-Fuel-Wannen sind nicht sehr verbreitet. Im vorliegenden Fall wird der Wärmetauscher mit einem Abgas durchströmt, dass zu etwa 1/3 aus CO₂ und 2/3 aus Wasserdampf besteht. Bezogen auf trockenes Abgas liegen die Konzentrationen an sauren Abgasbestandteilen entsprechend hoch, weshalb bei der Konstruktion und beim Betrieb von Wärmetauschern und Oxy-Fuel-Feuerung verstärkt darauf geachtet werden muss, dass keine Unterschreitungen von Wasser- oder Säuretaupunkten auftreten.

5.1.1.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|-----------------------|---------------------------|
| Filtertyp | Filternder Abscheider |
| Filtermaterial | M3GR-Nadelfilz |
| Temperatur vor Filter | Max. 150 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | 20 kg/h |
| Wassereindüsung | Nein |
| Filterstaubmenge | Ca. 220 t/a |
| Filterstaubverwendung | 100 % Recycling (Gemenge) |
| Nennleistung Gebläse | 127 kW |
| Wartungsintervall | Monatlich |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten (Jahr 2005)

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Grenzwert Spez. Emissionen [kg/t _{Glas}] | Messwert [kg/t _{Glas}] |
|-------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Gesamtstaub | 50 | 0,070 | 0,0015 |
| NO _x | | 0,7 | 0,23 |
| SO _x | 1.500 | 2,1 | 0,40 |
| HF | 5 | 0,007 | 0,0010 |
| HCl | 30 | 0,042 | 0,0082 |
| Schwermetalle: | | | |
| Klasse II TA Luft 1986 | 1 | 0,0014 | 0,125 · 10 ⁻³ |
| Klasse III TA Luft 1986 | 5 | 0,007 | 0,666 · 10 ⁻³ |

Die Emissionsbegrenzungen wurden auf Wunsch der Glashütte/Behörde von den Konzentrationen einer guten konventionell beheizten Glasschmelzwanne abgeleitet. Bei den Stickstoffoxiden gab es zum Zeitpunkt der Grenzwertfestlegung bereits Vorgaben der Behörde.

Die Emissionsbegrenzungen als spez. Emissionen werden bei allen Emissionskomponenten deutlich unterschritten. Auffallend sind die für Glasschmelzanlagen außerordentlich niedrigen NO_x-Emissionen, die umgerechnet auf eine konventionell beheizte Anlage unterhalb von 200 mg/m³ liegen.

Eine Kostenabschätzung der Abgasreinigungsanlage kann aufgrund fehlender Angaben nicht gemacht werden.

5.1.1.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung:

Für die Aufbereitung, Lagerung und den Transport von Gemenge- und Scherbenströmen existieren insgesamt 9 filternde Abscheider, an die ein Rohrleitungssystem mit annähernd 40 Absaugestellen angeschlossen ist.

Drei repräsentative Filteranlagen sind überwachungspflichtig und halten die geforderten Staubgrenzwerte von 20 mg/m³ bzw. die der Staubinhaltstoffe ein.

Die anfallenden Filterstäube werden dem Gemenge beigemischt.

Angaben zur Kostensituation liegen nicht vor.

5.1.1.5 Formgebung / Vergütung:

Die Abgase der Heißendvergütung werden den Wannenabgasen über ein Rohrleitungssystem zugeführt und über die Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne gereinigt.

Die Kostensituation wurde nicht durchleuchtet.

5.1.1.6 Abwasser

Das Prozesswasser wird im Kreis geführt.

Reinigungsabwässer der Maschinen- und Formenreinigung sowie Abschlammwasser aus dem Kesselbereich unterliegen einer kontinuierlichen Abwasserbehandlung. Die Abwässer werden indirekt eingeleitet.

Zur Abwasserbehandlung kommen die Verfahren Sedimentation, Leichtstoffabscheidung und Neutralisation zum Einsatz.

Der Schlamm aus dem Prozesswasserkreislauf wird sowohl dem Gemenge zugesetzt als auch teilweise entsorgt.

Der Frischwasserbedarf für das gesamte Werk wird mit einer Menge von 174.122 m³/a aus Stadtwasser und 74.459 m³/a aus eigener Brunnenförderung gedeckt.

Die Abwassermenge beläuft sich auf 77.580 m³/a.

5.1.1.7 Abfall

Detaillierte Angaben zur Abfallsituation liegen nicht vor. Der anfallende Filterstaub der Glasschmelzwannen in Höhe von ca. 170 t/a wird dem Gemenge beigemischt und eingeschmolzen. Auch der anfallende Filterstaub im Gemengehaus von ca. 180 t/a inklusive Fehlchargen und Kehricht werden dem Gemenge beigemischt und eingeschmolzen.

5.1.1.8 Bewertung der Referenzanlage 1

Die beiden Glasschmelzwannen sind derzeit in Deutschland die einzigen Behälterglaswannen, die mit reinem Sauerstoff als Oxidationsmedium befeuert werden und markieren damit den Stand der Technik in dieser Branche. Bei den Emissionen an Stickstoffoxiden liegen Brennstoff-Sauerstoff-beheizte Anlagen auf einem Niveau, die mit konventioneller Feuerungstechnik nur durch sekundäre Maßnahmen (SNCR bzw. SCR) erreicht werden können.

Die befürchteten Korrosionen im Oberofenbereich und eine damit verbundene kurze Wannenreise treten offensichtlich an beiden Referenzanlagen aufgrund der Konstruktionsweise mit hohem Oberofen vermindert auf. Ähnlich wie bei konventionell befeuerten Anlagen steigen die spezifischen Energieverbräuche im Laufe einer Wannenreise an und erhöhen damit die Schmelzenergiekosten als auch die Emissionsmassenströme der feuerungsbedingten Emissionen.

Bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen von Oxy-Fuel-Wannen gegenüber konventionell regenerativ oder rekuperativ beheizten Wannen spielen neben den Wannenlaufzeiten, den Investitionskosten, den spez. Energieverbräuchen oder den Wartungs- und Instandhaltungskosten insbesondere die Sauerstoffbezugskosten eine wichtige Rolle. Die Investitionskosten und die Energieverbräuche (ohne O₂-Erzeugung) von Oxy-Fuel-Wannen liegen unter denen konventioneller Wannen, die Betriebskosten liegen unter Beachtung der Sauerstoffkosten darüber.

Durch den Betrieb der Wärmetauscher zur Strom- und Drucklufterzeugung kann ein erheblicher Anteil der im Abgas enthaltenen Energie zurückgewonnen und genutzt werden.

Alle geforderten Emissionsgrenzwerte werden durch den Betrieb des filternden Abscheiders mit Trockensorptionsstufe deutlich unterschritten.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.1.2 Anlage 2:****Gasbeheizte Querbrennerwanne mit Rohstoffvorwärmer und E-Filter****5.1.2.1 Schmelzanlage**

| Anlage 2 | |
|---|---|
| Betriebsdaten | Aktuelle Durchschnittswerte |
| Wannenbauart | Querbrennerwanne |
| Luftvorwärmung | Regenerativ |
| Schmelzfläche | 108 m ² |
| Brenneranzahl je Feuerseite | 4 Brennerpaare |
| Art der Zerstäubung | Luft |
| Brennstoffart | Erdgas H, H _U = 31.867 kJ/m ³ |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | - |
| Glasfarbe | Weiß |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 350 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 2005 |
| Geplante Wannenlaufzeit | Jahr 2017 |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Nahstöch. Verbrennung, Abdichtmaßnahmen, Ofenraumgeometrie, Brenneranordnung |
| Sonstige Maßnahmen | Filterstaubrückführung / schwefelarme Brennstoffe |
| Vergütungsmittel (Heißend) | TC 100 |
| Emissionsweg Heißendvergütung | Filteranlage Schmelzwanne |
| | |
| Schmelzleistung | 275 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 60 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 1,5 % |
| Gasverbrauch | 1.360 m ³ /h |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.580 °C |
| Spez. Schmelzleistung | 2,55 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch | 3.782 kJ/kg Glas |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Schmelzwanne wurde im Jahr 2005 einer Hauptreparatur unterzogen und mit gleicher Schmelzfläche wieder aufgebaut. Ein Vergleich des spez. Energieverbrauchs der alten Wanne nach 11 Jahren Laufzeit und der Wanne im Neuzustand ergibt eine **jährliche Steigerung** von etwa **2,1 %**, bezogen auf den Neuzustand.

5.1.2.2 Abgaswärmennutzung:

| | |
|--|--|
| Wärmetauscherart | Rohstoffvorwärmer mit direktem Abgaskontakt zum Schmelzgut |
| Einbauort | Rohgas nach Regenerator |
| Abreinigung | Ohne |
| Verfügbarkeit | 100 % |
| Abgasvolumenstrom, feucht, Normzustand | 17.000 m ³ /h |
| Abgastemperatur Ein-/Austritt | ca. 450 / 200 °C |
| Rohstofftemperatur Ein-/Austritt | ca. 20 / 300 °C |
| Zurückgewonnene Energiemenge | ca. 900 kWh/h |

Die zurückgewonnene Wärmemenge wurde überschlagen. Umgelegt auf die Tonne produzierten Glases entspricht dies etwa 78 kWh/t_{Glas}.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 12 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Wärmetauscher inkl. Zubehör [€] |
|--|---------------------------------|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 1.000.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 113.333,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Personal, Sonstiges | 10.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>123.333,-</u> |

Dies entspricht einem zu investierenden Aufwand von 0,016 €/kWh zurückgewonnener Energie.

Auf die Tonnage umgelegt liegen die Investitions-/ Betriebskosten bei **€1,23/t_{Glas}**.

5.1.2.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Filtertyp | Elektrofilter mit 3 Feldern |
| Temperatur vor Filter | 200 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | Ohne |
| Wassereindüsung | Nein |
| Filterstaubmenge | 613 t/a |
| Filterstaubverwendung | 100 % Recycling (Gemenge) |
| Energiebedarf Gebläse und Filter | 194 kWh/h |
| Wartungsintervall | Nach Bedarf |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten (Jahr 2005)

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Messwert, normiert auf 8 % O ₂ [mg/m ³] | Messwert [kg/t _{Glas}] |
|-------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Gesamtstaub | 50 | 23,8 | 0,0371 |
| NO _x | 3.000 | 909 | 1,42 |
| SO _x | 1.200 | 386 | 0,60 |
| HF | 5 | 3,0 | 0,0047 |
| HCl | 30 | 4,8 | 0,0075 |
| Schwermetalle: | | | |
| Klasse I TA Luft 1986 | 0,2 | 0,003 | 0,005 · 10 ⁻³ |
| Klasse II TA Luft 1986 | 1,0 | 0,76 | 1,2 · 10 ⁻³ |
| Klasse III TA Luft 1986 | 5,0 | 1,01 | 1,6 · 10 ⁻³ |

Auffallend sind die geringen Konzentrationen an sauren Abgasbestandteilen, die alle die geforderten Grenzwerte zum Teil deutlich unterschreiten, obwohl **kein zusätzliches Sorptionsmittel** eingedüst wird. Der Rohstoffvorwärmer übernimmt neben der Funktion der Wärmerückgewinnung auch die einer Sorptionsstufe.

Den guten Reaktionsbedingungen (hohe Verweilzeit der Abgase im Vorwärmer und hohe Beladung des Abgases mit Glasabrieb und Gemenge) steht ein erhöhter Verschleiß im Abgassystem (Umlenkungen, Gebläse, Prallplatten) gegenüber.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

| | |
|--|--|
| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlage inkl. Zubehör, Gebläse, Rohrleitung, ... |
| | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 1.500.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 199.500,- |
| Betriebskosten Wartung / Reparatur, Elektr. Strom, Personal, Kont.- / Emissionsmessungen | 120.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>319.500,-</u> |

Umgelegt auf die produzierte Glasmenge betragen die abgeschätzten Kosten für die **Abgasreinigung €3,18/tGlas**.

5.1.2.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung:

Im Gemengehaus ist eine Zentralentstaubungsanlage installiert, die Bunker sind mit Siloaufsatzzfiltern ausgerüstet. Angaben zu den Kosten wurden aufgrund des Verbundes der Referenzanlage mit weiteren Schmelzwannen nicht gemacht.

5.1.2.5 Formgebung / Vergütung:

Im Bereich der Formgebung existieren keine Umweltschutzmaßnahmen. Emissionen im Bereich der Fertigungsmaschinen werden über die Dachlüfter ins Freie geleitet.

Die Abgase der Heißendvergütung werden den Wannenabgasen zugeführt. Eine Kostenabschätzung über den Rohrleitungsbau liegt nicht vor.

5.1.2.6 Abwasser:

Brauchwasser wird indirekt eingeleitet. Prozessabwässer werden im Kreislauf geführt.

Nach Angaben des Betreibers ist es nicht möglich, die Abwassersituation spezifisch zu betrachten.

Die Abwassermenge für das gesamte Werk beträgt 60.000 m³/a. Der Frischwasserbedarf liegt bei 30.000 m³/a.

Überschlägig können für die Referenzanlage 25 % der jeweiligen Gesamtmenge angesetzt werden.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

5.1.2.7 Abfall:

Der Löwenanteil des Abfalls fällt bei Hauptreparaturen an. In der Summe sind dies etwa 2.200 Tonnen Feuerfestmaterial pro Hauptreparatur.

Detaillierte Angaben liegen nicht vor.

5.1.2.8 Bewertung der Referenzanlage 2:

Querbrennerwannen weisen konstruktionsbedingt einen höheren Energiebedarf gegenüber U-Flammenwannen auf. Mit der Installation eines Rohstoffvorwärmssystems lässt sich der spez. Wärmeverbrauch reduzieren. Im vorliegenden Fall beträgt der spez. Energiebedarf der regenerativ mit Erdgas befeuerten Querbrennerwanne mit Rohstoffvorwärmer zur Produktion von weißem Behälterglas 3.782 kJ/kgGlas im Neuzustand der Wanne. Durch den Einsatz von elektrischer Zusatzheizung lässt sich der spezifische Energieverbrauch weiter absenken. Bei dieser Betrachtung muss man allerdings den Kraftwerkswirkungsgrad berücksichtigen.

Neben den energetischen Vorteilen eines Rohstoffvorwärmssystems ergeben sich bei der Abgasreinigung weitere Vorteile, da in der Regel auf eine Sorptionsstufe verzichtet werden kann, um die Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Die Staubkonzentrationen im Rohgas hinter Vorwärmung liegen im Bereich von 3000 mg/m³. Bei der Auslegung des Abgassystems müssen die abrasiven Eigenschaften der Abgasbestandteile berücksichtigt werden.

Im Rahmen eines Vortrages des Fachausschusses VI der DGG wurde von einem Ofenbauer eine realisierte Querbrennerwanne mit großem Kamervolumen und sehr hohem Elektroenergieanteil vorgestellt, die im spez. Energieverbrauch unterhalb von 3.400 kJ/KGlas liegt. Aus den Erfahrungen der HVG stellt diese Anlage eine Ausnahme dar.

5.1.3 Anlage 3:

Schwerölbeheizte U-Flammenwanne mit Abgaswärmennutzung und Elektrofilter

5.1.3.1 Schmelzanlage

| | Anlage 3 |
|---|--|
| Wannenbauart | U-Flammenwanne |
| Luftvorwärmung | Regenerativ |
| Schmelzfläche | 100 m ² |
| Brenneranzahl je Feuerseite | 2 |
| Art der Zerstäubung | Pressluft / Gas |
| Brennstoffart | Heizöl S (1% S), H _U = 41.018 kJ/m ³ ; Erdgas H, H _U = 35.964 kJ/m ³ |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | 2.010 kVA |
| Glasfarbe | Braun |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 300 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 1997 |
| Geplante Wannenlaufzeit | Jahr 2009 |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Nahstöch. Verbrennung, Abdichtmaßnahmen, Lambda Regelung, Ofenraumgeometrie, Brenneranordnung |
| Sonstige Maßnahmen | Filterstaubrückführung / Sulfatreduzierung |
| Vergütungsmittel (Heißend) | TiCl ₄ / SnCl ₄ |
| Emissionsweg Heißendvergütung | Filteranlage Schmelzwanne |
| Betriebsdaten | Aktuelle Durchschnittswerte |
| Schmelzleistung | 297 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 72 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 3 % |
| Ölverbrauch | 920 kg/h |
| Gasverbrauch | 300 m ³ /h |
| Leistung der Elektrozusatzheizung (EZH) | 1.000 kW |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.605 °C |
| Spez. Schmelzleistung | 2,97 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch (inkl. EZH) | 4.212 kJ/kg _{Glas} |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Eine Kostenabschätzung der primären NO_x-Minderungsmaßnahmen wurde vom Betreiber als schwierig eingestuft, da es sich um Vorgänge handelt, die in den zurückliegenden Jahren in Eigenleistung konsequent umgesetzt wurden. Gegenüber regenerativ beheizten Querbrennerwannen ist der Investitionsbedarf und die Betriebskosten einer U-Flammenwanne, z.B. zur Installation von ZrO₂-Sonden zur Sauerstoffmessung im Kammerkopf oder der Brennstoff-Luft-Regelung, deutlich geringer. In der Summe aller Maßnahmen kann orientierend ein Wert von **€0,3/t_{Glas}** angegeben werden.

Anmerkung: Die aktuellen Daten repräsentieren den Zustand der Schmelzwanne nach einer Wannenlaufzeit von 8 Jahren. An der gleichen Anlage wurden in den zurückliegenden Jahren die Betriebsdaten im Zuge von Emissionsmessungen ebenfalls dokumentiert. Bei vergleichbaren Randbedingungen stieg der spezifische Energieverbrauch (inkl. EZH) wie folgt:

| Jahr | Spez. Energieverbrauch [kJ/kg _{Glas}] |
|------|--|
| 1997 | 3.397 |
| 2000 | 3.770 |
| 2003 | 4.070 |
| 2005 | 4.212 |

Dies entspricht einer **jährlichen Steigerung** des spezifischen Energieverbrauchs von etwa **2,7 %**.

Deutlich gravierender als die Erhöhung des spezifischen Energieverbrauchs macht sich kostenseitig der enorme Anstieg der Energiepreise bemerkbar.

5.1.3.2 Abgaswärmemenutzung:

| | |
|---|------------------------------|
| Wärmetauscherart | Rohrbündel |
| Wärmeträgermedium | Wasser / Dampf |
| Nutzung der gewonnenen Energie | El. Strom / Brauchwasser |
| Einbauort | Reingas nach E-Filter |
| Abreinigungsart | Druckluft |
| Abreinigung | Online |
| Staubentsorgungsweg | Gemengebeimischung |
| Verfügbarkeit | 99 % |
| Temperaturdifferenz | ca. 150 °C |
| Abgasvolumenstrom, feucht, Normzustand | ca. 25.500 m ³ /h |
| Zurückgewonnene Energiemenge | ca. 1.500 kWh/h |

Die zurückgewonnene Energie wurde überschlagen.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Wärmetauscher inkl. Zubehör [€] |
|--|---------------------------------------|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 1.670.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 222.111,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung / Beseitigung von Filterstaub, Personal, Sonstiges | 33.500,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>255.611,-</u> |

Dies entspricht einem Aufwand von 0,0195 €/kWh zurückgewonnener Energie.

Auf die Tonnage umgelegt liegen die Invest-/Betriebskosten bei **€2,36/t_{Glas}**.

5.1.3.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|-----------------------|-----------------------------|
| Filtertyp | Elektrofilter mit 2 Feldern |
| Temperatur vor Filter | 400 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | 28 kg/h |
| Wassereindüsung | Nach Bedarf |
| Filterstaubmenge | 300 t/a |
| Filterstaubverwendung | 100 % Recycling (Gemenge) |
| Energiebedarf Gebläse | 125 kWh/h |
| Energiebedarf Filter | 65 kWh/h |
| Wartungsintervall | Jährlich |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten (Jahr 2005)

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Messwert, normiert auf 8 % O ₂ [mg/m ³] | Messwert [kg/t _{Glas}] | Minderung [%] |
|-------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|------------------|
| Gesamtstaub | 20 | 1,2 | 0,0019 | 99,9 |
| NO _x | 800 | 507 | 0,82 | - |
| SO _x | 1.400 | 829 | 1,34 | 53 |
| HF | 5 | 3,3 | 0,0053 | 88 |
| HCl | 30 | 25,0 | 0,0405 | 71 |
| Schwermetalle: | | | | |
| Klasse I TA Luft 1986 | 0,2 | 1,2 · 10 ⁻³ | 1,9 · 10 ⁻⁶ | n.b. |
| Klasse II TA Luft 1986 | 1,0 | 124 · 10 ⁻³ | 201 · 10 ⁻⁶ | n.b. |
| Klasse III TA Luft 1986 | 5,0 | 29 · 10 ⁻³ | 47 · 10 ⁻⁶ | n.b. |

n.b.: nicht bestimmt

Die niedrigsten normierten **NO_x-Konzentrationen** im Rahmen von Emissionsmessungen nach § 28 BImSchG betragen **446 mg/m³**, allerdings zusammen mit CO-Konzentrationen von 82 mg/m³.

Der in der Tabelle aufgeführte Wert wurde ohne CO-Konzentrationen nachgewiesen.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

| | |
|---|--|
| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlage inkl. Zubehör, Gebläse, Rohrleitung, ... |
| | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 2.100.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 279.300,- |
| Betriebskosten Wartung / Reparatur: 10.000,- Elektr. Strom: 93.000,- Sorptionsmittel: 20.000,- Personal: 15.000,- Kont.- / Emissionsmessungen: 14.000,- | 152.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>431.300,-</u> |

Umgelegt auf die produzierte Glasmenge muss demnach für die **Abgasreinigung ein Betrag von €3,98/tGlas** investiert werden.

5.1.3.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung:

Für die Aufbereitung, Lagerung und den Transport von Gemenge- und Scherbenströmen existiert eine Zentralentstaubungsanlage sowie 20 einzelne sog. Siloaufsatzzfilter. Die Anlagen sind nicht überwachungspflichtig.

Bei den Siloaufsatzzfiltern fällt der abgeschiedene Staub, der während der pneumatischen Befüllung anfällt, ins Silo zurück. Der abgeschiedene Staub der Zentralentstaubungsanlage wird dem Gemenge beigemischt und eingeschmolzen.

| | |
|--|----------------------------|
| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Entstaubungsanlagen |
| | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 190.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 25.270,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung / Beseitigung von Filterstaub, Personal, Sonstiges | 8.500,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>33.770,-</u> |

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Entstaubung im Gemengehaus kostet demnach umgerechnet auf die Tonnage **€0,31/t_{Glas}**.

5.1.3.5 Formgebung / Vergütung:

Im Bereich der Formgebung existieren keine Umweltschutzmaßnahmen. Emissionen im Bereich der Fertigungsmaschinen werden über die Dachlüfter ins Freie geleitet.

Die Abgase der Heißendvergütung werden den Wannenabgasen über ein Rohrleitungssystem zugeführt und über die Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne gereinigt. Der Investitionsbedarf für Rohrleitungen aus Edelstahl betrug etwa € 20.000,-. Der Wartungsbedarf ist vernachlässigbar.

Die Kostenabschätzung liefert jährliche Gesamtkosten von € 2.660,-.

Umgelegt auf die Tonnage sind dies **€0,02/t_{Glas}**.

5.1.3.6 Abwasser:

Die Abwässer werden sowohl direkt als auch indirekt eingeleitet.

Es fallen folgende Abwässer an:

- a) Haushaltsähnliches Brauchwasser (Kantine, Toilette,...)
- b) Kühlwasser (mit Produktkontakt)
- c) Kühlwasser (ohne Produktkontakt)
- d) Prozesswasser (Scherenkühlung)
- e) Reinigungswasser (Maschinenreinigung, Formenreinigung,...)

Die Abwässer aus b) und d) werden im Kreis geführt.

Das Wasser zur Scherenkühlung wird kontinuierlich über einen Ölabscheider geleitet.

Das Abwasser aus d) wird zusammen mit dem Reinigungswasser aus e) dem Gemenge beigemischt und verbrannt.

Zur Abwasserbehandlung kommen die Verfahren Sedimentation, Filtration, Leichtstoffabscheidung und Verbrennung zum Einsatz.

Abwasservorgaben und Grenzwerte:

| | |
|--------------------|---|
| Abwassermenge: | Max. 1 m ³ /h |
| Temperatur: | Max. 35 °C |
| pH-Wert: | 6 – 9,5 |
| Absetzbare Stoffe: | 1 ml/l |
| Ungelöste Stoffe: | 50 g/m ³ |
| Farbe: | Entfärbung in kommunaler Abwasserbehandlung muss gewährleistet bleiben |
| Geruch: | Ohne belästigende Gerüche |
| Toxizität: | Keine Beeinflussung der biologischen Vorgänge in der Abwasserbehandlungsanlage – keine Beeinträchtigung der Schlammbehandlung |

| | | | | | |
|-------|----------------------|------------------------|----|-----------------------|--------------------------|
| Al | 10 g/m ³ | 370 mol/m ³ | F | 50 g/m ³ | 2.650 mol/m ³ |
| Pb | 2 g/m ³ | 10 mol/m ³ | Cu | 2 g/m ³ | 30 mol/m ³ |
| Cd | 1 g/m ³ | 10 mol/m ³ | Ni | 3 g/m ³ | 50 mol/m ³ |
| Cr | 2 g/m ³ | 40 mol/m ³ | Hg | 0,05 g/m ³ | 0,25 mol/m ³ |
| Cr VI | 0,5 g/m ³ | 10 mol/m ³ | Zn | 5 g/m ³ | 75 mol/m ³ |
| Fe | 10 g/m ³ | 180 mol/m ³ | Öl | 20 g/m ³ | |

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Abwasser [€] |
|--|-------------------------|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 330.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 43.890,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Personal, Messungen, Sonstiges: 33.000,- Reststoffe (30 m ³): 15.000,- Abwasser (indirekt / 6000 m ³ /a): 15.000,- | 63.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>106.890,-</u> |

Dies entspricht einem Betrag von **€0,99/t_{Glas}**.

Die direkt eingeleitete Abwassermenge (kostenfrei) beträgt 16700 m³/a.

Der Frischwasserbedarf wird mit einer Menge von 1750 m³/a aus Stadtwasser und ca. 17000 m³/a aus eigener Brunnenförderung gedeckt.

5.1.3.7 Abfall:

Große Mengen an Abfall fallen nach Beendigung einer Wannenreise im Zuge einer Hauptreparatur an. Sämtliche Abriss und Entsorgungsaktivitäten werden von spezialisierten Fachfirmen durchgeführt.

Das Ablassglas wird recycelt und dem Schmelzprozess erneut zugeführt.

Schamotte wird in der Regel im Straßenbau verwendet.

Schmelzgegossene Materialien (ZAC) werden wieder aufgearbeitet. Es fallen beim Abriss etwa 400 t ZAC-Material an, welches mit € 65/t vergütet wird.

Die Deponierung von Bauschutt schlägt mit € 25/t zu Buche. Die Kosten der Deponierung von "halbkontaminiertem" Feuerfestmaterial belaufen sich auf € 55/t, während "kontaminiertes" Feuerfestmaterial mit € 100/t entsorgt werden muss.

Insgesamt werden 30 % des entstehenden Abfalls verwertet und 70 % entsorgt.

In der Summe entstehen Abrisskosten in Höhe von ca. € 150.000,- und Entsorgungskosten von ca. € 130.000,-.

Über die Wannenreise betragen die Abriss und Entsorgungskosten etwa € 0,26/t_{Glas}.

Die Abfallbilanz für das gesamte Werk im Jahr 2005 (**auf die Referenzanlage 3 entfallen 1/3 der genannten Beträge**) sieht folgendermaßen aus:

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

| Art | AVV Nr. | | Tonnen | €/Tonne | Transport | Gebühr | Summe |
|--------------------------|---------|-----|----------|-----------|-----------|----------|------------|
| | | | | | € | € | € |
| PE-Folie | 150102 | V | 131,23 | -344,51 | 2.070,00 | - | -45.210,25 |
| Messing | 170401 | V | 11,65 | -1.421,12 | 0,00 | - | -16.557,15 |
| Formenguß | 170405 | V | 71,46 | -155,48 | 0,00 | - | -11.110,30 |
| Eisenschrott | 170405 | V | 164,97 | -64,97 | 416,18 | - | -10.718,92 |
| Kupfer | 170401 | V | 1,94 | -2.590,11 | 0,00 | - | -5.030,00 |
| Nickelhaltig | ? | V/E | 0,88 | -3.435,98 | 377,50 | 80,56 | -3.016,79 |
| Karton | 150101 | V | 169,57 | -12,59 | 2.764,00 | - | -2.134,48 |
| Elektrokabel | 170411 | V | 1,51 | -900,00 | 0,00 | - | -1.355,40 |
| Aluminium | 170402 | V | 0,86 | -587,04 | 0,00 | - | -507,20 |
| Batterien | 160601 | E | 0,50 | 0,00 | 0,00 | - | 0 |
| Mischpapier | 150101 | V | 43,43 | 3,73 | 1.035,00 | - | 162,12 |
| Altglas, unverwertbar | 101112 | V | 1,97 | 111,03 | 48,50 | - | 218,73 |
| Basen | 06XXXX | E | 0,03 | 7.558,62 | 65,70 | 110,00 | 219,20 |
| Mineralfaser | 170604 | E | 1,07 | 215,00 | 0,00 | - | 230,05 |
| Leuchtstoffröhren | 060404 | E | 0,23 | 1.122,25 | 22,09 | - | 254,75 |
| Farben, Lacke | 080111 | E | 0,28 | 1.100,23 | 38,34 | 55,00 | 308,08 |
| Fettabstreicher, Kantine | 020204 | V | 4,50 | 71,11 | 0,00 | 5,00 | 320,00 |
| Lösemittel | 14060X | E | 0,70 | 983,65 | 63,90 | 110,00 | 684,62 |
| Elektronik Schrott | 200135 | V | 7,86 | 118,72 | 122,00 | - | 933,11 |
| Spraydosen | 160504 | E | 0,57 | 2.754,39 | 973,50 | 55,00 | 1.570,00 |
| Chemikalien | ? | E | 1,55 | 1.094,00 | 43,80 | 190,00 | 1.693,51 |
| Bauschutt | 170107 | V | 61,82 | 29,47 | 568,41 | - | 1.821,94 |
| Maschinenöl, chlорfrei | 130205 | V | 40,43 | 49,55 | 65,56 | 140,00 | 2.003,17 |
| Altholz A1 | 170201 | V | 85,76 | 24,27 | 1.653,00 | - | 2.081,80 |
| Ölhaltige Betriebsmittel | 150202 | V | 11,98 | 257,89 | 94,50 | - | 3.089,50 |
| Schlämme | 130503 | V | 19,56 | 176,94 | 646,74 | 1.777,47 | 3.460,99 |
| Kehrgut | 200303 | V/E | 66,47 | 60,13 | 681,50 | - | 3.996,80 |
| Kammerschlacke | 161105 | V | 60,41 | 141,91 | 3.527,00 | 393,92 | 8.572,49 |
| Sortierbarer Abfall | 150106 | V | 114,08 | 140,38 | 1.101,00 | - | 16.015,08 |
| Glasschlamm | 101114 | V/E | 162,89 | 241,63 | 8.158,70 | 114,00 | 39.359,70 |
| | | | 1.240,15 | 6,97 | 24.536,92 | 3.030,95 | -8.645,19 |

V: Verwertung

E: Entsorgung

Die Einnahmen aus dem Abfall belaufen sich auf € 95.640,84. Diese liegen damit um € 8.645,19 über den Ausgaben von € 86.955,64.

5.1.3.8 Bewertung der Referenzanlage 3:

Die Anlage ist der HVG seit Jahrzehnten bekannt. Sie ist eine der ersten Glasschmelzwannen, die mit kontinuierlicher Emissionsmesstechnik ausgerüstet wurden.

In den zurückliegenden Jahren wurden primärseitige NO_x-Minderungspotentiale konsequent ausgeschöpft und dauerhaft nachgewiesen. Das Bemühen der Betriebsleitung orientierte sich dabei nicht nur an existierenden Emissionsgrenzwerten, sondern vielmehr an der strikten Umsetzung der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten primäre Minderungsmaßnahmen umzusetzen.

Mit einem normierten NO_x-Wert von rund 500 mg/m³ bzw. 0,8 kg/t_{Glas} markiert die Referenzanlage selbst nach einer Laufzeit von 8 Jahren den niedrigsten Wert aller in Deutschland betriebener konventionell befeuerter Hohlglaswannen mit regenerativer Luftvorwärmung. Zu Beginn der Wannenreise lag die spez. NO_x-Emission sogar bei 0,65 kg/t_{Glas}. Während im Jahr 2005 der spez. Energieverbrauch bei 4.212 kJ/kg_{Glas} lag, betrug er im Neuzustand der Wanne 3.397 kJ/kg_{Glas}. Der jährliche Zuwachs des spez. Energiebedarfs von etwa 2,7 % ist repräsentativ für den Alterungsprozess von Glasschmelzwannen mit regenerativer Luftvorwärmung. Mit dem Anstieg des Energieverbrauchs steigen auch die feuerungsbedingten Emissionen.

Durch den Betrieb der Abgaswärmenutzung wird die Energiemenge der in die Schmelze eingebrachten Elektrozusatzheizung kompensiert. Berücksichtigt man die aus dem Abgas zurück gewonnene Energiemenge, so liegt der spez. Energiebedarf nach 11 Jahren Wannenreise bei 3.921 kJ/kg_{Glas}.

Neben den Stickstoffoxiden unterschreiten auch die anderen Emissionskomponenten die geforderten Grenzwerte, auch die der aktuellen TA-Luft aus dem Jahr 2002.

Addiert man die Kosten für primäre und sekundäre luft- und abwasserseitige Umweltschutzmaßnahmen auf, so resultiert ein Betrag von € 5,80/t_{Glas}. Hinzu addiert sich der Betrag für die Wärmerückgewinnung von € 2,36/t_{Glas}, den man allerdings mit der gewonnenen Energie verrechnen muss.

Die Abgasreinigungsanlage ist großzügig ausgelegt. Die Staubemissionen liegen auf einem für E-Filteranlagen außerordentlich niedrigen Wert von 1,2 mg/m³. Die HF- und HCl-Konzentrationen lagen in der Vergangenheit mit 0,8 bzw. 4 mg/m³ auf einem deutlich niedrigeren Niveau, allerdings bei höherer Sorptionsmittelmenge. Die Menge an Sorptionsmittel wurde nach bekannt werden der Messergebnisse aus dem Jahr 2005 wieder auf das alte Niveau angehoben.

Energie-, Abgas-, Abfall- und Abwassermanagement sind als vorbildlich zu bezeichnen.

5.1.4 Anlage 4:**Gasbeheizte U-Flammenwannen mit SCR-Anlage und E-Filter****5.1.4.1 Schmelzanlage**

Bei dieser Anlagenkonfiguration stand die Kombination aus Abgasreinigungsanlage im Verbund mit der selektiven katalytischen Reduktion (SCR-Anlage) im Vordergrund. Die Themen Abfall und Abwasser sowie die Schmelzanlagen wurden nicht betrachtet.

Die Abgase setzen sich aus dem gemeinsamen Abgas von 4 erdgasbeheizten U-Flammenwannen mit regenerativer Luftvorwärmung zusammen.

5.1.4.2 Abgaswärmenumutzung:

Neben den Regeneratoren zur Vorwärmung der Verbrennungsluft wird keine Abgaswärmenumutzung betrieben.

5.1.4.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwannen:

| | |
|----------------------------|-----------------------------|
| Filtertyp | Elektrofilter mit 5 Feldern |
| Temperatur vor Filter | 380 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | 35 kg/h |
| Wassereindüsung | Nein |
| Filterstaubmenge | 550 t/a |
| Filterstaubverwendung | 100 % Recycling (Gemenge) |
| Energiebedarf | 545 kWh/h |
| Wartungsintervall | Jährlich |
| Abgasvolumenstrom, trocken | 57.000 m ³ /h |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

Der nachgeschaltete zweilagige Wabenkatalysator wurde 1994 installiert und wird quasi-kontinuierlich mit vorgewärmer Druckluft abgereinigt. Als Reduktionsmittel dient 25%-ige NH₃-Lösung.

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten (Jahr 2001)

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Messwert, normiert auf 8 % O ₂ [mg/m ³] | Messwert [kg/t _{Glas}] | Minderung [%] |
|-------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|------------------|
| Gesamtstaub | 50 | 5,4 | 0,0094 | > 99 |
| NO _x | 500 | 389 | 0,68 | 78 |
| SO _x | 1.800 | 291 | 0,51 | 42 |
| HF | 5 | 2,1 | 0,0036 | 83 |
| HCl | 30 | 19,4 | 0,0342 | 52 |
| NH ₃ | 30 | 8,4 | 0,0149 | - |
| Schwermetalle: | | | | |
| Klasse I TA Luft 1986 | 0,2 | < 0,02 | < 0,04 · 10 ⁻³ | n.b. |
| Klasse II TA Luft 1986 | 1,0 | 0,88 | 1,55 · 10 ⁻³ | 88 |
| Klasse III TA Luft 1986 | 5,0 | 0,30 | 0,53 · 10 ⁻³ | 96 |

n.b.: nicht bestimmt

Die Höhe der Emissionen der Stoffe der Klasse II ist im Wesentlichen auf gasförmige Selenverbindungen zurückzuführen.

Die Tonnage lag bei 640 t/d. Zum Zeitpunkt der Messungen wurden 110 l/h Ammoniakwasser eingedüst.

Die Emissionsmessungen im Jahr 2004 lagen auf dem gleichen Niveau, allerdings war der NH₃-Schlupf mit 19,5 mg/m³ deutlich höher und die normierten NO_x-Konzentrationen betrugen 456 mg/m³.

Der gesamte elektrische Energiebedarf der Filter- mit SCR-Anlage, inklusive Ammoniaklager, Dosierung, Druckluft und sonstiger Verbraucher wurde mit 547 kW angegeben.

Als Strompreis wurden € 0,065/kWh angenommen.

Für Ammoniakwasser (25 %) werden 110 €/m³ angesetzt.

Vom Anlagenbetreiber wurde eine Abschreibungszeit von 13 Jahren angegeben. Zum Vergleich mit anderen Anlagen, die 10 Jahre abschreiben, werden auch in diesem Fall 10 Jahre herangezogen.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die gesamte Finanzierung erfolgte im Rahmen eines öffentlich mitfinanzierten Förderprojektes.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlage inkl. Zubehör, Gebläse, Rohrleitung, ... [€] | SCR inkl. Lagerung, Dosierung, ... [€] |
|---|---|--|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 3.950.000,- | 2.350.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 525.350,- | 312.550,- |
| Betriebskosten Wartung / Reparatur: 10.000,- Elektr. Strom: 311.460,- Sorptionsmittel: 25.000,- Personal: 15.000,- Kont.- / Emissionsmessungen (5.000,-) Ammoniakwasser (110 €/m ³ / 106,000,-) | | 472.460,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>1.310.360,-</u> | |

Umgelegt auf die produzierte Glasmenge muss demnach für die **Abgasreinigung inkl. SCR ein Betrag von €5,61/t_{Glas}** investiert werden.

Der Anteil für den Katalysator beträgt rund **€ 2,00/t_{Glas}**, wenn man bei den Betriebskosten (ohne Ammoniakwasser) einen Betrag für die SCR-Anlage von jährlich € 50.000,- ansetzt.

Die Punkte 5.1.4.4 bis 5.1.4.7 wurden im Rahmen des Projektes nicht durchleuchtet.

5.1.4.8 Bewertung der Referenzanlage 4:

Die Referenzanlage 4 ist abgasseitig mit einem Elektrofilter inkl. vorgeschalteter Trockensorptionsstufe (Ca(OH)_2 als Sorptionsmittel) und nachgeschalteter SCR-Anlage mit 25 prozentiger Ammoniaklösung als Reduktionsmittel ausgerüstet. Sie ist seit 12 Jahren ununterbrochen ohne Katalysatortausch in Betrieb. Sie hat damit den Beweis erbracht, dass Stickstoffoxide im Abgas von erdgasbefeuerten Glasschmelzwannen mit dem reingassseitigen Verfahren der selektiven katalytischen Reduktion wirksam reduziert werden können.

Damit sprechen hauptsächlich wirtschaftliche Gründe gegen diese Technologie. Unter den vorgefundenen Randbedingungen müssen zusätzlich etwa 2 €/t_{Glas} aufgewendet werden, um NO_x-Werte von weniger als 500 mg/m³ zu realisieren. Beachten muss man auch die zusätzliche Umweltbelastung durch den zusätzlichen Ammoniakschlupf und den zur Ammoniakerzeugung notwendigen Energieverbrauch.

Beim Betrieb einer SCR-Anlage muss auf die Feuerungsbedingungen der Schmelzwannen geachtet werden. Hier haben die Erfahrungen der HVG gezeigt, dass primären NO_x-Minderungsmaßnahmen nur noch wenig Aufmerksamkeit gewidmet wird. Dies führt zu einer Erhöhung des Ammoniakverbrauchs und im Allgemeinen zum Anstieg des spez. Energieverbrauchs.

Neben den Stickstoffoxiden unterschreiten auch die anderen Emissionskomponenten die geforderten Grenzwerte, auch die der aktuellen TA-Luft aus dem Jahr 2002.

5.1.5 Weitere Angaben zur Behälterglasindustrie:

Wie bereits erwähnt gab es im Bereich der Hohlglasindustrie zwischen den Jahren 2000 und 2005 erhebliche wirtschaftliche Schwierigkeiten, mit der Folge von Produktionsstilllegungen und Werkschließungen. Die Maßnahmen der Konsolidierung nahmen dabei keine Rücksicht auf Anlagen, die als BVT-Anlagen einzustufen sind (Oxy-Fuel-Wanne mit Rohstoffvorwärmer - LowNO_x-Melter - U-Flammenwanne mit Rohstoffvorwärmung).

Folgende Anmerkungen zu stillgelegten Wannen können aufgeführt werden:

Low-NOx-Melter

Betriebsdaten von existierenden Low-NOx-Meltern konnten nicht gewonnen werden. Aus diesem Grund können nur einige Angaben zu einer stillgelegten Anlage gemacht werden, die während einer Emissionsmessung im Jahr 2000 vorgefunden wurden:

| LowNOx-Melter | |
|------------------------------------|--|
| Schmelzfläche | 194 m ² |
| Brenneranzahl je Feuerseite | 10 |
| Art der Zerstäubung | Pressluft / Gas |
| Brennstoffart | Heizöl S (max. 1% S) $H_U = 40300 \text{ kJ/m}^3$ |
| Elektrozusattheizung (installiert) | 2860 kVA |
| Glasfarbe | Grün |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 390 t/d |
| Baujahr | Jahr 1997 |

| Betriebsdaten | Jahr 2000 |
|---|-------------------------|
| Schmelzleistung | 358 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 80 % |
| Ölverbrauch | 1.429 kg/h |
| Gasverbrauch | 300 m ³ /h |
| Max. Gewölbetemperatur | 1560 °C |
| Spez. Schmelzleistung | 1,85 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch (inkl. EZH) | 4008 kJ/kg Glas |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

Die Anlage war mit einem Rohstoffvorwärmer ausgestattet. Angaben zur Abgaswärmever Nutzung liegen nicht vor.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Daten der Abgasreinigungsanlage:

| | |
|-----------------------|-----------------------------|
| Filtertyp | Elektrofilter mit 2 Feldern |
| Temperatur vor Filter | 180 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | 30 kg/h |
| Filterstaubverwendung | 100 % Recycling (Gemenge) |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten (Jahr 2000)

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Messwert, normiert auf 8 % O ₂ [mg/m ³] |
|-------------------------|-----------------------------------|---|
| Gesamtstaub | 40 | 2,7 |
| NO _x | 650 | 336 |
| SO _x | 1600 | 1326 |
| HF | 5 | 0,6 |
| HCl | 15 | 10,2 |
| Schwermetalle: | | |
| Klasse I TA Luft 1986 | 0,2 | - |
| Klasse II TA Luft 1986 | 1,0 | 0,014 |
| Klasse III TA Luft 1986 | 5,0 | 0,017 |

n.b.: nicht bestimmt

Die CO-Konzentrationen lagen bei 58 mg/m³.

Oxy-Fuel-Wanne mit Rohstoffvorwärmung

Anfang 2005 wurde eine mischbefeuerte (Schweröl – Erdgas) Oxy-Fuel-Wanne mit Rohstoffvorwärmer zur Produktion von Behälterglas stillgelegt. Die Wanne war für eine Schmelzleistung von 415 t/d ausgelegt und wurde zu Beginn der Wannenreise mit einem spezifischen Wärmeverbrauch (inkl. EZH) von 3020 kJ/kg_{Glas} betrieben. Inklusive dem Energieaufwand für die Erzeugung des Sauerstoffs (VSA-Sauerstoff) wurde ein bemerkenswert günstiger Wert von 3238 kJ/kg_{Glas} angegeben, was einem Energiebedarf der Sauerstofferzeugung von rund 60 kWh/t_{Glas} entspricht. Aus anderen Quellen wird vom dreifachen des genannten Wertes berichtet.

Die NO_x-Emissionen lagen im Bereich von 0,25 kg/t_{Glas}, allerdings begleitet von CO-Emissionen von 0,08 kg/t_{Glas}.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Handling- und Verschleißprobleme des Schmelzgutvorwärmers führten dazu, dass die Anlage außer Betrieb genommen wurde. Nach 7 Jahren Laufzeit wurde ein Energieverbrauch ohne VSA-Sauerstofferzeugung von 3.618 kJ/kg Glas vorgefunden, also eine jährliche Steigerung von 2,6 %.

Die Oxy-Fuel-Wanne war zusammen mit zwei weiteren konventionell befeuerten Schmelzwannen an eine Elektrofilteranlage mit trockener Sorptionsstufe angeschlossen. Die geforderten Grenzwerte des Genehmigungsbescheides wurden eingehalten.

U-Flammenwanne mit Rohstoffvorwärmung

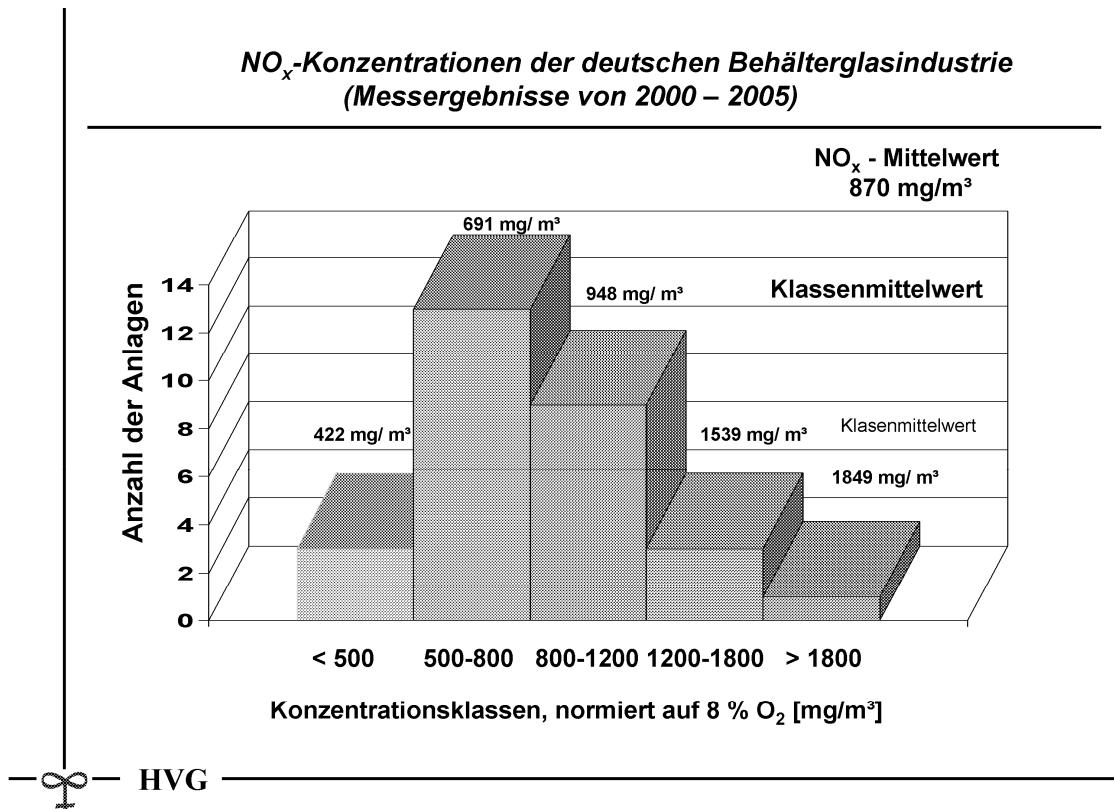
Der spez. Energieverbrauch der stillgelegten Wanne lag nach einer Laufzeit von 11 Jahren bei 4.027 kJ/kg Glas.

Die aufgeführten BVT-Anlagen sind natürlich nicht repräsentativ für die gesamte Behälterglasindustrie hinsichtlich ihres Energiebedarfs und die Auswirkungen auf die Umwelt. Die Erfassung aller Anlagen würde den Rahmen dieses Projektes sprengen.

Hohlgläser werden in Deutschland überwiegend in U-Flammenwannen mit regenerativer Luftvorwärmung geschmolzen. Die Schmelzflächen liegen zwischen 16 m² und 120 m². Die spezifischen Energieverbräuche sind dabei von vielen Faktoren abhängig, wie der Größe und Auslastung der Anlage, der Wannen- und Kammerkonstruktion, den Qualitätsanforderungen, dem Scherbenanteil, dem erschmolzenen Glastyp, dem Wannenalter, der Feuerführung oder dem Brennstoff.

Im Neuzustand einer hochbelasteten großen U-Flammenwanne können dabei spez. Energieverbräuche (inkl. EZH) von 3.200 kJ/kg erzielt werden. Kleinere, effiziente Anlagen mit 40 m² liegen im Neuzustand über 4.000 kJ/kg.

Abschließend sind die anhand von der HVG durchgeföhrten Emissionsmessungen aus den Jahren 2000 bis 2005 im Bereich der Behälterglasindustrie vorgefundenen NO_x-Konzentrationen von 29 Anlagen bildlich dargestellt.



Man sieht, dass rund die Hälfte der Anlagen den ab dem Jahr 2010 gültigen Emissionsgrenzwert von 800 mg/m³ bereits heute unterschreiten. Auf der anderen Seite gibt es eine ganze Reihe von Anlagen, für die dieser Grenzwert nach wie vor einen Zielwert darstellt.

Zu den Anlagen des Konzentrationsbereiches unterhalb von 500 mg/m³ zählt eine konventionell beheizte U-Flammenwanne (Referenzanlage 3), eine Anlage mit SCR-Technologie (Referenzanlage 4) sowie ein mittlerweile stillgelegter LowNO_x-Melter.

Bei dem angegebenen Mittelwert handelt es sich um einen arithmetischen Wert aus der Anzahl der Anlagen, also nicht bezogen auf die Schmelzleistung.

5.2 Flachglas:

In Deutschland existieren zur Zeit 11 Floatglaslinien sowie 3 Gussglaswannen.

Alle Floataggregate nutzen Querbrennerwannen mit regenerativer Luftvorwärmung als Schmelzaggregate und sind abgasseitig mit Elektrofiltern und Trockensorptionsstufe ausgerüstet. Als Energieträger kommen sowohl Erdgas als auch schweres Heizöl zum Einsatz. Die maximalen Tonnagen bewegen sich je nach Wanne und erschmolzenem Glas zwischen 550 t/d und über 800 t/d.

Die Qualitätsanforderungen an das geschmolzene Glas sind gegenüber der Hohlglasindustrie deutlich höher. Alle Maßnahmen zur Reduzierung umweltbelastender Emissionen unterliegen den Qualitätsansprüchen. Selbstverständlich nutzen alle Betreiber die bekannten Möglichkeiten der primären Maßnahmen zur NO_x-Reduzierung. Dennoch sind die eingesetzten primären Verfahren zur Reduzierung der Stickstoffoxidemissionen unterschiedlich.

Im Jahr 2006 wurde eine komplett neue Floatlinie in der Nähe von Magdeburg errichtet, die mit einer SCR-Anlage ausgerüstet ist. Nach der TA-Luft aus dem Jahr 2002 müssen Neuanlagen dieser Größe einen NO_x-Grenzwert von 500 mg/m³ einhalten. Messwerte bzw. Betriebserfahrungen liegen der HVG nicht vor.

Bei den Gussglaswannen liegen die max. genehmigten Schmelzleistungen bei 350 t/d. Auch hier sind die Schmelzaggregate Querbrennerwannen. Seit 1996 wird allerdings eine Gussglaswanne mit VSA-Sauerstoff als Oxidationsmedium und schwerem Heizöl als Brennstoff betrieben. Unter dem Punkt 5.2.3 werden zu dieser Anlage einige Angaben gemacht.

Leider ist es im Rahmen des Projektes nicht gelungen, Angaben einer erdgasbeheizten Floatanlage zu gewinnen, die das 3R-Verfahren einsetzt.

Als Referenzanlagen wurden eine Gussglaswanne und eine Floatwanne untersucht, die beide schwerölbeheizt sind, zusätzliche Abgaswärmeverwendung betreiben und mit aufwendigen Maßnahmen zur primärseitigen NO_x-Minderung ausgestattet sind.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.2.1 Anlage 5:**

**Schwerölbeheizte Gussglaswanne
mit Abgaswärmevernutzung und Elektrofilter**

5.2.1.1 Schmelzanlage

| Anlage 5 | |
|---|---|
| Betriebsdaten | Durchschnittswerte |
| Wannenbauart | Querbrennerwanne |
| Luftvorwärmung | Regenerativ |
| Schmelzfläche | 136 m ² |
| Art der Zerstäubung | Pressluft |
| Brennstoffart | Heizöl S, H _U = 40.700 kJ/m ³ |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | 1.000 kVA |
| Glasfarbe | Weiß, Extraweiß, Bronze, Gelb |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 350 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 2000 |
| Geplante Wannenlaufzeit | Jahr 2010 |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Nahstöch. Verbrennung, Abdichtmaßnahmen, einstellbare Brenner, Lambda Regelung, Brenneranordnung |
| Sonstige Maßnahmen | Filterstaubrückführung / Sulfatreduzierung |
| Abgaswärmevernutzung | Rohgaswärmetauscher |
| (Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand) | |
| Schmelzleistung | 259 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 30 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 4,6 % |
| Ölverbrauch | 1.515 kg/h |
| Leistung der Elektrozusatzheizung (EZH) | - |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.550 °C |
| Spez. Schmelzleistung | 2,35 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch | 5.710 kJ/kg Glas |

Die genannten Werte repräsentieren den Zustand der Anlage nach einer Laufzeit von 5 Jahren und der Produktion von herkömmlichen Gussglas.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Momentan wird ein Glas erschmolzen, welches besonderen Qualitätsansprüchen genügen muss (Einsatz bei Photovoltaik-Solarkollektoren) und einen höheren spezifischen Energiebedarf (6.145 kJ/kg_{Glas}) benötigt.

Der spez. Energieverbrauch hängt neben den Gegebenheiten der Wannen- und Kammerkonstruktion, der Isolation, dem Brennstoff-Luft-Verhältnis, der Feuerführung, dem Scherbenanteil usw. insbesondere von der Schmelzleistung der Wanne ab.

Hohe Auslastung begünstigt den spez. Energieverbrauch, da die Wärmeverluste im Oberofen und im Kammerbereich bezogen auf die Tonnage abnehmen. Im vorliegenden Fall ist die Tonnage stark produkt- und marktabhängig, so dass zeitweise nur zwei der drei Produktionslinien in Betrieb sind. Die Auslastung schwankt damit zwischen 200 und 320 t/d.

Im **Neuzustand** der Anlage lag bei hoher Auslastung der spez. Energieverbrauch bei **5.050 kJ/kg_{Glas}**. Die Erhöhung des Energieverbrauchs durch Wannenalterung beträgt **2,5 % pro Jahr**.

Die Schmelzwanne verfügt über ein getrenntes Kammersystem mit Zwischenwänden in den Regeneratoren, d. h. jede der 6 Kammern je Feuerseite besitzt getrennte Umsteuereinrichtungen für Abgas und Verbrennungsluft (Schieber und Kanäle), Einzelgebläse mit Regeleinrichtungen und ZrO₂-Sonden zur Sauerstoffmessung im Kammerkopf. Dazu gehört auch eine aufwendige Mess- und Regeleinrichtung. Kontrolliert und dokumentiert werden sämtliche Mess- und Regelgrößen, Energieverbrauch, Sauerstoffgehalt in den Kammerköpfen und die Emissionen. Die kontinuierliche Emissionsmesstechnik erlaubt die Erfassung der Emissionskomponenten NO_x, SO₂ und Staub sowie die der Abgasrandbedingungen O₂ und Temperatur. Über die Erfassung der Ölmenge wird der Abgasvolumenstrom und die Emissionsmassenströme abgeleitet.

All diese Maßnahmen und die Bereitschaft der Betriebsleitung den Prozess umweltverträglich und energetisch ständig zu optimieren sind notwendig, um den bereits im Genehmigungsbescheid fixierten NO_x-Emissionsgrenzwert von 800 mg/m³ (Fahrweise ohne Nitratläuterung) dauerhaft einhalten zu können. Auch hier gestaltet sich eine Kostenabschätzung aller Installationen, die in der Summe als primäre NO_x-Minderungsmaßnahmen verstanden werden müssen, schwierig.

Gegenüber einer regenerativ beheizten U-Flammenwanne sind Investitionskosten und Betriebskosten deutlich höher. Da bei der Hauptreparatur kein Vergleichsangebot einer Schmelzwanne ohne getrenntes Kammersystem eingeholt wurde, stützt sich die Kostenabschätzung auf Aussagen von Ofenbauern, den Angaben der Betriebsleitung und anderer Fachleute ab. Dennoch bleibt es eine Abschätzung mit einer relativ großen Unsicherheit.

Zwischenwände, Schieber, Abgaskanäle sind für eine Betriebsdauer von 20 Jahren ausgelegt. Zu den Installationskosten sind außerdem die notwendige Mess- und Regelungstechnik und die kontinuierliche Emissionsüberwachung zu zählen. Die Installation und Wartung der ZrO₂-Sonden läuft auf Leasingbasis.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Kostenabschätzung berücksichtigt den Mehraufwand gegenüber einer Anlage ohne Minderungsmaßnahmen.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 20 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Primäre NO_x-Maßnahmen Schmelzwanne [€] |
|--|---|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 1.500.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 126.000,- |
| Betriebskosten Energie: 5.000,- Sauerstoffmessung: 30.000,- Emissionsmessung (anteilig): 5.000,- | 40.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>166.000,-</u> |

Die Messwerte der Emissionsmessung sind als Kontrollmechanismus erforderlich. Sie werden normalerweise der Abgasreinigungsanlage zugerechnet, im vorliegenden Fall jedoch zu 50 % den Primärmaßnahmen zugeordnet.

Bei einer durchschnittlichen Tonnage von **259 t/d** ergibt sich damit ein Betrag für **primärseitige NO_x-Minderungsmaßnahmen von € 1,76 /t_{Glas}**. Bei voller Auslastung der Wanne ergeben sich € 1,42 / t_{Glas}.

Je größer die Anlage, um so geringer wirken sich die Kosten für primäre NO_x-Minderungsmaßnahmen auf die Tonne produzierten Glases aus. Bei einem Investitionsbedarf von etwa € 2.000.000,- und gleichen Betriebskosten können für eine **Floatanlage mit 750 t/d** Schmelzleistung rund **€ 0,80/t_{Glas}** überschlagen werden.

5.2.1.2 Abgaswärmemenutzung:

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Wärmetauscherart | Rohrregister |
| Wärmeträgermedium | Wasser / Dampf |
| Nutzung der gewonnenen Energie | Brauchwasser / Heizung / Ölvorwärmung |
| Einbauort | Rohgas vor E-Filter |
| Abreinigungsart | Kugelregenanlage |
| Abreinigung | Online |
| Staubentsorgungsweg | Sondermüll |
| Verfügbarkeit | 99 % |
| Temperaturdifferenz | ca. 200 °C |
| Zurückgewonnene Energiemenge | ca. 1.500 kWh/h |

Legt man die zurückgewonnene Energiemenge auf die Schmelzleistung um, so ergibt sich ein Wert von 139 kWh/t_{Glas} bzw. 500 kJ/kg_{Glas}.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Wärmetauscher inkl. Zubehör [€] |
|--|---------------------------------|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 500.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 66.500,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung / Beseitigung von Filterstaub, Personal, Sonstiges | 60.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>126.500,-</u> |

Dies entspricht einem Aufwand von 0,010 €/kWh zurück gewonnener Energie.

Auf die Tonnage umgelegt liegen die Invest-/Betriebskosten bei **1,34 €/t_{Glas}**.

5.2.1.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Filtertyp | Elektrofilter mit 2 Feldern |
| Temperatur vor Filter | max. 300 °C |
| Sorptionsmittelart | NaHCO ₃ |
| Sorptionsmittelmenge | 55 kg/h |
| Wassereindüsung | Im Sommer: Ja Im Winter : Nein |
| Filterstaubmenge | 570 t/a |
| Filterstaubverwendung | 100 % Recycling (Gemenge) |
| Energiebedarf Filter + Gebläse | 125 kWh/h |
| Wartungsintervall | Jährlich |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Messwert, normiert auf 8 % O ₂ [mg/m ³] | Messwert [kg/t _{Glas}] |
|---------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Gesamtstaub | 20 | 3,0 | 0,0048 |
| NO _x | 800 | 780 | 1,89 |
| NO _x (Nitrateinsatz) | 1.600 | 1.150 | 2,78 |
| SO _x | 1.200 | 1.150 | 2,78 |
| HF | 5 | 3,7 | 0,0089 |
| HCl | 30 | 7,0 | 0,0169 |
| Schwermetalle: | | | |
| Klasse I TA Luft 1986 | 0,2 | 0,6 · 10 ⁻³ | 1,5 · 10 ⁻⁶ |
| Klasse II TA Luft 1986 | 1,0 | 4 · 10 ⁻³ | 9,7 · 10 ⁻⁶ |
| Klasse III TA Luft 1986 | 5,0 | 25 · 10 ⁻³ | 60,5 · 10 ⁻⁶ |

Während der Bronzeglaskampagne muss die Sorptionsmittelmenge deutlich erhöht werden. Mit 80 kg/h lassen sich die Emissionen gasförmiger Selenverbindungen von etwa 30 mg/m³ im Rohgas auf unter 3 mg/m³ im Reingas reduzieren. Um den aktuellen Grenzwert von 1 mg/m³ einhalten zu können muss die Natriumbicarbonatmenge auf etwa 120 kg/h bzw. 3,5 g/m³ erhöht werden.

| | |
|---|--|
| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlage inkl. Zubehör, Gebläse, Rohrleitung, ... |
| | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 2.200.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 292.600,- |
| Betriebskosten | 205.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>497.600,-</u> |

Umgelegt auf die produzierte Glasmenge muss demnach für die **Abgasreinigung ein Betrag von € 5,26/t_{Glas}** investiert werden. Bei voller Auslastung der Wanne reduziert sich der Betrag auf ca. € 4,30/t_{Glas}.

Die Berechnung beruht auf der Annahme, dass die Filteranlage inkl. Dosierung neu gebaut werden muss. Ist die Anlage älter als 10 Jahre und weiterhin funktionstüchtig, so fallen die jährlichen Rückzahlungen weg. Damit schlagen bei einer abgeschriebenen Filteranlage nur noch die Betriebskosten zu Buche, also umgerechnet auf die aktuelle Tonnage sind dies € 2,17/t_{Glas}.

5.2.1.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung:

Es existieren 2 Gewebefilteranlagen (nicht überwachungspflichtig) zur Entstaubung während der Beschickung und Verwiegung der Rohstoffe bzw. des Mischerbereiches. Außerdem sind 4 Siloaufsatztfilter installiert.

Bei den Siloaufsatztfiltern fällt der abgeschiedene Staub, der während der pneumatischen Befüllung anfällt, ins Silo zurück. Der abgeschiedene Staub der Filteranlagen wird dem Gemenge beigemischt und eingeschmolzen.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Entstaubungs-Anlagen Gemengehaus [€] | Aufsatzfilter [€] |
|---|--|-----------------------------|
| Investitions-/Wiederbeschaffungskosten | 150.000,- | 40.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 19.950,- | 5.320,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung / Beseitigung von Filterstaub, Personal, Sonstiges | 20.000,- | 10.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>55.270,-</u> | |

Die Entstaubung im Gemengehaus kostet demnach umgerechnet auf die Tonnage **€0,58/tGlas**.

5.2.1.5 Formgebung / Vergütung: Entfällt

5.2.1.6 Abwasser:

Die Abwässer werden indirekt eingeleitet.

Es fallen folgende Abwässer an:

- a) Haushaltsähnliches Brauchwasser (Kantine, Toilette,...)
- b) Kühlwasser (ohne Produktkontakt)
- c) Prozesswasser (Osmosewasser zur Vollentsalzung, Abwasser aus Filterrückspülung bei Förderung Brunnenwasser)

Die Abwässer aus b) werden im Kreis geführt und aufbereitet. Außerdem unterliegt das Wasser im Abhitzekessel einer Wasseraufbereitung.

Zur Abwasserbehandlung kommen die Verfahren Filtration und Ionenaustausch zum Einsatz.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Schwellenwerte und Jahresfrachten von Inhaltstoffen:

| Spalte | | A | B | C | D | |
|-------------------------------|-------------|----------------------|---------------|-------------------|---------------|----------------|
| Emittierter Stoff (Parameter) | | Direkteinleiter | | Indirekteinleiter | | |
| Nr. | Bezeichnung | Schwellenwert [kg/a] | Fracht [kg/a] | Ermittlungsart | Fracht [kg/a] | Ermittlungsart |

1. Nährstoffe

| | | | | | | |
|----|------------------------|--------|---|---|-------|---|
| 01 | Summe Stickstoff als N | 50.000 | - | - | 4.982 | M |
| 02 | Summe Phosphor als P | 5.000 | - | - | 177 | M |

2. Metalle und Verbindungen

| | | | | | | |
|----|---|-----|---|---|------|---|
| 03 | Arsen und seine Verbindungen als As | 5 | - | - | 0,70 | M |
| 04 | Cadmium und seine Verbindungen als Cd | 5 | - | - | 0,07 | M |
| 05 | Chrom und seine Verbindungen als Cr | 50 | - | - | 0,70 | M |
| 06 | Kupfer und seine Verbindungen als Cu | 50 | - | - | 3,15 | M |
| 07 | Quecksilber und seine Verbindungen als Hg | 1 | - | - | 0,03 | M |
| 08 | Nickel und seine Verbindungen als Ni | 20 | - | - | 0,85 | M |
| 09 | Blei und seine Verbindungen als Pb | 20 | - | - | 2,14 | M |
| 10 | Zink und seine Verbindungen als Zn | 100 | - | - | 4,92 | M |

3. Chlorhaltige organische Stoffe

| | | | | | | |
|----|--|-----|---|---|-------|---|
| 11 | Dichloroethan-1,2 (DCE) | 10 | - | - | 0,07 | M |
| 12 | Dichlormethan (DCM) | 10 | - | - | 0,07 | M |
| 13 | Chloralkane (C10 – 13) | 1 | - | - | u. B. | M |
| 14 | Hexachlorbenzol (HBC) | 1 | - | - | 0,01 | M |
| 15 | Hexachlorbutadien (HCBD) | 1 | - | - | 0,01 | M |
| 16 | Hexachlorcyclohexan (HCH) | 1 | - | - | 0,01 | M |
| 17 | Halogenhaltige organische Verbindungen als AOX | 100 | - | - | 5,95 | M |

4. Sonst. Organische Verbindungen

| | | | | | | |
|----|---|--------|---|---|-------|---|
| 18 | Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylole als BTEX | 200 | - | - | u. B. | M |
| 19 | Bromierte Diphenylether | 1 | - | - | 0,01 | M |
| 20 | Organische Zinnverbindungen als Sn | 50 | - | - | 0,07 | M |
| 21 | Phenole als gesamt C | 5 | - | - | 0,75 | M |
| 22 | Polyzykl. Aromatische Kohlenwasserstoffe | 20 | - | - | 8,90 | M |
| 23 | Organischer Kohlenstoff als Gesamt – C oder CSB/3 | 50.000 | - | - | 7.428 | M |

5. Sonstige Verbindungen

| | | | | | | |
|----|----------------|-----------|---|---|-------|---|
| 24 | Chlorid als Cl | 2.000.000 | - | - | 9.096 | M |
| 25 | Cyanid als CN | 50 | - | - | 0,76 | M |
| 26 | Fluorid als F | 2.000 | - | - | 0,01 | M |

u. B. = unterhalb der Bestimmungsgrenze

| Kostenabschätzung: (Abschreibungszeit: 15 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Abwasser |
|--|----------------------------|
| | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 1.500.000,- (Sanierung) |
| Jährliche Rückzahlung | 110.000,- |
| Betriebskosten: Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Personal, Messungen, Sonstiges: 10.000,- Abwasser (indirekt / 2000 m ³ /a): 5.000,- | 15.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>125.000,-</u> |

Dies entspricht einem Betrag von **€1,32/t_{Glas}**.

Hinzu addieren sich die Kosten in Höhe von € 74.000,-, die für Niederschlagswasser aufgebracht werden müssen. Aufsummiert entspricht dies einem Gesamtbetrag für Abwasser von **€2,10/t_{Glas}**.

Der Frischwasserverbrauch beträgt 84.408 m³/a.

Die Kosten belaufen sich auf € 79.000,-.

5.2.1.7 Abfall:

Wie bei jeder Glasschmelzwanne, fällt der Löwenanteil an Abfall im Zuge einer Hauptreparatur an. Folgende Mengen an Feuerfestmaterial (nicht überwachungsbedürftig) fielen im Jahr 2000 an:

| | |
|------------------------------|----------|
| Corhart ZAC: | 137,68 t |
| Sekundärbaustoff LAGA Z 1.2: | 958,20 t |
| Sekundärbaustoff TASi 2: | 990,36 t |
| Versatzbaustoff: | 612,70 t |

Die Kosten wurden nicht durchleuchtet.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Abfallbilanz der Referenzanlage 5 für das Jahr 2005 gestaltet sich folgendermaßen:

| Abfallbezeichnung | Neuer AbfSchl. (KrW-/AbfG) ab 2002 | | | | | | | Schl. f. Ent.verf. | Menge 05 [in t] | Kosten 05 [in EURO] |
|--|---------------------------------------|--------|--------|------------|-------------|---|-----------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| | | Intern | Extern | Verwertung | Beseitigung | | Deponierung über Tage | | | |
| Leuchtstoffröhren | 200121 | | X | | x | | | R 4 | 0,2 | 333,94 |
| Glasabfall (Bruchglas) | 101112 | | X | x | | X | | D 1 | 367,74 | 12012,33 |
| Baustellenabfall BETON | 170101 | | X | X | | | | R 5 | 11,92 | 159,26 |
| Hausmüll | 200301 | | X | x | | | | D 10 | 20,93 | 11393,74 |
| Kunststoff | 150102 | | X | X | | | | R 1 | 6,85 | 2857,51 |
| verbrauchte Auskleidungen und ff. Materialien | 161106 | | | x | | | | D 1 | 13,14 | 754,54 |
| Metallabfall | 120101 | | X | X | | | | R 3 | 48,52 | -1593 |
| nichtchlorierte Maschineoole | 130205 | | x | x | | | | R 12 | 16,3 | 3436,65 |
| Schlamm aus Einlaufschächten | 130503 | | x | x | | | | R 1 | 7,5 | 758,44 |
| Papier und Pappe | 150101 | | X | X | | | | R 3 | 11,5 | 3382,09 |
| Holz | 150103 | | x | x | | | | R 1 | 95,1 | 3819,16 |
| Verpackungen mit schädlichen Verunreinigungen [Farbfrittensäcke] | | | x | x | | | x | D 10 | 0,41 | 577,73 |
| Verpackungen mit schädlichen Verunreinigungen [Aerosoldosen] | 150110 | | x | x | | | x | D 10 | 0,32 | 350,1 |
| Aufsaug- und Filtermaterialien, ... Mit schädlichen Verunreinigungen | 150202 | | x | x | | | | R 1 | 0,56 | 920,62 |
| Baustellenabfall GIPS | 170802 | | x | | x | x | | D 1 | 258,57 | 11493,47 |
| Elektronikschrott | 160214 | | x | x | | | | R 1 | 0,555 | 268,42 |
| Farbfritten Entsorgung (Wasserschaden - Versicherung) | 080111 | | x | | x | | x | D 10 | 1,92 | 2865 |
| sonstige Bau- Abfälle | 170903 | | x | x | | | x | D 10 | 2,41 | 2233,52 |

5.2.1.8 Bewertung der Referenzanlage 5:

Bei der schwerölbefeuerten Querbrennerwanne mit regenerativer Luftvorwärmung der Referenzanlage 5 sind die aufwendigen Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung hervorzuheben, insbesondere das geteilte Kammersystem im Verbund mit der Sauerstoffmessung mittels Zirkondioxidsonden und der kontinuierlichen Emissionsüberwachung. Während Floatwannen mit Schmelzleistungen von bis zu 900 t/d betrieben werden, müssen bei einer Schmelzleistung von durchschnittlich 260 t/d vergleichbar hohe Betriebskosten und nur etwas niedrigere Investitionskosten getätigt werden. Aus diesem Grund liegen die abgeschätzten Kosten mit € 1,78/t_{Glas} relativ hoch. Bei hochbelasteten Floatwannen dürfte sich der Betrag mehr als halbieren.

Auf der anderen Seite erlauben die Maßnahmen das sichere Einhalten des Emissionsgrenzwertes für Stickstoffoxide von 800 mg/m³.

Die Trockensorption der Elektrofilteranlage nutzt Natriumbicarbonat als Sorptionsmittel. Man erzielt damit unter den vorherrschenden Abgastemperaturen bei entsprechender Sorptionsmittelmenge sehr gute Minderungsraten, insbesondere bei gasförmigen Selenverbindungen, bei den anorganischen, gasförmigen Chlorverbindungen sowie bei den Schwefeloxiden. Als weiterer Vorteil der NaHCO₃-Anwendung ist aufzuführen, dass sich gegenüber der Ca(OH)₂-Eindüsung ein deutlich besseres Abscheideverhalten für Gesamtstaub herauskristallisiert hat.

Anorganische Fluorverbindungen dagegen lassen sich nur unzureichend abscheiden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass bereits rohgasseitig der geforderte Grenzwert von 5 mg/m³ unterschritten wird.

Alle geforderten Emissionsgrenzwerte werden unterschritten.

Außerdem muss erwähnt werden, dass Natriumbicarbonat mit einem derzeitigen Bezugspreis von etwa € 220,-/t relativ teuer ist. Berücksichtigt man den Filterstaub als Natriumträger zur Bildung des Glasmatrix, so muss gegenüber herkömmlicher Soda die doppelte Menge eingesetzt werden.

Der zu Beginn der Wannenreise vorherrschende spez. Energiebedarf von 5.050 kJ/kg ist für Flachglaswannen ohne EZH sehr niedrig. Der jährliche Mehrverbrauch beträgt etwa 2,5 %. Durch den Betrieb der Abgaswärmeverwendung werden umgerechnet auf die Tonnage etwa 139 kWh/t_{Glas} bzw. 500 kJ/kg_{Glas} Wärmemenge zurückgewonnen.

Addiert man die Kosten für Primärmaßnahmen (€ 1,76/t_{Glas}), Abhitzebetrieb (€ 1,34/t_{Glas}), Abgasreinigungsanlage (€ 5,26/t_{Glas}/Neuanlage), Gemengehausentstaubung (€ 0,58/t_{Glas}), Abwasser (€ 1,32/t_{Glas}) und Abfall (€ 0,59/t_{Glas}) zusammen, so ergibt sich ein Betrag von € 10,85/t_{Glas}, zzgl. der Kosten für Regenwasser von € 0,78/t_{Glas}.

Die Abschätzungen gründen sich auf Neuanlagen. Sind die Anlagen nach der Abschreibungszeit weiterhin funktionstüchtig, liegen die tatsächlichen Kosten auf niedrigerem Niveau.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.2.2 Anlage 6:**

**Schwerölbeheizte Floatwanne
mit Abgaswärmevernützung und Elektrofilter**

5.2.2.1 Schmelzanlage

| Anlage 6 | |
|---|--|
| Betriebsdaten | Durchschnittswerte (2004) |
| Wannenbauart | Querbrennerwanne |
| Luftvorwärmung | Regenerativ |
| Schmelzfläche | 400 m ² |
| Art der Zerstäubung | Erdgas |
| Brennstoffart | Erdgas H, H _U : 37.080 kJ/m ³ / Heizöl S, H _U : 40.680 kJ/kg |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | 1.000 kVA |
| Glasfarbe | Weiß |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 800 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 2002 |
| Geplante Wannenlaufzeit | Jahr 2017 |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Nahstöch. Verbrennung, Abdichtmaßnahmen, Injektorausrichtung, Lambda Regelung, Brenneranordnung |
| Sonstige Maßnahmen | Filterstaubrückführung / Schwefelarme Brennstoffe |
| Abgaswärmevernützung | Rohgaswärmetauscher |
| | |
| Schmelzleistung | 700 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 35 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 4,2 |
| Gasverbrauch | 2.910 m ³ /h |
| Ölverbrauch | 990 kg/h |
| Leistung der EZH | 1.000 kW |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.550 °C |
| Spez. Schmelzleistung | 1,75 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch (inkl. EZH) | 5.204 kJ/kg _{Glas} |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die genannten Werte repräsentieren den Zustand der Anlage nach 2 Jahren Laufzeit. Im Neuzustand können damit rund **5.000 kJ/kg_{Glas}** als spez. Wärmebedarf abgeschätzt werden.

Die Schmelzwanne verfügt über die gleichen primärseitigen NO_x-Minderungsmaßnahmen wie die Referenzanlage 5.

Die Kostenabschätzung berücksichtigt nur den Mehraufwand gegenüber einer Anlage ohne Minderungsmaßnahmen.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 20 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Primäre NO_x-Maßnahmen Schmelzwanne [€] |
|--|---|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 2.000.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 168.000,- |
| Betriebskosten Energie: 8.000,- Sauerstoffmessung: 33.000,- Emissionsmessung (anteilig): 5.000,- | 46.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>214.000,-</u> |

Die Kosten können über 20 Jahre abgeschrieben werden.

Die Messwerte der Emissionsmessung sind als Kontrollmechanismus erforderlich. Sie werden normalerweise der Abgasreinigungsanlage zugerechnet, im vorliegenden Fall jedoch zu 50 % den Primärmaßnahmen zugeordnet.

Für primärseitige NO_x-Minderungsmaßnahmen sind € 0,84/t_{Glas} aufzuwenden.

5.2.2.2 Abgaswärmemenutzung:

| | |
|--------------------------------|---|
| Wärmetauscherart | Rohrbündel |
| Wärmeträgermedium | Wasser / Dampf |
| Nutzung der gewonnenen Energie | Brauchwasser / Heizung / Prozesswasser / Strom |
| Einbauort | Rohgas vor E-Filter |
| Abreinigungsart | Kugelregenanlage |
| Abreinigung | Online |
| Staubentsorgungsweg | In der Regel Wiedereinlage/ In Ausnahmen Sondermüll |
| Verfügbarkeit | 97,2 % |
| Zurückgewonnene Energiemenge | 3.000 kWh/h |

Legt man die zurückgewonnene Energiemenge auf die Schmelzleistung um, so ergibt sich ein Wert von 102 kWh/t_{Glas} bzw. 370 kJ/kg_{Glas}.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Wärmetauscher inkl. Zubehör [€] |
|--|---------------------------------|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 1.000.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 133.000,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung / Beseitigung von Filterstaub, Personal, Sonstiges | 70.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>203.000,-</u> |

Dies entspricht einem Aufwand von € 0,008/kWh zurückgewonnener Energie.

Auf die Tonnage umgelegt liegen die Invest-/Betriebskosten bei **€0,79/t_{Glas}**.

5.2.2.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Filtertyp | Elektrofilter mit 4 Feldern |
| Temperatur vor Filter | 300 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | 15 kg/h |
| Wassereindüsung | Nein |
| Filterstaubmenge | 240 t/a |
| Filterstaubverwendung | Läutermittel |
| Energiebedarf Filter + Gebläse | 320 kWh/h |
| Wartungsintervall | Jährlich |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Messwert, normiert auf 8 % O ₂ [mg/m ³] | Messwert [kg/t _{Glas}] |
|-------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Gesamtstaub | 20 | 1,5 | 0,0031 |
| NO _x | 800 | 750*) | 1,54 |
| SO _x | 1.500 | 1327 | 2,72 |
| HF | 5 | 0,5 | 0,0010 |
| HCl | 30 | 25 | 0,0512 |
| Schwermetalle: | | | |
| Klasse I TA Luft 1986 | 0,2 | n.b. | n.b. |
| Klasse II TA Luft 1986 | 1,0 | < 2 · 10 ⁻³ | < 4 · 10 ⁻⁶ |
| Klasse III TA Luft 1986 | 5,0 | 5 · 10 ⁻³ | 10 · 10 ⁻⁶ |

n.b.: nicht bestimmt

*) Dies gilt für die normale Produktion. Bei erheblicher Beeinflussung der Glasqualität wird zumeist ein kurzfristiges, höheres Niveau eingestellt, um nach Abklingen der Qualitätssituation den Zustand unter 800 mg/m³ wieder anzufahren.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

| | |
|---|--|
| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlage inkl. Zubehör, Gebläse, Rohrleitung, ... |
| | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 2.500.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 331.500,- |
| Betriebskosten | 238.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>569.500,-</u> |

Umgelegt auf die produzierte Glasmenge muss demnach für die **Abgasreinigung** ein Betrag von **€2,23/tGlas** investiert werden.

5.2.2.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung:

Es existieren 2 Gewebefilteranlagen (nicht überwachungspflichtig) zur Entstaubung während der Beschickung und Verriegelung der Rohstoffe bzw. des Mischerbereiches. Außerdem sind 10 Siloaufsatzzfilter installiert.

Bei den Siloaufsatzzfiltern fällt der abgeschiedene Staub, der während der pneumatischen Befüllung anfällt, ins Silo zurück. Der abgeschiedene Staub der Filteranlagen wird dem Gemenge beigemischt und eingeschmolzen.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Entstaubungs- Anlagen Gemengehaus | Aufsatzzfilter |
|---|--|-----------------------|
| | [€] | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 160.000,- | 40.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 21.280,- | 5.320,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung / Beseitigung von Filterstaub, Personal, Sonstiges | 15.000,- | 5.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>46.600,-</u> | |

Die Entstaubung im Gemengehaus kostet demnach umgerechnet auf die Tonnage **€0,18/tGlas**.

5.2.2.5 Formgebung / Vergütung: Entfällt

5.2.2.6 Abwasser:

Die Abwässer werden sowohl direkt als auch indirekt eingeleitet.

Es fallen folgende Abwässer an:

- a) Haushaltsähnliches Brauchwasser (Kantine, Toilette,...)
- b) Kühlwasser (ohne Produktkontakt)
- c) Prozesswasser (Osmosewasser zur Vollentsalzung, Abwasser aus Filterrückspülung bei Förderung Brunnenwasser)

Die Abwässer aus b) werden im Kreis geführt und aufbereitet. Außerdem unterliegt das Wasser im Abhitzekessel einer Wasseraufbereitung.

Zur Abwasserbehandlung kommen die Verfahren der Filtration und des Ionenaustausches zum Einsatz. Die geforderten Grenzwerte für abfiltrierbare Stoffe bzw. den CSB von jeweils 30 mg/l werden unterschritten.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 15 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Abwasser [€] |
|--|--------------------------|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 900.000,- (Sanierung) |
| Jährliche Rückzahlung | 75.600,- |
| Betriebskosten | 50.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>125.600,-</u> |

Dies entspricht einem Betrag von **€0,49/t_{Glas}**.

Der Frischwasserverbrauch wird mit 40.000 m³/a aus Stadtwasser und 150.000 m³/a aus Brunnenwasser gedeckt. Die Kosten belaufen sich jeweils auf € 85.000,-.

Die Abwassermenge beträgt für das gesamte Werk 220.000 m³/a mit jährlichen Abwassergebühren von € 459.000,-. Addiert man die Kosten der Abwassergebühren der Kostenabschätzung für das Abwasser hinzu, so sind umgerechnet auf die Tonnage € 2,29/t_{Glas} zu entrichten.

5.2.2.7 Abfall:

Angaben zum Abfall während einer Hauptreparatur liegen nicht vor.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Abfallbilanz der Referenzanlage 6 für das Jahr 2005 gestaltet sich folgendermaßen:

| Abfallbezeichnung | Neuer AbfSchl. (Krw-/AbfG) ab 2002 | | | | | | | | Menge 05 [in t] | Kosten 05 [in EURO] | |
|---|---------------------------------------|--------|--------|------------|-------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------|-------------|
| | | Intern | Extern | Verwertung | Beseitigung | Deponierung übertrage | Deponierung untertrage | Chemisch, Physik. Behandlung | Verbrennung | | |
| Holz | 150103 | | x | x | | | | | R 1 | 57,06 | 2.225,16 |
| Altpapier | 200010 1 | | x | x | | | | | R 3 | 49,36 | -631,71 |
| Altpapier (Akten) | 200010 1 | | x | x | | | | | R 3 | 4,21 | 589,40 |
| Gemengereste | 101112 2 | | x | x | | | | | R 5 | 1058,69 | 46.521,28 |
| Glasabfälle (Altglas) | 101112 | | x | x | | | | | R 5 | 15,40 | 985,60 |
| Glasabfälle (Misch- Spiegel- Glas) | 120101 | | x | x | | | | | | 3627,58 | -125.996,46 |
| Bauschutt | 170904 | | x | x | x | | | | R 5 | 52,63 | 6.289,63 |
| Ofenausbruch | 161106 | | x | x | | | | | R 5 | 4,20 | 168,00 |
| Eisenschrott | 170405 | | x | x | | | | | R 4 | 76,41 | -9.551,29 |
| Feste fett- und ölverschmutzte Betriebsmittel | 150202 | | x | | x | | | x | D 10 | 1,42 | 296,36 |
| Halog. org. Lösemittel | 070203 | | x | | x | | | | D 13 | 0,22 | 125,15 |
| Lack- und Farbschlamm | 080113 | | x | x | | | | x | | 2,37 | 1.341,98 |
| PE-Folie | 150102 | | x | x | | | | | R 5 | 0,96 | 44,16 |
| Gemischte Siedlungsabfälle | 200301 | | x | x | | | | x | D 10 | 31,63 | 5.156,56 |
| Lösemittel | 200113 | | x | | x | | | x | D 13 | 0,22 | 125,15 |
| Elektronikschrott | 200136 | | x | x | | | | | R 4 | 3,47 | 1.225,28 |
| Leuchtstoffröhre n | 200121 | | x | | x | x | | | R 11 | 0,18 | 400,00 |
| Nichtchlor. Öle | 130205 | | x | x | | | | | R 3/R1 | 6,20 | 740,00 |
| Anorg. Chemik. | 160507 | | x | | x | | | x | D9/10 | 0,22 | 467,05 |
| Ziegel | 170102 | | x | x | | | | | R 5 | 6,50 | 50,05 |
| Aerosole | 150110 | | x | | x | | | | R13/D1 3 | 0,35 | 187,50 |
| Div. Chemikal. | 200127 | | x | x | | | | x | D 10 | 0,06 | 117,79 |
| Kupferkabel | 120101 | | x | x | | | | | R 4 | 0,44 | -322,26 |
| Bildschirmgeräte | 160213 | | x | x | | | | | R3/4/5 | 0,79 | 657,91 |
| Gemischte Ver- packungen (40- er) | 150106 | | x | x | | | | x | D 10 | 0,32 | 350,1 |
| Ref. Anlage 6 Ergebnis | | | | | | | | | | 5.123,97 | -65.665,46 |

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die größte Menge der Abfallbilanz stellen die Glasabfälle aus Misch- und Spiegelglas dar. Sie dienen als Rohstoff in der Glasfaserindustrie.

Der Gewinn aus der Abfallbilanz beträgt € 0,26/t_{Glas}.

5.2.2.8 Bewertung der Referenzanlage 6:

Bei der der Referenzanlage 6 (schwerölbefeuerte Querbrennerwanne mit regenerativer Luftvorwärmung zur Produktion von Floatglas) liegen die Aufwendungen für Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung gegenüber einer ähnlich aufgebauten Vergleichswanne mit der Hälfte der Schmelzleistung auf einem deutlich niedrigeren Niveau (€ 0,84/t_{Glas} zu € 1,78/t_{Glas}).

Der geforderte Emissionsgrenzwert für Stickstoffoxide von 800 mg/m³ kann sicher eingehalten werden, allerdings sind aus Qualitätsgründen kurzfristige Überschreitungen notwendig. Dennoch ist aus Sicht des Betreibers ein weiteres Absenken der NO_x-Konzentrationen in Zukunft nicht auszuschließen.

Alle weiteren geforderten Emissionsgrenzwerte der einzelnen Emissionskomponenten werden ebenfalls unterschritten.

Im Neuzustand der Wannen betrug der spez. Energieverbrauch rund 5.000 kJ/kg_{Glas}, ein für Floatwannen sehr günstiger Wert. Über den rohgasseitig angeordneten Wärmetauscher wird eine Wärmemenge von 102 kWh/t_{Glas} bzw. 370 kJ/kg_{Glas} zurückgewonnen.

Mit den Kosten für Primärmaßnahmen (€ 0,84/t_{Glas}), Abhitzebetrieb (€ 0,79/t_{Glas}), Abgasreinigungsanlage (€ 2,23/t_{Glas}), Gemengehausentstaubung (€ 0,18/t_{Glas}), Abwasser (€ 0,49/t_{Glas}) und dem Gewinn aus der Abfallbilanz (€ 0,26/t_{Glas}) ergibt sich ein Betrag von € 4,27/t_{Glas}. Addiert man die Abwasserabgaben für das ganze Werk hinzu, dann erhöht sich der Betrag auf € 6,07/t_{Glas}.

5.2.3 Weitere Angaben zur Flachglasindustrie:

In Deutschland existieren im Floatglasbereich ausschließlich konventionell befeuerte Querbrennerwannen mit regenerativer Luftvorwärmung. Bei den zwei Referenzanlagen mit aufwendigen primären NO_x-Minderungsmaßnahmen handelt es sich um Schweröl-/ bzw. Schweröl-Erdgas-beheizte Schmelzwannen. Beide Anlagen unterschreiten schon jetzt den ab dem Jahr 2010 gültigen NO_x-Emissionsgrenzwert von 800 mg/m³.

Der HVG liegen keine aktuellen Daten vor, die den Stand der Technik für ausschließlich Erdgas beheizte Querbrennerwannen mit regenerativer Luftvorwärmung darstellen.

Bekannt ist, dass effektive Maßnahmen zur Reduzierung der NO_x-Emissionen durch aufwendige Wannenkonstruktionen mit geteilten Kammern begünstigt werden. Damit lassen sich an den einzelnen Brennerports exakte Brennstoff-Luft-Verhältnisse einstellen und über Zirkondioxidsonden zur O₂-Messung in den zugehörigen Kammerköpfen kontrollieren und regeln.

Bei dem Pilkington 3R-Verfahren wird zuzüglich zur nahstöchiometrischen Fahrweise Sekundärbrennstoff (5 – 9 %) auf der abziehenden Abgasseite, beim

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Eintritt der ausgebrannten Abgase in den Regenerator eingedüst. Der Brennstoff wird unter Sauerstoffmangel pyrolysiert, wobei die entstehenden Kohlenwasserstoffradikale Stickstoffoxide in Stickstoff und Wasser aufspalten. Die unverbrannten Brennstoffanteile werden anschließend weitgehend durch Falschlufteinbrüche oder gezielte Luftzufuhr zu Kohlendioxid autoxidiert. Einem einfachen und günstigen Installationsaufwand steht im Wesentlichen der Mehrverbrauch an Brennstoff gegenüber.

Mit den angenommenen Angaben:

- Spez. Energieverbrauch ohne 3R: 6000 kJ/kg_{Glas} / Tonnage: 700 t/d
- Erdgas H, H_U: 37350 kJ/m³ bzw. 10,42 kWh/m³
- Mehrverbrauch 3R: 8 %
- Erdgaspreis: € 0,25/m³

errechnet sich ein zusätzlicher Brennstoffmehraufwand von € 3,21/t_{Glas}. Bei einem Mehrverbrauch von 5 % müssen zusätzlich € 2,01/t_{Glas} aufgebracht werden, also ein Niveau welches dem Betrieb einer SCR-Anlage (Referenzanlage 4) gleich kommt. Berücksichtigen muss man zudem die Nachteile beim CO₂-Emissionshandel. Anzumerken ist noch, dass ein Teil der zugeführten zusätzlichen Wärmemenge in einem nachgeschalteten Wärmetauscher zurückgewonnen werden kann und Auswirkungen auf das Feuerfestmaterial in den Regeneratoren nicht zweifelsfrei geklärt sind.

Floatwanne mit offenem Kammersystem

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden im Kammerkopf einer erdgasbeheizten Floatwanne Emissionsmessungen durchgeführt.

| Kammerkopf | normiert | | | | Emission | | | Abgasvolumenstrom Normzustand trocken [m ³ /h] |
|------------|-----------------------|----------------------------|---|---|--------------|---------------------------|---------------------------|--|
| | O ₂ [%] | CO [mg/m ³] | SO ₂ [mg/m ³] | NO _X [mg/m ³] | CO [kg/h] | SO ₂ [kg/h] | NO _X [kg/h] | |
| Port 1 | 0,1 | 1183 | 1282 | 1575 | 18,20 | 19,71 | 24,22 | 9561 |
| Port 2 | 0,1 | 1314 | 1058 | 1665 | 19,94 | 16,06 | 25,26 | 9456 |
| Port 3 | 0,0 | 5000 | 871 | 1355 | 63,58 | 11,18 | 17,36 | 7947 |
| Port 4 | 0,5 | 938 | 348 | 1803 | 16,08 | 5,96 | 30,87 | 10884 |
| Port 5 | 3,8 | 3 | 178 | 2714 | 0,02 | 0,92 | 14,31 | 3917 |
| Port 6 | 4,6 | 0 | 162 | 2789 | 0 | 0,84 | 11,43 | 4099 |

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Ports 5 und 6 waren nicht mit Brennstoff beaufschlagt. Die CO-Konzentrationen wurden größtenteils wieder aufoxidiert. Die normierten NO_x-Konzentrationen lagen im Reingas bei 1630 mg/m³, die SO₂-Konzentrationen bei 570 mg/m³.

Die Messergebnisse demonstrieren die Schwierigkeiten, die ein offenes Kammersystem bei der Brennstoffaufteilung mit sich bringt. Die Luftverteilung auf die einzelnen Brennerports ist konstruktionsbedingt vorgegeben, der Brennstoff muss entsprechend der Luftpumpe angepasst werden. Regelungsmechanismen zur Luftaufteilung sind schwierig und lassen sich in geringem Umfang z.B. durch sog. Sperrluftlanzen im Kammerfuß realisieren.

Ob sich der in der TA-Luft genannte NO_x-Grenzwert von 800 mg/m³ für Altanlagen im Jahr 2010 mit erdgasbeheizten Flachglaswannen erreichen lässt, ist derzeit noch offen. Insbesondere bei offenem Kammersystem und Standardbrenner- und Regelungssystemen kann die Installation sekundärer Minderungsmaßnahmen u. U. notwendig werden.

Bei Flachglasanlagen liegen die HCl-Gehalte im Abgas, in erster Linie durch den in den letzten Jahrzehnten ständig abnehmenden NaCl-Gehalt der eingesetzten Soda, bereits im Rohgas nicht selten unterhalb von 30 mg/m³.

Die HF-Gehalte im Abgas liegen im Reingas ebenfalls unterhalb des Emissionsgrenzwertes von 5 mg/m³, teilweise auch deutlich darunter. Bedingt durch den Rohstoffeinsatz findet man im Rohgas Konzentrationen, die oftmals den Emissionsgrenzwert unterschreiten.

Oxy-Fuel-beheizte Gussglaswanne

Seit 1996 wird in Deutschland eine Gussglaswanne mit VSA-Sauerstoff als Oxidationsmedium und schwerem Heizöl als Brennstoff betrieben. Die Schmelzfläche beträgt 65 m², die Schmelzleistung im Mittel etwa 140 t/d. Der Sauerstoff stammt von einer VSA-Anlage, die neben dem Hüttengebäude betrieben wird. VSA-Sauerstoff wird mit Hilfe von Molekularsieben in Form von Zeolithen produziert.

Die Abgase der Wanne werden links und rechts nahe der Stirnseite in die Rekuperatoren abgezogen. Die aufgeheizte Rekuperatorluft wird auf der rechten Seite zum Entfrosten der Flüssig-Sauerstoffanlage genutzt und auf der linken Seite ungenutzt über Dach geleitet. Nach den Rekuperatoren werden die beiden Abgasteilströme zusammengeführt und einer Elektrofilteranlage mit trockener Sorptionsstufe zugeführt.

Die Emissionsgrenzwerte in Form einer spez. Emissionsbegrenzung werden alle unterschritten. Die spez. NO_x-Emission liegt bei rund 0,7 kg/t_{Glas}. Die Abgase werden nicht mit einströmender Umgebungsluft abgekühlt, so dass die Konzentrationen der einzelnen Emissionskomponenten sehr hoch sind. Beim verlassen der Schmelzwanne liegen beispielsweise die SO_x-Konzentrationen bei 9.300 mg/m³.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.3 Spezialglasindustrie:**

Spezialglaswannen werden heute zunehmend mit Oxy-Fuel-Feuerung betrieben oder als Elektrowannen ausgelegt.

Die 4 konventionell beheizten Spezialglaswannen zur Fernsehglasproduktion in Deutschland waren bis zur Stilllegung mit sekundärer Minderungstechnologie ausgerüstet (SCR-Anlagen bzw. SNCR-Anlagen), so dass NO_x-Emissionswerte < 500 bzw. < 1000 mg/m³ bei Salpetereinsatz erreicht wurden. Zur Zeit existiert im Spezialglasbereich nur noch eine Katalysatoranlage hinter konventionell beheizten Querbrennerwannen (Referenzanlage 12).

Für die Spezialglasindustrie wurden 4 Referenzanlagen mit Oxy-Fuel-Feuerung, eine Elektrowanne und eine Anlage mit SCR-Technologie untersucht.

5.3.1 Anlage 7:**Elektrowanne (Borosilikatglas) mit Gewebefilter****5.3.1.1 Schmelzanlage****Anlage 7**

| | Wanne 1 | Wanne 2 |
|------------------------------------|--------------|---------|
| Wannenbauart | Elektrowanne | |
| Glasfarbe | Weiβ | |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 38 t/d | 48 t/d |
| Geplante Wannenlaufzeit | 60 Monate | |

| Betriebsdaten | Aktuelle Durchschnittswerte | |
|--|-----------------------------|-----------------------------|
| | Wanne 1 | Wanne 2 |
| Schmelzleistung | 35 t/d | 45 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 70 % | 70 % |
| Leistung E-Heizung | 1.700 kW | 1.990 kW |
| Max. Gewölbetemperatur | 230 °C | 230 °C |
| Spez. Energieverbrauch | 4.451 kJ/kg _{Glas} | 3.908 kJ/kg _{Glas} |

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Zur Inbetriebnahme (Antempern) von vollelektrisch beheizten Glasschmelzwannen muss das Feuerfestmaterial auf Betriebstemperatur gebracht und der Inhalt der Schmelzwannen (kalte Scherben oder Gemenge) zunächst mit fossilen Energieträgern aufgeschmolzen werden, damit die Elektroenergie über die im flüssigen Glasbad angeordneten Elektroden zugeführt werden kann. Im flüssigen Zustand wird die elektrische Leitfähigkeit der Glasschmelze ausgenutzt, um den Energieeintrag über den elektrischen Strom zu realisieren.

Während des Schmelzbetriebes wird das Gemenge über einen traversierenden Gurtförderer so eingelegt, dass sich über der Glasschmelze eine geschlossene Gemengedecke bildet. Die auf der Glasschmelze liegende Gemengeschicht schmilzt von unten her ab und schirmt gleichzeitig den Ofenraum gegenüber der Strahlung des geschmolzenen Glases ab. Dadurch wird die Staub- und Schadgasemissionen in erster Linie verursachende Verdampfung stark eingeschränkt. Die Gemengedecke übernimmt damit die Funktion einer Sorptionsstufe, da die freigesetzten Gemengegase, die beim Aufschmelzen der Glasrohstoffe entstehen, durch die Gemengeschüttung strömen müssen. Die sauren Abgasbestandteile können damit von der Gasphase durch Reaktion mit den Alkalien bzw. Erdalkalien im Gemenge zu Feststoffen wie z.B. NaCl reagieren. Anlagen dieser Art nennt man auch Elektrowannen mit kaltem Oberofen (cold top).

Die Schmelzwannen wurden vor der Umstellung auf Elektroschmelze als regenerativ befeuerte Querbrennerwannen betrieben. Der Energieverbrauch lag aufgrund der Anlagengröße oberhalb von 20.000 kJ/kg_{Glas}.

Nach den Unterlagen der HVG liegt der günstigste spezifische Wärmeverbrauch von Querbrennerwannen im Spezialglasbereich mit einer Schmelzleistung von weniger als 50 t/d bei 17.260 kJ/kg_{Glas}. Dieser Wert wurde im Januar 2001 vorgefunden. Die Umstellung auf eine andere Schmelztechnologie war damit aus energetischer Sicht sinnvoll.

5.3.1.2 Abgaswärmennutzung: Entfällt

5.3.1.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

Die Abgase werden über zwei getrennte Gewebefilteranlagen gereinigt.

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| Filtertyp | Tuchfilter |
| Temperatur vor Filter | 80 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | 3 kg/h |
| Wassereindüsung | Nein |
| Filterstaubmenge | 35 t/a |
| Filterstaubverwendung | Deponie |
| Energiebedarf Filter + Gebläse | 20 kWh/h |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Messwert W 1 [mg/m ³] | Messwert W 2 [mg/m ³] | Messwert W 1 [kg/t _{Glas}] | Messwert W 2 [kg/t _{Glas}] |
|-----------------|-----------------------------------|---|---|--|--|
| Gesamtstaub | 30 | 1,2 | 0,8 | 0,0017 | 0,0008 |
| NO _x | 500 | 72 | 103 | 0,39 | 0,29 |
| SO _x | 100 | 0,7 | 4,7 | 0,0037 | 0,0131 |
| HF | 5 | 0,3 | 0,3 | 0,0018 | 0,0009 |
| HCl | 30 | 5,1 | 22,0 | 0,0279 | 0,0614 |

Die Emissionen von elektrisch erschmolzenen Gläsern in „cold-top“-Elektrowannen liegen im Vergleich zu Gläsern gleichen Typs in flammenbeheizten Glasschmelzwannen in der Regel auf einem niedrigeren Niveau. Die NO_x-Emissionen resultieren aus der Nitratzerersetzung.

Da keine fossilen Energieträger zum Einsatz kommen und die Umgebungsluft als Trägermedium für die angesaugten Abgase dient, entspricht der Sauerstoffgehalt der Abgase an beiden Anlagen etwa dem Sauerstoffgehalt von Luft. Emissionsgrenzwerte lassen sich damit nicht auf einen Bezugssauerstoffgehalt normieren. Durch Variation der Absaugbedingungen ergeben sich innerhalb des Leistungsspektrums des installierten Gebläses beliebige Konzentrationen der einzelnen Emissionskomponenten.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlagen inkl. Zubehör, Gebläse, Rohrleitung, ... [€] |
|--|--|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 440.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 58.520,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung / Beseitigung von Filterstaub, Personal, Sonstiges | 50.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>108.520,-</u> |

Umgelegt auf die produzierte Glasmenge muss demnach für die **Abgasreinigung ein Betrag von €3,71/tGlas** investiert werden.

5.3.1.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung:

Die Rohstoffe werden in einem gemeinsamen Gemengehaus zusammen-gemischt und gefördert. Eine Differenzierung ist nicht möglich.

5.3.1.5 Formgebung / Vergütung: Entfällt

5.3.1.6 Abwasser:

Auch hier sind die Anlagen im Werksverbund zu sehen. Detaillierte Angaben liegen nicht vor. Es fallen Brauchwasser sowie Kühlwasser mit und ohne Produktkontakt an. Kühlwasser wird im Kreislauf geführt. Eingeleitet wird nur überschüssiges Kühl- und Scherbenwasser.

5.3.1.7 Abfall:

Es liegen keine Angaben vor.

5.3.1.8 Bewertung der Referenzanlage 7:

Spezialglaswannen benötigen wegen der geforderten Glasqualität und aufgrund des erschmolzenen Glastyps in der Regel höhere Oberofentemperaturen und höhere spezifische Energieverbräuche als herkömmliche Kalk-Natron-Silicatgläser. Mit der Umstellung von konventioneller Befeuerung auf Elektroschmelze konnte im vorliegenden Fall der spez. Energieverbrauch drastisch abgesenkt werden.

Berücksichtigen muss man allerdings, dass der angegebene Wert durch den Kraftwerkswirkungsgrad dividiert werden muss, also etwa um den Faktor 3 höher liegt.

Die Emissionen liegen bei der Installation einer Filteranlage oft eine Zehnerpotenz unterhalb der konventionellen Schmelztechnologie. Emissionen resultieren nur aus rohstoffbedingten Gemengereaktionen. NO_x-Emissionen treten nur bei nitrathaltigen Gemengesätzen aus der Salpeterzersetzung auf.

Bei der sog. Chloridläuterung muss ein besonderes Augenmerk auf die HCl-Konzentrationen gelegt werden, da die vorherrschenden Abgastemperaturen eine effektive Abscheidung mit trockener Sorptionstechnik an der Abgasreinigung nicht erlauben.

Durch Variation der Absaugbedingungen ergeben sich innerhalb des Leistungsspektrums des installierten Gebläses beliebige Konzentrationen der einzelnen Emissionskomponenten. Dennoch wurden im vorliegenden Fall Konzentrationen als Emissionsbegrenzungen festgelegt. Eine solche Betrachtung sollte allerdings einhergehen mit einer Eingrenzung von minimalem und maximalem Abgasvolumenstrom.

Anmerkung zur Emissionsgrenzwertfestlegung von Elektro- und
Oxy-Fuel-Wannen:

Bei vollelektrisch beheizten Schmelzwannen entstehen abgasseitig hinsichtlich Abgasvolumenstrom, Emission und Schadstoffkonzentration ganz andere Verhältnisse als bei konventionell Brennstoff-Luft-beheizten Glasschmelzwannen. Für Elektrowannen gab es bis zum Jahr 2002 in der TA-Luft keine Regelung, die den Besonderheiten dieser Schmelzöfen Rechnung trägt. In der derzeit geltenden TA-Luft vom 1.10.2002 wurde jedoch unter der Ziffer 5.4.2.8 folgender Passus eingefügt:

"Bei Brennstoff-Sauerstoff-beheizten und bei elektrisch beheizten Glasschmelzwannen sind Sonderregelungen zu treffen. Als Beurteilungsmaßstab sind der spezifische Energieverbrauch moderner vergleichbarer Brennstoff-Luft-beheizter Glasschmelzwannen und die Leistungsfähigkeit von Abgasreinigungsanlagen zu berücksichtigen. Auf die VDI-Richtlinie 2578 (Ausgabe November 1999) wird hingewiesen."

Danach ist bei Glasschmelzöfen mit Brennstoff-Sauerstoffbeheizung und bei Elektrowannen, ausgehend vom spezifischen Energieverbrauch moderner Brennstoff-Luft-beheizter Glasschmelzwannen, eine z.B. dem NO_x-Emissionswert von 500 mg/m³ (Zielwert) äquivalente produktbezogene Emission abzuleiten.

Soweit aus Produktqualitätsgründen ein Nitrateinsatz erforderlich ist, sollte die Emission das Zweifache dieses Wertes nicht überschreiten.

Mit der oben aufgeführten Regelung sollte sichergestellt werden, dass eine elektrisch beheizte Glasschmelzwanne hinsichtlich ihrer NO_x-Emission nicht ungünstiger beurteilt wird als eine konventionell fossil beheizte Glasschmelzwanne, die den Zielwert für NO_x von 500 mg/m³, den Grenzwert von 800 mg/m³ bzw. von 1000 mg/m³ bei Nitrateinsatz bereits erreicht hat.

Bewährt hat sich die Ableitung von produktbezogenen Emissionsbegrenzungen, z.B. in [kg Schadstoff/t Glas].

Mit der Festlegung spezifischer produktbezogener Emissionsgrenzwerte wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Umrechnung gemessener NO_x-Emissionswerte auf einen bestimmten Bezugssauerstoffgehalt nicht möglich ist.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.3.2 Anlage 8:****Oxy-Fuel-Wanne zur Borosilikatglasherstellung mit Gewebefilter****5.3.2.1 Schmelzanlage**

| Anlage 8 | |
|---|---|
| Betriebsdaten | Durchschnittswerte |
| Wannenbauart | Oxy-Fuel-Wanne |
| Schmelzfläche | Keine Angabe |
| Brennstoffart | Erdgas L, H _u : 31.147 kJ/m ³ |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | 700 kVA |
| Glasfarbe | Transparent |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 50 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 2005 |
| Geplante Wannenlaufzeit | Jahr 2010 |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Sauerstoff als Oxidationsmedium |
| Abgaswärmeverwendung | Nein |
| Schmelzleistung | 40 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 60 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 1 % |
| Gasverbrauch | 327 m ³ /h |
| Sauerstoffbedarf | 636 m ³ /h |
| Leistung der EZH | 283 kW |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.650 °C |
| Spez. Energieverbrauch (inkl. EZH / ohne O ₂ -Erzeugung) | 6.722 kJ/kgGlas |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

Bis zum Jahr 2000 wurden die Gläser in einer regenerativ befeuerten Querbrennerwanne mit Heizöl L und Erdgas L als Brennstoff erschmolzen. Bei gleicher Schmelzfläche, ohne Elektrozusatzheizung, allerdings geringerer Schmelzleistung der konventionell beheizten Anlage, wurde im Neuzustand ein spez. Wärmeverbrauch von 17.300 kJ/kgGlas festgestellt.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Hier zeigt sich eindeutig, dass man mit der Umstellung auf Oxy-Fuel-Technik bei kleinen Schmelz aggregaten hohe Reduzierungen des spez. Energiebedarfs erreichen kann. Die benötigte Energie zur Herstellung von Flüssigsauerstoff ist nicht berücksichtigt.

Das Oxidationsmedium wird als Flüssigsauerstoff angeliefert.

Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Zuge eines Neubaus spielen neben den Investitionskosten der Wanne natürlich auch die Betriebskosten, und damit der Energieverbrauch und die Kosten für den Sauerstoff eine herausragende Rolle.

Bekannt ist, dass bei regenerativ befeuerten Glasschmelzwannen, insbesondere bei Querbrennerwannen, gegenüber Oxy-Fuel-Wannen viel mehr Feuerfestmaterial für die Wärmerückgewinnung benötigt wird. Die Investitionskosten liegen damit deutlich höher. Zusätzlich müssen im Spezialglasbereich aufgrund der hohen Oberofentemperaturen oder der Salpeterzugabe mit konventioneller Schmelztechnik in der Regel sekundäre Minderungsmaßnahmen zur NO_x-Reduzierung installiert und betrieben werden. Bei Oxy-Fuel-Wannen dagegen muss ein besonderes Augenmerk auf die Kosten der Sauerstofferzeugung bzw. des angelieferten Flüssigsauerstoffs gelegt werden.

Im vorliegenden Fall dürfte allein die Umstellung auf Oxy-Fuel-Technik und die damit verbundene Brennstoffersparnis ausreichende Gründe geliefert haben.

Bei einem angenommenen Erdgaspreis für die Industrie von € 0,025/kWh, einem Betrag € 0,11/m³ für die Flüssigsauerstoffanlieferung und einem Strompreis von € 0,065/kWh und den oben aufgeführten Daten ergibt sich ein Gasverbrauch pro Tonne Glas für die konventionell beheizte Anlage von 555,4 m³/t_{Glas}. Mit dem Gaserbrauch der Oxy-Fuel-Wanne von 196,2 m³/t_{Glas}, einem Elektroenergiebedarf von 169,8 kWh/t_{Glas} und einem Sauerstoffbedarf von 381,6 m³/t_{Glas} ergeben sich Beträge für die:

Konventionelle Wanne: €120,13/t_{Glas}

Oxy-Fuel-Wanne: €93,46/t_{Glas}

Die Schmelzenergiekosten der Oxy-Fuel-Wanne liegen damit rund 20 % unter der konventionell befeuerten Querbrennerwanne.

➔ Die Kosten wurden alle abgeschätzt und beruhen auf mündlichen Angaben von Industrievertretern. Vom Anlagenbetreiber liegen keine Angaben zu den Kosten vor.

5.3.2.2 Abgaswärmennutzung: Entfällt

5.3.2.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| Filtertyp | Tuchfilter mit Wärmeverschiebesystem |
| Filtermaterial | Polyacrylnitril |
| Temperatur vor Filter | 105 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | 15 kg/h |
| Wassereindüsung | Nein |
| Filterstaubmenge | 184 t/a |
| Filterstaubverwendung | Neutralisationsmittel in CPB |
| Energiebedarf Filter + Gebläse | 34 kWh/h |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten

| Komponente | Grenzwert [kg/h] | Messwert [kg/h] | Messwert [mg/m ³] | Messwert [kg/t _{Glas}] |
|-----------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Gesamtstaub | 0,23 | 0,0044 | 0,28 | 0,0027 |
| NO _x | 8,25 | 2,31 | 148 | 1,42 |
| SO _x | 1,15 | 0,087 | 5,6 | 0,054 |
| HF | 0,058 | 0,0070 | 0,45 | 0,0043 |
| HCl | 0,345 | 0,108 | 6,9 | 0,066 |

Als Emissionsgrenzwerte wurden Massenstrombegrenzungen festgelegt. Zu informativen Zwecken wurden auch die gemessenen Werte und die spez. Emissionen angegeben.

Alle Emissionskomponenten unterschreiten die geforderten Grenzwerte deutlich.

Bei der alten konventionell beheizten Wanne lagen die spez. NO_x-Emissionen bei 16 kg/t_{Glas}.

| | |
|--|--|
| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 15 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlage inkl. Zubehör, Gebläse, Rohrleitung, ... |
| | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 1.500.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 126.000,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung / Beseitigung von Filterstaub, Personal, Sonstiges | 83.109,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>209.109,-</u> |

Umgelegt auf die durchschnittlich produzierte Glasmenge muss demnach für die **Abgasreinigung ein Betrag von €14,32/tGlas** investiert werden.

Trotz einer Abschreibungszeit von 15 Jahren heben sich die Kosten erheblich von denen großer hochbelasteter Schmelzwannen ab.

5.3.2.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung: Keine Angaben

5.3.2.5 Formgebung / Vergütung: Entfällt

5.3.2.6 Abwasser: Keine Angaben

5.3.2.7 Abfall: Keine Angaben

5.3.2.8 Bewertung der Referenzanlage 8:

An Referenzanlage 8 konnte durch die Umstellung von einer regenerativ befeuerten Querbrennerwanne zu einer Oxy-Fuel-beheizten Spezialglaswanne eine erhebliche Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs erzielt werden. Die Abschätzung der Kosten durch die Einsparung der Schmelzenergie lag inkl. der Kosten für den angelieferten Flüssigsauerstoff bei rund 20 %.

Der spezifische Energieverbrauch konnte durch die Umstellung um 60 % (ohne Aufwand zur Flüssigsauerstofferzeugung) reduziert werden. Noch bemerkenswerter ist die Abnahme der NO_x-Emissionen von mehr als 90 %.

Mit dem Betrieb der Gewebefilteranlage liegen sämtliche Emissionskomponenten deutlich unterhalb der geforderten Emissionsbegrenzungen.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.3.3 Anlage 9:****Oxy-Fuel-Wanne (Borosilikatglas) mit Gewebefilter****5.3.3.1 Schmelzanlage**

| Anlage 9 | |
|--|--|
| Wannenbauart | Oxy-Fuel-Wanne |
| Schmelzfläche | 51,2 m ² |
| Brennstoffart | Erdgas H, H _U : 36.008 kJ/m ³ |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | Ja |
| Glasfarbe | Farblos |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 50 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 2005 |
| Geplante Wannenlaufzeit | 4,5 Jahre |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Einstellbare Brenner, nahstöch. Verbrennung, Brenneranordnung |
| Sonstige Minderungsmaßnahmen | Schwefelarme Brennstoffe |
| Abgaswärmennutzung | Nein |
| Art der Vergütung | Oberflächenbehandlung |
| Vergütungsmittel | Schwefeldioxid |
| Emissionsweg | Über Dach |
| Betriebsdaten | |
| Durchschnittswerte | |
| Schmelzleistung: | 50 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung: | 40 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge: | 0,1 % |
| Gasverbrauch: | 600 m ³ /h |
| Sauerstoffbedarf: | 1.200 m ³ /h |
| Leistung der EZH: | Keine Angabe |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.690 °C |
| Spez. Energieverbrauch (ohne EZH / ohne O ₂ -Erzeugung): | 10.370 kJ/kg _{Glas} |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Beim Oxidationsmedium handelt es sich um kryogenen Sauerstoff, der auf dem Werksgelände mit einer Luftzerlegungsanlage produziert wird. Nach Angaben der Betriebsleitung müssen etwa **25 % der Schmelzenergiekosten** für die **Sauerstoffproduktion** aufgebracht werden.

Die zuvor installierte Querbrennerwanne mit regenerativer Luftvorwärmung hatte einen spez. Energieverbrauch von $20.500 \text{ kJ/kg}_{\text{Glas}}$. Bei einem angenommenen Erdgaspreis für die Industrie von € 0,025/kWh und den oben aufgeführten Daten ergibt sich ein Gasverbrauch pro Tonne Glas für die konventionell beheizte Anlage von $569,3 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{Glas}}$ und Kosten von:

Konventionelle Wanne: €142,36/t_{Glas}.

Zur Berechnung der Schmelzenergiekosten der Oxy-Fuel-Wanne fehlen die Angaben zur Leistung der EZH. Vernachlässigt man diesen Anteil, dann müssen für die gleiche Schmelzleistung (angenommene Sauerstoffkosten: € 0,065/m³) aufgebracht werden:

Oxy-Fuel-Wanne: €90,73/t_{Glas} (zzgl. EZH-Kosten).

➔ Auch hier handelt es sich nicht um Angaben der Betriebsleitung, sondern um eine Abschätzung!

5.3.3.2 Abgaswärmenutzung: Entfällt

5.3.3.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Filtertyp | Tuchfilter mit Wärmeverschiebesystem |
| Temperatur vor Filter | 120 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | 20 kg/h |
| Wassereindüsung | Nein |
| Filterstaubmenge | 250 t/a |
| Filterstaubverwendung | Bergversatz |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten

| Komponente | Grenzwert | Messwert [mg/m ³] |
|-----------------|-----------------------|----------------------------------|
| Gesamtstaub | 20 mg/m ³ | 1 mg/m ³ |
| NO _x | 16,7 kg/h | 13,9 kg/h |
| SO _x | 100 mg/m ³ | 5 mg/m ³ |
| HF | 5 mg/m ³ | 1 mg/m ³ |
| HCl | 30 mg/m ³ | 1 mg/m ³ |

Als Emissionsgrenzwerte wurde bei den Stickstoffoxiden eine Massenstrombegrenzung, bei den anderen Komponenten eine Konzentration festgelegt. Der NO_x-Grenzwert von 16,7 kg/h wurde aus dem Emissionsgrenzwert von 1.000 mg/m³ (Nitratläuterung) einer energetisch guten, konventionell beheizten Vergleichswanne abgeleitet.

Alle Emissionskomponenten unterschreiten die geforderten Grenzwerte deutlich.

Umgelegt auf die Tonnage werden 6,67 kgNO_x/t_{Glas} emittiert. Bei der alten konventionell beheizten Wanne lagen die spez. NO_x-Emissionen bei 33,6 kg/t_{Glas}, also eine Minderung von 80 %.

Zur Kostenabschätzung für den Betrieb der Filteranlage stehen nicht genügend Daten zur Verfügung.

5.3.3.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung: Keine Angaben

5.3.3.5 Formgebung / Vergütung: Entfällt

5.3.3.6 Abwasser: Die Abwässer werden indirekt eingeleitet. Es fallen Brauchwasser sowie Kühlwasser mit und ohne Produktkontakt an. Das Kühlwasser wird im Kreis geführt.

Die jährliche Abwassermenge liegt bei 120.000 m³ (€ 157.000,- Abwasserabgabe). Frischwasser wird mit 95.953 m³/a von der Stadt bezogen. Die restliche Menge erfolgt aus Flussförderung.

5.3.3.7 Abfall: Die Abwicklung von Abriss- und Verwertungs- bzw. Entsorgungsarbeiten übernimmt im Zuge einer Hauptreparatur eine Fremdfirma. Jährlich fallen zusätzlich etwa 750 Tonnen Glasabfälle zur Beseitigung an.

Filterstäube aus der Abgasreinigungsanlage (250 t/a) dienen als Bergversatz.

5.3.3.8 Bewertung der Referenzanlage 9:

Neben den energetischen, wirtschaftlichen und evtl. qualitativen Gründen für den Wechsel der Schmelztechnologie, spielten vermutlich auch Überlegungen hinsichtlich der Installation einer SCR-Anlage bei der Entscheidungsfindung, ob eine konventionell befeuerte oder eine Oxy-Fuel-Wanne gebaut werden soll, eine Rolle. Der Grenzwert der TA-Luft beträgt 1.000 mg NO_x/m³ für konventionell beheizte Glasschmelzwannen mit Nitrateinsatz.

Bei dem erschmolzenen Spezialglas ist dieser Wert ohne sekundäre Maßnahmen nicht zu erreichen.

Alle Borosilikatglas-Schmelzanlagen sind mehr oder weniger mit einem weiteren Problem behaftet. Die Abscheidung staubförmiger Borverbindungen im Abgas ist unproblematisch und im Wesentlichen von der Dimensionierung der Filteranlage abhängig. Gasförmige Borverbindungen dagegen kondensieren erst bei sehr niedrigen Temperaturen bis in den Bereich des Wassertaupunktes hinein. Damit ist die Abgasreinigung schwierig und selbst hinter Gewebefilteranlagen mit Trockensorptionsstufen können sichtbare Rauchgasfahnen auftreten.

Die HVG widmet sich diesem Problem zur Zeit im Rahmen eines Forschungsprojektes. Erste Untersuchungen im Abgas einer rekuperativ beheizten E-Glas Wanne wurden erfolgreich durchgeführt und Minderungsraten an gasförmigen Borverbindungen von 80 % erzielt. Die Aktivitäten werden durch thermochemische Berechnungen im Vorfeld und während der Messungen unterstützt.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.3.4 Anlage 10:****Oxy-Fuel-Wanne (Borosilikatglas) mit Gewebefilter****5.3.4.1 Schmelzanlage**

| | | Anlage 10 |
|---|--|---|
| Wannenbauart | | Oxy-Fuel-Wanne |
| Schmelzfläche | | 54 m ² |
| Brennstoffart | | Erdgas H, H _U : 36.000 kJ/m ³ |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | | 2.500 kVA |
| Glasfarbe | | Transparent |
| Glasart | | Glaskeramik |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | | 40 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | | Jahr 2004 |
| Geplante Wannenlaufzeit | | Jahr 2008 |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | | Nahstöchiometrische Verbrennung, Abdichtmaßnahmen, Einstellbare Brenner, Lamba Regelung |
| Sonstige Minderungsmaßnahmen | | Schwefelarme Brenn- und Rohstoffe |
| SNCR-Anlage | | Außer Betrieb |
| Abgaswärmevernützung | | Ja |
| Betriebsdaten | | Durchschnittswerte |
| Schmelzleistung | | 40 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | | 50 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | | 1 % |
| Gasverbrauch | | 550 m ³ /h |
| Sauerstoffbedarf | | 1.100 m ³ /h |
| Leistung der EZH | | 200 kW |
| Max. Gewölbetemperatur | | 1.700 °C |
| Spez. Energieverbrauch (inkl. EZH / ohne O ₂ -Erzeugung) | | 12.312 kJ/kg _{Glas} |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Schmelzwanne ist mit einer SNCR-Anlage mit gasförmigem NH₃ als Reduktionsmittel ausgestattet. Im Zuge von Optimierungsmaßnahmen konnte der geforderte Massenstromgrenzwert für NO_x auch ohne Ammoniakeindüsung eingehalten werden.

Die Gläser wurden früher in regenerativ befeuerten Querbrennerwannen bzw. Rekuperativwannen mit Heizöl L und Erdgas H als Brennstoff erschmolzen. Der EZH-Anteil lag gegenüber dem Istzustand etwa fünf mal so hoch. Der spez. Energieverbrauch lag bei rund 20.000 kJ/kg_{Glas} (inkl. EZH von 1.050 kWh).

Der Energiebedarf konnte durch die Umstellung auf Oxy-Fuel-Feuerung um etwa 38 % reduziert werden. Allerdings muss der Energiebedarf der Sauerstoffherstellung hinzugerechnet werden.

Das Oxidationsmedium ist kryogener Sauerstoff und wird auf dem Werksgelände produziert. Angaben über den Energiebedarf der Luftzerlegungsanlage liegen nicht vor.

Aus Gesprächen mit Sauerstofflieferanten ergab sich ein von der Anlagengröße und der produzierten Sauerstoffmenge abhängiger Wert an Elektroenergie zwischen 0,4 und 1 kWh/m³_{Sauerstoff}.

Legt man den Mittelwert von 0,75 kWh/m³ zugrunde, so ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch inkl. O₂-Erzeugung der Referenzanlage 10 von 14.094 kJ/kg_{Glas}. Dies sind knapp 30 % weniger als die konventionell beheizten Vergleichswannen benötigen.

Aus der Sicht des Anlagenbetreibers sind jedoch in der Regel die Kosten ausschlaggebend. Im vorliegenden Fall beträgt der Kostenanteil der Sauerstoffproduktion rund 30 % der Schmelzenergiekosten.

5.3.4.2 Abgaswärmemenutzung: Im Rohgas der Referenzanlage 10 ist ein Abgaswärmetauscher zur Brauchwassererwärmung installiert. Die zurückgewonnene Wärmemenge wurde mit 550 kWh angegeben.

Auf die Schmelzleistung bezogen ergibt sich ein Wert von 330 kWh/t_{Glas} bzw. 1.188 kJ/kg_{Glas}.

Angaben über Installations- bzw. Betriebskosten liegen nicht vor.

5.3.4.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|-----------------------|---------------------|
| Filtertyp | Gewebefilter |
| Filtermaterial | Acryl-Nadelfilz |
| Temperatur vor Filter | 82 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | Ohne |
| Wassereindüsung | Nein |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten

| Komponente | Grenzwert [kg/h] | Messwert [kg/h] | Messwert [mg/m ³] | Messwert [kg/t _{Glas}] |
|-------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Gesamtstaub | 0,055 | 0,0004 | 0,02 | 0,0002 |
| NO _x | 10,3 | 8,85 | 575 | 5,59 |
| SO _x | 1,1 | 0,041 | 2,8 | 0,026 |
| HF | 0,055 | 0,0032 | 0,2 | 0,0020 |
| HCl | 0,33 | 0,0032 | 0,2 | 0,0020 |
| NH ₃ | 0,6 | - | - | - |
| Klasse II TA Luft 1986 | 0,0077 | < 0,09 · 10 ⁻³ | < 0,091 | < 0,06 · 10 ⁻³ |
| Klasse III TA Luft 1986 | 0,055 | < 0,06 · 10 ⁻³ | < 0,0004 | < 0,03 · 10 ⁻³ |

Die Emissionsgrenzwerte (Massenstrombegrenzungen) wurden alle unterschritten. Zu informativen Zwecken wurden auch die gemessenen Werte und die spez. Emissionen angegeben.

Alle Emissionskomponenten unterschreiten die geforderten Grenzwerte deutlich.

Bei der alten konventionell beheizten Wanne lagen die spez. NO_x-Emissionen bei 29,7 kg/t_{Glas}. Die Umstellung auf Oxy-Fuel brachte damit eine Minderung von rund 80 %.

Angaben über die Kostensituation liegen nicht vor.

5.3.4.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung: Das Gemenge wird in einem gemeinsamen Gemengehaus für mehrere Schmelzaggregate hergestellt. Ein Differenzierung ist nicht möglich.

5.3.4.5 Formgebung / Vergütung: Entfällt

5.3.4.6 Abwasser: Keine Angaben

5.3.4.7 Abfall: Keine Angaben

5.3.4.8 Bewertung der Referenzanlage 10:

Auch bei der Referenzanlage 10 resultierte eine deutliche Reduzierung des spezifischen Energieverbrauchs nach der Umstellung von Brennstoff-Luft-Befeuerung auf Oxy-Fuel-Feuerung. Die NO_x-Emissionen konnten um etwa 80 % reduziert werden.

Die Filteranlage kann ohne Sorptionsmittel betrieben werden. Ein besonderes Augenmerk muss auf das Temperaturregime gelegt werden. Bei Abgastemperaturen oberhalb eines gewissen Niveaus besteht die Gefahr, dass gasförmige Arsenverbindungen die Filteranlage passieren und emittiert werden.

Die SNCR-Anlage ist außer Betrieb. Durch Optimierungsprozesse konnte der geforderte Emissionsgrenzwert auch ohne zusätzliche Ammoniak-Eindüsung unterschritten werden.

Beim Betrieb einer SNCR-Anlage darf das zur Reduktion von Stickstoffoxid zu Stickstoff und Wasser notwendige Temperaturfenster (950 +/- 100°C) nicht verlassen werden und es muss eine gute Einmischung des Reduktionsmittels in den Abgasstrom gewährleistet sein. Bei zu niedrigen Eindüsterperaturen steigt der NH₃-Schlupf stark an, bei zu hohen Temperaturen verbrennt das eingedüste Ammoniak und erhöht sogar die NO_x-Fracht. Der sichere Betrieb einer SNCR-Anlage im Abgas von Oxy-Fuel-Wannen benötigt daher aufwendige Kontroll- und Regelmechanismen, da sich Laständerungen auf die Abgasmenge und ganz erheblich auf die Abgastemperatur auswirken, mit der Folge, dass der NH₃-Eindüsor variabel ausgelegt werden muss.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.3.5 Anlage 11****Oxy-Fuel-Wannen (Fernsehglas) mit SNCR und E-Filter****5.3.5.1 Schmelzanlage****Anlage 11**

| | Bildschirmwanne | Konuswanne |
|--------------------------------------|--|--------------------|
| Wannenbauart | Oxy-Fuel-Wanne | |
| Schmelzfläche | 240 m ² | 109 m ² |
| Brenneranzahl je Feuerseite | 11 | 9 |
| Brennstoffart | Erdgas H, H _U = 37.200 kJ/m ³ | |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | 500 kVA | Ohne |
| Glasfarbe | Braun/Grün | Braun |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 270 t/d | 240 t/d |
| Baujahr | Jahr 1995 | Jahr 1996 |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 2001 | Jahr 2002 |
| Geplante Wannenlaufzeit | Jahr 2008 | Jahr 2009 |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Nahstöch. Verbrennung, Abdichtmaßnahmen, Ofenraumgeometrie SNCR | Ohne SNCR |
| Sonstige Maßnahmen | Schwefelarme Roh- und Brennstoffe / Filterstaubrückführung | |

Betriebsdaten**Aktuelle Durchschnittswerte**

| | | |
|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Schmelzleistung: | 270 t/d | 170 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung: | 30 % | 40 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge: | 2 % | 2 % |
| Gasverbrauch: | 1.500 m ³ /h | 600 m ³ /h |
| Sauerstoffverbrauch: | 3.000 m ³ /h | 1.200 m ³ /h |
| EZH: | 500 kW | - |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.570 °C | 1.530 °C |
| Spez. Schmelzleistung: | 1,125 t/m ² d | 1,560 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch: | 5.120 kJ/kg _{Glas} | 3.151 kJ/kg _{Glas} |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Bemerkenswert niedrig sind die spez. Energieverbräuche, insbesondere der Wert der Konuswanne. Immerhin sind dies Werte nach einer Wannenreise von 4 bzw. 5 Jahren.

Folgende Argumente wurden als Gründe für die Oxy-Fuel-Technik genannt:

- a) Glasqualität und Prozessstabilität
- a) NO_x-Emissionen
- b) Platzbedarf
- c) Kosten für Bau und Entsorgung der Wanne

Negativ bewertet wurde die Installation der Anlage zur Sauerstofferzeugung und die damit verbundenen Sicherheitsauflagen.

Die Sauerstofferzeugung erfolgt mittels einer auf dem Firmengelände platzierten VSA-Anlage. Im Bedarfsfall kann auf Flüssigsauerstoff zurückgegriffen werden (Notlager). Die Luftzerlegungsanlage wird von der Herstellerfirma betrieben. Der Glashersteller liefert die benötigte Energie in Form von elektrischem Strom und Wasser, die Herstellerfirma erhält eine vertraglich festgelegte Summe.

Die Jahreskosten betragen:

- Zugelieferte Energie: € 1.560.000,-
- O₂-Bezug: € 1.020.000,-

In der Summe müssen damit jährlich € 2.580.000,- für den Sauerstoffbezug aufgebracht werden. Auf die benötigte Sauerstoffmenge umgelegt betragen die

Sauerstoffkosten: €0,070/m³

Umgelegt auf die Tonnage müssen an Bildschirmwanne **€18,67/t_{Glas}** und an der Konuswanne **€11,86/t_{Glas}** zur Deckung des Sauerstoffbedarfs aufgebracht werden.

Der **Energiebedarf** zur Sauerstofferzeugung wurde auf **0,67 kWh/m³** abgeschätzt.

Die Betriebsleitung ist ständig bemüht, Prozessabläufe und Umweltauswirkungen zu verbessern. Seit dem Jahr 2002 konnten für das gesamte Werk inkl. der Produktions- und sonstigen Anlagen, umgelegt auf die produzierte Glasmenge, der Erdgasbedarf um 8,5 % und die Elektroenergie um 16,6 % gesenkt werden. Dies ging einher mit einer Reduzierung der CO₂-Emissionen um 9,2 %.

5.3.5.2 Abgaswärmemenutzung:

| Anlage | Bildschirmwanne |
|--------------------------------|----------------------|
| Wärmetauscherart | Rohrbündel |
| Wärmeträgermedium | Wasser / Dampf |
| Nutzung der gewonnenen Energie | Warm-/ Prozesswasser |
| Einbauort | Rohgas vor E-Filter |
| Abreinigungsart | Kugelregen |
| Abreinigung | Online |
| Staubentsorgungsweg | Deponierung |
| Verfügbarkeit | 98,3 % |
| Zurückgewonnene Energiemenge | 1.300 kWh/h |

| Kostenabschätzung: (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Wärmetauscher inkl. Zubehör [€] |
|--|---------------------------------------|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 500.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 66.500,- |
| Betriebskosten: Wartung / Reparatur: 25.000,- Elektr. Strom: 5.000,- Filterstaubentsorgung: 1.000,- Personal: 6.000,- | 37.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>103.500,-</u> |

Dies entspricht einem Aufwand von 0,01 €/kWh zurück gewonnener Energie.

Auf die Tonnage umgelegt liegen die Investitions-/Betriebskosten bei **1,05 €/tGlas**.

5.3.5.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|------------------------------|-----------------------------|
| Filtertyp | Elektrofilter mit 2 Feldern |
| Temperatur vor / nach Filter | 250 / 220 °C |
| Sorptionsmittelart | Ohne |
| Wassereindüsung | Nein |
| Filterstaubmenge | 350 t/a |
| Filterstaubverwendung | 100 % Recycling (Gemenge) |

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten

| Komponente | Grenzwert [kg/h] | Messwert [kg/h] | Messwert [kg/t _{Glas}] |
|-----------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------|
| Gesamtstaub | 0,54 | 0,02 | 0,0011 |
| NO _x | 58,7 | 47,5 | 2,59 |
| SO _x | 3,2 | 0,3 | 0,016 |
| HF | 0,032 | 0,012 | 0,0007 |
| HCl | 0,192 | 0,095 | 0,0052 |

Die Begrenzungen der Klassen I bis III werden nach Angaben der Betriebsleitung deutlich unterschritten. Als Staubinhaltstoff ist Blei die kritische Komponente mit einer Emission von 0,3 g/h.

Die Bildschirmwanne ist mit einer SNCR-Anlage ausgerüstet. Als Reduktionsmittel dient Harnstofflösung. Die Anlage ist seit dem Jahr 2004 nicht mehr in Betrieb, jedoch noch funktionstüchtig. In den letzten 4 Jahren konnten aufgrund von Optimierungsmaßnahmen die NO_x-Emissionen um ein Drittel gesenkt werden, so dass die Einhaltung der Emissionsbegrenzung auch ohne SNCR-Technik sicher gewährleistet ist.

Während des Betriebes der SNCR-Anlage wurden NO_x-Minderungsraten von 25 - 40 % gefahren. Der NH₃-Schlupf lag bei ca. 50 g/h (3 mg/m³).

Pro kg NO_x-Minderung werden 1,4 kg Harnstoff benötigt.

Eine Kostenabschätzung der SNCR-Anlage liegt nicht vor.

Der abgeschiedene Filterstaub enthält 70 % PbO und ist damit ein wichtiger Rohstoff.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

| | |
|---|--|
| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlage inkl. Zubehör, Gebläse, Rohrleitung, ... |
| | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 1.500.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 199.500,- |
| Betriebskosten Wartung / Reparatur: 8.000,- Elektr. Strom: 45.000,- Personal: 12.000,- Emissionsmessungen: 3.000,- | 68.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>267.500,-</u> |

Umgelegt auf die produzierte Glasmenge muss demnach für die **Abgasreinigung ein Betrag von € 1,67/tGlas** investiert werden. Aufwendungen für Sorptionsmittel sind nicht erforderlich.

5.3.5.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung:

Für die Aufbereitung, Lagerung und den Transport von Gemenge- und Scherbenströmen existieren inkl. der Siloaufztsfilter 25 Filteranlagen Der Zustand der Anlagen/Filtertücher wird im Abstand von 3 Monaten kontrolliert. 3 Anlagen zum Handling von bleihaltigen Rohstoffen sind überwachungspflichtig. Die Staubemissionen liegen dabei an allen Anlagen unterhalb von 1 mg/m³, bei einem Grenzwert von 50 mg/m³.

| | |
|---|----------------------------|
| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Entstaubungsanlagen |
| | [€] |
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 375.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 49.875,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung / Beseitigung von Filterstaub, Personal | 68.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>117.875,-</u> |

Die Entstaubung im Gemengehaus kostet demnach umgerechnet auf die Tonnage **€0,73/tGlas**.

5.3.5.5 Formgebung / Vergütung: Entfällt

5.3.5.6 Abwasser:

Die Abwasserbehandlung des gesamten Werkes ist sehr aufwendig. Die Abwässer werden direkt eingeleitet.

Es fallen folgende Abwässer an:

- a) Haushaltsähnliches Brauchwasser (Kantine, Toilette,...)
- b) Kühlwasser (mit Produktkontakt)
- c) Kühlwasser (ohne Produktkontakt)
- d) Prozesswasser
- e) Wasser der Weiterverarbeitung (Schleifen, Polieren, Waschen,...)

Alle Abwässer werden im Kreis geführt und unterliegen einer ständigen Abwasserbehandlung.

Zur Abwasserbehandlung kommen alle bekannten Verfahren zum Einsatz, bis auf Fliehkraftabscheidung und Verbrennung. Sämtliche Anlagenteile zur Abwasserbehandlung befinden sich in einem riesigen Gebäudekomplex in unmittelbarer Nähe zu den Produktionshallen.

Die verschiedenen Abwässer werden getrennt beprobt (intern und extern) und anschließend zusammengeführt. Die Grenzwerte werden alle eingehalten. Kritischste Komponente ist Blei.

➔ Das Werk verfügt außerdem über eine eigene Kläranlage, über die auch das Abwasser einer 5000 Einwohnergemeinde geklärt wird.

Frischwasser wird aus einem nahe gelegenen Fluss entnommen, aufbereitet und größtenteils im Kreislauf geführt.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Beispiel der Abwassersituation für das Jahr 2002:

| Ablauf | Erlaubt | Ist |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Scherbenkühlwasser | 91.104 m ³ /a | 87.600 m ³ /a |
| Schleifereiabwasser | 163.812 m ³ /a | 187.346 m ³ /a |
| Galvanikabwasser | 8.760 m ³ /a | 3.650 m ³ /a |
| Kühlwasser | 36.792 m ³ /a | 37.814 m ³ /a |
| Weichwasser | 13.140 m ³ /a | 9.125 m ³ /a |
| Vakuum.-O ₂ -Anlage | 70.080 m ³ /a | 3.700 m ³ /a |
| Summe | 383.688 m³/a | 329.235 m³/a |
| Kläranlage | 35.000 m³/a | 24.057 m³/a |
| Frischwassermenge | | 427.150 m³/a |

Eine Kostenangabe zur Abwasserbehandlung ist sehr schwierig. Als Investitionskosten für die Gebäude wurde ein Betrag von 6 Mio. Euro, für die Behandlungsanlagen 4 Mio. Euro und für Rohrleitungen 26 Mio. Euro veranschlagt.

Mit den Betriebskosten von etwa € 400.000,- im Jahr, einer Abschreibungszeit von 30 Jahren (Gebäude) bzw. 10 Jahren (Anlagen) und 6 % Jahreszins resultiert umgelegt auf die Tonnage ein Wert von rund **€30/t_{Glas}**.

Da die Abschreibungszeiten überwiegend abgelaufen sind, müssen derzeit etwa **€4,50/t_{Glas}** zur Abwasserbehandlung aufgebracht werden.

5.3.5.7 Abfall:

Während der Glasschmelze fällt kontinuierlich sog. Drainageglas an, welches vollständig dem Eigenscherbenkreislauf zugeführt und wieder eingeschmolzen wird.

Sämtliche Abriss und Entsorgungsaktivitäten werden von spezialisierten Fachfirmen durchgeführt.

Nach Angaben der Betriebsleitung liegen die anfallenden Kosten von Oxy-Fuel-Wannen 30 % unter denen konventionell befeuerter Schmelzwannen mit regenerativer Luftvorwärmung.

Die Filterstäube im Gemengehaus werden zurückgeführt.

Es fallen etwa 100 t/a Fehlchargen (bleifrei) an, die mit ca. € 20.000,- Deponiekosten zu Buche schlagen.

5.3.5.8 Bewertung der Referenzanlage 11:

In der Beschreibung der Marktsituation innerhalb der Glasindustrie wurde bereits erwähnt, dass der Fernsehglasmarkt zusammengebrochen ist, was zur Schließung von insgesamt 5 großen Fernsehbildschirm- und Konuswannen in Deutschland führte. Diese Anlagen waren alle mit SCR-Katalysatoren ausgerüstet.

Ohne SCR-Technik wurden im Bereich der Fernsehglaswannen normierte NO_x-Konzentrationen von bis zu 5.000 mg/m³ oder umgerechnet spez. Emissionen von mehr als 12 kgNO_x/t_{Glas} vorgefunden.

Im Abgassystem der Bildschirmwanne ist eine SNCR-Anlage mit Harnstoff als Reduktionsmittel installiert. Durch Optimierungen der Feuerführung ist es der Betriebsleitung gelungen, die Einhaltung des geforderten NO_x-Grenzwertes auch ohne Betrieb der selektiven nichtkatalytischen Reduktion zu erreichen.

Bei den beiden Oxy-Fuel-Wannen der Referenzanlage 11 liegt die mittlere spez. NO_x-Emission bei 2,59 kg/t_{Glas} und damit auf einem Niveau, das nur durch sekundäre Minderungsmaßnahmen bei konventionellen Wannen zu erreichen ist.

Der spez. Energieverbrauch der Bildschirm- bzw. Konuswanne liegt mit 5.120 bzw. 3.151 kJ/kg_{Glas} auf einem vergleichbar mit konventionellen Wannen niedrigen Niveau. An der Bildschirmwanne müssen mit den abgeschätzten Daten der Luftzerlegungsanlage zusätzlich 643 kJ/kg_{Glas} (0,18 kWh/kg_{Glas}) und an der Konuswanne 409 kJ/kg_{Glas} (0,11 kWh/kg_{Glas}) in Form elektrischer Energie zur Sauerstofferzeugung aufgebracht werden.

Die Schmelzenergiekosten einer konventionellen Vergleichswanne zur Bildschirmproduktion mit einem spez. Wärmeverbrauch von 9.000 kJ/kg_{Glas} (angenommener Gaspreis: € 0,025/kWh) belaufen sich auf € 62,50/t_{Glas}. Mit den Kosten der Sauerstofferzeugung von € 18,67/t_{Glas}, dem EZH-Anteil von € 2,89/t_{Glas} (angenommener Strompreis € 0,065/kWh) und den Gaskosten von € 34,44/t_{Glas}, ergibt sich z.B. für die Bildschirmwanne der Referenzanlage 11 ein Betrag von € 56,00/t_{Glas}. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten spricht damit im Fernsehglasbereich vieles für den Betrieb von Oxy-Fuel-Wannen, zumal geringere Investitions- und Abrisskosten zu verzeichnen sind und keine sekundären Minderungsmaßnahmen zur Stickstoffoxidreduktion notwendig sind.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.3.6 Anlage 12:****Regenerativ befeuerte Querbrennerwannen mit SCR-Anlage und E-Filter****5.3.6.1 Schmelzanlage**

Das gemeinsame Abgas der Referenzanlage 12 besteht aus den Teilsströmen von 4 unterschiedlich großen regenerativ mit Erdgas und leichtem Heizöl befeuerten Querbrennerwannen. Zusammengefasst ergeben sich folgende anlagenbezogene Daten:

| Anlage 12 | |
|--------------------------------------|--|
| Wannenbauart | Querbrennerwannen |
| Luftvorwärmung | Regenerativ |
| Schmelzfläche | 200 m ² |
| Art der Zerstäubung | Gas |
| Brennstoffart | Erdgas H, H _U = 35.953 kJ/m ³ |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | Heizöl EL, H _U : 42.600 kJ/kg |
| Glastyp | 3.000 kVA |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 8412 / 8414 (interne Bezeichnung) |
| Geplante Wannenlaufzeit | 220 t/d |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | 5 Jahre |
| Sonstige Maßnahmen | Abdichtmaßnahmen, SCR Schwefelarme Roh- und Brennstoffe |

| Betriebsdaten | Aktuelle Durchschnittswerte |
|---|------------------------------------|
| Schmelzleistung | 170 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 25 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 1,5 % |
| Gasverbrauch | 2.600 m ³ /h |
| Ölverbrauch | 570 l/h |
| Leistung der Elektrozusatzheizung (EZH) | 1.000 kW |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.650 °C |
| Spez. Schmelzleistung | 0,85 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch (inkl. EZH) | 16.440 kJ/kg Glas |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

5.3.6.2 Abgaswärmemenutzung:

| Anlage | 12 |
|--------------------------------|-----------------------|
| Wärmetauscherart | Rohrbündel |
| Wärmeträgermedium | Wasser / Dampf |
| Nutzung der gewonnenen Energie | Brauchwasser |
| Einbauort | Reingas nach E-Filter |
| Abreinigungsart | Ohne |
| Verfügbarkeit | 99 % |
| Zurückgewonnene Energiemenge | 1.140 kWh/h |

Auf die Tonnage umgerechnet werden 0,161 kWh/kg_{Glas} bzw. 579 kJ/kg_{Glas} der im Abgas enthaltenen Energie zurückgewonnen.

Angaben zu den Kosten liegen nicht vor.

5.3.6.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|-----------------------|--|
| Filtertyp | Elektrofilter mit 2 Feldern und SCR-Anlage |
| Temperatur vor Filter | 350 °C |
| Sorptionsmittelart | Ca(OH) ₂ |
| Sorptionsmittelmenge | 22 kg/h |
| Wassereindüsung | Nein |
| Filterstaubmenge | 307 t/a |
| Filterstaubverwendung | Verwertung (Bergversatz) |
| Energiebedarf | ca. 250 kWh/h |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

Im Reingas hinter der Filteranlage ist eine SCR-Anlage (Wabenkatalysator mit 10 m³ Kamervolumen) mit Ammoniaklösung (25 %) als Reduktionsmittel installiert. Die Abreinigung erfolgt quasi-kontinuierlich mit Pressluft.

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Messwert, normiert auf 8 % O ₂ [mg/m ³] | Messwert [kg/t _{Glas}] |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|
| Gesamtstaub | 25 | 20 | 0,127 |
| NO _x | 1.000 | 950 | 6,05 |
| SO _x | - | - | - |
| HF | 5 | 4 | 0,015 |
| HCl | 30 | 9 | 0,057 |
| NH ₃ | 30 | 20 | 0,127 |
| Schwermetalle: | | | |
| Pkt. 5.2.7.1.1 TA Luft 2002 | 0,7 | 0,088 | 0,6 · 10 ⁻³ |
| Klasse II TA Luft 2002 | 0,5 | 0,004 | 0,03 · 10 ⁻³ |
| Klasse III TA Luft 2002 | 1 | 0,007 | 0,05 · 10 ⁻³ |

Die Emissionsgrenzwerte wurden bereits auf die Werte der TA-Luft aus dem Jahr 2002 angepasst. Schwefeloxide liegen im Abgas nur als Spuren vor.

Die **NO_x-Minderung** beträgt **82 %**. Hieraus errechnet sich eine normierte Rohgaskonzentration von 5278 mg/m³ NO_x. Anhand der Verbrennungsrechnung lässt sich die Reduktionsmenge mit 195 kg_{NO_x}/h ableiten. Die stöchiometrisch benötigte Menge an Ammoniakwasser beläuft sich damit auf rund 320 l/h.

| Kostenabschätzung: (Abschreibungszeit: 10 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlage inkl. Zubehör, Gebläse, Rohrleitung, ... [€] | SCR inkl. Lagerung, Dosierung, Material [€] |
|--|--|---|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 2.800.000,- | 1.500.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 372.400,- | 199.500,- |
| Betriebskosten: | 275.000,- | 380.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>1.226.900,-</u> | |

Umgelegt auf die produzierte Glasmenge muss demnach für die **Abgasreinigung inkl. SCR ein Betrag von €19,77/t_{Glas}** investiert werden.

Der Anteil für den **Katalysator** beträgt **€9,34/t_{Glas}**.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Punkte 5.3.6.4 bis 5.3.6.7 wurden im Rahmen des Projektes nicht durchleuchtet da die Referenzanlage 12 nur einen schwer fassbaren Teilbereich des gesamten Werkes darstellt.

5.3.6.8 Bewertung der Referenzanlage 12:

Die Referenzanlage 12 ist seit 1989 mit einer SCR-Anlage ausgerüstet. Angaben zur Lebensdauer der Katalysatormodule liegen nicht vor. Aus Informationen von Veröffentlichungen können 4 bis 5 Jahre Standzeit erwartet werden. Bei den Emissionen stehen die Stickstoffoxide im Vordergrund.

Zur Einhaltung des geforderten NO_x-Grenzwertes von 1.000 mg/m³ (Schmelzwannen mit Nitrateinsatz) müssen die im Rohgas vorherrschenden, normierten Konzentrationen von über 5.000 mg/m³ durch die SCR-Anlage um mehr als 80 % reduziert werden.

Aufgrund der geringen Tonnage und dem hohen spez. Wärmebedarf der erschmolzenen Gläser sind die Aufwendungen zur Abgasreinigung enorm hoch.

Kostenabschätzung: Umstellung auf Oxy-Fuel-Technik

Aus ökologisch und ökonomischer Sicht stellt sich auch hier die Frage, ob die Umstellung auf Oxy-Fuel-Technik Vorteile bringt.

Berücksichtigt müssen Fragestellungen wie:

- Ist der Glastyp und die erforderliche Qualität mit Oxy-Fuel zu erreichen?
- Lebensdauer der Wanne?
- Feuerfestmaterialien des Gewölbes?
- Abgaswärmennutzung?
- Zusätzlich SNCR-Technik notwendig?

Zur Kostenabschätzung werden Annahmen getroffen, da für den geschmolzenen Glastyp keine Referenzanlagen zur Verfügung stehen. Betrachtet werden nur Schmelzenergiekosten inkl. Sauerstoffbezug und eine Befeuerung ausschließlich mit Erdgas.

| | |
|-----------|--|
| Annahmen: | Spez. Energieverbrauch Oxy-Fuel-Wanne: 9.000 kJ/kg Leistung EZH: 250 kW Erdgaspreis: € 0,025/kWh Strompreis: € 0,065/kWh Sauerstoffpreis: € 0,065/m ³ Keine Abgaswärmennutzung |
|-----------|--|

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Es resultieren folgende Beträge:

| | Konventionelle Wanne | Oxy-Fuel-Wanne |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Spez. Energieverbrauch | 16.440 kJ/kgGlas | 9.000 kJ/kgGlas |
| EZH | 250 kWh/h | 250 kWh/h |
| Schmelzleistung | 50 t/d | 50 t/d |
| Erdgasverbrauch | 928 m ³ /h | 497 m ³ /h |
| Sauerstoffverbrauch | - | 994 m ³ /h |
| Erdgaskosten | 111,21 €/tGlas | 59,56 €/tGlas |
| Stromkostenkosten | 7,80 €/tGlas | 7,80 €/tGlas |
| Sauerstoffkosten | - | 31,01 €/tGlas |
| Schmelzenergiekosten | 119,01 €/tGlas | 98,37 €/tGlas |

Die abgeschätzten Schmelzenergiekosten der Oxy-Fuel-Wanne liegen bei den angenommenen Energie-/ Bezugspreisen ab einem spez. Energieverbrauch von 12.000 kJ/kgGlas auf dem Niveau der konventionell befeuerten Wanne.

Berücksichtigen muss man zudem die geringeren Investitionskosten der Oxy-Fuel-Wanne gegenüber einer regenerativ beheizten Querbrennerwanne und den evtl. niedrigeren Aufwand für sekundäre Minderungsmaßnahmen.

➔ An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Bezugspreise für Energie und Sauerstoffbereitstellung von Standort zu Standort verschieden sind und von den angegebenen Werten abweichen können. Dabei ist hervorzuheben, dass insbesondere die Sauerstoffbezugskosten von der Art des Herstellungsverfahrens, der Anlagengröße, der benötigten Menge und nicht zuletzt vom Verhandlungsgeschick des Anlagenbetreibers abhängen.

5.3.7 Weitere Angaben zur Spezialglasindustrie

Die Referenzanlage 12 hat gezeigt, dass der erzielbare NO_x-Abscheidegrad bzw. der NO_x-Reingasgehalt einer SCR-Anlage ausschließlich von der Auslegung bzw. dem Katalysatorvolumen abhängt. Lässt man wirtschaftliche Gesichtspunkte außen vor, lassen sich nahezu beliebig geringe NO_x-Konzentrationen realisieren.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

In der Spezialglasindustrie werden in der Regel Gewebefilteranlagen eingesetzt. Die Gesamtstaubgehalte liegen dann unter 20 mg/m³, in einzelnen Bereichen – je nach Toxizität der emittierten Stäube auch deutlich unter 10 mg/m³. Bei diesen Anlagen ist besonders auf die Staubinhaltsstoffe zu achten. Es gibt in der Spezialglasindustrie jedoch auch Filterstäube mit geringerem toxischen Potential.

SO_x-Emissionen spielen in der Spezialglasindustrie nur eine untergeordnete Rolle. Die Konzentrationen liegen meist im Bereich der Messunsicherheiten der angewandten Messverfahren.

Bei Spezialglaswannen mit Kochsalzläuterung treten im Rohgas teilweise sehr hohe HCl-Gehalte auf. Bei entsprechender Dosierung und Auswahl des Sorptionsmittels ist auch an diesen Anlagen eine Unterschreitung des Emissionsgrenzwertes gewährleistet. Alle übrigen Anlagen der Spezialglasindustrie haben mit der HCl-Emission keine Probleme.

In der Regel ist die HF-Emission für die Spezialglasindustrie unproblematisch – insbesondere wegen der überwiegend eingesetzten sehr reinen Rohstoffe. Bestimmte Teilbereiche benötigen jedoch den Einsatz fluorhaltiger Rohstoffe. Dann müssen unter den vorgegebenen Abgasrandbedingungen und Filtertechnologien entsprechende Sorptionsmittel eingesetzt werden, um den Emissionsgrenzwert einzuhalten.

In der Spezialglas- und Faserglasindustrie werden dem Gemenge sehr oft borhaltige Rohstoffe beigemischt. Die Abscheidung gasförmiger Borverbindungen ist mit herkömmlicher Abgasreinigungstechnologie unter Umständen schwierig. Dieser Thematik stellt sich die HVG momentan im Rahmen eines Forschungsvorhabens.

Spezialglaswannen werden in jüngster Zeit zunehmend mit Sauerstoff als Oxidationsmedium beheizt. Mit dem Einsatz der Oxy-Fuel-Technologie sind auf eine Konzentration bezogene Emissionsgrenzwerte und eine Normierung auf einen Bezugssauerstoffgehalt nicht aussagekräftig, da der Restsauerstoff im Abgas weder dem Oxidationsmedium noch der einströmenden Falschluft zugeordnet werden kann. Hier müssen beispielsweise spezifische produktbezogene Emissionsbegrenzungen z.B. in [kg Schadstoff/t Glas] abgeleitet werden.

Die Umstellung auf Oxy-Fuel-Feuerung konnte anhand von Kostenabschätzungen nachvollzogen werden. Sowohl aus ökologischen als auch ökonomischen Gründen spricht im Spezialglasbereich, wo mit der konventionellen Beheizung sehr hohe spez. Energieverbräuche notwendig sind, vieles für eine Brennstoff-Sauerstoff beheizte Schmelzwanne.

Dennoch muss für jede einzelne Anlage eine gesonderte Betrachtung angestellt werden.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.4 Wirtschaftsglas:**

Als Referenzanlagen zur BVT-Betrachtung wurden zwei Anlagen ausgesucht. Es handelte sich dabei um einen Standort, in dem ausschließlich elektrisch betriebene Schmelzwannen betrieben werden und eine weitere Anlage, bei der das Glas in einer regenerativ befeuerten U-Flammenwanne mit schwerem Heizöl als Brennstoff geschmolzen wurde.

Während von den Elektrowannen keine Informationen hinsichtlich der Befragung zurückgeflossen sind, wurde die andere Anlage in der zweiten Hälfte des Jahres 2006 aus wirtschaftlichen Gegebenheiten geschlossen.

Aus diesen Gründen heraus können zu beiden Anlagen nur eingeschränkt Angaben gemacht werden.

5.4.1 Anlage 13**Schwerölbeheizte U-Flammenwanne mit E-Filter**

| Anlage 13 | |
|---|---|
| Betriebsdaten | Aktuelle Werte (2005) |
| Wannenbauart | U-Flammenwanne |
| Luftvorwärmung | Regenerativ |
| Schmelzfläche | 54 m ² |
| Brennstoffart | Heizöl S, H _u : 41.100 kJ/kg |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 125 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 2004 |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Abdichtmaßnahmen, Sauerstoffregelung |
| Schmelzleistung | 110 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 40 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 2 % |
| Ölverbrauch | 1.330 kg/h |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.512 °C |
| Spez. Schmelzleistung | 2,04 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch | 4.970 kJ/kgGlas |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten (2005)

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] | Messwert, normiert auf 8 % O ₂ [mg/m ³] | Messwert [kg/tGlas] |
|-------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|
| Gesamtstaub | 50 | 16,5 | 0,034 |
| NO _x | 1.000 | 827 | 1,71 |
| SO _x | 1.800 | 944 | 2,02 |
| HF | 5 | 0,6 | 0,0013 |
| HCl | 30 | 11 | 0,0233 |
| Schwermetalle: | | | |
| Klasse II TA Luft 1986 | 1 | 0,3 | 0,69 · 10 ⁻³ |
| Klasse III TA Luft 1986 | 5 | 0,06 | 0,14 · 10 ⁻³ |

An der gleichen Anlage wurden auch schon im Rahmen von Emissionsmessungen NO_x-Konzentrationen unterhalb von 800 mg/m³ und Staubkonzentrationen von 2 mg/m³ gemessen.

Weitere Daten stehen nicht zur Verfügung.

5.4.2 Anlage 14**Elektrowannen**

Bei den Schmelzagggregaten handelt es sich um 3 kontinuierlich betriebene vollelektrisch beheizte Glasschmelzwannen, deren Vorherd und Entnahmesystem gleichfalls elektrisch beheizt sind. Die zum Schmelzen und Läutern des Glases benötigte Energie wird bei dem vorliegenden Anlagentyp unmittelbar durch Elektroden zugeführt, wobei die elektrische Leitfähigkeit der Glasschmelze ausgenutzt wird. Die elektrische Energie wird durch sogenannte Topelektroden übertragen. Diese gekrümmten Elektroden werden durch relativ große Öffnungen im Oberofen durch das Gemenge hindurch in die Schmelze eingetaucht.

Das Gemenge wird in der Schmelzwanne von oben auf das erschmolzene Glas aufgebracht und gleichmäßig verteilt. Die auf der Glasschmelze liegende Gemengeschicht schmilzt von unten her ab und schirmt gleichzeitig den Ofenraum gegenüber der Strahlung des geschmolzenen Glases ab (Cold Top Anlage). Dadurch wird die die Staubemission in erster Linie verursachende Verdampfung stark eingeschränkt.

Die Schmelzleistungen liegen zwischen 20 und 30 Tagestonnen. Der spez. Energieverbrauch liegt zwischen 1,0 und 1,3 kWh/kgGlas.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Abgase der Elektrowannen werden zusammengeführt und werden ohne Abgasreinigung über Dach geführt.

Zur Verfügung stehende Emissionsdaten:

| Komponente | Messwert [mg/m³] | Messwert [kg/t_{Glas}] |
|-------------------|--|---|
| Gesamtstaub | 20,2 | 0,044 |
| NO _x | 499 | 1,49 |
| SO _x | 2,1 | 0,005 |

Aktuelle Emissionsgrenzwerte sind nicht bekannt. Die Staubemissionen liegen auf einem vergleichbar niedrigen Niveau. Die Konzentration ist nicht sehr aussagekräftig, da mit einer Variation der Absaugverhältnisse beliebige Konzentrationen eingestellt werden können. Interessanter ist die spez. Emission.

Die NO_x-Emissionen der Elektrowannen stammen aus der Salpeterzerersetzung.

Eine Vergleichswanne mit 7.000 kJ/kg_{Glas} Energieverbrauch darf bei Einsatz von nitrathaltigen Gemengesätzen 2,8 kgNO_x/t_{Glas} emittieren. Demnach wäre der geforderte Grenzwert der TA-Luft aus dem Jahr 2002 eingehalten.

5.4.3 Weitere Angaben zur Wirtschaftsglasindustrie

Wirtschaftsglas wird bei größeren Stückzahlen in kontinuierlich betriebenen Schmelzwannen erschmolzen. Sämtliche für die Glasindustrie gültigen Emissionsgrenzwerte werden nach dem Kenntnisstand der HVG im Wirtschaftsglasbereich eingehalten.

Mit Inkrafttreten der Emissionsgrenzwerte der neuen TA-Luft stellen die Stickstoffoxide, insbesondere wenn nitrathaltige Gemengesätze vorliegen, die größte Herausforderung dar. Ab Oktober 2010 müssen Neu- und Altanlagen 1.000 mg/m³ einhalten. Lediglich Altanlagen mit einem Abgasvolumenstrom von weniger als 5.000 m³/h dürfen 1,2 g/m³ emittieren.

Wirtschaftsgläser werden in kleineren Stückzahlen auch in Hafenöfen gefertigt.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Bei Hafenöfen ist die Emissionssituation von der jeweiligen Schmelzphase abhängig. Die höchsten Emissionen treten während der Einlegephasen auf. In vielen Fällen wird das Glas nach Beendigung der sog. Rauschmelze "geblasen", d.h. mit dem Eintauchen eines nassen Holzklotzes oder einer Kartoffel in die Glasschmelze, erfolgt ein gewaltiges Aufkochen und Homogenisieren der Schmelze. In diesen Phasen können ebenfalls große Konzentrationsspitzen der einzelnen Emissionskomponenten auftreten.

In Deutschland sind alle Hafenofenschmelzanlagen nach dem Kenntnisstand der HVG mit Gewebefilteranlagen ausgerüstet. Bei sachgerechter Handhabung und evtl. zusätzlichem Sorptionsmittel Einsatz lassen sich an diesen Anlagen die geforderten Emissionsgrenzwerte einhalten.

Beim Vorhandensein gasförmiger Schwermetallverbindungen muss besonders auf das Abgastemperatureniveau vor der Filteranlage geachtet werden. Gasförmige Arsenverbindungen beispielsweise besitzen in Abhängigkeit von der Abgasmatrix einen derart hohen Dampfdruck, dass sie auch bei Temperaturen unterhalb von 100°C die Filteranlage gasförmig passieren können.

Die Abwasser- und Abfallsituation konnte im Rahmen der Befragung nicht erörtert werden. In der Weiterverarbeitung fallen gegenüber der Hohlglasindustrie höhere Abwassermengen aus Schleif- und Poliervorgängen an.

5.5 Glasfasern und Mineralwolle

In diesem Industriezweig der Glasindustrie sind in Deutschland überwiegend erdgasbeheizte Schmelzwannen mit rekuperativer Luftvorwärmung in Betrieb, die aufgrund der geringeren Luftvorwärmtemperaturen gegenüber regenerativ beheizten Schmelzwannen mit der Einhaltung des Grenzwertes für Stickstoffoxid von 800 mg/m³ geringere Probleme besitzen.

Es existieren aber auch Elektrowannen und Oxy-Fuel-Wannen.

Im Zuge der Bearbeitung des Projektes wurde zur Isolierglasfaserproduktion eine rekuperativ beheizte Schmelzwanne sowie eine mit Sauerstoff als Oxidationsmedium betriebene Schmelzwanne ausgewählt.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.5.1 Anlage 15****Oxy-Fuel-Wanne (C-Glas) mit E-Filter****5.5.1.1 Schmelzanlage**

| Anlage 15 | |
|--|---|
| Wannenbauart | Oxy-Fuel-Wanne |
| Schmelzfläche | 71,5 m ² |
| Brennstoffart | Erdgas H, H _U : 35.903 kJ/m ³ |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | 170 kVA |
| Glasart | C-Glas |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 206 t/d |
| Baujahr | Jahr 2006 |
| Geplante Wannenlaufzeit | 8 Jahre |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Nahstöch. Verbrennung, Abdichtmaßnahmen, Einstellbare Brenner |
| Sonstige Minderungsmaßnahmen | Schwefelarme Roh- und Brennstoffe |
| Abgaswärmennutzung | Nein |
| Betriebsdaten | Durchschnittswerte |
| Schmelzleistung | 199 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 66 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 2,5 % |
| Gasverbrauch | 820 m ³ /h |
| Sauerstoffbedarf | 1.750 m ³ /h |
| Leistung der EZH | 0 kW |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.500 °C |
| Spez. Energieverbrauch (ohne O ₂ -Erzeugung): | 3.551 kJ/kgGlas |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

Der Sauerstoff wird auf dem Werksgelände produziert. Es handelt sich um eine VSA-Anlage, die ein Oxidationsmedium mit einem O₂-Anteil von ca. 93 - 94 % liefert.

Produktionsabfälle werden im Fallschacht den Zerfaserungsprodukten erneut zugemischt.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Neue rekuperativ beheizte Vergleichswannen liegen im spez. Energieverbrauch bei etwa 5.000 kJ/kg Glas.

Ein Kostenabschätzung der Schmelzenergiekosten (Erdgaspreis: € 0,025/kWh; Strompreis: € 0,065/kWh; Sauerstoffpreis: € 0,065/m³) liefert damit:

Oxy-Fuel-Wanne: **€24,56 (Gas) + €13,72 (O₂) = €38,28/t_{Glas}**

Rekuperativwanne: **€34,72/t_{Glas}**

Vorausgesetzt die angenommenen Preise und spez. Energieverbräuche spiegeln die Realität wider, so bedeutet dies, dass man eine detaillierte Kostenrechnung aufstellen muss, um das wirtschaftlichere Schmelzagggregat über die gesamte Wannenreise ausfindig zu machen.

5.5.1.2 Abgaswärmennutzung: Entfällt

5.5.1.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

An der Referenzanlage 15 liegen derzeit noch keine offiziellen Ergebnisse von Emissionsmessungen vor. Die Referenzanlage wurde nach dem Vorbild einer existierenden gasbeheizten Schmelzwanne im europäischen Ausland, ebenfalls mit Oxy-Fuel-Feuerung und der gleichen Glasart, aufgebaut.

Dort wurden von der HVG im Rahmen eines Forschungsprojektes Emissionsmessungen durchgeführt.

Die Abgase werden nach Verlassen des Schmelzofens mit Umgebungsluft abgekühlt und, wie die Abgase der Referenzanlage 15, anhand eines Elektrofilters ohne zusätzliches Sorptionsmittel gereinigt.

Emissionsbegrenzungen – Emissionsdaten

| Komponente | Grenzwert*) [kg/h] | Messwert**) [kg/h] | Messwert**) [mg/m ³] | Messwert**) [kg/t _{Glas}] |
|-----------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Gesamtstaub | 0,37 | 0,021 | 3,4 | 0,0076 |
| NO _x | 9,17 | 2,30 | 371 | 0,83 |
| SO _x | 1,83 | 0,004 | 0,7 | 0,0014 |
| HCl | 0,092 | 0,004 | 0,7 | 0,0014 |
| HF | 0,018 | 0,003 | 0,5 | 0,0011 |

*) Grenzwerte der Referenzanlage 15

**) Messwerte der ausländischen Vergleichsanlage

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Die Referenzanlage 15 ist dreimal größer als die ausländische Vergleichsanlage. Sie benötigt daher auch mehr Schmelzenergie, was bei der Bewertung der spez. NO_x-Emission berücksichtigt werden muss. Multipliziert man den NO_x-Massenstrom der Vergleichsanlage mit dem Faktor 3, so wird der geforderte Emissionsgrenzwert (Massenstrom) dennoch unterschritten.

Alle anderen Messwerte liegen auf einem sehr niedrigen Niveau.

Der abgeschiedene Filterstaub (ca. 260 t/a) wird wieder eingeschmolzen.

Der Grund für die geringen Konzentrationen an sauren Abgasbestandteilen liegt einerseits an der Rohstoffauswahl, andererseits an den hohen Rohgasstaubkonzentrationen von 1.750 mg/m³ (bei einem O₂-Gehalt der Abgase von 18,2 %) und den damit verbundenen Sorptionseigenschaften der emittierten Stäube.

Die Kostenabschätzung betrifft die Referenzanlage. Vom Anlagenbetreiber wurde eine Abschreibungszeit von 8 Jahren angegeben.

| Kostenabschätzung (Abschreibungszeit: 8 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlage inkl. Zubehör [€] |
|--|--|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 910.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 158.750,- |
| Betriebskosten Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Personal, Sonstiges | 60.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>218.750,-</u> |

Umgelegt auf die durchschnittlich produzierte Glasmenge muss demnach für die **Abgasreinigung ein Betrag von €3,01/t_{Glas}** investiert werden.

5.5.1.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung:

Im Gemengehaus existieren keine überwachungspflichtigen Filteranlagen. Der Aufwand zur Staubabscheidung wurde mit **€0,16/t_{Glas}** abgeschätzt.

5.5.1.5 Formgebung / Vergütung:

Der größte Aufwand auf dem Gebiet der Luftreinhaltung muss den Produktionsprozessen nach der Zerfaserung gewidmet werden.

Emissionsbegrenzungen

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] |
|----------------------|-----------------------------------|
| Gesamtstaub | 20 (Fallschächte) |
| Gesamtstaub | 10 (Produktionslinie) |
| NO _x | 35 |
| SO _x | 50 |
| Phenol + Formaldehyd | 15 |
| Ammoniak | 65 |
| Gesamt C | 15 |

Offizielle Messergebnisse liegen noch nicht vor.

Für die Produktionslinien, Fallschächte und Härteöfen wurden folgende Kostenabschätzungen angegeben:

| Kostenabschätzung: (Abschreibungszeit: 8 Jahre / Kein Restwert / Zinssatz: 6 %) | Filteranlagen inkl. Zubehör [€] |
|--|------------------------------------|
| Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten | 3.140.000,- |
| Jährliche Rückzahlung | 498.475,- |
| Betriebskosten: Inkl. Wartung, Energie, Betriebsmittel, Verwertung, Personal, Sonstiges | 200.000,- |
| Jährliche Gesamtkosten | <u>698.475,-</u> |

Auf diesem Gebiet belaufen sich die Kosten auf **€ 9,62/t_{Glas}** und liegen damit mehr als dreifach höher, als die Abgasreinigung der Schmelzanlage.

5.5.1.6 Abwasser:

Im Abwasserbereich fallen nur haushaltsähnliche Brauchwässer an. Sämtliche Kühl-, Prozess und Abwässer aus Wäschersystemen werden im Kreis geführt und filtriert.

Eine definierte Kostenabschätzung liegt nicht vor.

Der Frischwasserbedarf von 54.800 m³/a wird aus Brunnenwasser gedeckt, der mit € 0,07/m³ gefördert werden muss.

5.5.1.7 Abfall:

Die Abfallsituation konnte nicht nachvollziehbar dokumentiert werden. Es handelt sich bei der Referenzanlage 15 um einen neu errichteten Produktionsstandort.

5.5.1.8 Bewertung der Referenzanlage 15:

Die Emissionen der Referenzanlage 15 mussten aufgrund fehlender offizieller Messergebnisse durch eine Referenzanlage verifiziert werden. Bemerkenswert niedrig sind die Emissionen saurer Abgasbestandteile wie SO_X, HCl und HF. Auch die Stickstoffoxidemissionen liegen unter dem Vergleichswert einer konventionell beheizten Wanne mit einem Grenzwert von 500 mg/m³.

Die Kostenabschätzung mit angenommenen Beträgen für Energie und Sauerstoffbezug kamen zu dem Ergebnis, dass man eine exakte Kostenrechnung durchführen muss, um bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Schmelztechnologie Vorteile für eine konventionelle oder die Oxy-Fuel-Technologie zu belegen.

Die Kosten für Umweltschutzmaßnahmen in Höhe von € 12,79/t_{Glas} (ohne Abfall- und Abwasserbetrachtung) sind nur zu etwa 25 % durch die Abgasreinigung der Glasschmelzwannenabgase verursacht. Die Abgasbehandlung der Produktfertigung erfordert den weitaus größeren Anteil.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**5.5.2 Anlage 16****Rekuperativwanne und Elektrofilter****5.5.2.1 Schmelzanlage**

| Anlage 16 | |
|---|---|
| Betriebsdaten | Aktuelle Durchschnittswerte |
| Wannenbauart | Querbrennerwanne |
| Luftvorwärmung | Rekuperativ |
| Schmelzfläche | 80 m ² |
| Brennstoffart | Erdgas H, H _U = 36.119 kJ/m ³ |
| Elektrozusatzheizung (installiert) | Ohne |
| Maximal genehmigte Schmelzleistung | 300 t/d |
| Letzte Hauptreparatur | Jahr 2002 |
| Geplante Wannenlaufzeit | 5 - 8 Jahre |
| NO _x -Minderungsmaßnahmen | Nahstöch. Verbrennung, Abdichtmaßnahmen, Einstellbare Brenner |
| Sonstige Maßnahmen | Schwefelarme Brennstoffe |
| Schmelzleistung | 270 t/d |
| Scherbenanteil, bez. auf die Schmelzleistung | 75 % |
| Gemengefeuchte, bez. auf Gesamtgemenge | 0,8 % |
| Gasverbrauch | 1.700 m ³ /h |
| Max. Gewölbetemperatur | 1.520 °C |
| Spez. Schmelzleistung | 3,375 t/m ² d |
| Spez. Energieverbrauch | 5.458 kJ/kg Glas |

(Volumenangaben sind bezogen auf Normzustand)

Die Produktionsabfälle mit Bindemittelbeaufschlagung werden einem sog. Zyklonofen zugeführt, in dem die organischen Bestandteile verbrannt und zusammen mit den Wannenabgasen weitergeleitet werden. Insgesamt werden damit jährlich etwa 3.700 t Glaswolleabfälle eingeschmolzen und dem Prozess zurückgeführt.

5.5.2.2 Abgaswärmennutzung: Entfällt

5.5.2.3 Abgasreinigungsanlage der Schmelzwanne:

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Filtertyp | Elektrofilter mit 2 Feldern |
| Temperatur vor Filter | 380 °C |
| Sorptionsmittelart | Ohne |
| Wassereindüsung | Ja |
| Filterstaubmenge | 400 t/a |
| Filterstaubverwendung | 100 % Recycling (Gemenge) |
| Energiebedarf Gebläse und Filter | 194 kWh/h |

Emissionsbegrenzungen

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] |
|-----------------|-----------------------------------|
| Gesamtstaub | 30 |
| NO _x | 500 |
| SO _x | 100 |
| HF | 5 |
| HCl | 30 |

Die geforderten Grenzwerte werden alle unterschritten.

Die Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten für die Abgasreinigungsanlage betragen etwa 1,5 Mio. Euro.

5.5.2.4 Abgasreinigungsanlagen Gemengeherstellung:

Für die Aufbereitung, Lagerung und den Transport von Gemenge- und Scherben sind keine überwachungspflichtigen Abgasreinigungsanlagen notwendig. Insgesamt sind 16 Siloaufsatzzfilter montiert.

5.5.2.5 Formgebung:

Emissionsbegrenzungen

| Komponente | Grenzwert [mg/m ³] |
|----------------------|-----------------------------------|
| Gesamtstaub | 50 |
| Phenol + Formaldehyd | 30 |
| Ammoniak | 65 |
| Gesamt C | 50 |

Die geforderten Grenzwerte werden alle eingehalten.

Analog zur Referenzanlage 15, müssen zur Produktfertigung sehr hohe Aufwendungen hinsichtlich der Luftreinhaltung betrieben werden.

Die Investitions-/ Wiederbeschaffungskosten für die Abgasreinigung betragen etwa 10 Mio. Euro.

5.5.2.6 Abwasser:

Es fällt nur haushaltsähnliches Brauchwasser an. Die Ableitung erfolgt über das städtische Abwassersystem. Regenwasser wird nach kontinuierlicher Überwachung in ein naheliegendes Gewässer abgegeben.

Prozesswasser wird im Kreislauf geführt. Die Behandlung erfolgt durch Filtration bzw. Rotationssiebtechnik.

Die Abwassermenge liegt bei 15.000 m³/a.

Kostenangaben liegen nicht vor.

5.5.2.7 Abfall:

Im Zuge einer Hauptreparatur fallen etwa 780 Tonnen Feuerfestmaterial an, die zu 100 % der Verwertung zugeführt werden.

Ansonsten ist der Produktionsprozess weitgehend abfallfrei. Filterstäube aus der Abgasreinigungsanlage der Schmelzwannen, im Gemengehaus und der Weiterverarbeitung werden dem Prozess erneut zugeführt.

5.5.2.8 Bewertung der Referenzanlage 16:

Der spez. Energieverbrauch der rekuperativ beheizten Schmelzwanne liegt nach einer Wannenlaufzeit von 4 Jahren bei 5.458 kJ/kgGlas. Im Neuzustand lag der Wert bei etwa 5.000 kJ/kgGlas.

Die Kostensituation wurde bereits bei der Referenzanlage 15 durchleuchtet.

Alle geforderten Emissionsbegrenzungen der Schmelzwanne und der Weiterverarbeitung werden eingehalten. Auch der Emissionsgrenzwert für Stickstoffoxide von 500 mg/m³ wird unterschritten.

Die Kosten der Abluftreinigung im Bereich der Weiterverarbeitung der Glasfasern sind deutlich höher als die Kosten der Abgasreinigung der Schmelzwannenabgase.

Die Referenzanlage 16 ist mit einer zusätzlichen besonderen Schmelztechnologie, dem sog. Zyklonofen ausgestattet. Der Zyklonofen ist an die Schmelzwanne angegliedert und separat beheizt. Die Produktionsabfälle mit den daran gebundenen organischen Bestandteilen werden aufgeschmolzen und in die Schmelzwanne überführt. Die organischen Bestandteile werden rückstandslos verbrannt. Die Abgasführung des Zyklonofens erfolgt zusammen mit den Wannenabgasen.

5.5.3 Weitere Angaben zur Glasfaser und Mineralwolleindustrie

Neben den vorgestellten Referenzanlagen, einer Oxy-Fuel- und einer rekuperativ beheizten Schmelzwanne, gibt es auch Glasschmelzöfen mit ausschließlich elektrischer Beheizung oder sog. Kupolöfen zur Produktion von Steinwolle.

Beim Kupolofen wird Vulkanisches Gestein, Kalk, Mineralienzuschläge sowie Steinwolle-Recyclingmaterial durch Verbrennen von Koks auf mehr als 1500° C erhitzt. Die flüssige Gesteinsschmelze wird anschließend zu Fasern versponnen, mit einem organischen Bindemittel versetzt und ausgehärtet. Belastbare Angaben zum Thema Umweltschutz liegen nicht vor.

Bei vollelektrischen Glasschmelzöfen werden traversierende Gurtförderer oder andere ausgeklügelte Einlegetechniken so eingesetzt, dass sich über der Glasschmelze eine geschlossene Gemengedecke bildet. Die Gemengedecke übernimmt damit die Funktion einer Sorptionsstufe. Im Verbund mit einem filternden Abscheider liegen die Emissionen von elektrisch erschmolzenen Gläsern ("Cold-Top-Wannen") im Vergleich zu konventionell erschmolzenen Gläsern gleichen Typs in flammenbeheizten Glasschmelzwannen in der Regel auf einem deutlich niedrigeren Niveau.

Beim Einsatz von borhaltigen Gemengebestandteilen werden, insbesondere wenn man alkaliarme Gläser einschmilzt, gasförmige Borverbindungen emittiert. Unter dem nächsten Punkt werden zu dieser Problemstellung einige Anmerkungen, die im Rahmen von Forschungsaktivitäten der HVG gewonnen wurden, aufgeführt.

6 Aktuelle Forschungsergebnisse der HVG auf dem Gebiet der Luftreinhaltung

Ein Großteil der Forschungsaktivitäten der HVG widmet sich seit 30 Jahren den Emissionen der Glasindustrie und den primären und sekundären Minderungsmöglichkeiten von einzelnen Emissionskomponenten.

Feinstaubemissionen - PM 10 / PM 2,5

Im Mai 2004 wurde eine Projekt abgeschlossen, indem die Feinstaubemissionen von Glasschmelzöfen untersucht wurden.

In der Summe wurden Messungen an 18 Schmelzwannen aus den unterschiedlichen Industriezweigen der Glasindustrie durchgeführt. Es konnte dokumentiert werden, dass die Glasindustrie im Vergleich mit anderen Industriezweigen kein besonderes Feinstaubemissionsproblem hat.

Die Messungen wurden mit einem Kaskadenimpaktor vom Typ Johnas II durchgeführt, mit dem die Kornfraktionen $> 10 \mu\text{m}$, $< 10 \mu\text{m}$ (PM 10) und $< 2,5 \mu\text{m}$ (PM 2,5) erfasst und ausgewertet werden können. Alle Messungen wurden durch zeitparallele Gesamtstaubmessungen begleitet.

Dadurch konnte festgestellt werden, dass die richtlinienabgestützte Feinstaubmesstechnik im Abgas von Glasschmelzwannen mit einem Problem behaftet ist. Innerhalb des Kaskadenimpaktors kommt es zu Staubverlusten, die in erster Linie auf die Agglomerationsneigung der Stäube zurückzuführen sind. Auf der ersten Düsenplatte des Kaskadenimpaktors findet man nach der Messung mehr oder weniger starke Staubablagerungen. Summiert man die Einzelfraktionen des Kaskadenimpaktors auf und vergleicht sie mit dem zeitparallel gemessenen Gesamtstaubgehalt, so treten je nach Glasschmelzwanne unterschiedlich große Verluste von teilweise mehr als 30 % auf.

Die Gewichtsverluste im Kaskadenimpaktor wirken sich auf die Auswertung der Messergebnisse aus. Schlägt man den Verlustanteil dem Grobstaub zu, was anhand rasterelektronischer Untersuchungen belegt werden konnte, so wurden beispielsweise im Abgas der 10 untersuchten Hohlglaswannen im Mittel ein PM 10-Anteil am Gesamtstaub von 68 % und ein PM 2,5-Anteil von 48 % festgestellt. Vernachlässigt man die Verluste, dann ergibt sich ein PM 10-Anteil am Gesamtstaub von 86 % und ein PM 2,5-Anteil von 56 %.

Ähnliche Anteile wurden auch in der Flachglas-, Spezialglas und Glasfaserindustrie vorgefunden.

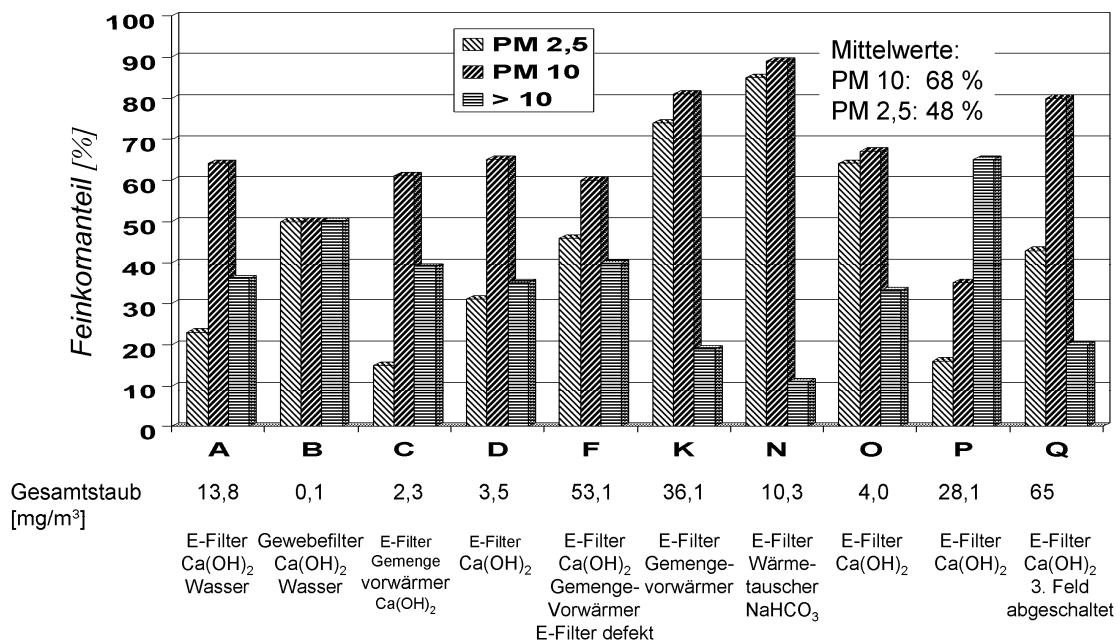
Signifikante und nachvollziehbare Abhängigkeiten des Feinstaubanteils von der Gesamtstaubkonzentration, den eingesetzten Absorptionsmedien und den Abgasrandbedingungen konnten nicht festgestellt werden.

Für die Dimensionierung von Neuanlagen ergaben sich keine zusätzlichen Aspekte. Geringe Reingas-Gesamtstaubgehalte führen zu niedrigen Feinstaubemissionen.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Bei einer abgeschätzten Abgasmenge der gesamten Glasindustrie in Deutschland von 2.500.000 m³/h (7 Mio. Jahrestonnen – 5.000 kJ/kgGlas), bezogen auf trockenes Abgas im Normzustand mit 8 % O₂, ergibt sich bei einer mittleren Staubkonzentration von 14,3 mg/m³ (Mittelwert aller Anlagen während der Untersuchungen) eine Gesamtstaubemission von 35,7 kg/h. Legt man die ungünstigere Auswertung zugrunde, so wird ein PM 10 Massenstrom von 31,8 kg/h emittiert, bzw. 24,3 kg/h, wenn man die Ablagerungen bzw. Verluste im Kaskadenimpaktor dem Grobstaub zuschlägt.

Das nachfolgende Bild zeigt zusammenfassend die Ergebnisse in der Hohlglasindustrie. Bei der Auswertung wurden die Ablagerungen dem Grobstaub zugeschlagen.

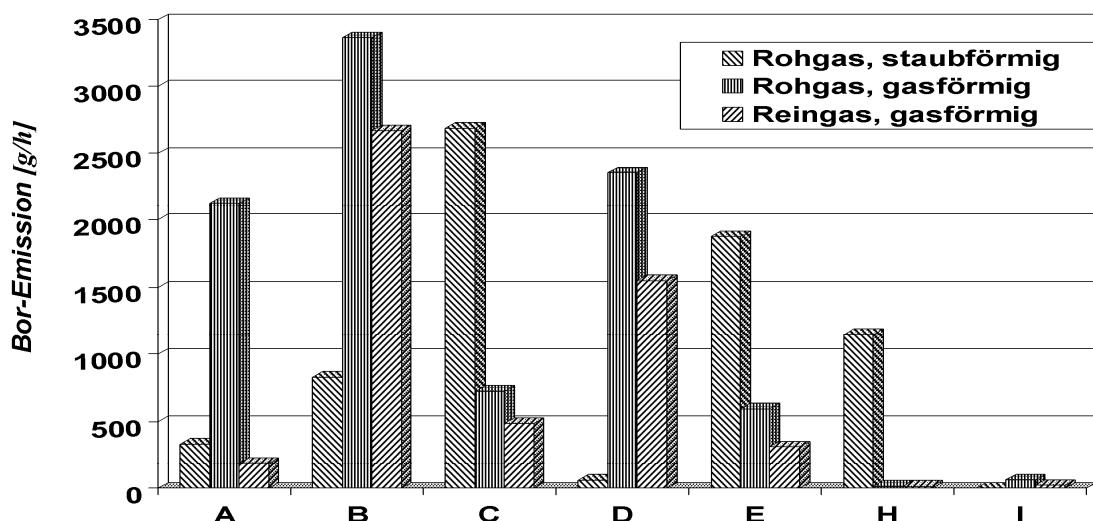
Feinstaubemissionen von Hohlglaswannen

Die Feinstaubanteile sind von Anlage zu Anlage unterschiedlich.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE**Boremissionen**

Im Rahmen eines im Jahr 2005 abgeschlossenen Forschungsvorhabens wurden an insgesamt 18 Glasschmelzöfen mit borhaltigem Gemenge Untersuchungen zur Emission staub- und gasförmiger Borverbindungen durchgeführt. Die Anlagen unterschieden sich sowohl hinsichtlich der erschmolzenen Gläser, des Ofentyps, der Art der Befeuerung sowie der nachgeschalteten Abgasreinigungstechnologien.

Einige Ergebnisse sind nachfolgend zusammengestellt.

Boremissionen von Borosilikatglasschmelzanlagen

| Anlage | Emailg. (oxy) alkaliarm | E-Glas (konv.) alkaliarm | Spezialg. (oxy) alkalireich | Spezialg. (oxy) alkalifrei | Spezialg. (oxy) alkalireich | C-Glas (oxy) alkalireich | Spezial (el.) alkalireich |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Borverdampfung: | - | 5,34 % | 5,72 % | 7,40 % | 4,22 % | 2,37 % | 0,09 % |
| Minderung: | 92,2 % | 36,4 % | 85,7 % | 35,9 % | 87,3 % | 98,7 % | 64,3 % |

Die angegebene Minderung repräsentiert die Funktionstüchtigkeit der Abgasreinigungsanlage und bezieht sich auf die Summe an gas- und staubförmigen Borverbindungen.

Im Gegensatz zu fossil beheizten Glasschmelzwannen liegen die Emissionen von vollelektrisch beheizten Glasschmelzwannen mit "kaltem" Oberofen – sog. Cold-Top-Wannen (Anlage I) auf deutlich niedrigerem Niveau.

Bei borhaltigen Gläsern muss man im Abgas neben den staubförmigen Borverbindungen auch mit einem gasförmigen Anteil rechnen. Die Intensität der Verdampfung borhaltiger Verbindungen und damit die Boremission hängt ab von der Borkonzentration im einschmelzenden Gemenge bzw. im Glas sowie von dem Verhältnis und der Summe von Bor und Alkalien [4,5,6]. Auf Grund der unterschiedlichen Zusammensetzung borhaltiger Gläser wie z. B. den Glasfasern (E-Glas, C-Glas, Glaswolle) und den technischen Borosilikatgläsern (Duran 50, Suprax, G20, Fiolax) findet man im ungereinigten Abgas der betreffenden Öfen eine große Konzentrationsbandbreite borhaltiger Verbindungen.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Der Anteil an staubförmigen Borverbindungen im Rohgas ist stark vom Alkaligehalt, evtl. auch vom Erdalkaligehalt der erschmolzenen Gläser abhängig. Bei alkalireichen Gläsern findet man im Abgas hohe Gesamtstaubkonzentrationen, wodurch entsprechende Reaktionspartner beispielsweise zur Natriumboratbildung zur Verfügung stehen. Bei alkalifreien Gläsern spielen die staubförmigen Borverbindungen im Rohgas nur eine untergeordnete Rolle.

Die Abscheidung staubförmiger Borverbindungen ist unproblematisch. Sie funktioniert sowohl bei E-Filtern als auch bei Gewebefilteranlagen sehr gut. Problematisch sind die aufwachsenden Borschichten an kalten Stellen der Filteranlage und des Abgassystems. Die Abscheidung gasförmiger Borverbindungen gestaltet sich deutlich schwieriger. Sie kondensieren erst bei sehr niedrigen Temperaturen im Bereich des Wassertaupunktes, passieren damit die Abgasreinigungsanlage und können selbst hinter Gewebefilteranlagen zu einer sichtbaren Rauchfahne führen.

Zur effektiven Abscheidung gasförmiger Borverbindungen müssen weitergehende Maßnahmen ergriffen werden. In einem Folgevorhaben werden zur Zeit neben der Überprüfung der Leistungsfähigkeit vorhandener Sorptionsstufen mit speziellen Sorptionsmitteln, dem Einfluss einer zusätzlichen Wassereindüsung bzw. der Eindüsung alkalischer Lösungen insbesondere das Minderungspotential gasförmiger Borverbindungen durch die Installation einer Hochtemperatursorptionstufe untersucht. Hierzu wurde eine mobile Dosieranlage angeschafft, die das Eindüsen fein gemahlener Glasrohstoffe (z.B. Soda, Kalkstein oder Dolomit) in den Abgasstrom hinter dem Oberofen bei Abgastemperaturen von 1.400 °C erlaubt.

Erste Untersuchungen im Abgas einer rekuperativ beheizten E-Glas-Wanne wurden erfolgreich durchgeführt. Es konnten Minderungsraten an gasförmigen Borverbindungen von mehr als 80 % nachgewiesen werden.

Die Aktivitäten werden durch thermochemische Berechnungen im Vorfeld und während der Messungen unterstützt.

Quarzfeinstaubemissionen

Quarzfeinstaub wird aufgrund seiner krebserzeugenden Wirkung evtl. in absehbarer Zeit in Deutschland mit einem Emissionsgrenzwert belegt, der z.B. nach TA-Luft der Klasse III 1 mg/m³ beträgt. Die Glasindustrie wird auf Grund des hohen SiO₂-Anteils im Produkt und wegen des hohen Quarzsandanteils im Gemenge als potentieller Quarzfeinstaubemittent angesehen. Bisher gibt es jedoch keinerlei Emissionsdaten.

Zu Projektbeginn im Februar 2005 stand kein erprobtes Messverfahren zur Bestimmung der Quarzfeinstaubemissionen in Form von kristallinem Quarz und Cristobalit für die in der Glasindustrie vorkommenden Abgastemperaturen bis 400 °C zur Verfügung. Die Forschungsaktivitäten konzentrierten sich zunächst auf ein geeignetes Probenahmesystem bzw. das Austesten eines geeigneten Filtermaterials.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Im Laufe des FE-Bearbeitungszeitraumes wurde neben der Entwicklung der PM 4-Stufe für den Kaskadenimpaktor Johnas II auch das Abscheideverhalten eines temperaturbeständigen Edelstahlfaserfiltermaterials vom Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) validiert und die Validierung der Analytik des Edelstahlfaserfilters auf Quarzfeinstaub vom Institut für Gefahrstoffforschung (IGF) der Bergbau-Berufsgenossenschaft an der Ruhr-Universität Bochum bekannt gegeben. Demnach folgen die Analysen von belegten Edelstahlfaserfiltern (Quarz DQ 12 A-Staub / Christobalit SF 6000), nach Aufschluss in Königswasser und der Überführung der Probe auf ein Silberfilter, röntgenographisch mittels XRD-Analyse einer linearen Kalibrierfunktion.

Damit steht ein einfach handelbares Insitu-Messverfahren zur Verfügung.

Sämtliche Messergebnisse, die sowohl mit Edelstahlfasermaterial als auch mit anderen Probenahmeverisionen gewonnen wurden, lagen im Reingas von 10 untersuchten Glasschmelzwannen zum Teil unterhalb der analytischen Nachweisgrenze bzw. deutlich unterhalb der oben aufgeführten Konzentration von 1 mg/m³, der als Grenzwert für Quarzfeinstaub diskutiert wird.

Die Analysenergebnisse von vergleichenden Untersuchungen im Labor der HVG mit Edelstahlfaserfiltern und Zellulosenitratfiltern, die standardmäßig auf dem Gebiet des Arbeitsschutzes eingesetzt werden, lagen sowohl bei der Quarzanalyse (Faktor 2) als auch beim Cristobalit auseinander. Als Teststaub wurden Feinstäube einer Sandtrocknungsanlage benutzt. Außerdem weisen die Edelstahlfaserfilter ohne Staubbeaufschlagung im heißen Abgas von Glasschmelzwannen eine deutliche Gewichtszunahme auf, die verbunden sind mit einer Farbveränderung des Filtermaterials.

In Zukunft müssen diesbezüglich offene Fragestellungen zur Analytik geklärt werden, so dass weiterer Forschungsbedarf besteht.

7 Oxy-Fuel-Feuerungen - Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und ökologische Aspekte

Die Umstellung der Schmelztechnik von konventionell Brennstoff-Luft-beheizten Glasschmelzwannen hin zur reinen Oxy-Fuel-Feuerung wurde in der Spezialglasindustrie an vielen Anlagen realisiert. In Deutschland existieren nach dem Kenntnisstand der HVG weiterhin 2 Hohlglaswannen, eine Gussglaswanne sowie einige Schmelzwannen in der Glasfaserindustrie, die reinen Sauerstoff als Oxidationsmedium bei der Verbrennung der fossilen Brennstoffe nutzen.

Sauerstofferzeugung

Der Sauerstoff wird bei kleinen Anlagen in der Regel in Form von Flüssigsauerstoff per LKW angeliefert und gelagert.

Bei größeren Anlagen wird der Sauerstoff meist als kryogener Sauerstoff einer Luftzerlegungsanlage auf dem Werksgelände produziert. Kryogene Luftzerlegung ist ein Verfahren, das atmosphärische Luft verdichtet, abkühlt und danach - abhängig von den unterschiedlichen Siedepunkten - die so erhaltene Flüssigkeit in einer Destillationskolonne in seine Bestandteile zerlegt.

Die Sauerstofferzeugung kann auch mit einer sog. VSA-Anlage hergestellt werden. Diese Anlagen nutzen das Verfahren der Gastrennung durch Adsorption. Dabei durchströmt Luft ein Molekularsieb, in dem Stickstoff und Kohlendioxid aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften gebunden wird. Sauerstoff und Argon hingegen durchströmen das Molekularsieb. Ist das Sieb gesättigt, erfolgt eine Regeneration durch Druckabsenkung unter Atmosphärendruck, so dass Stickstoff und Kohlendioxid desorbiert werden.

Eine weitere Möglichkeit der Sauerstofferzeugung ist eine VPSA-Anlage. Dieses Vakuum-Druckwechsel-Adsorption-Verfahren ist eine nichtkryogene Technologie, die Sauerstoff aus der Luft herstellt, indem sie ein Adsorbent in einem Druckwechselverfahren benutzt, um Stickstoff zu entfernen.

Die Schmelzleistung und der erforderliche Energiebedarf des erschmolzenen Glases und damit die Menge des benötigten Sauerstoffes bestimmen die Anlagengröße und vermutlich auch den Typ der Sauerstoffproduktionsanlage. Dieses Entscheidungskriterium soll nicht Gegenstand dieser Betrachtung sein.

Flüssigsauerstoff und kryogener Sauerstoff bieten den Vorteil, dass der O₂-Gehalt des Oxidationsmediums nahezu 100 % beträgt. Bei den beiden anderen Herstellungsverfahren liegt der O₂-Gehalt zwischen 92 und 95 %, so dass etwa 5 % Argon und 2 bis 3 % Stickstoff als Ballast vorhanden sind.

Ursachen der NO_x-Bildung

Die NO_x-Emissionen von Glasschmelzöfen sind im Wesentlichen verursacht durch die thermische NO_x-Bildung in der Flamme (Stickstoffoxidbildung nach Zeldovic). Diese ist wiederum vorwiegend bedingt durch die Flamenttemperatur, den Sauerstoffgehalt in der Reaktionszone und die Verweilzeit bei hoher Temperatur.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Mit zunehmender Verweilzeit bei hoher Temperatur und zunehmendem Sauerstoffpartialdruck nimmt die Stickstoffoxidbildung zu. In der Praxis stehen diese Einflussgrößen in Wechselwirkung mit Betriebsparametern wie dem Luftüberschuss, der Temperatur der Verbrennungsluft, der Flammenart, der Art des Brennstoffs, der Mischung von Brennstoff und Verbrennungsluft, den verschiedenen Brennerparametern, den Abmessungen des Ofenraumes u. a..

Bei Glasschmelzöfen, bei denen aus Produktqualitätsgründen Salpeter eingesetzt werden muss, ist die Salpeterzerersetzung eine weitere Ursache für die NO_x-Emissionen.

Die Ofenraumtemperatur von Glasschmelzöfen liegt im Allgemeinen zwischen 1500 °C und 1700 °C. Die Verbrennungsluft wird bei rekuperativ beheizten Glasschmelzwannen bis zu 800 °C und bei regenerativ beheizten Glasschmelzwannen bis zu 1350 °C vorgewärmt. Damit werden entsprechend hohe Flammentemperaturen erreicht mit der Folge einer starken thermischen NO_x-Bildung.

Oxy-Fuel-befeuerte Glasschmelzwannen bieten hinsichtlich der Luftreinhaltung den großen Vorteil, dass die Emissionen an Stickstoffoxiden auf einem Niveau liegen, die mit konventioneller Feuerungstechnik nur durch sekundäre Maßnahmen (SNCR bzw. SCR) erreicht werden können.

Emissionsgrenzwertbetrachtung

Während an erdgasbeheizten Glasschmelzwannen im Spezialglasbereich NO_x-Konzentrationswerte bis zu 5000 mg/m³ festgestellt wurden, ist es in den letzten Jahren gelungen, die NO_x-Emission von Glasschmelzöfen durch die Anwendung einer Reihe primärer Minderungsmaßnahmen deutlich zu senken.

In der neuen TA-Luft vom 01.10.2002 wurde für die Komponente NO_x ein Emissionszielwert für Glasschmelzwannen (ab dem Jahr 2010) von 500 mg/m³ festgelegt. Für U-Flammenwannen und Querbrennerwannen mit einem Abgasvolumenstrom von weniger als 50.000 m³/h darf eine NO_x-Massenkonzentration von 800 mg/m³ (Emissionsgrenzwert) nicht überschritten werden. Dieser Grenzwert ist auch für Altanlagen mit einem Abgasvolumenstrom von mehr als 50.000 m³/h gültig. Soweit aus Gründen der Produktqualität ein Nitrateinsatz erforderlich ist, darf die NO_x-Massenkonzentration 1000 mg/m³ nicht überschreiten. Bei Altanlagen unterhalb von 5.000 m³/h dürfen 1,2 g/m³ nicht überschritten werden.

Aufgrund des weitgehenden Fehlens des Ballaststickstoffs bei Oxy-Fuel-Feuerung entstehen im Hinblick auf die NO_x-Bildung in der Flamme wie auch abgasseitig hinsichtlich Abgasvolumenstrom, Abgasfeuchte und NO_x-Konzentration ganz andere Verhältnisse als bei konventionell beheizten Glasschmelzwannen.

Die Verwendung von reinem Sauerstoff als Oxidationsmittel und einem stickstofffreien Brennstoff würde keinerlei NO_x entstehen lassen, wenn es gleichzeitig gelänge, den Ofenraum gegenüber der Umgebungsluft dicht zu halten. Es muss jedoch damit gerechnet werden, dass trotz Abdichtungsmaßnahmen Umgebungsluft in die Ofenanlage einströmt und damit

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Stickstoff in die Verbrennungszone gelangt. Außerdem steht mehr oder weniger viel chemisch gebundener Stickstoff aus dem Brennstoff und Stickstoff als Begleitstoff des Oxidationsmediums zur Verfügung.

Die aufgeführten Referenzanlagen zeigen jedoch, dass unabhängig von der Art des Brennstoffs und dem Produktionsverfahren des Sauerstoffs niedrige Emissionswerte erreicht werden können.

Bei Oxy-Fuel-Wannen, aber auch bei vollelektrisch beheizten Schmelzwannen entstehen abgasseitig hinsichtlich Abgasvolumenstrom, Emission und Schadstoffkonzentration ganz andere Verhältnisse als bei konventionell Brennstoff-Luft-beheizten Glasschmelzwannen. Für diese Anlagen gab es bis zum Jahr 2002 in der TA-Luft keine Regelung, die den Besonderheiten dieser Schmelzöfen Rechnung trägt. In der derzeit geltenden TA-Luft vom 1.10.2002 wurde jedoch unter der Ziffer 5.4.2.8 folgender Passus eingefügt:

"Bei Brennstoff-Sauerstoff-beheizten und bei elektrisch beheizten Glasschmelzwannen sind Sonderregelungen zu treffen. Als Beurteilungsmaßstab sind der spezifische Energieverbrauch moderner vergleichbarer Brennstoff-Luft-beheizter Glasschmelzwannen und die Leistungsfähigkeit von Abgasreinigungsanlagen zu berücksichtigen. Auf die VDI-Richtlinie 2578 (Ausgabe November 1999) wird hingewiesen."

Danach ist bei Glasschmelzöfen mit Brennstoff-Sauerstoffbeheizung und bei Elektrowannen, ausgehend vom spezifischen Energieverbrauch moderner Brennstoff-Luft-beheizter Glasschmelzwannen, eine dem NO_x-Emissionswert der Vergleichswanne äquivalente produktbezogene Emission abzuleiten. Damit sollte sichergestellt werden, dass eine Oxy-Fuel-Wanne hinsichtlich ihrer NO_x-Emission nicht ungünstiger beurteilt wird als eine konventionell fossil beheizte Glasschmelzwanne.

Bewährt hat sich beispielsweise die Ableitung von produktbezogenen Emissionsbegrenzungen, z.B. in [kg Schadstoff/t Glas]. Mit der Festlegung spezifischer produktbezogener Emissionsgrenzwerte wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Umrechnung gemessener NO_x-Emissionswerte auf einen bestimmten Bezugssauerstoffgehalt nicht möglich ist.

Wirtschaftliche Aspekte

Bei der Entscheidung, ob eine bestehende oder neue Schmelzwanne mit konventioneller Feuerung- und Wärmerückgewinnungstechnologie oder mit Brennstoff-Sauerstoff-Feuerung ausgelegt werden soll, spielen eine ganze Reihe von Gründen und Fragestellungen eine Rolle, die aus ökologischer und ökonomischer Sicht zu beachten sind, wie z.B. Glasqualität - Investitionskosten - Sauerstoffkosten und Betriebskosten - NO_x-Emissionen - CO₂-Emissionen - Flächenbedarf - Lebensdauer der Wanne - Feuerfestmaterial – Abgaswärmenutzung - usw..

Der wichtigste dieser Punkte ist sicherlich der Wirtschaftlichkeitsaspekt.

Die Befürchtung, dass mit dem Betrieb einer Oxy-Fuel-Wanne gleichzeitig auch eine kürzere Wannenreise verbunden ist, konnte insbesondere durch die Konstruktion des Wannengewölbes und die Art der Zustellung entkräftet werden.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

In der Spezialglasindustrie, wo mit konventioneller Schmelztechnologie aufgrund der Anlagengröße und des erschmolzenen Glases ein hoher spez. Energieverbrauch notwendig ist, konnte die Umstellung auf Oxy-Fuel-Feuerung anhand von Kostenabschätzungen nachvollzogen werden. In der Spezialglasindustrie lagen in vielen Fällen, bedingt durch den deutlich geringeren Energiebedarf, die abgeschätzten Schmelzenergiekosten inkl. Sauerstofferzeugung einer Oxy-Fuel-Wanne unter denen einer konventionell befeuerten Vergleichswanne.

Bei der Kostenabschätzung in der Glas- und Mineralfaserindustrie muss zusätzlich verstärkt ein Augenmerk auf die Investitionskosten und die damit verbundene Kapitalbindung gelegt werden. Gleches gilt auch für die produzierten Massengläser der Hohl- und Flachglasindustrie.

Die Bezugspreise für Energie und Sauerstoffbereitstellung unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Produktionsstandort und den erforderlichen Mengen. Dabei ist hervorzuheben, dass insbesondere die Sauerstoffbezugskosten von der Art des Herstellungsverfahrens, der Anlagengröße, dem Sauerstoffbedarf und nicht zuletzt vom Verhandlungsgeschick des Anlagenbetreibers abhängen, oder auch davon, ob zusätzlich anfallende Luftkomponenten (Stickstoff / Argon) vermarktet werden können.

Belastbare Zahlen stehen in vollem Umfang an keiner der genannten Referenzanlagen zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden zur Kostenabschätzung Annahmen getroffen, die aus Gesprächen mit Lieferanten von Luftzerlegungsanlagen und Beschäftigten der Glasindustrie sich als aktuellen Durchschnittswert herauskristallisiert haben. Den Abschätzungen wurden folgende Werte zugrunde gelegt:

Erdgaspreis: € 0,025/kWh

Strompreis: € 0,065/kWh

Flüssigsauerstoffpreis: € 0,11/m³

Kryogener- oder VSA/VPSA-Sauerstoffpreis: € 0,065/m³

Während man im Spezialglasbereich in Abhängigkeit von der Anlagengröße und der Glasart mit Schmelzenergiekosten bis € 120/t_{Glas} und mehr rechnen muss, können für eine hochbelastete Oxy-Fuel-Wanne im Hohlglasbereich (ohne EZH) bei einem angenommenen spez. Energieverbrauch zu Beginn der Wannenreise von 3.200 kJ/kg_{Glas} etwa € 33/t_{Glas} inkl. der Kosten zur Sauerstofferzeugung abgeschätzt werden. Große regenerativ beheizte Glasschmelzwannen können im Neuzustand etwa 3.400 kJ/kg_{Glas} erreichen. Die Schmelzenergiekosten belaufen sich damit auf abgeschätzte € 24/t_{Glas}.

Die Differenz muss durch die geringeren Investitionskosten (inkl. Finanzierung / Abschreibung) der Oxy-Fuel-Wanne gegenüber der konventionellen Schmelzwanne aufgebracht werden.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Der Kostenvergleich einer Floatglaswanne mit 800 Tagenstunden ist deutlich schwieriger, da keine gesicherten Angaben zum spezifischen Energieverbrauch oder der Lebensdauer einer Oxy-Fuel-Wanne dieser Größenordnung zur Verfügung stehen. Auch liegen die Vorteile der Investitionskosten der Schmelzwanne, insbesondere durch den Wegfall der Regeneratoren der Querbrennerwanne, auf der Seite der Oxy-Fuel-Technik. Die Betriebskosten inkl. der Sauerstofferzeugung dagegen dürften die der konventionellen Befeuerung übersteigen. Die Wirtschaftlichkeit hängt also maßgeblich davon ab, wie groß die Differenz im spez. Energieverbrauch zwischen beiden Anlagetypen ist, wie hoch die Sauerstofferzeugungskosten sind und welcher Aufwand bei der konventionellen Verbrennung für primäre oder sekundäre NO_x-Minderungsmaßnahmen aufgebracht werden muss.

Der HVG liegen differenzierte inoffizielle Vergleichsrechnungen von namhaften Ofenbaufirmen vor, die im Hohlglasbereich hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit durchgeführt wurden. Die Berechnungen wurden alle ohne nachgeschalteten Wärmetauscher durchgeführt, berücksichtigen vorhersehbare Angaben zur Investition, zum Betrieb und zur Instandhaltung bis hin zum CO₂-Emissionshandel.

Für eine Schmelzwanne mit einer Tonnage von 300 t/d, einem Scherbenanteil von 85 % und einem mittleren spez. Energiebedarf über die Wannenreise von 10 Jahren von 4.050 kJ/kg (Konventionelle regenerativ beheizte Querbrennerwanne) und 3.620 kJ/kg (Oxy-Fuel-Wanne), 10 Jahre Abschreibungszeit ohne Restwert (6 % Zinsen) lassen sich mit den Energie und Sauerstoffpreisen der vorangegangenen Seite folgende Werte abschätzen:

Abschätzung der jährlichen Gesamtkosten:

Regenerativ beheizte Querbrennerwanne: 4,82 Mio. Euro

Oxy-Fuel-Wanne: 5,14 Mio. Euro

Während die Investitionskosten der Oxy-Fuel-Wanne um mehrere Millionen Euro unter denen der regenerativ befeuerten Querbrennerwanne liegen und sich damit positiv auf die jährliche Rückzahlung auswirken, wird dieser Vorteil durch die Sauerstoffkosten (ca. 1,35 Mio. Euro jährlich) mehr als aufgebraucht.

Der Grund für die geringen Investitionskosten der Oxy-Fuel-Wanne liegt nach Angaben der Ofenbauer in den geringeren Aufwendungen für Feuerfestmaterial, Abgasführungsmechanismen und Regelmechanismen. Außerdem sind die Planungs- und Montagekosten niedriger, der Platzbedarf der Oxy-Fuel-Wanne ist gegenüber der regenerativ beheizten Querbrennerwanne kleiner, der Elektroenergiebedarf für Druck-, Kühl- und Verbrennungsluft (ohne Sauerstofferzeugung) ist niedriger und die Instandhaltungskosten der Oxy-Fuel-Wanne liegen unter denen der konventionell befeuerten Anlage.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Bei der Betrachtung der oben aufgeführten Beträge für die jährliche Rückzahlung wird ersichtlich, insbesondere wenn man den Aufwand zum Betrieb einer SCR-Anlage oder aufwendige Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung bei der konventionellen Anlage hinzurechnet, dass beide Konzepte in dem angenommenen Fall nahezu gleichauf liegen.

Der geschätzte Investitionsaufwand für eine Oxy-Fuel-Wanne mit ZAC-Gewölbe liegt bei vorliegendem Beispiel etwa bei 1,4 Mio. Euro höher als der Betrag einer Wanne mit Silica-Gewölbe.

Ökologische Aspekte

Betrachtet man die Oxy-Fuel-Technik aus ökologischer Sicht, dann muss man an vorderster Stelle die geringen NO_x-Emissionen erwähnen, die bei den vorgestellten Referenzanlagen bei Kalk-Natron-Silicatgläsern zwischen 0,2 und 0,8 kg/t_{Glas} liegen und aus heutiger Sicht nur durch sekundäre Minderungsmaßnahmen an konventionellen Schmelzwannen mit regenerativer Luftvorwärmung erreicht werden können.

Sekundäre Minderungsmaßnahmen bei konventionell befeuerten Glasschmelzwannen erfordern neben dem Materialeinsatz für Katalysatoren (SCR), Vorrattanks, Rohrleitungen oder Stahlbau auch den Einsatz von Harnstoff oder Ammoniak. Ammoniak ist in der Herstellung sehr energie- und rohstoffintensiv und wird zudem in Form von Ammoniakschlupf teilweise emittiert.

Ammoniak wird heutzutage nahezu ausschließlich nach dem Haber-Bosch – Prozess hergestellt. Die Mehrheit der Anlagen arbeitet heute nach dem Steam-Reforming-Prozess mit Erdgas als Wasserstoff-Lieferant. Der erste Schritt ist die Herstellung von Synthesegas: Entschwefeltes Erdgas wird in drei Schritten mit Wasserdampf und Sauerstoff aus der Luft zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgesetzt. Letzteres wird dann ausgewaschen. Anschließend reagiert der Wasserstoff zusammen mit dem Luftpstickstoff an Eisenkatalysatoren unter Freisetzung von Wärme zu Ammoniak. Alle Verfahrensschritte benötigen hohe Temperaturen und hohen Druck. Der Energiebedarf der besten Prozesse liegt bei **30 GJ/t_{NH₃}**. Für Ammoniakwasser (25 % - ρ = 0,226 kg_{NH₃}/l) entspricht dies einem Energiebedarf von 1,88 kWh/l, ohne Berücksichtigung von Ansatz-, Transport-, bzw. Lagerungsaufwand.

Auf der anderen Seite muss auch zur Sauerstofferzeugung ein hoher apparativer Aufwand betrieben und elektrischer Energiebedarf zur Verfügung gestellt werden. Aus der Literatur schwanken die Angaben je nach Anlagengröße und Sauerstoffart zwischen 0,2 und 1 kWh/m³. Im Bereich der Glasindustrie werden Zahlen von 0,4 bis 1 kWh/m³ aufgeführt.

In einem konkreten Beispiel einer realisierten Anlage wurde ein Energiebedarf von **0,86 kWh/m³** für eine Sauerstofferzeugungsanlage genannt, die für eine Menge von 2.000 m³/h Sauerstoff ausgelegt ist.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Betrachtet man große Schmelzwannen der Behälterglasindustrie ohne Abwärmenutzung und ohne EZH, dann können bei effektiven Oxy-Fuel-Wannen im Neuzustand ca. 3.200 kJ/kg_{Glas} (0,89 kWh/kg_{Glas}) und bei U-Flammenwannen ca. 3.400 kJ/kg_{Glas} (0,94 kWh/kg_{Glas}) erreicht werden. Berücksichtigt man den Kraftwerkswirkungsgrad von 33 % für die Erzeugung der Elektroenergie und überschlägt den Sauerstoffbedarf einer sehr effizienten Schmelzwanne im Neuzustand mit 0,17 m³/kg_{Glas}, dann sind 1,33 kWh/kg_{Glas} für die Oxy-Fuel-Wanne als Schmelzenergie aufzubringen.

Die CO₂-Bilanz fällt nach dieser Berechnung zugunsten der konventionellen Feuerungstechnik aus, wenn man voraussetzt, dass die Elektroenergie aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird. In Verbindung mit einer Abgaswärmennutzung (siehe Referenzanlage 1) kann der Nachteil wieder ausgeglichen werden.

In anderen Bereichen der Glasindustrie mit höheren spez. Energieverbräuchen liegen die Vorteile der Bilanzierung bei der Oxy-Fuel-Technik.

Angaben zur Abschätzung der CO₂-Emissionen (ohne Gemengereaktionen):

- Spez. CO₂-Emission von Erdgas: ca. 0,2 kg/kWh
- Spez. CO₂-Emission von Schweröl: ca. 0,28 kg/kWh
- CO₂-Emission der Sauerstofferzeugung: ca. 0,5 kg/kWh

➔ Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass jede einzelne Anlage unter Einbeziehung sämtlicher Randparameter hinsichtlich der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen gesondert betrachtet werden muss.

8 Medienübergreifende Aspekte

Filterstaubrückführung

In Deutschland sind alle Glasschmelzwannen mit Abgasreinigungsanlagen ausgerüstet, die weitgehend dem Stand der Technik entsprechen. In der Regel handelt es sich dabei um Elektrofilter oder Gewebefilteranlagen mit vorgeschalteter trockener Sorptionsstufe und Calciumhydroxid, manchmal auch Soda oder Natriumbikarbonat als Sorptionsmittel. In einigen Fällen kann auf Sorptionsmittel verzichtet werden. Im Spezialglasbereich gibt es vereinzelt auch Schüttsschichtfilter oder Nassverfahren zur Abgasreinigung.

Bei der Massenglasfertigung im Hohl-, Faser- und Flachglasbereich werden die abgeschiedenen Filterstäube nahezu vollständig dem Gemenge beigemischt und wieder eingeschmolzen. Sie entlasten damit erheblich die Abfallsituation des Standortes.

Für die Läuterung industrieller Hohl-, Flach- und Fasergläser werden heutzutage fast ausschließlich schwefelhaltige Rohstoffe eingesetzt. Eine geschlossene Darstellung der Sulfatläuterung ist nicht einfach, weil Schwefel und seine Verbindungen an verschiedenen Punkten des Glasschmelzprozesses auf unterschiedliche Weise wirksam werden [7].

Üblicherweise dient Natriumsulfat als Gemengerohstoff zur Sulfatläuterung. Mit der vollständigen Filterstaubrückführung kommt beim Einsatz von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ als Sorptionsmittel überwiegend CaSO_4 in den Prozess, dessen läuternde Wirkung bei der Glasschmelze anderen Reaktionsmechanismen folgt. Aus diesem Grund wird in vielen Fällen, selbst wenn schweres Heizöl als Brennstoff verwendet wird und beträchtliche Schwefelmengen durch die Abgasreinigung zurückgeführt werden, zusätzlich Natriumsulfat dem Gemenge zugeschlagen.

Beachtet man die SO_2 -Konzentration von 1225 mg/m^3 , die bei der Verbrennung von schwerem Heizöl mit einem Schwefelgehalt von 1 % und einem Sauerstoffgehalt von 8 % im trockenen Abgas vorliegt, dann bleibt nur noch ein kleiner Spielraum für schwefelhaltige Abgase aus der Läuterung des Glases, um die Grenzwerte der TA-Luft einzuhalten.

Nach der TA-Luft dürfen ab dem Jahr 2007 schwerölbefeuerete Hohl- und Flachglaswannen $1,5 \text{ g/m}^3$ ($0,80 \text{ g/m}^3$ bei Gasbeheizung) Schwefeloxide emittieren. An den Grenzwert sind Voraussetzungen geknüpft, wie im Fall der Hohlglasindustrie eine nahstöchiometrische Verbrennung, eine vollständige Filterstaubrückführung, Sulfatläuterung und ein Scherbenanteil von mehr als 40 %. Werden die Bedingungen nicht erfüllt, dann beträgt der Grenzwert $0,80 \text{ g/m}^3$ für Schweröleinsatz und $0,40 \text{ g/m}^3$ für Gasfeuerung.

Man erkennt schnell, dass dem Einsatz von schwerem Heizöl mit beliebigem Schwefelgehalt und vollständiger Filterstaubrückführung Grenzen gesetzt sind.

Eine weitere Hürde für die Filterstaubrückführung stellt ein hoher Scherbenanteil dar, der aufgrund der mitgeführten Verunreinigungen einen gewissen Spielraum bei der Gemengerezeptur benötigt. Dieser Spielraum setzt den Filterstaubmengen ebenfalls Grenzen.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Üblicherweise wird Ca(OH)₂ als Trockensorptionsmittel verwendet und unter günstigen Umständen eine SO_x-Minderung von 50 - 60 % erzielt. Beim Einsatz von Na(HCO)₃ und idealen Voraussetzungen hinsichtlich der Einmischbedingungen, der Korngröße oder der Abgastemperatur wurden auch schon Minderungsraten von mehr als 80 % erzielt.

Die Funktionsfähigkeit einer Abgasreinigungsanlage kann bei vollständiger Filterstaubrückführung und schwerem Heizöl mit hohem Schwefelgehalt als Brennstoff der Glasschmelzwanne nicht immer voll ausgeschöpft werden. Die Schwefellöslichkeit im Glas ist begrenzt, in den letzten 20 Jahren sogar rückläufig. Mit der vollständigen Filterstaubrückführung werden sich die SO_x-Konzentrationen im Rohgas aufschaukeln und schon bald ein Zeitpunkt erreicht, bei dem der geforderte Emissionsgrenzwert, auch bei sehr hohen Minderungsraten, nicht mehr eingehalten werden kann.

Die Gründe für den Rückgang des in der Glasmatrix eingebundenen Schwefels bei Kalk-Natron-Silikatgläsern sind nicht eindeutig zuordenbar. Die nahstöchiometrische Verbrennung als Maßnahme zur NO_x-Reduzierung und die damit verbundenen teilweise reduzierenden Bedingungen in der Atmosphäre des Oberofens spielen vermutlich eine zu beachtende Rolle.

Die Filterstaubrückführung wird von einigen Hohlglassherstellern auch dazu genutzt, die Selenströme zu beeinflussen. Selen wird zur Produktion von weißem Behälterglas dazu genutzt, die farblichen Verunreinigungen, die in erster Linie durch die Recyclingscherben dem Prozess zugeführt werden, nach dem Prinzip der Komplementärfarben physikalisch zu entfärbten. Normalerweise wird dem Gemenge Selen in Form von Natriumselenit oder metallischem Selen zugeführt.

Beim Einschmelzen selenhaltiger Verbindungen verdampft jedoch der größte Anteil und wird gasförmig mit dem Abgas aus dem Prozess ausgetragen. In der Abgasreinigungsanlage werden teilweise mehr als 90 % der gasförmigen Selenverbindungen abgeschieden, beispielsweise als Calciumselenit gebunden und wieder eingeschmolzen. In Abhängigkeit von der geforderten Glasqualität konnte durch diese Maßnahme in einigen Fällen auf den zusätzlichen Eintrag von Selenverbindungen ins Gemenge verzichtet werden. Mit begleitenden Messungen des Selengehaltes im Filterstaub und Farbmessungen des produzierten Glases ist es gelungen, einige Wochen ausschließlich vom Filterstaub als Selenträger weißes Hohlglas zu produzieren.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Nahstöchiometrische Verbrennung

Die Vorteile der nahstöchiometrischen Verbrennung beim Energieverbrauch oder den NO_x-Emissionen einer Glasschmelzwanne sind nicht von der Hand zu weisen. Dennoch kann bei vielen Gläsern und den damit verbundenen Anforderungen an die Glasqualität diese Maßnahme nicht voll ausgeschöpft werden.

Die Realisierung einer nahstöchiometrischen Fahrweise stellt oft eine Gratwanderung dar und kann effektiv nur durch exakte Mess- und Regelungstechnik von Brennstoff- und Oxidationsmedien sowie einer aufwendigen Ausbrandkontrolle über O₂- oder CO-Messungen eingehalten werden.

Als Folge der nahstöchiometrischen Verbrennung treten in Einzelfällen CO-Konzentrationen im Abgas auf. Die Erfahrungen der HVG auf dem Sektor der Emissionsmesstechnik haben gezeigt, dass CO-Konzentrationen von 500 mg/m³ und teilweise darüber im Kammerkopf einer regenerativ beheizten Glasschmelzwanne auf dem Weg durch die Regeneratoren wieder aufoxidiert werden und im Reingas nicht mehr nachweisbar sind.

8 Zusammenfassung des Projektes

Die Hüttentecnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG) hat im Auftrag des Umweltbundesamtes einen deutschen Beitrag für die im Jahr 2007 beginnende Revision des BVT-Merkblattes für die Glasindustrie erarbeitet. Das vorrangige Ziel des Projektes war es, anhand von Referenzanlagen die besten verfügbaren Techniken der Glasindustrie im Bereich des Umweltschutzes zu recherchieren und zu dokumentieren. Als Grundlage zur Projektabwicklung wurde ein Fragenkatalog erarbeitet, der die Erfassung aller emissionsrelevanten Daten erlaubte, detaillierte Investitions- und Betriebskosten für die eingesetzten Umweltschutzmaßnahmen auswies und die Bereiche Abfälle und Abwasser betrachtete.

Insgesamt wurden 16 Glasschmelzanlagen aus den Bereichen Behälterglas, Flachglas, Spezialglas, Wirtschaftsglas und Glasfasern untersucht, die aus dem Kenntnisstand der HVG die momentan besten verfügbaren Techniken in Deutschland widerspiegeln. Viele Anlagen wurden durch Betriebsbesichtigungen zusammen mit Vertretern des UBA in Augenschein genommen und sowohl unter technischen Aspekten als auch von der Kostenseite durchleuchtet.

Aufgrund der wirtschaftlich angespannten Lage in den Jahren seit Erscheinen der IPPC-Richtlinie im Jahr 2000 und der Substitution von Glasflaschen durch Kunststoff, kam es in der Hohlglassindustrie zu Produktionsstilllegungen und Werkschließungen, denen einige BVT-Anlagen (Oxy-Fuel-Wanne mit Rohstoffvorwärmer - U-Flammenwanne mit Rohstoffvorwärmung - LowNO_x-Melter) zum Opfer fielen. Die Funktionstüchtigkeit der bestehenden Anlagen wurde in der Regel lediglich mit notdürftigen Reparaturmaßnahmen Aufrecht erhalten und Neuentwicklungen nicht realisiert. Außerdem ist der Fernsehglasmarkt zusammengebrochen. Dies hatte zur Folge, dass insgesamt 5 große Fernsehbildschirm- und Fernsehtrichterwannen in Deutschland stillgelegt wurden. Diese Anlagen waren alle mit SCR-Technologie ausgerüstet.

Ein besonderes Interesse wurde in diesem Projekt der Oxy-Fuel-Feuerung gewidmet, um neue Entwicklungen bezüglich des technischen Fortschritts, der Zuverlässigkeit, des tatsächlichen Minderungspotentials sowie der anfallenden Kosten zu untersuchen. Im Spezialglasbereich fand eine nahezu vollständige Umstellung von konventioneller Beheizung auf Oxy-Fuel-Feuerung statt. Auch im Faserglas-, Hohlglas- und Gussglasbereich existieren sauerstoffbeheizte Glasschmelzwannen.

Außerdem wurden Informationen aus dem Erfahrungsschatz der HVG bereitgestellt, um Erkenntnisse in anonymisierter Form weiterzugeben oder aktuelle Ergebnisse von Forschungsvorhaben zu präsentieren.

Die Umweltprobleme konzentrieren sich überwiegend auf die Luftreinhaltung. Im Spezialglasbereich spielen Abfall und Abwasser eine größere Rolle als bei der Massenglasproduktion oder im Faserglasbereich. An einigen Referenzanlagen im Hohl- und Flachglasbereich konnten detaillierte Abfallbilanzen oder Angaben zur Abwassersituation aufgeführt werden.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

In Deutschland sind alle Glasschmelzwannen mit Abgasreinigungsanlagen ausgerüstet, die weitgehend dem Stand der Technik entsprechen. In der Regel handelt es sich dabei um Elektrofilter oder Gewebefilteranlagen mit vorgeschalteter trockener Sorptionsstufe und Calciumhydroxid, manchmal auch Soda oder Natriumbikarbonat als Sorptionsmittel. In einigen Fällen kann auf Sorptionsmittel verzichtet werden. Im Spezialglasbereich gibt es vereinzelt auch Schüttsschichtfilter oder Nassverfahren zur Abgasreinigung.

Die anfallenden Stäube im Gemengehaus bzw. bei der Förderung und Lagerung der Schüttgüter werden von zentralen Filteranlagen abgeschieden und in vielen Fällen dem Prozess zurückgeführt. Silos werden bei der pneumatischen Beladung über sog. Siloaufsatzzfilter entstaubt. Probleme mit Grenzwertüberschreitungen treten bei intakten Filteranlagen nicht auf.

Bei der Massenglasfertigung im Hohl-, Faser- und Flachglasbereich werden die abgeschiedenen Filterstäube nahezu vollständig dem Gemenge beigemischt und wieder eingeschmolzen. Sie entlasten damit erheblich die Abfallsituation des Standortes. Im Spezialglasbereich wird die Filterstaubrückführung selten praktiziert und der anfallende Filterstaub je nach Belastung mit Staubinhaltstoffen z.B. als Bergversatz angewendet oder deponiert.

Behälterglasindustrie

Nahezu 60 % der erschmolzenen Glasmenge in Deutschland entfallen auf die Hohlglasindustrie. Behältergläser werden in Deutschland überwiegend in regenerativ befeuerten U-Flammenwannen mit regenerativer Luftvorwärmung und Erdgas bzw. schwerem Heizöl als Brennstoff erschmolzen. Weiterhin existieren regenerativ beheizte Querbrennerwannen sowie wenige Oxy-Fuel-Wannen und Low-NO_x-Melter. An einem Produktionsstandort werden die Abgase der angeschlossenen Schmelzwannen mit einer SCR-Anlage behandelt.

Die SNCR-Technologie, wie sie beispielsweise bei rekuperativ beheizten Schmelzwannen oder bei Wannen mit mehrstufigem Kammsystem verwendet werden kann, findet keine Anwendung.

Im Rahmen des Projektes wurden 4 Referenzanlagen der Hohlglassindustrie untersucht und die zur Verfügung stehenden Daten stillgelegter Anlagen vorgestellt.

Die spez. Energieverbräuche sind, wie bei allen Glasschmelzwannen, neben der Glasfarbe, der Wannenkonstruktion oder dem Anteil elektrischer Zusatzheizung stark vom Alter der Schmelzaggregate seit der letzten Hauptreparatur abhängig. Im Neuzustand können große konventionell beheizte Regenerativwannen Werte bis etwa 3.400 kJ/kgGlas erreichen, bei großen Oxy-Fuel-Wannen beträgt die Abschätzung etwa 3.200 kJ/kgGlas im Neuzustand. Kleinere oder mittlere Wannen liegen im spez. Energieverbrauch zum Teil deutlich höher, so dass Werte von 6.000 kJ/kgGlas oder mehr vorkommen können. Der durchschnittliche Anstieg des Energieverbrauchs durch Wannenalterung betrug an den Referenzanlagen etwa 2,5 %.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Auf dem Gebiet der Luftreinhaltung werden die geforderten Emissionsgrenzwerte der TA-Luft alle eingehalten. Bei den gasförmigen Selenverbindungen, die eine wichtige Emissionskomponente bei der Produktion von Weißglas darstellt, muss auf ausreichende Sorptionsmittelmenge geachtet werden. Wichtigste Emissionskomponente ist die NO_x-Emission. Die NO_x-Emissionen von Oxy-Fuel-Wannen liegen auf einem Niveau von teilweise weniger als 0,3 kg/t_{Glas}, also eine spez. Emission, die umgerechnet einer normierten Konzentration von etwa 200 mg/m³ im Abgas einer konventionell beheizten Vergleichswanne entspricht. Derart niedrige Emissionen können annähernd mit Low-NO_x-Meltern oder Anlagen mit sekundärer Minderungstechnologie erreicht werden.

Die NO_x-Konzentrationen der Behälterglasindustrie liegen im arithmetischen Mittel über die letzten 5 Jahre unterhalb von 900 mg/m³. Viele Anlagen unterschreiten heute schon den Grenzwert der TA-Luft von 800 mg/m³, der ab dem Jahr 2010 gültig ist, einige Anlagen liegen aber auch noch deutlich darüber. Die NO_x-Konzentrationen der Referenzanlage 3 zeigen, dass große U-Flammenwannen mit regenerativer Luftvorwärmung und dem entsprechend notwendigen Aufwand für primäre Minderungstechnologie dem NO_x-Zielwert von 500 mg/m³ sehr nahe kommen können.

Die Kosten für Umweltschutzmaßnahmen zur Luftreinhaltung sind bei Produkten mit relativ geringer Wertschöpfung im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit nicht zu vernachlässigen. Bei großen Anlagen müssen zur Abgasreinigung bis € 4/t_{Glas} für die Abgasreinigung ausgegeben werden. Der Betrieb einer SCR-Anlage lässt sich mit € 2/t_{Glas} abschätzen. Mit Abnahme der Anlagengröße bzw. der Tonnage einer Schmelzwanne steigen die Kosten zur Luftreinhaltung umgelegt auf die Schmelzleistung erheblich an.

Durch die Installation von Wärmetauschern oder Rohstoffvorwärmern im Abgas der Schmelzwannen lassen sich deutliche Wärmemengen zurückgewinnen. Wärmetauschersysteme und nachgeschaltete Anlagen, etwa zur Stromgewinnung, sind jedoch wartungsintensiv und bedürfen u. U. einer genauen Kosten-Nutzen-Rechnung.

Die wirtschaftliche Betrachtungsweise ist auch der wichtigste Aspekt, wenn die Entscheidung von zukünftigen Schmelztechnologien, also die Umstellung von konventioneller auf Oxy-Fuel-Feuerung diskutiert wird. Den geringeren Investitionskosten der Oxy-Fuel-Wanne gegenüber der Regenerativwanne stehen die höheren Betriebskosten durch die Sauerstofferzeugungs- oder Bezugskosten gegenüber.

Flachglasindustrie

In Deutschland existieren zurzeit 11 Floatglaslinien sowie 2 Gussglaswannen. Während die genannten Wannen alle konventionell befeuert werden, gibt es eine weitere Gussglaswanne mit Oxy-Fuel-Feuerung und schwerem Heizöl als Brennstoff.

Alle Floataggregate nutzen Querbrennerwannen mit regenerativer Luftvorwärmung als Schmelzagggregat und sind abgasseitig mit Elektrofiltern und Trockensorptionsstufe (Calciumhydroxid) ausgerüstet.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Seit Ende 2006 gibt es eine Anlage mit SCR-Technik. Die maximalen Tonnagen bewegen sich je nach Wanne und erschmolzenem Glas zwischen 550 und über 800 t/d.

Der spez. Energieverbrauch einer Floatwanne liegt deutlich über dem einer hochbelasteten großen Hohlglaswanne. Die Veränderung im spez. Energieverbrauch unterliegt ebenfalls dem negativen Einfluss der Wannenalterung.

Die Filterstaubrückführung wird an allen Floatlinien praktiziert.

Die Einhaltung der geforderten Emissionsgrenzwerte von Staub, SO₂, HCl und HF ist unproblematisch. Bei der Produktion von selengefärbten Gläsern muss, wie bei der Hohlglasindustrie, auf ausreichende Sorptionsmittelmenge geachtet werden. Wird Natriumbikarbonat als Sorptionsmittel genutzt, dann müssen aufgrund der schlechten Reaktionseigenschaften mit den anorganischen Fluorverbindungen bereits Rohgaskonzentrationen vorliegen, die den Emissionsgrenzwert unterschreiten bzw. tangieren.

Die Qualitätsanforderungen an das geschmolzene Glas sind gegenüber der Hohlglasindustrie deutlich höher. Selbstverständlich nutzen alle Betreiber unter Beachtung der Qualitätsanforderungen die bekannten Möglichkeiten der primären Maßnahmen zur NO_x-Reduzierung. Dennoch sind die eingesetzten primären Verfahren zur Reduzierung der Stickstoffoxidemissionen unterschiedlich. Bekannt ist, dass effektive Maßnahmen zur Reduzierung der NO_x-Emissionen durch aufwendige Wannenkonstruktionen mit geteilten Kammern begünstigt werden. Damit lassen sich an den einzelnen Brennerports exakte Brennstoff-Luft-Verhältnisse einstellen und über Zirkondioxidsonden zur O₂-Messung in den zugehörigen Kammerköpfen kontrollieren und regeln. An den Referenzanlagen, die mit Schweröl bzw. einer Mischung aus Schweröl und Erdgas betrieben werden, lassen sich 800 mg/m³ gesichert einhalten.

Bei dem Pilkington 3R-Verfahren wird zuzüglich zur nahstöchiometrischen Fahrweise Sekundärbrennstoff auf der abziehenden Abgasseite, beim Eintritt der ausgebrannten Abgase in den Regenerator eingedüst. Messergebnisse liegen der HVG nicht vor.

Beide Verfahren sind mit Kosten verbunden. Die Investitionskosten sind im ersten Fall vermutlich höher, die Betriebskosten im Vergleich zum 3R-Verfahren dagegen niedriger. Bei den jährlichen Gesamtkosten dürfte der höhere finanzielle Aufwand beim 3R-Verfahren liegen. Beachtet werden muss auch der CO₂-Emissionshandel und die Auswirkungen auf das Feuerfestmaterial. Ein Teil der zugeführten zusätzlichen Wärmemenge kann beim 3R-Verfahren in einem nachgeschalteten Wärmetauscher zurückgewonnen werden.

Ob sich der in der TA-Luft genannte NO_x-Grenzwert von 800 mg/m³ für Altanlagen im Jahr 2010 mit erdgasbeheizten Flachglaswannen (ohne 3R) erreichen lässt, ist derzeit noch offen. Insbesondere bei offenem Kammersystem und Standardbrenner- und Regelungssystemen kann die Installation sekundärer Minderungsmaßnahmen u. U. notwendig werden. Wannenkonstruktionen mit offenem Kammersystem engen den Spielraum zu effektiven Primärmaßnahmen zur Stickstoffoxidreduzierung ein. Die Luftverteilung auf die einzelnen Brennerports ist konstruktionsbedingt vorgegeben, der Brennstoff muss entsprechend der Luftpumpe angepasst werden.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Regelungsmechanismen zur Luftaufteilung sind schwierig und lassen sich in geringem Umfang z.B. durch sog. Sperrluftlanzen im Kammerfuß realisieren.

Oxy-Fuel-Wannen werden zur Floatglasproduktion in Deutschland nicht eingesetzt. Es stehen auch keine gesicherten Angaben zum spezifischen Energieverbrauch oder der Lebensdauer einer Oxy-Fuel-Wanne dieser Größenordnung zur Verfügung. Die Vorteile der Investitionskosten der Schmelzwanne, insbesondere durch den Wegfall der Regeneratoren der Querbrennerwanne, liegen auf der Seite der Oxy-Fuel-Technik. Die Betriebskosten inkl. der Sauerstofferzeugung dagegen dürften die der konventionellen Befeuerung übersteigen. Die Wirtschaftlichkeit hängt also maßgeblich davon ab, wie groß die Differenz im spez. Energieverbrauch zwischen beiden Anlagetypen ist, wie hoch die Sauerstofferzeugungskosten sind und welcher Aufwand bei der konventionellen Verbrennung für primäre oder sekundäre NO_x-Minderungsmaßnahmen aufgebracht werden muss.

Betrachtet man die Oxy-Fuel-Technik aus ökologischer Sicht, dann muss man an vorderster Stelle die geringen NO_x-Emissionen erwähnen, die bei den vorgestellten Referenzanlagen bei Kalk-Natron-Silicatgläsern zwischen 0,2 und 0,8 kg/t_{Glas} liegen und aus heutiger Sicht nur durch sekundäre Minderungsmaßnahmen an konventionellen Schmelzwannen mit regenerativer Luftvorwärmung erreicht werden können. Die CO₂-Bilanz dürfte zugunsten der konventionellen Feuerungstechnik ausfallen, wenn man voraussetzt, dass die Elektroenergie zur Sauerstofferzeugung nicht aus Kernkraft sondern aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird.

Spezialglasindustrie

In der Spezialglasindustrie konnte die weitgehende Umstellung von konventioneller Feuerungstechnik hin zur Oxy-Fuel-Feuerung nachvollzogen werden. Die Einsparungen im spez. Wärmeverbrauch vieler Spezialglaswannen sind zum Teil so groß, dass die Einsparpotentiale bei den Investitionskosten unberücksichtigt bleiben dürfen. Inklusive der Sauerstoffkosten liegen die Schmelzenergiekosten der Oxy-Fuel-Wanne oft deutlich unter denen der konventionell befeuerten Vergleichswanne, deren Investitionskosten die der Sauerstoffwanne in der Regel übersteigen.

Mit der Umstellung auf Oxy-Fuel-Feuerung konnten die NO_x-Emissionen drastisch gesenkt werden. Durch ständige Optimierungsprozesse ist es außerdem gelungen, die installierten SNCR-Anlagen ohne Ammoniak-Eindüsung zu betreiben, um die geforderten Emissionsbegrenzungen einzuhalten.

Im Spezialglasbereich ist seit 1989 im Abgas von konventionell befeuerten Schmelzwannen eine SCR-Anlage installiert. Zur Einhaltung des geforderten NO_x-Grenzwertes von 1.000 mg/m³ (Schmelzwannen mit Nitrateinsatz) muss der Katalysator mit einer Minderungsrate von 80 % betrieben werden.

Zur Abgasreinigung werden oft filternde Abscheider eingesetzt, deren staubförmige Emissionskomponenten nicht selten im Bereich der messtechnischen Nachweigrenze liegen. In vielen Fällen kann auch auf den Einsatz von Sorptionsmitteln verzichtet werden.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Beim Einsatz von Arsen muss ein besonderes Augenmerk auf das Temperaturregime der Filteranlage gelegt werden, damit gasförmige Verbindungen die Filteranlage nicht passieren und staubförmig abgeschieden werden können.

SO_x-Emissionen spielen in der Spezialglasindustrie nur eine untergeordnete Rolle. Die Konzentrationen liegen meist im Bereich der Messunsicherheiten der angewandten Messverfahren.

Bei Spezialglaswannen mit Kochsalzläuterung treten im Rohgas teilweise sehr hohe HCl-Gehalte auf. Bei entsprechender Dosierung und Auswahl des Sorptionsmittels ist auch an diesen Anlagen eine Unterschreitung des Emissionsgrenzwertes gewährleistet. Alle übrigen Anlagen der Spezialglasindustrie haben mit der HCl-Emission keine Probleme.

In der Regel ist die HF-Emission für die Spezialglasindustrie unproblematisch - insbesondere wegen der überwiegend eingesetzten sehr reinen Rohstoffe. Bestimmte Teilbereiche benötigen jedoch den Einsatz fluorhaltiger Rohstoffe. Dann müssen unter den vorgegebenen Abgasrandbedingungen und Filtertechnologien entsprechende Sorptionsmittel eingesetzt werden, um den Emissionsgrenzwert einzuhalten.

In der Spezialglas- und Faserglasindustrie werden dem Gemenge sehr oft borhaltige Rohstoffe beigemischt. Die Abscheidung gasförmiger Borverbindungen ist mit herkömmlicher Abgasreinigungstechnologie unter Umständen schwierig. Dieser Thematik stellt sich die HVG momentan im Rahmen eines Forschungsvorhabens, bei dessen Durchführung bisher sehr gute Minderungsraten erzielt werden konnten.

Die Abfall- und Abwassersituation konnte im Rahmen des Projektes nicht sachgerecht durchleuchtet werden. Je nach Glasart und Produkt müssen auf diesem Gebiet zum Teil erhebliche Anstrengungen und Aufwendungen getätigt werden.

Wirtschaftsglas

Wirtschaftsglas wird bei größeren Stückzahlen in kontinuierlich betriebenen Schmelzwannen erschmolzen. Sämtliche für die Glasindustrie gültigen Emissionsgrenzwerte werden nach dem Kenntnisstand der HVG im Wirtschaftsglasbereich eingehalten.

Mit Inkrafttreten der Emissionsgrenzwerte der neuen TA-Luft stellen die Stickstoffoxide, insbesondere wenn nitrathaltige Gemengesätze vorliegen, die größte Herausforderung dar. Ab Oktober 2010 müssen Neu- und Altanlagen 1.000 mg/m³ einhalten. Lediglich Altanlagen mit einem Abgasvolumenstrom von weniger als 5.000 m³/h dürfen 1,2 g/m³ emittieren.

Wirtschaftsgläser werden in kleineren Stückzahlen auch in Hafenöfen gefertigt.

Bei Hafenöfen ist die Emissionssituation von der jeweiligen Schmelzphase abhängig. Die höchsten Emissionen treten während der Einlegephasen auf. In vielen Fällen wird das Glas nach Beendigung der sog. Rauschmelze "geblasen", d.h. mit dem Eintauchen eines nassen Holzklotzes oder einer Kartoffel in die Glasschmelze erfolgt ein gewaltiges Aufkochen und Homogenisieren der

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Schmelze. In diesen Phasen können ebenfalls große Konzentrationsspitzen der einzelnen Emissionskomponenten auftreten.

In Deutschland sind alle Hafenofenschmelzanlagen nach dem Kenntnisstand der HVG mit Gewebefilteranlagen ausgerüstet. Bei sachgerechter Handhabung und evtl. zusätzlichem Sorptionsmitteleinsatz lassen sich an diesen Anlagen die geforderten Emissionsgrenzwerte einhalten.

Beim Vorhandensein gasförmiger Schwermetallverbindungen muss besonders auf das Abgastemperatureniveau vor der Filteranlage geachtet werden.

Glas- und Mineraldämmstoffindustrie

In diesem Industriezweig der Glasindustrie sind in Deutschland überwiegend erdgasbeheizte Schmelzwannen mit rekuperativer Luftvorwärmung in Betrieb. Es existieren aber auch Elektrowannen und Oxy-Fuel-Wannen. Zum Schmelzen von Steinwolle werden auch Kupolöfen eingesetzt.

Beim Kupolofen wird Vulkanisches Gestein, Kalk, Mineralienzuschläge sowie Steinwolle-Recyclingmaterial durch Verbrennen von Koks auf mehr als 1500° C erhitzt. Die flüssige Gesteinsschmelze wird anschließend zu Fasern versponnen, mit einem organischen Bindemittel versetzt und ausgehärtet. Belastbare Angaben zum Thema Umweltschutz liegen nicht vor.

Die Emissionen der einzelnen Emissionskomponenten der beiden Referenzanlagen, einer Oxy-Fuel- und einer rekuperativ beheizten Schmelzwanne, liegen auch ohne Einsatz von zusätzlichem Sorptionsmittel an der Abgasreinigungsanlage unterhalb der geforderten Emissionsgrenzwerte. Bemerkenswert niedrig sind in beiden Fällen die geringen NO_x-Emissionen.

Beim Aufbringen der organischen Bindemittel (Schlichten) und dem anschließenden Weiterverarbeitungsprozess müssen ebenfalls Maßnahmen zur Abluftreinigung ergriffen werden. Die Anlagengröße und die zu behandelnden Abluftvolumenströme übersteigen die der Wannenabgase um ein Mehrfaches. Hier müssen Emissionsgrenzwerte organischer Verbindungen eingehalten werden, die ansonsten in der Glasindustrie nicht vorkommen (Phenol / Formaldehyd / Ammoniak / Gesamt-C). Die Aufwendungen zur Luftreinhaltung sind in der Weiterverarbeitung enorm hoch.

Besondere Abfall- oder Abwasserprobleme treten nicht auf. Die Produktionsabfälle werden entweder eingeschmolzen oder dem Produkt erneut zugemischt.

Bei vollelektrischen Glasschmelzöfen muss nur zur Inbetriebnahme fossiler Brennstoff angewendet werden. Während des Betriebes schmilzt die auf der Glasschmelze liegende Gemengeschicht von unten her ab und übernimmt damit die Funktion einer Sorptionsstufe. Im Verbund mit einem filternden Abscheider liegen die Emissionen von elektrisch erschmolzenen Gläsern ("Cold-Top-Wannen") im Vergleich zu konventionell erschmolzenen Gläsern gleichen Typs in flammenbeheizten Glasschmelzwannen in der Regel auf einem niedrigeren Niveau.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Weitere Bereiche der Glasindustrie

Neben dem Behälterglas und Flachglasbereich, dem Wirtschafts- und Spezialglas und der Glas- und Mineralfaserindustrie gibt es weitere Glasproduzenten.

Wasserglas wird in Deutschland in regenerativ befeuerten Glasschmelzwannen geschmolzen. Als Brennstoff wird oft schweres Heizöl verwendet. Beim Wasserglas besteht der Gemengesatz nur aus Sand und Soda (bzw. Kaliumcarbonat). Der abgeschiedene Filterstaub der Abgasreinigungsanlage wird wieder eingeschmolzen. Als Sorptionsmittel wird in der Regel Soda verwendet. Die Emissionen aus Wasserglasschmelzen enthalten als Staubinhaltstoffe ausschließlich Komponenten, die aus dem Brennstoff kommen. Besondere Emissionsprobleme gibt es keine. Zur Minderung von Stickstoffsäureemissionen kommen Verfahren der primären und sekundären (SCNR) Minderung zum Einsatz.

Zur Produktion von Glasfritten oder Emailgläsern werden teilweise Anlagen betrieben, die mit reinem Sauerstoff als Oxidationsmedium arbeiten. Die Emissionen der Schmelzöfen liegen aufgrund der Einsatzstoffe und der färbenden Komponenten auf einem sehr hohen Niveau, so dass beispielsweise rohgasseitige Emissionen anorganischer Fluorverbindungen mehr als 1000 mg/m³ auftreten können. Aus diesem Grund muss zur Abgasreinigung von fossil beheizten Anlagen ein sehr hoher Aufwand betrieben werden. In einem konkreten Anwendungsfall bedeutet dies, dass drei filternde Abscheider mit Sorptionsstufen in Reihe geschaltet betrieben werden müssen, um geforderte Emissionsgrenzwerte zu unterschreiten. Der anfallende Filterstaub wird solange im Kreis geführt, bis die Anreicherung mit Calciumfluorid ein Maß erreicht, welches in der Zementindustrie als Zuschlagstoff verarbeitet werden kann.

Die zur Spezialglasindustrie zählende Quarzschmelze erfolgt elektrisch. Emissionen treten ausschließlich als staubförmige Verdampfungsprodukte beim Eintritt des flüssigen Quarzglases in die Atmosphäre auf. Die staubförmigen Verbindungen können abgesaugt und behandelt werden.

HÜTTENTECHNISCHE VEREINIGUNG DER DEUTSCHEN GLASINDUSTRIE

Abschließend bleibt festzuhalten, dass sich die verschiedenen Industriezweige der Glasindustrie, sowohl hinsichtlich der erschmolzenen Gläser, der verwendeten Schmelztechnologien, der Produktionstechniken bis hin zum Aufwand für Abgasreinigung bzw. zum Abfall- und Abwasserhandling zum Teil drastisch unterscheiden.

Auch innerhalb eines Industriezweiges gibt es große Unterschiede. Deshalb lassen sich branchenspezifische Angaben, wie etwa die Angaben von spez. Emissionsfaktoren in kgSchadstoff/tGlas nur abschätzen. Der spezifische Energieverbrauch eines Schmelzaggregates hängt maßgeblich vom Glastyp und den an das Glas gestellten Qualitätsanforderungen ab. Er wird entscheidend durch die Größe, die Belastung und den Scherbenanteil einer Schmelzwanne geprägt, so dass vergleichbare Gläser nicht selten einen Energiebedarf benötigen, der sich um den Faktor 2 voneinander unterscheidet.

Dies ist auch der Grund dafür, dass man bei einer Bewertung einer Glasschmelzanlage im Hinblick auf umweltrelevante Aspekte Einzelbetrachtungen durchführen muss. Vergleichsanlagen kann man nur heranziehen, wenn man Bilanzgrenzen absteckt, die eine realistische Gegenüberstellung erlauben.

Offenbach, im Februar 2007

Der Projektleiter

Dipl.-Ing. K. Gitzhofer

Literatur

- [1] Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) – Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry; (Oct. 2000)
- [2] VDI-Richtlinie 2578 - Emissionsminderung Glashütten; VDI-Verlag (November 1999)
- [3] Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA-Luft; Bundesanzeiger Verlag (2002)
- [4] Heide, K.; Hartung, E.; Schmidt, H.G.; Ottlinger, J.: Untersuchungen zur Verdampfung von Bor beim Einschmelzen von borhaltigen Glasgemengen ; Glastech. Ber. 59 [3] 59-63 (1986)
- [5] Beerkens, R.G.C.; Van Limp, H.: Influence of glass furnace operational conditions on the evaporation from soda-lime-silica and borosilicate glass melts; International Glass Journal No.110, 27-36 (2000)
- [6] Beerkens, R.G.C.; Van Limpt, H.: Evaporation in industrial glass melt furnaces, Glastech. Ber. Glass Sci. Technol. 74 [9] 245-257 (2001)
- [7] Müller-Simon, H.: Sulfatläuterung von Kalknatronsilicatgläsern, HVG-Fortbildungskurs 45-72 (1999)