

TEXTE

45/2021

Teilbericht

# Überarbeitung der Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe in den Branchen Zementklinkerproduktion und Glasherstellung

In der Systematik der Genfer Luftreinhaltekonvention:  
NFR 2.A.1 und NFR 2.A.3

von:

Karlheinz Gitzhofer, Ruslan Goppe

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

Herausgeber:

Umweltbundesamt



TEXTE 45/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für  
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl FKZ 3719 52 101 0

& 

Teilbericht

# **Überarbeitung der Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe in den Branchen Zementklinkerproduktion und Glasherstellung**

In der Systematik der Genfer Luftreinhaltekonvention:  
NFR 2.A.1 und NFR 2.A.3

von

Karlheinz Gitzhofer, Ruslan Goppe  
Hüttentechnische Vereinigung der deutschen Glasindustrie  
e.V. (HVG), Offenbach am Main

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

### Durchführung der Studie:

Hüttentechnische Vereinigung der deutschen Glasindustrie e. V.  
Siemensstraße 45  
63071 Offenbach am Main

### Abschlussdatum:

November 2020

### Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie  
Sandra Leuthold

Fachgebiet V 1.6 Emissionssituation  
Robert Kludt

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

### **Kurzbeschreibung: Überarbeitung der Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe in den Branchen Zementklinkerproduktion und Glasherstellung**

Die Hüttentechnische Vereinigung der deutschen Glasindustrie e. V. mit Sitz in Offenbach am Main betreibt seit über 40 Jahren Emissionsmessungen im Bereich der Glasindustrie in Deutschland. Zur Bereitstellung der Emissionsfaktoren in der deutschen Glasindustrie, die aufgearbeitet und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden konnten, lagen somit handfeste Messwerte vor. In diesem Bericht wird die Glasherstellung auf sieben Glassparten aufgeteilt: Behälterglas, Flachglas, Wirtschaftsglas, Spezialglas, Glasfasern und Glaswolle, Mineral- und Steinwolle sowie Wasserglas. Zeitlich aufgeteilte Emissionsdarstellungen gewähren somit einen Blick auf die Entwicklung der Emissionen in der Glasindustrie. Zusätzlich wurden zu den errechneten Emissionsfaktoren, die auf tatsächlichen Messungen basieren, Unsicherheiten erarbeitet. Diese sollen die möglichen Abweichungen vom nicht zu ermittelnden tatsächlichen Wert aufzeigen und basieren auf Schätzungen. Die Messtätigkeiten der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie decken nicht die gesamte Anzahl an Glasherstellern ab.

Deshalb beinhaltet dieser Bericht ein Expertenvotum für ausgewählte Emissionsfaktoren: Eine Einschätzung auf Grundlage von internen und externen Messdaten und Erfahrungen unseres Vereins in Anbetracht der umwelttechnischen Entwicklungen im Bereich der Glasindustrie, um ein möglichst reales Emissionsbild für jede der genannten Glassparten zu liefern.

### **Abstract: Revision of the emission factors for air pollutants in the cement clinker production and glass manufacturing sectors**

The Research Association of the German Glass Industry in Offenbach has been carrying out emission measurements for more than 40 years in the German glass manufacturing field. For the provision of emission factors in the German glass manufacturing industry, which have been refurbished and published, we could underpin these with actual emission measurements. In this report the glass manufacturing glass industry is split into seven branches: Container Glass, Flat Glass, Table Ware, Special Glass, Fiber Wool Glass, Stone Wool and Water Glass. Divided by time periods, this report grants an insight into the development of emissions in the glass manufacturing industry. Uncertainties have been elaborated in addition to the calculated emission factors. These are estimations that are supposed to show possible deviations from the real value that cannot be fully determined. The work of the Research Association of the German Glass Industry cannot possibly cover all German glass manufacturers. For this reason this report contains an expert vote for chosen emission factors: It's an estimation based on intern and extern emission measurements and experience of our association in consideration of the progress of environmental engineering in the glass manufacturing industry.

## Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis .....	8
Abkürzungsverzeichnis .....	11
Zusammenfassung.....	12
Summary .....	15
1 Einleitung.....	18
2 Aufgabenstellung .....	20
3 Glasindustrie und Emissionen von Glasschmelzwannen .....	22
4 Messverfahren und Messunsicherheiten.....	27
5 Projektabwicklung.....	32
6 Ergebnisse .....	35
6.1 Behälterglas .....	35
6.1.1 Behälterglas: Gasförmige Schadstoffe.....	35
6.1.2 Behälterglas: Partikelförmige Schadstoffe .....	37
6.1.3 Behälterglas: Bor.....	38
6.1.4 Behälterglas: Quecksilber .....	38
6.2 Flachglas.....	39
6.2.1 Flachglas: Gasförmige Schadstoffe .....	39
6.2.2 Flachglas: Partikelförmige Schadstoffe.....	40
6.2.3 Flachglas: Bor und Quecksilber .....	40
6.3 Wirtschaftsglas.....	41
6.3.1 Wirtschaftsglas: Gasförmige Schadstoffe .....	41
6.3.2 Wirtschaftsglas: Partikelförmige Schadstoffe.....	42
6.3.3 Wirtschaftsglas: Bor und Quecksilber.....	42
6.4 Spezialglas .....	42
6.4.1 Spezialglas: Gasförmige Schadstoffe .....	43
6.4.2 Spezialglas: Partikelförmige Schadstoffe .....	44
6.4.3 Spezialglas: Bor und Quecksilber .....	44
6.5 Glasfasern/Glaswolle .....	45
6.5.1 Glasfasern/Glaswolle: Gasförmige Schadstoffe (Schmelzwannen).....	45
6.5.2 Glasfasern/Glaswolle: Partikelförmige Schadstoffe (Schmelzwannen).....	46
6.5.3 Glasfasern/Glaswolle: Bor und Quecksilber .....	46
6.6 Steinwolle.....	47
6.6.1 Steinwolle: Gasförmige Schadstoffe (Schmelzanlagen).....	49

6.6.2	Steinwolle: Partikelförmige Schadstoffe (Schmelzanlagen) .....	49
6.7	Wasserglas .....	50
6.7.1	Wasserglas: Gasförmige Schadstoffe.....	51
6.7.2	Wasserglas: Partikelförmige Schadstoffe .....	51
6.7.3	Wasserglas: Bor und Quecksilber .....	52
7	Unsicherheitsbereiche.....	53
7.1	Beispiel zur Einschätzung der Unsicherheit .....	57
7.2	Unsicherheiten für die Behälterglasindustrie .....	61
7.3	Unsicherheiten für die Flachglasindustrie .....	62
7.4	Unsicherheiten für die Wirtschaftsglasindustrie .....	62
7.5	Unsicherheiten für die Spezialglasindustrie.....	63
7.6	Unsicherheiten für die Glasfasern- und Glaswollindustrie .....	63
7.7	Unsicherheiten für die Steinwollindustrie .....	64
7.8	Unsicherheiten für die Wasserglasindustrie.....	64
8	Expertenvotum zur Einschätzung aktueller Emissionsfaktoren.....	65
8.1	Behälterglas .....	65
8.2	Flachglas.....	67
8.3	Wirtschaftsglas.....	68
8.4	Spezialglas .....	71
8.5	Glasfasern- und Glaswolle .....	72
8.6	Steinwolle.....	74
8.7	Wasserglas .....	77
9	Vorher- und Nachher-Abgleich.....	79

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung von aktuellen Emissionsfaktoren in Kilogramm pro Tonne Glas .....	15
Tabelle 2: CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktoren gemäß nationalem Inventarbericht .....	26
Tabelle 3: Die Emissionskomponenten und die zugehörigen Regelwerke .....	28
Tabelle 4: Messunsicherheiten der kontinuierlichen Probenahmen, alle Angaben in Milligramm pro Kubikmeter .....	30
Tabelle 5: Messunsicherheit der kontinuierlichen Probenahme bei Sauerstoff, alle Angaben in Volumenprozent.....	30
Tabelle 6: Messunsicherheit der diskontinuierlichen Probenahme von HCl und HF, alle Angaben in Milligramm pro Kubikmeter .....	30
Tabelle 7: Messunsicherheit der diskontinuierlichen Probenahme von So <sub>2</sub> und NH <sub>3</sub> , alle Angaben in Milligramm pro Kubikmeter .....	30
Tabelle 8: Messunsicherheit der diskontinuierlichen Probenahme von Staub, alle Angaben in Milligramm pro Kubikmeter .....	31
Tabelle 9: Messunsicherheiten der partikelförmigen Staubinhaltsstoffe.....	31
Tabelle 10: Messunsicherheiten der filtergängigen Staubinhaltsstoffe .....	32
Tabelle 11: Anzahl ausgewerteter Berichte im aktuellen Zeitraum.....	34
Tabelle 12: Ersatz und Annahmewerte für Schmelzverlust und Scherbenanteil ....	35
Tabelle 13: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Behälterglasindustrie.....	36
Tabelle 14: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas .....	37
Tabelle 15: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas .....	38
Tabelle 16: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Flachglasindustrie .....	40
Tabelle 17: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas .....	40
Tabelle 18: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas .....	41
Tabelle 19: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Wirtschaftsglasindustrie ..	42
Tabelle 20: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas .....	42
Tabelle 21: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas .....	43
Tabelle 22: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Spezialglasindustrie .....	44
Tabelle 23: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas .....	44
Tabelle 24: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas .....	45
Tabelle 25: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Glaswollindustrie .....	46
Tabelle 26: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas .....	46



Tabelle 27: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas .....	47
Tabelle 28: Emissionsfaktoren für Kupolöfen nach ProBas für gasförmige Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas .....	49
Tabelle 29: Emissionsfaktoren für Kupolöfen nach ProBas für staubförmige Schadstoffe in Gramm pro Tonne Glas.....	49
Tabelle 30: Aktuelle Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas .....	50
Tabelle 31: Aktuelle Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas .....	50
Tabelle 32: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Wasserglasindustrie.....	51
Tabelle 33: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas .....	52
Tabelle 34: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas .....	52
Tabelle 35: Ausschlaggebende Kriterien für die Einschätzung der Unsicherheit eines Emissionsfaktors .....	57
Tabelle 36: Bewertung der Datenbanken für Glasbranchen auf Repräsentativität anhand der Anzahl untersuchter Anlagen (viertes Kriterium) .	57
Tabelle 37: Notenvergabe an die Kriterien für die NOx-Werte und abgeschätzte Unsicherheit .....	59
Tabelle 38: Notenvergabe an die Kriterien für die Staubwerte und abgeschätzte Unsicherheit .....	61
Tabelle 39: Einschätzung der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Behälterglasindustrie.....	62
Tabelle 40: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Flachglasindustrie .....	63
Tabelle 41: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Wirtschaftsglasindustrie.....	63
Tabelle 42: Einschätzung der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Spezialglasindustrie .....	64
Tabelle 43: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Glaswollindustrie .....	64
Tabelle 44: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Steinwollindustrie.....	65
Tabelle 45: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Wasserglasindustrie .....	65
Tabelle 46: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Behälterglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	66
Tabelle 47: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Behälterglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	67

Tabelle 48: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Flachglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	68
Tabelle 49: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Flachglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	69
Tabelle 50: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Wirtschaftsglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	70
Tabelle 51: Emissionsfaktoren aus dem Jahr 2016 für Staubinhaltsstoffe im Rohgas von Wirtschaftsglaswannen in Gramm pro Tonne Glas.....	71
Tabelle 52: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Wirtschaftsglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	71
Tabelle 53: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum – Spezialglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	72
Tabelle 54: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Spezialglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	72
Tabelle 55: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Glasfasern / Glaswolle - Schmelzwannen) mit dazu gehörigen Unsicherheiten.....	73
Tabelle 56: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Glasfasern / Glaswolle - Schmelzwannen) mit dazu gehörigen Unsicherheiten.....	74
Tabelle 57: Emissionsfaktoren in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Glasfasern / Glaswolle - Weiterverarbeitung) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	75
Tabelle 58: Abgeleitete Emissionsfaktoren einer neuen Steinproduktionslinie aus einem aktuellen Genehmigungsbescheid in Kilogramm pro Tonne Glas .....	76
Tabelle 59: Aktuelle Emissionsfaktoren für den Zeitraum 2020 in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Steinwolle).....	77
Tabelle 60: Emissionsfaktoren in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Steinwolle – Schmelze und Weiterverarbeitung) mit dazu gehörigen Unsicherheiten .....	77
Tabelle 61: Emissionsfaktoren partikelförmiger und gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum – Wasserglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten.....	79
Tabelle 62: Zusammenstellung von aktuellen und prognostizierten Emissionsfaktoren in Kilogramm pro Tonne Glas für den Zeitraum 2020 .....	80



## Abkürzungsverzeichnis

<b>UNFCCC</b>	United Nations Framework Convention on Climate Change
<b>LRTAP</b>	Convention on Long Range Transboundary Air Pollution
<b>VDZ</b>	Verein Deutscher Zementwerke
<b>HVG</b>	Hüttentechnische Vereinigung der deutschen Glasindustrie
<b>BImSchG</b>	Bundesimmissionsschutzgesetz
<b>IVU-Richtlinie</b>	Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
<b>PPC</b>	Integrated Pollution Prevention and Control
<b>DGG</b>	Deutsche Glastechnische Gesellschaft
<b>AP</b>	Arbeitspaket
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt
<b>SCR</b>	Selective Catalytic Reduction
<b>SNCR</b>	Selective Non Catalytic Reduction
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>EN</b>	Europäische Norm
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>TA Luft</b>	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

## Zusammenfassung

Die Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG) ist eine technisch-wissenschaftliche Vereinigung mit Sitz in Offenbach am Main. Zweck dieser Vereinigung ist vor allem die Förderung von Wissenschaft, Umweltschutz und Forschung auf dem Gebiet des Werkstoffes Glas sowie der damit verwandten Werkstoffe. Im Zuge von Umweltaktivitäten auf dem Gebiet der Luftreinhaltung führt die HVG seit mehr als 40 Jahren Emissionsmessungen bei Glasherstellern in Deutschland durch. Die HVG ist als amtlich benannte Messstelle für glasspezifische Emissionen bekanntgegeben und nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Für das ausgeschriebene Projekt des Umweltbundesamtes zur Bereitstellung aktueller Emissionsfaktoren für die Glasindustrie erklärte die HVG sich bereit, ihre über die Jahre gewonnenen Ergebnisse und Kenntnisse in Form eines Berichts dem Umweltbundesamt zur Verfügung zu stellen.

Das Projekt lief in vier sogenannten Arbeitspaketen ab. Zunächst bemühte sich die HVG um die Datensammlung. Für die Bereitstellung der Emissionsfaktoren stellte die interne Datenbank der HVG die Grundlage dar. Die Datenbank, in Form einer Excel-Datei, beinhaltet die verschiedenen Glasbranchen der Glasindustrie in Deutschland, die gesammelten Messergebnisse aus Emissionsmessungen zahlreicher Emissionskomponenten unterschiedlicher Standorte der letzten 30 Jahre sowie weitere zahlreiche Informationen zu den untersuchten Anlagen, viele davon unterliegen jedoch der Geheimhaltung. Zunächst galt es die Datenbank auf den aktuellen Stand zu bringen und durch Messergebnisse anderer Institute aufzustocken. Da nicht jede Glashütte mit der HVG in Zusammenarbeit steht, wurden zahlreiche Anlagenbetreiber kontaktiert und die meisten unterstützten das Vorhaben und lieferten Messergebnisse an die HVG, die von anderen Messinstituten im Rahmen von behördlich angeordneten Emissionsmessungen durchgeführt wurden. Ergänzend zu den Emissionsmessungen, die alle drei Jahre je Anlage stattfinden, wurden Funktionsprüfungen und Kalibrierberichte mit in den Datensatz aufgenommen. Dadurch konnten weitere Messergebnisse für einige Emissionskomponenten eingegliedert werden.

Auf die Datensammlung folgte die Bestimmung der Emissionsfaktoren für jede Emissionskomponente jeder Glasbranche aufgeteilt in verschiedene Zeitperioden. Das Ziel war es für jede Glasbranche ein repräsentatives Emissionsbild zu liefern. Bedingt durch den Mangel an durchgeführten Messungen in einigen Branchen konnte oft kein fachlich nachvollziehbarer Emissionsfaktor abgeleitet werden, viele Angaben sind daher mit großen Unsicherheiten versehen. Kapitel 6 beschäftigt sich mit den Ergebnissen der ermittelten Emissionsfaktoren. Es ist zu erwähnen, dass die Emissionsfaktoren in Kapitel 6 vollständig aus den Messdaten der HVG errechnet wurden. Um die mit hoher Unsicherheit versehenen oder nicht nachvollziehbaren Emissionsfaktoren, beispielsweise bedingt durch Ausreißerergebnisse, mit schlüssigeren Werten zu ersetzen, wurde ein Expertenvotum abgegeben. Jeder Wert wurde diskutiert und bei Bedarf mit einer aus Sicht der HVG plausibleren Alternative versehen.

Abschließend wurden die im Jahr 2008 prognostizierten Emissionsfaktoren im Rahmen eines ähnlichen Berichts branchenbezogen mit den aktuellen Werten gegenübergestellt und bewertet.

Die Glasindustrie lässt sich in die Sparten Behälterglas, Flachglas, Spezialglas, Wirtschaftsglas, Mineralwolle, Endlosglasfasern und Glasfritten einteilen. Die innerhalb der europäischen Union zur Glasindustrie zählende Produktion von Hochtemperaturwolle wird in dem Projekt nicht berücksichtigt. Sogenanntes Wasserglas wird in fossil befeuerten Glasschmelzwannen erschmolzen und ist Bestandteil der Projektabwicklung. Der Bereich Glasfritten wird aus Gründen der bisherigen Emissionsberichterstattung dem Sektor Spezialglas zugeordnet, der

Bereich Endlosglasfasern geht in dem Subsektor Glasfasern / Glaswolle auf. Der Sektor Mineralwolle wurde in die Subsektoren Glasfasern / Glaswolle und Steinwolle aufgeteilt.

In Deutschland existieren etwa 90 Hüttenstandorte mit einer täglichen Schmelzleistung von mehr als 20 Tonnen Glas. Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2019 rund 7,38 Millionen Tonnen Glas erschmolzen, mehr als 80 Prozent der produzierten Glasmenge entfällt auf Behälterglas und Flachglas. Hinzu addiert sich die Wasserglasproduktion in der Größenordnung von etwa 0,6 Millionen Tonnen Glas pro Jahr.

Die Vielzahl der produzierten Glasarten erfordert eine breite Palette von Rohstoffen, die sich aus natürlich vorkommenden Mineralien, künstlich hergestellten anorganischen Erzeugnissen und Eigen- beziehungsweise Recyclingscherben zusammensetzen. Die Komplexität der Glas- und Mineralfaserbranche hinsichtlich der eingesetzten Rohstoffe, der Anlagengröße und Anlagenauslastung, der Art der Befeuerung und der Luftvorwärmung bis hin des zum Einsatz kommenden Oxidationsmediums spiegelt sich auch im Emissionsbild der betreffenden Anlagen wider. Zum Einsatz kommen kontinuierlich betriebene Glasschmelzwannen mit regenerativer und rekuperativer Luftvorwärmung, Glasschmelzaggregate mit Rohstoffvorwärmer, Brennstoff-Sauerstoff-beheizte Schmelzaggregate (sogenannte 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. Hafenoöfen, Drehrohröfen oder Tageswannen. Im Steinwollbereich werden auch Kupolöfen und Sonderschmelzaggregate eingesetzt. Die Hauptenergieträger sind Erdgas, schweres Heizöl, leichtes Heizöl und elektrische Energie.

Neben den angewendeten primären Emissionsminderungsmaßnahmen sind in Deutschland alle Glasschmelzaggregate mit Abgasreinigungsanlagen ausgerüstet, die meist aus Elektrofilteranlagen oder filternden Abscheidern mit vorgeschalteter Trockensorptionsstufe bestehen. Der abgeschiedene Filterstaub wird im Behälterglas- und Flachglasbereich vollständig und bei den restlichen Sparten in vielen Fällen teilweise in den Prozess zurückgeführt und wieder eingeschmolzen.

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.

Zu den luftverunreinigenden Stoffen gehören die partikelförmigen Emissionen einschließlich der partikelförmigen und filtergängigen Staubinhalstoffe des Feinstaubanteils, Stickstoffoxide, Schwefeloxide sowie anorganische gasförmige Fluor- und Chlorverbindungen. Es kommt zur brennstoff- und rohstoffbedingten Kohlendioxidfreisetzung und in einigen Fällen auch zu Kohlenmonoxid Emissionen. Bei sekundären Stickstoffoxidminderungsmaßnahmen können auch Ammoniak-Emissionen auftreten. Emissionen organischer Verbindungen und nicht verbrannter Kohlenwasserstoffe beziehungsweise Dioxine und Furane spielen im Abgas der Schmelzwannen keine beziehungsweise nur eine untergeordnete Rolle.

Nachfolgend werden die wichtigsten aktuellen Emissionsfaktoren der einzelnen Sektoren der Glasindustrie tabellarisch (Tabelle 1) zusammengefasst. Es handelt sich dabei um Angaben, die nach der vorliegenden Datenlage und nach Abschluss der Expertenbewertung aus Sicht der HVG als repräsentativ anzusehen sind.

**Tabelle 1: Zusammenstellung von aktuellen Emissionsfaktoren in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	Behälterglas	Flachglas	Wirtsch.-glas	Spezialglas	Glasfaser-Glaswolle	Steinwolle	Wasserglas
CO <sub>2</sub>	287	550	432	520	357	628	412
NO <sub>x</sub>	1,08	1,77	2,86	3,56	1,39	1,88	1,15
SO <sub>2</sub>	0,76	1,57	0,06	0,12	0,18	2,23	0,11
CO	0,07	0,02	0,07	0,12	0,06	0,19	0,06
HCl	0,0133	0,0446	0,0049	0,0145	0,0143	0,0470	0,0046
HF	0,0016	0,0045	0,0004	0,0094	0,0034	0,0100	0,0005
Staub	0,0086	0,0168	0,0150	0,0077	0,6110	0,6430	0,0002
NH <sub>3</sub>	0,0026	0,0191	0,0000	0,0295	1,1000	1,1630	0,0160
C-gesamt	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6000	0,6570	0,0000

In den sektorbezogen tabellarisch dargestellten Emissionsfaktoren im Bericht werden auch die Staubinhalstoffe einzeln aufgeführt.

Beim CO<sub>2</sub> wurden die gemessenen Konzentrationen im Abgas zur Datenauswertung herangezogen. Es handelt es sich bei den Angaben um die Summe aus rohstoffbedingten und prozessbedingten Emissionsfaktoren aus den Schmelzanlagen. Im Bericht werden die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren aus der (prozessbedingten) Karbonatzersetzung während des Schmelzprozesses separat ausgewiesen.

Betrachtet man die Variation der Emissionsfaktoren der einzelnen Emissionskomponenten in den verschiedenen Sektoren der Glasindustrie, dann wird die Komplexität der Glas- und Mineralfaserindustrie ersichtlich.

Die Emissionsfaktoren der Sektoren Glasfaser / Glaswolle und Steinwolle beinhalten auch die dem Schmelzprozess nachgeschaltete Weiterverarbeitung zu Dämmwolle oder Glasfasermatten.

## Summary

The Research Association of the German Glass Industry (in German short: HVG) is a technical and scientific association based in Offenbach am Main. The main purpose of this association is to promote science, environmental protection and research in the field of glass and related materials. In the course of environmental activities in the field of air pollution control, HVG has been carrying out emission measurements at glass manufacturers in Germany for more than 40 years. The HVG has been announced as the officially designated measuring body for glass-specific emissions and is accredited according to DIN EN ISO / IEC 17025: 2018. For the announced project provision of current emission factors in the glass manufacturing industry the HVG agreed to put its emission results collected over 30 years with its gathered knowledge to paper and provide it to the federal environment agency.

The project proceeded continuously in four so called work packages. First information and data had to be collected. The basis for the provision of current emission factors is the in-house database of the HVG. This huge excel-database contains the different glass branches in Germany, the collected emission results from conducted emission measurements of different pollutant components from the past 30 years, also further numerous information about the examined facilities of which a lot are to be kept under secrecy. First, the mentioned database had to be brought up to date and stocked up with external emission results from other institutes. Since not all glass manufacturers are collaborating with the HVG a lot of glass manufacturers had to be contacted by the HVG with the favor to support this project and provide the HVG with their emission data based on measurement results gathered from officially ordered measurements by other institutes. In addition, reports about emission measurements conducted every three years, further reports about calibrations and functional tests of installed automatic measurement devices have been integrated into the database. Thus, more data was collected for some emission components.

What followed was the determination of the emission factors for each component and glass branch divided into specific time spans. The goal was to supply a representative emission image for each glass branch. Many of the presented results come with huge uncertainties due to limited conducted measurements in some glass branches. Chapter 6 deals with the emission factors. It is to be mentioned that the emission factors are purely derived from the data available to the HVG. A sort of expert vote was conducted to even out or replace the uncertain or implausible emission factors which are conditioned by for example outliers in the measurement results. Each factor was discussed and if strongly needed replaced with a more coherent alternative emission factor, at least from the point of view of the HVG.

Finally, the emission factors forecast in 2008 were compared with the current values for each branch and evaluated.

The glass industry can be divided into the categories of container glass, flat glass, special glass, table ware, mineral wool, continuous glass fibers and glass frits. The production of high-temperature wool, which belongs to the glass industry within the European Union, is not taken into account in the project. So-called water glass is melted in fossil-fired glass melting furnaces and is part of the project. For reasons of previous emissions reporting, the area of glass frits is assigned to the subsector special glass, the area of continuous glass fibers is merged into the subsector glass fibers / glass wool. The mineral wool sector has been divided into the glass fibers / glass wool and rock wool subsectors.

In Germany there are around 90 glass producing sites with a daily melting capacity of more than 20 tons of glass. In total, around 7.38 million tons of glass was melted in Germany in 2019, more



than 80 percent of the amount of glass produced is accounted for by container glass and flat glass. In addition, the water glass production adds up to around 0.6 million tons of glass per year.

The large number of types of glass produced requires a wide range of raw materials, which are composed of naturally occurring minerals, artificially produced inorganic products and own or recycled cullet. The complexity of the glass and mineral fiber industry with regard to the used raw materials, the size of the system and system utilization, the type of firing and air preheating through to the oxidizing medium used is also reflected in the emissions profile of the systems concerned. Continuously operated glass melting furnaces with regenerative and recuperative air preheating, glass melting units with raw material preheaters, fuel-oxygen-heated melting units (so-called oxy-fuel furnaces), electric furnaces, glass melting systems with a combination of electrical and fossil heating as well as special designs to improve environmental compatibility are used. There are also discontinuously operated melting furnaces, e.g. pot furnaces, rotary kilns or day furnaces. Cupola furnaces and special melting units are also used in the rock wool sector. The main energy sources are natural gas, heavy fuel oil, light fuel oil and electrical energy.

In addition to the primary emission reduction measures applied, all glass melting units in Germany are equipped with exhaust gas cleaning systems, which mostly consist of electrostatic precipitators or bag filters with an upstream dry sorption stage. The separated filter dust is completely returned to the process and melted down again in the container glass and flat glass area and in many cases in the remaining areas.

The glass industry's environmental problems are mainly focused on air emissions and energy consumption. To a lesser extent, the emissions into the water as well as the solid waste and residues produced play a role.

Air pollutants include particulate emissions including particulate and filter-permeable dust constituents in the fine dust fraction, nitrogen oxides, sulfur oxides and inorganic gaseous fluorine and chlorine compounds. Fuel and raw material-related carbon dioxide releases and in some cases also carbon monoxide emissions occur. With secondary nitrogen oxide reduction measures, ammonia emissions can also occur. Emissions of organic compounds and unburned hydrocarbons or dioxins and furans play no or only a subordinate role in the exhaust gas from the melting units.

The most important current emission factors of the individual sectors of the glass industry are summarized in the following table (Table 1). The information concerns the evaluations of the available measurement results from emission measurements and the expert assessment. From the point of view of HVG, these data are to be regarded as representative.

**Table 2: Compilation of current emission factors in kilograms per ton of glass**

Component	Container Glass	Flat Glass	Table Ware	Special Glas	Fiber Wool Glass	Stone Wool	Water Glass
CO <sub>2</sub>	287	550	432	520	357	628	412
NO <sub>x</sub>	1.08	1.77	2.86	3.56	1.39	1.88	1.15
SO <sub>2</sub>	0.76	1.57	0.06	0.12	0.18	2.23	0.11
CO	0.07	0.02	0.07	0.12	0.06	0.19	0.06
HCl	0.0133	0.0446	0.0049	0.0145	0.0143	0.0470	0.0046
HF	0.0016	0.0045	0.0004	0.0094	0.0034	0.0100	0.0005
Dust	0.0086	0.0168	0.0150	0.0077	0.6110	0.6430	0.0002
NH <sub>3</sub>	0.0026	0.0191	0.0000	0.0295	1.1000	1.1630	0.0160
Total organic carbon	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6000	0.6570	0.0000

In the sector-related tabular emission factors in the report, the dust constituents are also listed individually.

In the case of CO<sub>2</sub>, the measured concentrations in the exhaust gas were used to evaluate the data. The information is the sum of raw material-related and process-related emission factors from the melting plants. In the report, the CO<sub>2</sub> emission factors from the (raw material-related) carbonate decomposition during the melting process are shown separately.

If one looks at the variation of the emission factors of the individual emission components in the different sectors of the glass industry, then the complexity of the glass and mineral fiber industry becomes apparent.

The emission factors for the glass fiber / glass wool and rock wool sectors also include the downstream processing into insulating wool or glass fiber mats.

## 1 Einleitung

Im Zusammenhang mit der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) beziehungsweise der Genfer Luftreinhaltkonvention (LRTAP) bestehen auch in Deutschland Verpflichtungen zur anforderungskonformen Emissionsberechnung relevanter Schadstoffe und deren Ergebnisübermittlung für die vorherrschenden Industriebranchen. Entsprechende Emissionsinventare bedürfen der regelmäßigen Überprüfung durch Expertenteams sowie deren Aktualisierung.

Vor dem Hintergrund, dass man länderspezifischen Emissionsfaktoren gegenüber sogenannten Default-Faktoren (Standardfaktoren) favorisiert wurde vom Umweltbundesamt am 04.04.2019 eine öffentliche Ausschreibung formuliert: ReFoPlan-Vorhaben 3719 52 1010 – “Überarbeitung der Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe in den Branchen Zementklinkerproduktion und Glasherstellung (in der Systematik der Genfer Luftreinhaltkonvention: NFR 2.A.1 und 2.A.3)“.

Die VDZ hat zusammen mit der HVG als Unterauftragnehmer den Zuschlag erhalten.

Die geforderten Arbeitspakete des Vorhabens werden für beide Industriezweige getrennt voneinander untersucht und die Ergebnisse in zwei Teilberichten zusammengefasst. Die VDZ gGmbH übernimmt das Projektmanagement und den Bereich der Zementklinkerproduktion. Die HVG ist für die Glasindustrie zuständig.

Für die Branchen Glasherstellung und Zementklinkerproduktion liegt die Bereitstellung von Daten aus der betrieblichen Überwachung und verbandseigenen Forschung mehr als zehn Jahre zurück. Die Ergebnisse der Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Glas- und Mineralfaserindustrie (FKZ: 206 425 300/02) wurden von der HVG im Schlussbericht vom Oktober 2008 zusammengefasst.

Bei der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e. V. handelt es sich um eine technisch-wissenschaftliche Vereinigung. Zweck dieser Vereinigung beziehungsweise des Vereins ist vor allem die Förderung von Wissenschaft, Umweltschutz und Forschung auf dem Gebiet des Werkstoffes Glas sowie der damit verwandten Werkstoffe. Dies wird verwirklicht insbesondere durch:

- ▶ Vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung im Bereich der Glashütten, der glasbearbeitenden und verarbeitenden Industrie und der Zulieferindustrie. Durchführung und Teilnahme an wissenschaftlichen Veranstaltungen, Tagungen, Kolloquien und Fortbildungskursen. Veröffentlichung der technischen und wissenschaftlichen Forschungsergebnisse in internationalen Zeitschriften, die sowohl den Mitgliedern wie auch der Öffentlichkeit zugänglich sind
- ▶ Förderung des Umweltschutzes bei der Glasherstellung durch Erforschung offener technisch wissenschaftlicher Fragen. Besonders durch eigenständige grundlegende Forschungsarbeiten. Zum Beispiel zur Ermittlung der Zusammenhänge bei der Entstehung von Schadstoffen und zur Entwicklung von Strategien zur Minderung und Vermeidung von Emissionen. Diese Tätigkeiten werden häufig in Zusammenarbeit und in Partnerschaft mit den zuständigen Behörden wie zum Beispiel dem Umweltbundesamt und den Landesumweltämtern ausgeführt

- ▶ Unterstützung und Mitarbeit bei Forschungseinrichtungen, Behörden sowie nationalen und internationalen Gremien. Dazu ist auch die Förderung der als gemeinnützig anerkannten Deutschen Glastechnischen Gesellschaft (kurz DGG) zu zählen, die auf demselben Sektor tätig ist
- ▶ Durchführung von eigenen vorwettbewerblichen Gemeinschaftsforschungsarbeiten auf dem Gebiet der Glasindustrie und verwandter Industrien. Ziel ist dabei, in Kooperation von Industrie und Hochschule neue Erkenntnisse der Grundlagenforschung in die industrielle Praxis umzusetzen und Probleme der Industrie durch anwendungsnahe Forschung zu lösen
- ▶ Ferner ist die Förderung des Nachwuchses und der Weiterbildung des technischen und wissenschaftlichen Personals durch Organisation und Durchführung von Schulungsmaßnahmen, Vorträgen und Workshops ein ganz wesentliches Ziel des Vereins.

Im Zuge von Umweltaktivitäten auf dem Gebiet der Luftreinhaltung führt die Messstelle der HVG seit mehr als 40 Jahren Emissionsmessungen im Bereich der Glasindustrie durch. Sie ist als amtlich notifizierte Messstelle, bekanntgegeben nach § 29b BImSchG und nach DIN EN ISO/IEC 17025: 2018 akkreditiert. Alle Analysen von Proben aus Emissionsmessungen werden im eigenen Labor durchgeführt. Seit 1991 existiert die Bekanntgabe zur Kalibrierung und Funktionsprüfung von kontinuierlich betriebenen Emissionsmessgeräten. Die Kompetenz der HVG hinsichtlich der Probenahme und Analytik wurde unter anderem durch regelmäßige und erfolgreiche Teilnahmen an nationalen und internationalen Ringversuchen bestätigt.

Die Kenntnisse der HVG auf dem Gebiet des Umweltschutzes fanden auch Einzug auf europäischer Ebene (IVU-Richtlinie beziehungsweise IPPC-Guideline) sowie im nationalen Bereich bei der VDI-Richtlinie 2578:2017 "Emissionsminderung Glashütten". Der Erfahrungsschatz der HVG dient als Grundlage für Emissionsprognosen und Gutachten auf dem Gebiet der Luftreinhaltung, beispielsweise bei der Bewertung von Emissionen aus Oxy-Fuel-Wannen beziehungsweise der Ableitung von Emissionsbegrenzungen. Die Kenntnisse und Erfahrungen aus den Arbeiten der HVG fließen unter anderem 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 in den Fachausschuss-Sitzungen der DGG sowie den Jahrestagungen der DGG berichtet. Darüber hinaus werden die Forschungsergebnisse in internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht sowie auf nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt.

## 2 Aufgabenstellung

Die Leistungsbeschreibung des Umweltbundesamtes unterteilt das Projekt “Überarbeitung der Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe in den Branchen Zementklinkerproduktion und Glasherstellung“ in Arbeitspakete.

Das Arbeitspaket AP 0 beinhaltet das Projektmanagement. Die Gesamtprojektleitung übernimmt die VDZ gGmbH mit Sitz in Düsseldorf und fungiert als zentraler Ansprechpartner und Koordinator für das Umweltbundesamt.

Die Arbeitspakete AP 1 (Glas) und Arbeitspakete AP 2 (Zement) sind inhaltlich gleich. AP 1 wird als Projektpartner für den Bereich der Glasindustrie von der HVG bearbeitet, den Bereich der Zementklinkerproduktion übernimmt die VDZ gGmbH.

Nachfolgend wird ausschließlich AP 1 betrachtet. Die Arbeitspakete unterteilen sich wie folgt:

- ▶ AP 1.1 Datensammlung
- ▶ AP 1.2 Ermittlung der Emissionsfaktoren
- ▶ AP 1.3 Unsicherheitseinschätzung
- ▶ AP 1.4 Vor- und Nachher-Abgleich

Bei der Datensammlung sollen qualitativ hochwertige anlagenspezifische Daten für die Glas- und Mineralfaserindustrie zusammengetragen und daraus Emissionsfaktoren abgeleitet werden. In der Leistungsbeschreibung des UBA wurden die zu untersuchenden anorganischen und organischen Schadstoffe für die Glasindustrie aufgelistet. Falls einzelne der dort genannten Schadstoffe bei einem oder allen Subsektoren nicht entstehen oder freigesetzt werden können und daher kein Emissionsfaktor angegeben werden kann, wird dafür die Abkürzung “NA“ (not applicable) angegeben und mit einer kurzen Begründung dokumentiert. Die Datensammlung ist in anonymisierter Form als Kalkulationsdatei dem Auftraggeber zur Verfügung zu stellen.

Grundlage der Berechnung von Emissionsfaktoren für die einzelnen relevanten Emissionskomponenten sind belastbare Messdaten, vorwiegend aus eigenen Messberichten oder aus Messberichten anderer akkreditierter Messstellen der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Emissionsüberwachung.

Zur Sicherstellung der Konsistenz der bisherigen Emissionsberichterstattung des Umweltbundesamtes sollen die Emissionsfaktoren für folgende Subsektoren ermittelt werden:

- ▶ Behälterglas
- ▶ Flachglas
- ▶ Wirtschaftsglas
- ▶ Spezialglas
- ▶ Glasfasern und Glaswolle
- ▶ Mineral- und Steinwolle

Im Vordergrund stehen die Angaben von allen relevanten Emissionsfaktoren der einzelnen Emissionskomponenten in den Subsektoren für ein möglichst aktuelles Jahr.

Messunsicherheiten bleiben bei der Berechnung der Emissionsfaktoren unberücksichtigt. Das Arbeitspaket AP 1.3 widmet sich dem Thema der Unsicherheitseinschätzung. Im letzten

Arbeitspaket findet ein Vor- und Nachher-Abgleich statt. Die aktuellen ermittelten Emissionsfaktoren werden mit den bisher vom Umweltbundesamt verwendeten Emissionsfaktoren verglichen und diskutiert. Die Arbeiten für den Bereich der Glasindustrie sind abgeschlossen. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im vorliegenden finalen Teilbericht für die Glasindustrie dokumentiert.

### 3 Glasindustrie und Emissionen von Glasschmelzwannen

Die Glasindustrie lässt sich in die Sparten Behälterglas, Flachglas, Spezialglas, Wirtschaftsglas, Mineralwolle, Endlosglasfasern und Glasfritten einteilen. Innerhalb der europäischen Union zählt auch die Produktion von Hochtemperaturwolle zur Glasindustrie. Obwohl es sich beim Wasserglas um einen typischen Glasschmelzprozess handelt, wird diese Sparte nicht in der sogenannten Glass BREF aufgeführt. Der Bereich Glasfritten wird aus Gründen der bisherigen Emissionsberichterstattung dem Subsektor Spezialglas zugeordnet, der Bereich Endlosglasfasern geht in dem Subsektor Glasfasern / Glaswolle auf. Wasserglas wird separat betrachtet. In der Summe werden innerhalb der europäischen Union etwa 38 Millionen Tonnen Glas pro Jahr produziert, wobei etwa 80 % der Gesamtproduktionsmenge auf Behälterglas und Flachglas entfallen. In Deutschland existieren etwa 90 Hüttenstandorte mit einer täglichen Schmelzleistung von mehr als 20 Tonnen Glas. Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2019 rund 7,38 Millionen Tonnen Glas. Die Zahlen stammen vom Bundesverband Glas.

Die Gesamttonnage im Jahr 2019 gliederte sich folgendermaßen auf:

- ▶ Behälterglas: 4,131 Millionen Tonnen
- ▶ Flachglas 2.014 Millionen Tonnen
- ▶ Wirtschaftsglas: 0,041 Millionen Tonnen
- ▶ Spezialglas: 0,277 Millionen Tonnen
- ▶ Glasfasern und Glaswolle: 0,311 Millionen Tonnen
- ▶ Steinwolle: 0,616 Millionen Tonnen

Die Wasserglasproduktion kann mit etwa 0,6 Millionen Tonnen pro Jahr abgeschätzt werden.

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

Die Komplexität der Glas- und Mineralfaserbranche hinsichtlich der eingesetzten Rohstoffe, der Anlagengröße und Anlagenauslastung, der Art der Befuerung und der Luftvorwärmung bis hin des zum Einsatz kommenden Oxidationsmediums spiegelt sich auch im Emissionsbild der betreffenden Anlagen wider. Zum Einsatz kommen kontinuierlich betriebene Glasschmelzwannen mit regenerativer und rekuperativer Luftvorwärmung, Glasschmelzaggregate mit Rohstoffvorwärmer, Brennstoff-Sauerstoff-beheizte Schmelzaggregate (sogenannte 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. Hafenoöfen, Drehrohröfen oder Tageswannen. Im Steinwollbereich werden auch Kupolöfen und Sonderschmelzaggregate eingesetzt. Die Hauptenergieträger sind Erdgas, schweres Heizöl, leichtes Heizöl und elektrische Energie.

Neben den angewendeten primären Emissionsminderungsmaßnahmen sind in Deutschland alle Glasschmelzaggregate mit Abgasreinigungsanlagen ausgerüstet, die meist aus Elektrofilteranlagen oder filternden Abscheidern (Gewebefilter beziehungsweise Kerzenfilter) 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 teilweise in den Prozess zurückgeführt und wieder eingeschmolzen.

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.

Zu den luftverunreinigenden Stoffen gehören die partikelförmigen Emissionen einschließlich der partikelförmigen und filtergängigen Staubinhalstoffe des Feinstaubanteils, Stickstoffoxide, Schwefeloxide sowie anorganische gasförmige Fluor- und Chlorverbindungen. Es kommt zur brennstoff- und rohstoffbedingten Kohlendioxidfreisetzung und in einigen Fällen auch zu Kohlenmonoxid Emissionen. Bei sekundären Stickstoffoxidminderungsmaßnahmen können auch Ammoniak-Emissionen auftreten. Emissionen organischer Verbindungen und nicht verbrannter Kohlenwasserstoffe beziehungsweise Dioxine und Furane spielen im Abgas der Schmelzwannen keine beziehungsweise nur eine untergeordnete Rolle.

Staubemissionen von Glasschmelzöfen entstehen hauptsächlich durch die Verdampfung von Gemenge- und Glasbestandteilen. Je höher der Dampfdruck dieser Komponenten und je größer ihre Konzentration im Gemenge ist, desto höher wird die Verdampfung sein. Hinzu addiert sich die direkte Verstaubung des Gemenges speziell in der Nähe des Einlegebereiches. Maßgebliche Einflussfaktoren sind:

- ▶ Oberofentemperatur
- ▶ Brennstoffart
- ▶ Spezifische Schmelzleistung
- ▶ Scherbenanteil
- ▶ Gemengefeuchte
- ▶ Sulfatanteil am Gemenge
- ▶ Anteil leicht flüchtiger Komponenten
- ▶ Dekrepiationsverhalten der Karbonate
- ▶ Alkalianteil am Gemenge
- ▶ Wasserdampfpartialdruck im Oberofen
- ▶ Feuerungsart
- ▶ Flammenimpuls

Die Emission überwachungspflichtiger partikelförmiger und filtergängiger Staubinhalstoffe resultiert aus den Verunreinigungen der eingesetzten Rohstoffe, aus zugesetzten Färbebeziehungsweise Entfärbungsmitteln, aus Verunreinigungen von Recyclingscherben, den Inhaltstoffen des rückgeführten Filterstaubes oder aus Gemengebestandteilen die aus Produktqualitätsgründen zugemischt werden.

Aufgrund des Hochtemperaturprozesses bei fossil befeuerten Glasschmelzanlagen steht die Emission von Stickstoffoxiden im Fokus. Die Summe ( $\text{NO}_x$ -Emissionen) aus Stickstoffmonoxidemissionen ( $\text{NO}$ ) und Stickstoffdioxidemissionen ( $\text{NO}_2$ ) von konventionell



beheizten Glasschmelzöfen sind im Wesentlichen verursacht durch die thermische  $\text{NO}_x$ -Bildung in der Flamme (Stickstoffoxidbildung nach Zeldovic). Diese ist wiederum hauptsächlich bedingt durch die Flammentemperatur, den Sauerstoffgehalt in der Reaktionszone und die Verweilzeit bei hoher Temperatur. 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 oder den installierten Regelmechanismen. Bei Glasschmelzöfen, bei denen aus Produktqualitätsgründen Salpeter eingesetzt werden muss, ist die Salpeterzersetzung eine weitere Ursache für die  $\text{NO}_x$ -Emissionen. Der  $\text{NO}_2$ -Anteil an der Gesamtstickstoffoxidemission von Glasschmelzöfen liegt in den meisten Fällen deutlich unterhalb von 10 % und nur in Ausnahmefällen im Spezialglasbereich treten  $\text{NO}_2$ -Anteile bis zu 30 % auf.

Schwefeloxidemissionen ( $\text{SO}_x$ ) im Abgas von Glasschmelzöfen resultieren aus dem Schwefelgehalt der eingesetzten Brennstoffe sowie aus dem Schwefelgehalt der verwendeten Rohstoffe (zum Beispiel Natriumsulfat, Filterstaub, Scherben) und sie werden durch die Schwefellöslichkeit des erschmolzenen Glases beeinflusst. Finden sich genügend Reaktionspartner, zum Beispiel in Form von Alkalien im Abgas, dann wird ein entsprechender Anteil der gasförmigen Schwefeloxidverbindungen im Staub gebunden. Beeinflusst wird die Höhe der Schwefeloxidemissionen durch die vorherrschenden Verbrennungsbedingungen. Zumindest kurzfristig bewirkt eine reduzierende Oberofenatmosphäre die Freisetzung von Schwefeloxiden. In den Ablagerungen im Kammersystem befinden sich ebenfalls hohe Anteile an Schwefel.

Emissionen anorganischer gasförmiger Fluor- und Chlorverbindungen ( $\text{HCl}$  und  $\text{HF}$ ) im Abgas stammen in der Regel aus unerwünschten Verunreinigungen der eingesetzten Rohstoffe. Die im Spezialglasbereich anzutreffende sogenannte Kochsalzläuterung führt in Abhängigkeit der Einsatzmengen zu einem enormen Anstieg der Emissionen anorganischer gasförmiger Chlorverbindungen. Im Behälterglasbereich wird die  $\text{HCl}$ -haltige Abluft aus den Heißendvergütungsanlagen den Wannenabgasen beigemischt und erhöht damit die  $\text{HCl}$ -Frachten im Rohgas vor der Filteranlage. Auf der anderen Seite können bei der Produktion von fluorgetrübbten Gläsern hohe  $\text{HF}$ -Konzentrationen im Abgas auftreten.

Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) entsteht vorwiegend bei der unvollständigen Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe.  $\text{CO}$ -Emissionen resultieren vorwiegend aus dem Bemühen der Anlagenbetreiber heraus, aus energetischen Gründen und zur Reduzierung von Stickstoffoxiden eine nahstöchiometrische Verbrennung zu realisieren.

Ammoniakemissionen ( $\text{NH}_3$ ) im Abgas von Glasschmelzanlagen treten nur beim Betrieb von SCR- Katalysatoren in Form von Ammoniak schlupf auf. Mineral- und glasfaserproduzierende Anlagen emittieren bei der Nachbearbeitung ebenfalls Ammoniak sowie flüchtige organische Verbindungen.

Borhaltige Rohstoffe werden bei der Schmelze von sogenannten Borosilicatgläsern eingesetzt, um zum Beispiel die chemische Beständigkeit zu erhöhen oder einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu erzielen. Neben Glasfasern zur Verstärkung von Kunststoffbauteilen oder textilen Anwendungen (E-Glas), findet man borhaltige Gläser bei der Glaswollproduktion zu Isolierzwecken (C-Glas), im Spezialglasbereich (zum Beispiel Laborgläser, Glasrohre, Displaygläser), im Wirtschaftsglasbereich (zum Beispiel hitzebeständiges Kochgeschirr) und bei den sogenannten Frittengläsern (Pigmente, Glasemails und keramische Emails). Zum Schmelzen der Gläser kommen überwiegend fossile Brennstoffe zum

Einsatz, insbesondere kleine Schmelzaggregate nutzen auch über Elektroden in die Schmelze eingebrachte elektrische Energie. Problematisch sind die entstehenden Abgase beim Schmelzprozess. Man findet im Abgas vor Eintritt in die Abgasreinigungsanlage neben den klassischen Emissionskomponenten auch mehr oder weniger hohe Konzentrationen an Borverbindungen. Gasförmige Borverbindungen liegen in Abhängigkeit des erschmolzenen Glases und den aus der Schmelze verdampften Komponenten, der Feuerungsart sowie den vorherrschenden Abgasrandbedingungen wie Temperatur, Feuchte oder CO<sub>2</sub>-Gehalt in unterschiedlichen Konzentrationen im Abgas vor. Insbesondere im Behälterglasbereich können ebenfalls Boremissionen auftreten, vermutlich verursacht durch die hohen Fremdscherbenanteile.

Kohlendioxidemissionen entstehen bei der Verbrennung fossiler Energieträger und aus der Karbonatzersetzung der eingesetzten Rohstoffe wie Soda, Kalkstein oder Dolomit. CO<sub>2</sub> wird im Gegensatz zu anderen Abgasbestandteilen von der Abgasreinigungsanlage nicht beeinflusst, d.h. die Emissionen im Rohgas und im Reingas sind identisch. Im Abschlussbericht der Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Glas- und Mineralfaserindustrie (FKZ: 206 425 300/02) aus dem Jahr 2008 ergaben messtechnisch nachgewiesene CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren im Jahr 2005 für die Summe aus brennstoff- und rohstoffbedingten Emissionen von 340 bis zu 600 Kilogramm pro Tonne Glas.

Bereits im Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 bis 2005 wird eine CO<sub>2</sub>-Berechnungsmethode unter Berücksichtigung der Gewichtsanteile von Glasoxiden (CaO, Na<sub>2</sub>O, MgO und BaO) und des Scherbenanteils für die verschiedenen Glasbranchen aufgeführt. Demnach ergeben sich für die verschiedenen Glassorten folgende stöchiometrischen Emissionsfaktoren (ohne Scherben) für CO<sub>2</sub>:

**Tabelle 2: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren gemäß nationalem Inventarbericht**

Glasbranche	Emissionsfaktor in Kilogramm pro Tonne Glas
Behälterglas	193
Flachglas	208
Wirtschaftsglas	120
Spezialglas	113
Glasfasern	198
Steinwolle	299

Die HVG besitzt ein eigenes Berechnungstool, um aus den eingesetzten Rohstoffen den Schmelzverlust durch die Karbonatzersetzung oder die Freisetzung von Wasserdampf, SO<sub>3</sub> oder NO<sub>2</sub> zu berechnen. Für die Behälterglasindustrie beispielsweise kann für die CO<sub>2</sub>-Emission ein durchschnittlicher Schmelzverlust, bezogen auf trockenes Gemenge ohne Scherben, von rund 16,5 % und für die Flachglasindustrie von rund 17,5 % herangezogen werden. Damit lassen sich auch die Abgaben in der oben aufgeführten Tabelle verifizieren. Wirtschaftsgläser besitzen oft vergleichbare Glaszusammensetzungen wie Behältergläser, so dass nach den Erfahrungen der HVG ein CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor im Bereich von 200 Kilogramm pro Tonne anzusetzen ist.

Die am 1. Oktober 2002 in Kraft getretene Verwaltungsvorschrift TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) befindet sich seit einigen Jahren im Stadium der Novellierung. Auf die bestehenden beziehungsweise neuen Emissionsbegrenzungen wird im Weiteren nicht eingegangen. Die in der TA Luft genannten Emissionswerte beziehen sich bei flammenbeheizten

Glasschmelzöfen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im trockenen Abgas von 8 Volumenprozent, bei flammenbeheizten Hafentöpfen und Tageswannen beträgt der Bezugssauerstoffgehalt 13 Volumenprozent.

Anmerkung zum spezifischen Energieverbrauch: Der spezifische Energieverbrauch eines Schmelzaggregates hängt maßgeblich vom Glastype 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. Die spezifische produktbezogene Emission einer Komponente ist unmittelbar an den spezifischen Energieverbrauch gekoppelt. Das heißt, die Emissionsfaktoren der einzelnen Komponenten eines kleinen Schmelzaggregates mit einem konstruktionsbedingten hohen spezifischen Energieverbrauch liegen immer deutlich über denen eines großen Schmelzaggregates mit niedrigerem spezifischen Energieverbrauch.

## 4 Messverfahren und Messunsicherheiten

Dem Projekt liegen ausschließlich Messergebnisse vor, die überwiegend von der Messstelle der HVG und zum kleinen Teil von Messstellen gewonnen wurden, die amtlich notifiziert beziehungsweise nach §29b BImSchG bekanntgegeben und nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 oder DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert sind.

In der aktuellen Akkreditierungsurkunde wird der HVG bestätigt, dass das Prüflaboratorium die Kompetenz nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 besitzt, Prüfungen in folgenden Bereichen durchzuführen. Folglich ein Ausschnitt der Urkunde:

*“Ermittlung von anorganischen partikelförmigen Luftinhaltsstoffen bei Emissionen; Prüfverfahren zur Bestimmung von anorganischen gasförmigen Luftinhaltsstoffen bei Emissionen; Kalibrierung und Funktionsprüfungen kontinuierlich arbeitender Emissionsmeseinrichtungen für partikelförmige Luftinhaltsstoffe; Verfahren zur Kalibrierung und Funktionsprüfungen kontinuierlich arbeitender Emissionsmeseinrichtungen für anorganische gasförmige Luftinhaltsstoffe; Modul Immissionsschutz.“*

In der Tabelle 3 sind die zum Einsatz kommenden Messverfahren aufgelistet.

**Tabelle 3: Die Emissionskomponenten und die zugehörigen Regelwerke**

Komponente	Regelwerk
<b>Staub</b>	DIN EN 13284-1:2018 – Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei geringen Staubkonzentrationen – Teil 1: Manuelles gravimetrisches Verfahren. VDI 2066 Blatt 1:2006 – Gravimetrische Bestimmung der Staubbeldung
<b>Partikelförmige und filtergängige Staubinhaltsstoffe</b>	VDI 3868 Blatt 1:1994 – Messen der Gesamtemission von Metallen, Halbmetallen und Ihren Verbindungen – Manuelle Messung in strömenden, emittierten Gasen – Probenahmesystem für partikelgebundene und filtergängige Stoffe. DIN EN 14385:2004 – Bestimmung der Gesamtemission von As, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Ti und V
<b>Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>)</b>	DIN EN 14792:2017 – Bestimmung der Massenkonzentration von Stickstoffoxiden – Standardreferenzverfahren: Chemilumineszenz
<b>Kohlenmonoxid (CO)</b>	DIN EN 15058:2017 – Bestimmung der Massenkonzentration von Kohlenmonoxid – Standardreferenzverfahren: Nicht-dispersive Infrarotspektrometrie
<b>Schwefeloxide (SO<sub>2</sub>)</b>	DIN EN 14791:2017 – Bestimmung der Massenkonzentration von Schwefeloxiden, Standardreferenzverfahren
<b>Anorganische gasförmige Chlorverbindungen (HCl)</b>	DIN EN 1911:2010 – Bestimmung der Massenkonzentration von gasförmigen Chloriden, angegeben als HCl, Standardreferenzverfahren
<b>Anorganische gasförmige Fluorverbindungen (HF)</b>	VDI 2470 Blatt 1:1975 – Messen gasförmiger Fluorverbindungen – Absorptions-Verfahren
<b>Ammoniak (NH<sub>3</sub>)</b>	VDI 3878:2017 – Messen von Ammoniak (und dampfförmigen Ammoniumverbindungen) – Manuelles Verfahren
<b>Quecksilber (Hg)</b>	DIN EN 13211:2001 – Manuelles Verfahren zur Bestimmung der Gesamtquecksilber-Konzentration

Komponente	Regelwerk
Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	DIN EN 14789:2017 – Bestimmung der Volumenkonzentration von Sauerstoff – Standardreferenzverfahren: Paramagnetismus
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	ISO 12039:2019 – Determination of the mass concentration of carbon monoxide, carbon dioxide and oxygen in flue gas – Performance characteristics of automated measuring systems
Abgasvolumenstrom	DIN EN ISO 16911-1:2013 – Manuelle und automatische Bestimmung der Geschwindigkeit und des Volumenstroms in Abgaskanälen - Teil 1: Manuelles Referenzverfahren
Abgasfeuchte	DIN EN 14790: 2017 – Bestimmung von Wasserdampf in Leitungen, Standardreferenzverfahren
Messanforderungen	DIN EN 15259:2008 – Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht

Alle Messstellen müssen über ein Verfahren verfügen, zu jeder Emissionskomponente die entsprechende Messunsicherheit zu ermitteln.

Die VDI-Richtlinie 4219:2009 (Ermittlung der Messunsicherheit von Emissionsmessungen mit diskontinuierlichen Messverfahren) wurde im Jahr 2015 überprüft und bestätigt. Die Richtlinie beschreibt zwei gleichwertige Ansätze zur Ermittlung der Messunsicherheit:

- ▶ Direkter Ansatz auf Basis von Doppelbestimmungen mit dem vollständigen Messverfahren
- ▶ Indirekter Ansatz mit getrennter Betrachtung aller zur Messunsicherheit beitragenden Teilschritte oder Eingangsgrößen des vollständigen Messverfahrens

Die Messunsicherheiten der einzelnen Emissionskomponenten wurden unter Zuhilfenahme des direkten Ansatzes mit Doppelbestimmungen gewonnen. Sie wurden nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 4219 bei verschiedenen Konzentrationsniveaus für das Gesamtverfahren bestehend aus Probenahme und Analytik im Abgas unterschiedlicher Glasschmelzwannen ermittelt.

Bei den partikelförmigen und filtergängigen Staubinhalstoffen wurde bei der Probenahme der indirekte Ansatz mit Analyse der Teilschritte des Messverfahrens gewählt. Bei der Analytik wurde auf den direkten Ansatz zurückgegriffen. Für das Gesamtverfahren wurden beide Teilschritte zusammengefügt. Die Berechnung der Messunsicherheiten bei der Probenahme erfolgte unter Berücksichtigung der Varianzermittlung sämtlicher Einflussgrößen. Die folgenden zeigen die erweiterten Messunsicherheiten für Staub und gasförmige Komponenten.

**Tabelle 4: Messunsicherheiten der kontinuierlichen Probenahmen, alle Angaben in Milligramm pro Kubikmeter**

	NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	CO
<b>Konzentrationsniveau</b>	0 bis 400	400 bis 800	0 bis 100	100 bis 1000
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	5	14	2	5

**Tabelle 5: Messunsicherheit der kontinuierlichen Probenahme bei Sauerstoff, alle Angaben in Volumenprozent**

	O <sub>2</sub>
<b>Konzentrationsniveau</b>	0 bis 25
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	0,2

**Tabelle 6: Messunsicherheit der diskontinuierlichen Probenahme von HCl und HF, alle Angaben in Milligramm pro Kubikmeter**

	HCl	HCl	HCl	HF	HF	HF
<b>Konzentrationsniveau</b>	0 bis 15	15 bis 30	Größer 30	0 bis 2,5	2,5 bis 5	Größer 5
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	1,5	1,7	3,1	0,3	0,6	0,6

**Tabelle 7: Messunsicherheit der diskontinuierlichen Probenahme von SO<sub>2</sub> und NH<sub>3</sub>, alle Angaben in Milligramm pro Kubikmeter**

	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>
<b>Konzentrationsniveau</b>	0 bis 400	400 bis 800	Größer 800	0 bis 1	1 bis 5	Größer 50
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	11	29	73	0,1	0,2	5,3

**Tabelle 8: Messunsicherheit der diskontinuierlichen Probenahme von Staub, alle Angaben in Milligramm pro Kubikmeter**

	Staub	Staub	Staub
<b>Konzentrationsniveau</b>	0 bis 15	15 bis 30	Größer 30
<b>Erweiterte Messunsicherheit</b>	0,5	1,3	1,8

Zusätzlich gibt es für die Staubinhaltsstoffe ermittelte Messunsicherheiten. Tabelle 9 und Tabelle 10 stellen die Messunsicherheiten der Staubinhaltsstoffe dar.

**Tabelle 9: Messunsicherheiten der partikelförmigen Staubinhaltsstoffe**

Element	Wellenlänge in Nanometer	Messbereich in Mikrogramm pro Kubikmeter	Erweiterte Messunsicherheit in Mikrogramm pro Kubikmeter
<b>As</b>	193,7	0 bis 50	2
<b>Cd</b>	214,4	0 bis 50	2
<b>Co</b>	228,6	0 bis 500	14
<b>Cr</b>	205,5	0 bis 500	24
<b>Cu</b>	324,7	0 bis 500	12
<b>Mn</b>	260,5	0 bis 400	11
<b>Ni</b>	231,6	0 bis 400	10
<b>Pb</b>	182,2	0 bis 500	29
<b>Sb</b>	206,8	0 bis 500	17
<b>Se</b>	196,0	0 bis 500	11
<b>Sn</b>	189,9	0 bis 500	14
<b>V</b>	292,4	0 bis 400	12

Die Messunsicherheiten bei der Ermittlung der Abgasrandbedingungen wie zum Beispiel dem Abgasvolumenstrom werden berücksichtigt und arbeitstäglich dokumentiert.

**Tabelle 10: Messunsicherheiten der filtergängigen Staubinhaltsstoffe**

Element	Wellenlänge in Nanometer	Messbereich in Mikrogramm pro Kubikmeter	Erweiterte Messunsicherheit in Mikrogramm pro Kubikmeter
As	189,0	0 bis 20	2
As	189,0	20 bis 75	3
Cd	214,4	0 bis 20	1
Cd	228,8	20 bis 75	3
Co	228,6	0 bis 210	5
Co	228,6	210 bis 750	23
Cr	205,5	0 bis 450	7
Cr	205,5	450 bis 1450	37
Cu	327,3	0 bis 450	8
Cu	327,3	450 bis 1450	23
Mn	260,5	0 bis 450	8
Mn	260,5	450 bis 1450	38
Ni	231,6	0 bis 210	8
Ni	231,6	210 bis 750	30
Pb	220,3	0 bis 210	5
Pb	220,3	210 bis 750	14
Sb	206,8	0 bis 450	18
Sb	206,8	450 bis 1450	80
Se	196,0	0 bis 210	17
Se	196,0	210 bis 820	34
Sn	189,9	0 bis 700	8
Sn	292,4	700 bis 1450	22
V	292,4	0 bis 450	7
V	292,4	450 bis 1450	38



## 5 Projektentwicklung

Die Datenerfassung wurde Ende April 2020 abgeschlossen. Im Vordergrund der Datensammlung stand die Ermittlung aktueller Emissionsfaktoren von allen relevanten Luftschadstoffen der verschiedenen Branchen der Glasindustrie. Emissionsfaktoren beschreiben die emittierten Schadstoffe bezogen auf eine Tonne produziertes Glas in der Einheit Kilogramm oder Gramm pro Tonne Glas.

Die Systematik der chronologischen Dokumentation der vorhandenen Datensammlung der HVG in Form einer EXCEL-Tabelle wurde beibehalten und mit neuen Messdaten aufgestockt. Es handelt sich um dieselbe Datensammlung wie für den Schlussbericht über die Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Glas- und Mineralfaserindustrie aus dem Jahr 2008. In der aktuellen Version der Datensammlung wird der Zeitraum von 2003 bis 2007 für das Jahr 2005 betrachtet, das Jahr 2010 setzt sich aus 2008 bis 2012 zusammen und Messwerte von 2013 bis 2017 findet man unter dem Jahr 2015. Um für das aktuelle Jahr 2020 repräsentative Ergebnisse zu definieren, wird der Betrachtungszeitraum von 2015 bis 2020 herangezogen. Dies hat natürlich zu Folge, dass es Überschneidungen zwischen den Jahren 2015 und 2020 gibt, da zum Teil Ergebnisse aus denselben Zeiträumen verwendet werden. Zu beachten ist, dass die Datensammlung im April 2020 beendet wurde und somit nicht alle Ergebnisse aus dem Jahr 2020 mit in die Dokumentation aufgenommen werden konnten. Die Datenbank wurde nach dem 4-Augenprinzip hinsichtlich der eingegebenen Daten und der Berechnungsfunktionen überprüft.

Berücksichtigt wurden überwiegend von der HVG im Zuge der Emissionsüberwachung gewonnene Messergebnisse aus wiederkehrenden Emissionsmessungen nach §28 BImSchG, Berichte von Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Luftreinhaltung und Kalibriermessungen kontinuierlicher Messeinrichtungen sowie Funktionsprüfungen. Zur Info: Messungen nach §28 BImSchG und Kalibriermessungen finden pro Anlage alle drei Jahre statt, Funktionsprüfungen dagegen jährlich. Messungen im Rahmen der kontinuierlichen Emissionsüberwachung beinhalten weniger gemessene Schadstoffe als die Emissionsberichte nach §28 BImSchG, liefern dennoch zusätzlich einen großen Emissionsdatensatz für die Komponenten NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> sowie Gesamtstaub.

Unterstützung fand das Projekt von Glashütten, die nicht in Zusammenarbeit mit der HVG stehen. Diese stellten zahlreiche Berichte anderer akkreditierter Messinstitute zur Verfügung. In der Tabelle 11 sind die Anzahl der berücksichtigten Messberichte sowie die Subsektoren aufgelistet.

**Tabelle 11: Anzahl ausgewerteter Berichte im aktuellen Zeitraum**

Sektor	Anzahl gesammelter Berichte von 2015 bis 2020
Behälterglas	108
Flachglas	33
Wirtschaftsglas	6
Spezialglas (mit Glasfritten)	58
Glasfaser, Glaswolle	7
Steinwolle	4
Wasserglas	13
<b>Summe:</b>	<b>229</b>

Für die Behälterglasindustrie stehen viele Emissionsdaten zur Verfügung, wodurch eine repräsentative Darstellung des Emissionsbildes möglich ist. Für die anderen Subsektoren stehen zum Teil deutlich weniger bis sehr wenig Daten zur Verfügung. Dadurch entstehen große Lücken in der Dokumentation. Außerdem können bei unzureichender Anzahl von Messungen pro Untersuchungsjahr Werte auftauchen, die die Branche nicht repräsentativ abbilden.

Zur Berechnung der Emissionsfaktoren werden zunächst die Konzentrationen der Abgaskomponenten mit dem zum Zeitpunkt herrschenden Abgasvolumenstrom multipliziert. Es ergibt sich der momentane Massenstrom. Die Konzentrationen und Volumenströme sind stets auf Normbedingungen bezogen. Die Normbedingung ist ein Zustand bei einer Temperatur von 273 Kelvin und 1013 Millibar. Der resultierte Massenstrom wird dann durch die Schmelzleistung dividiert. Es wurde strikt darauf geachtet, dass nicht versehentlich zum Beispiel eine auf 8 Sauerstoffvolumenprozent berechnete Konzentration mit dem Volumenstrom bei einem abweichenden Sauerstoffgehalt multipliziert wurde.

Da Glasschmelzwannen sehr unterschiedliche Tonnagen aufweisen werden die Emissionsfaktoren dementsprechend nach Tonnage gewichtet und nicht arithmetisch ermittelt. Für die Auswertung wurden alle Mittelwerte der Messergebnisse in eine Datenbank in Form einer Excel Tabelle eingespeist. Mithilfe der integrierten Funktionen können die Emissionsdaten jahresbezogen ermittelt werden. Dem Auftraggeber wurden die Tabellen in anonymisierter Form zur Verfügung gestellt. Die ausgetauschten Daten geben somit keinerlei Rückschluss auf Unternehmen oder Standort des Glasherstellers.

Zur Berechnung von prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren muss neben dem Scherbenanteil auch der Gemengesatz bekannt sein. Diese Daten stehen jedoch bei vielen Anlagen nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden Berechnungen aus zurückliegenden und aktuellen Untersuchungen der HVG dazu genutzt, für die Branchen Ersatzwerte zu generieren. In der Tabelle 12 sind die entsprechenden Werte zusammengefasst.

**Tabelle 12: Ersatz und Annahmewerte für Schmelzverlust und Scherbenanteil**

<b>Sektor</b>	<b>Schmelzverlust in Prozent</b>	<b>Prozentualer angenommener Scherbenanteil, falls im Bericht keine Angabe vorliegt</b>
<b>Behälterglas</b>	16,5	65
<b>Flachglas</b>	17,5	20
<b>Wirtschaftsglas</b>	12	40
<b>Spezialglas</b>	10	40
<b>Glasfritten</b>	15	0
<b>Glaswolle</b>	17	60
<b>Glasfasern</b>	16	0
<b>Steinwolle</b>	25	0
<b>Wasserglas</b>	13,7	0

Den prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren werden nachfolgend auch informativ, die aus den Emissionsmessungen sich ergebenden Werte gegenübergestellt.

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

Bei den Ausführungen handelt es sich nicht um ein Positionspapier der Glasindustrie. Es werden nahezu ausschließlich Messdaten aus Emissionsmessungen ausgewertet, die bei unzureichender Datenlage durch weitere Informationswege untermauert wurden.

## 6 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Projektes branchenbezogen dokumentiert. Auffälligkeiten bei der Datensammlung oder der Auswertung werden sektorbezogen diskutiert. Messergebnisse organischer oder hochtoxischer Verbindungen von akkreditierten Messinstituten liegen im Abgas von Glasschmelzwannen nicht vor. Sie spielen auch aufgrund des Hochtemperaturprozesses bei fossiler Befeuerung erwartungsgemäß keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund müssen alle vom Umweltbundesamt zu berücksichtigende organische Komponenten mit „NA“ (not applicable) bezeichnet werden. Die Komponenten wurden in den nachfolgenden tabellarischen Dokumentationen nicht gesondert aufgelistet.

In einem gesonderten Kapitel (Expertenvotum) werden die einzelnen Emissionsfaktoren, die sich zum Teil aus einer unzureichenden Datenlage ergeben, erneut betrachtet und ggf. neu bewertet.

### 6.1 Behälterglas

Behältergläser werden in Deutschland überwiegend in regenerativ befeuerten U-Flammenwannen mit regenerativer Luftvorwärmung erschmolzen. Als Energieträger dient nahezu ausschließlich Erdgas. Weiterhin existieren regenerativ beheizte Querbrennerwannen, wenige Oxy-Fuel-Wannen, sogenannte Low-NO<sub>x</sub>-Melter beziehungsweise Wannen mit rekuperativer Luftvorwärmung. Einige Schmelzwannen sind mit Rohstoffvorwärmssystemen ausgerüstet. Im Bereich der Behälterglasindustrie gibt es keine Anlagen mit sogenannter nichtkatalytischer Technologie oder SNCR.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Behälterglasindustrie aufgeführt. Die HVG betreibt zahlreiche Messungen in Glashütten, die sich auf Behälterglas spezialisiert haben. Für die Behälterglasindustrie konnten somit vergleichsweise viele Daten ausgewertet werden. Tabelle 13 gibt die genaue Anzahl an ausgewerteten Berichten für jeden betrachteten Zeitraum.

**Tabelle 13: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Behälterglasindustrie**

2005	2010	2015	2020
39	56	89	108

Es ist zu erwähnen, dass die steigende Anzahl an Berichten nicht auf eine erhöhte Messtätigkeit der HVG zurückzuführen ist. Die Zusendung weiterer Berichte anderer Messinstitute hat dazu geführt, dass besonders für die Jahre 2015 bis 2020 ein erhöhter Datensatz entstanden ist. Zusätzlich wurden, wie in Kapitel 5 beschrieben, Kalibrierberichte und Berichte über Funktionsprüfungen mit in die Datenbank aufgenommen. Dadurch entstanden mehr verwertbare Ergebnisse für Staub, Stickoxide und Schwefeloxide.

#### 6.1.1 Behälterglas: Gasförmige Schadstoffe

Aufgrund des großen Datensatzes, der der HVG im Bereich der Behälterglasindustrie zur Verfügung steht, konnte ein aussagekräftiges Emissionsbild erzeugt werden. Insgesamt sind deutliche, sich nach unten hin entwickelnde Trends bei den gasförmigen Emissionskomponenten im Bereich der Luftreinhalte ersichtliche.

**Tabelle 14: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	334,65	323,17	286,47	286,66
CO <sub>2</sub> (Prozess)	69,03	69,43	67,11	66,53
NO <sub>x</sub>	1,4933	1,3800	1,0996	1,0766
SO <sub>2</sub>	1,2493	1,1362	0,7393	0,7590
HCl	0,0254	0,0238	0,0162	0,0133
HF	0,0025	0,0028	0,0019	0,0016
CO	0,3452	0,2052	0,1482	0,0732
NH <sub>3</sub>	0,0027	0,0004	0,0010	0,0000

Die als CO<sub>2</sub> ausgewiesenen Kohlendioxid-Emissionsfaktoren spiegeln die Werte wider, die sich aus dem gemessenen CO<sub>2</sub>-Gehalt während der Emissionsmessung multipliziert mit dem Abgasvolumenstrom und dividiert durch die vorherrschende Tonnage ergeben. Es handelt sich also um die Summe aus brennstoff- und rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der abnehmende Trend dürfte vorwiegend auf den leicht schrumpfenden spezifischen Energieverbrauch der Branche zurückzuführen sein. Bei den Untersuchungen aus dem Jahr 2008 lag der spezifische Energieverbrauch inklusive Elektrozusatzheizung von allen untersuchter Anlagen bei 4682 Kilojoule pro Kilogramm Glas. Bei dem aktuellen Untersuchungsraum von 2015 bis 2020 liegt der Wert bei 4333. Der Scherbenanteil ist in den beiden Untersuchungszeiträumen von 61 % auf 68 % im Mittel gestiegen. Die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind auf die Zersetzung von Karbonat der einzelnen Gemengebestandteile und den daraus resultierenden Schmelzverlust zurückzuführen. Hier sind keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Jahren zu erkennen, wenngleich ein leicht abfallender Trend vorliegt.

Besonders lässt sich die Entwicklung der Stickoxidemissionen hervorheben. Der ermittelte NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor von 1990 bis 1992 (siehe Bericht über Emissionsfaktoren im Bereich der Glasindustrie aus dem Jahr 2008) betrug 3,388 Kilogramm pro Tonne Glas. Damit konnte mit dem heutigen Stand von rund 1,077 eine Drittelung dieses Werts erreicht werden. Interessant ist auch, dass in dem Schlussbericht über die Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Glas- und Mineralfaserindustrie aus dem Jahr 2008 für das Jahr 2020 ein NO<sub>x</sub>-Wert von 1,147 Kilogramm pro Tonne Glas prognostiziert wurde. Der aktuelle Emissionsfaktor für das Jahr 2020 für Stickstoffoxide liegt nur rund 6 % unterhalb des prognostizierten Wertes.

Der Kohlenmonoxid-Emissionsfaktor für 2020 ist sehr niedrig. Dies hängt auch damit zusammen, dass Anlagenbetreiber neben der Einhaltung von NO<sub>x</sub>-Emissionswerten auch zunehmend einen überwachungspflichtigen Emissionswert für CO einhalten müssen. In der Regel liegt dieser bei 100 Milligramm pro Kubikmeter.

Beim HCl und HF konnten bislang befürchtete Anreicherungseffekte durch die Filterstaubrückführung nicht messtechnisch bestätigt werden.

Die NH<sub>3</sub>-Emissionen der Behälterglasindustrie liegen auf einem sehr niedrigen Niveau. Für den Zeitraum 2015 bis 2020 konnte lediglich eine Messung mit sekundärer NO<sub>x</sub>-Minderungstechnologie berücksichtigt werden. Der normierte NH<sub>3</sub>-Schlupf lag bei dieser Messung bei 1,3 Milligramm pro Kubikmeter, woraus für diese Anlage ein NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktor von 0,0021 Kilogramm pro Tonne Glas resultiert. Bezogen auf die gesamte Behälterglasindustrie ist damit der Emissionsfaktor für Ammoniak vernachlässigbar. Aktuell sind nach dem

Kenntnisstand der HVG in Deutschland im Behälterglasbereich 3 keramische SCR-Katalysatoren hinter Elektrofilteranlagen installiert. Hinzu addieren sich mindestens 4 keramische Filterkerzenanlagen mit katalytischer Beschichtung. Damit wird der NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktor zukünftig an Bedeutung gewinnen. Falls alle Produktionsanlagen zukünftig mit sekundärer NO<sub>x</sub>-Minderungstechnik ausgerüstet werden sollten, dann dürfte der Emissionsfaktor für NH<sub>3</sub> etwa mit dem für HCl vergleichbar sein.

### 6.1.2 Behälterglas: Partikelförmige Schadstoffe

Zu den partikelförmigen Schadstoffen gehört der Gesamtstaub. Nach dem Auswiegen des belegten Messfilters zur Bestimmung der Staubkonzentration wird das Messfilter mittels Säuren und Mikrowellen-Druckaufschlussverfahren aufgeschlossen, damit in die flüssige Form überführt und auf die relevanten Schwermetalle untersucht. Diese Schwermetalle beziehungsweise Schwermetallverbindungen können neben der partikelförmigen Form auch filtergängig vorliegen. Zusätzlich werden deshalb die filtergängigen Bestandteile bei der Probenahme nach dem Passieren des Messfilters durch eine oberhalb der Abgastemperatur beheizte, inerte Sonde geleitet und in einer Absorptionslösung gesammelt. Die Absorptionslösungen werden ebenfalls auf die relevanten Metalle analysiert. Tabelle 15 stellt die Emissionsfaktoren von Staub und die Summe der partikelförmigen und filtergängigen Metalle dar.

**Tabelle 15: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas**

Komponente	2005	2010	2015	2020
<b>Staub</b>	17,78	17,58	10,82	8,63
<b>PM 10</b>	15,29	15,12	9,30	7,42
<b>PM 2,5</b>	9,96	9,84	6,06	4,83
<b>As</b>	0,0149	0,0701	0,0236	0,0156
<b>Cd</b>	0,0024	0,0038	0,0030	0,0020
<b>Co</b>	0,0006	0,0039	0,0002	0,0004
<b>Cr</b>	0,0275	0,0197	0,0160	0,0141
<b>Cu</b>	0,0082	0,0000	0,0077	0,0085
<b>F</b>	0,0002	0,0001	0,0005	0,0010
<b>Mn</b>	0,0053	0,0001	0,0015	0,0050
<b>Ni</b>	0,0094	0,0585	0,0058	0,0036
<b>Pb</b>	0,2430	0,2903	0,1385	0,1029
<b>Sb</b>	0,0002	0,0012	0,0032	0,0032
<b>Se</b>	0,6764	1,3131	0,2802	0,2550
<b>Sn</b>	0,2537	0,3458	0,1772	0,0837
<b>V</b>	0,0114	0,0092	0,0007	0,0001

Der aktuelle Emissionsfaktor für Gesamtstaub hat sich mit einem Wert von 8,63 Gramm pro Tonne Glas in den letzten 15 Jahren halbiert.

Emissionsfaktoren von Staubinhalstoffen werden nicht einzeln diskutiert. Anzumerken ist allerdings, dass in den Genehmigungsbescheiden der einzelnen Anlagen nicht immer alle relevanten Komponenten gefordert werden. Dementsprechend werden die Komponenten auch nicht explizit in den Messberichten aufgeführt. Die HVG misst und analysiert in den letzten 5 Jahren immer alle oben aufgeführten Staubinhalstoffe. Die Auswertung zusätzlicher Berichte von weiteren Messinstituten mit fehlenden Angaben führt zwangsläufig zu einer Erhöhung der Unsicherheiten.

Der Feinstaubanteil am emittierten Gesamtstaub wurde bei den vorliegenden Messberichten nicht bestimmt. Die HVG hat in den zurückliegenden Jahren viele Messungen im Abgas von Behälterglaswannen durchgeführt. Die Probenahme erfolgte nach der VDI-Richtlinie 2066, Blatt 10:2004 „Messung der Emissionen von PM 10 und PM 2,5 an geführten Quellen nach dem Impaktionsverfahren“. Nach dem aktuellen Kenntnisstand liegt der Anteil an emittierten Feinstaub mit einem Partikeldurchmesser von 10 Mikrometer (PM 10) bei 86 %, die Feinstaubfraktion von 2,5 Mikrometer (PM 2,5) nimmt einen Anteil von 56 % ein. Die ausgewiesenen Emissionsfaktoren für Feinstaub wurden durch Multiplikation der Feinstaubanteile mit dem Emissionsfaktor für Staub berechnet.

### **6.1.3 Behälterglas: Bor**

Die HVG beschäftigt sich zusätzlich seit vielen Jahren mit der effektiven Abscheidung von filtergängigen Borverbindungen aus dem Abgas von Borosilicatglas-Schmelzwannen. Bei borhaltigen Gläsern muss man im Abgas neben den staubförmigen Borverbindungen auch mit einem gasförmigen Anteil rechnen. Der Anteil an staubförmigen Borverbindungen im Rohgas ist stark vom Alkaligehalt der erschmolzenen Gläser abhängig. Bei alkalireichen Gläsern findet man im Abgas hohe Gesamtstaubkonzentrationen, wodurch entsprechende Reaktionspartner beispielsweise zur Natriumboratbildung zur Verfügung stehen. Bei alkaliarmen Gläsern steigen die gasförmigen Borverbindungen im Abgas stark an. Bei alkalifreien Gläsern spielen die staubförmigen Borverbindungen nur eine untergeordnete Rolle. Gasförmige Borverbindungen lassen sich mit den installierten Abgasreinigungsanlagen nur unzureichend abscheiden.

Im Zuge der Novellierung der TA Luft wurde auch der Gehalt an gasförmigen Borverbindungen im Abgas von Behälterglaswannen untersucht. Der Boreintrag in den Prozess dürfte überwiegend auf den Einsatz von Recyclingscherben zurückzuführen sein. In den Jahren 2018 und 2019 wurden insgesamt 22 Anlagen beprobt und ausgewertet. Vorgefunden wurden normierte Bor-Konzentrationen von 0,07 bis 3,32 Milligramm pro Kubikmeter. Berechnet als Borsäure ( $H_3BO_3$ ) liegt die Spanne der normierten Messwerte zwischen 0,5 und 25,3 Milligramm pro Kubikmeter. Als Emissionsfaktor für gasförmiges Bor resultiert für den Behälterglasbereich ein Mittelwert von 1,909 Gramm pro Tonne Glas.

### **6.1.4 Behälterglas: Quecksilber**

Die Novellierung der TA Luft sieht vor, dass die Emissionsbegrenzung für Quecksilber von derzeit 50 auf 10 Mikrogramm pro Kubikmeter abgesenkt werden soll. Quecksilber im Abgas von Glasschmelzwannen wird in den Genehmigungsbescheiden als nicht zu überwachende Emissionskomponente betrachtet. Aus diesem Grund lagen bis zum Jahr 2017 auch keine Messergebnisse über Konzentrationen im Abgas vor. Durch die geplante drastische Absenkung des Emissionswertes wurden in den Jahren 2018 und 2019 im Behälterglasbereich Abgasmessungen durchgeführt. Dabei wurden mittlere Konzentrationen an filtergängigen Quecksilberverbindungen zwischen 1 und 34 Mikrogramm pro Kubikmeter vorgefunden



(bezogen auf 8 Prozent Sauerstoffvolumen). Knapp die Hälfte der untersuchten Anlagen hat die geplante Emissionsbegrenzung tangiert oder überschritten.

Von den 12 untersuchten Anlagen im Behälterglasbereich in den Jahren 2018 und 2019 lässt sich ein Emissionsfaktor für filtergängige Quecksilberverbindungen von 0,013 Gramm pro Tonne Glas ableiten.

## 6.2 Flachglas

In Deutschland werden nach dem Kenntnisstand der HVG aktuell 12 Float-Glaswannen und 3 Gussglaswannen betrieben. Bei den Float-Glaswannen handelt es sich ausschließlich um regenerativ beheizte Querbrennerwannen. Als Brennstoff dient überwiegend Erdgas. Im Fall der Mischfeuerung wird zusätzlich schweres Heizöl eingesetzt. Fast alle Float-Glaswannen sind mit einer SCR-Anlage ausgerüstet. Zwei der drei Gussglaswannen nutzen eine Brennstoff-Sauerstoff-Beheizung, die dritte Anlage ist eine regenerativ mit Schweröl beheizte Querbrennerwanne. Der Anteil der Gussglasproduktion an der gesamten Flachglasproduktion liegt bei etwa 9 %.

**Tabelle 16: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Flachglasindustrie**

2005	2010	2015	2020
14	9	23	33

Für die Flachglasbranche stehen deutlich weniger Berichte zur Verfügung als für die Behälterglas- und Spezialglasbranche, wie anhand Tabelle 16 ersichtlich. Etwa die Hälfte der ausgewerteten Berichte für den aktuellen Zeitraum stammt von weiteren Messinstituten. Daher das größere Aufkommen von Daten für 2015 und 2020.

### 6.2.1 Flachglas: Gasförmige Schadstoffe

**Tabelle 17: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	528,27	541,14	515,13	550,16
CO <sub>2</sub> (Prozess)	151,18	168,25	168,45	165,91
NO <sub>x</sub>	3,4804	1,5448	1,6875	1,7708
SO <sub>2</sub>	2,1200	1,1395	1,3452	1,5677
HCl	0,0437	0,0406	0,0592	0,0446
HF	0,0026	0,0033	0,0050	0,0045
CO	0,0702	0,0293	0,0152	0,0241
NH <sub>3</sub>	NA	0,0125	0,0314	0,0191

Die aktuellen prozess- und brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren unterscheiden sich nur unwesentlich von zurückliegenden Untersuchungszeiträumen, wenngleich der momentane Wert von 550,16 relativ hoch ist. Die Summe an CO<sub>2</sub>-Emissionen wird maßgeblich durch den spezifischen Energieverbrauch beeinflusst, welcher wiederum von verschiedenen Faktoren abhängig ist, wie zum Beispiel der Wannentalterung oder der Auslastung. Neue Float-Glaswannen mit regenerativer Luftvorwärmung und voller Auslastung können 5500 Kilojoule



pro Kilogramm Glas erreichen, bei alten Wannen mit geringer Tonnage sind spezifische Energieverbräuche bis zu 8000 Kilojoule pro Kilogramm Glas möglich.

Bei den NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktoren muss man berücksichtigen, dass aktuell mindestens 2 der 12 Linien ohne SCR-Technologie betrieben werden und dass in den Jahren 2015 bis 2020 neue SCR-Anlagen gebaut wurden. Die Gussglaswannen besitzen keine sekundären Minderungstechnologien für Stickoxide. Die Emissionsfaktoren für HCl und HF sind etwa dreifach höher als im Behälterglasbereich. Kohlenmonoxid bewegt sich auf einem verhältnismäßig geringen Niveau.

### 6.2.2 Flachglas: Partikelförmige Schadstoffe

Tabelle 18: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas

Komponente	2005	2010	2015	2020
<b>Staub</b>	26,90	13,05	17,11	16,81
<b>PM 10</b>	22,87	11,09	14,54	14,29
<b>PM 2,5</b>	12,37	6,00	7,87	7,73
<b>As</b>	0,0058	0,0000	0,0014	0,0012
<b>Cd</b>	0,0403	0,0001	0,0003	0,0001
<b>Co</b>	0,0001	0,0000	0,0001	0,0003
<b>Cr</b>	0,0186	0,0001	0,0005	0,0004
<b>Cu</b>	NA	NA	0,0038	0,0027
<b>F</b>	0,0014	NA	NA	0,0016
<b>Ni</b>	0,0114	0,0029	0,0006	0,0008
<b>Pb</b>	0,3819	0,0017	0,0020	0,0014
<b>Sb</b>	0,0077	NA	0,0001	0,0006
<b>Se</b>	0,0480	0,0015	0,0080	0,0061
<b>Sn</b>	0,0118	0,0064	0,0002	0,0001
<b>V</b>	0,0123	0,0001	0,0003	0,0001

Der aktuelle Emissionsfaktor für Gesamtstaub beträgt 16,1 Gramm pro Tonne Glas. Der Feinstaubanteil am emittierten Gesamtstaub liegt nach dem aktuellen Kenntnisstand der HVG bei einem Partikeldurchmesser von 10 Mikrometer (PM 10) bei 85 %, die Feinstaubfraktion von 2,5 Mikrometer (PM 2,5) nimmt einen Anteil von 46 % ein.

### 6.2.3 Flachglas: Bor und Quecksilber

Messungen von gasförmigen Bor- und Quecksilberverbindungen wurden in diesem Bereich nicht durchgeführt. Im Abgas von zwei Gussglaswannen wurden im Jahr 2018 die gasförmigen Borverbindungen gemessen. Der Emissionsfaktor für gasförmiges Bor lag im Schnitt der zwei Anlagen bei 0,011 Kilogramm pro Tonne Glas.

## 6.3 Wirtschaftsglas

Wirtschaftsgläser werden in größeren Stückzahlen überwiegend mit fossil beheizten und kontinuierlich betriebenen Schmelzwannen erschmolzen, in kleineren Stückzahlen kommen Hafenöfen oder Tageswannen zum Einsatz. Energieträger bei fossil befeuerten Anlagen ist Erdgas. Bei Hafenöfen ist die Emissionssituation von der jeweiligen Schmelzphase abhängig. Die höchsten Emissionen treten meist während der Einlegephasen auf. Sämtliche Schmelzaggregate sind mit Abgasreinigungsanlagen ausgerüstet.

**Tabelle 19: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Wirtschaftsglasindustrie**

2005	2010	2015	2020
4	0	3	6

Es liegen nur wenige Daten zu Grunde. Der aktuelle Zeitraum konnte durch drei weitere Fremdberichte aufgestockt werden.

### 6.3.1 Wirtschaftsglas: Gasförmige Schadstoffe

**Tabelle 20: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	513,16	NA	422,11	431,51
CO <sub>2</sub> (Prozess)	73,17	NA	68,76	65,88
NO <sub>x</sub>	4,4875	NA	2,0091	2,8602
SO <sub>2</sub>	1,9726	NA	0,0599	0,0599
HCl	0,0207	NA	0,0025	0,0049
HF	0,0012	NA	0,0004	0,0004
CO	0,0116	NA	NA	0,0661

Die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren liegen auf dem Niveau der Behälterglasindustrie. In der Summe aus prozess- und brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der Emissionsfaktor deutlich höher als bei der Behälterglasproduktion. Glasschmelzwannen zur Wirtschaftsglasproduktion sind relativ klein. Die Tagestonnagen von kontinuierlich betriebenen Wannen bewegen sich je nach Schmelzaggregat zwischen 20 und 60 Tonnen pro Tag. Der spezifische Energieverbrauch ist aufgrund der Anlagengröße entsprechend hoch. Bei der Bewertung des NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktors muss man berücksichtigen, dass aus produktqualitätsgründen meist Nitrate eingesetzt werden. Sekundäre NO<sub>x</sub>-Minderungsanlagen werden nach dem Kenntnisstand der HVG nicht eingesetzt. NH<sub>3</sub> wird nicht emittiert. Die Emissionsfaktoren für SO<sub>2</sub>, HCl und HF sind sehr niedrig. Der Emissionsfaktor für Kohlenmonoxid bewegt sich auf dem Niveau der Behälterglasindustrie.

### 6.3.2 Wirtschaftsglas: Partikelförmige Schadstoffe

Tabelle 21: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas

Komponente	2005	2010	2015	2020
<b>Staub</b>	25,29	NA	0,62	2,19
<b>PM 10</b>	21,50	NA	0,53	1,86
<b>PM 2,5</b>	11,63	NA	0,29	1,01
<b>As</b>	NA	NA	0,0080	0,0040
<b>Cd</b>	NA	NA	0,0001	0,0000
<b>Co</b>	0,0008	NA	NA	NA
<b>Cr</b>	NA	NA	0,0017	0,0008
<b>Cu</b>	NA	NA	0,0002	0,0001
<b>F</b>	NA	NA	0,0002	0,0001
<b>Mn</b>	NA	NA	0,0046	0,0023
<b>Ni</b>	0,0122	NA	0,0477	0,0275
<b>Pb</b>	0,0122	NA	0,0015	0,0007
<b>Sb</b>	0,0590	NA	0,0369	0,5055
<b>Se</b>	0,2597	NA	0,0225	0,0231
<b>Sn</b>	NA	NA	NA	NA
<b>V</b>	0,0384	NA	NA	NA

### 6.3.3 Wirtschaftsglas: Bor und Quecksilber

Messungen zur Bestimmung von gasförmigen Bor- und Quecksilberverbindungen liegen nicht vor.

## 6.4 Spezialglas

Unter Spezialglas versteht man zum Beispiel die Produktion von Glasrohren, Glaskeramiken, optischen Gläsern, Borosilicatgläsern, Display-Gläsern oder Borofloatgläsern. Spezialglaswannen werden heute überwiegend mit Oxy-Fuel-Feuerung betrieben oder als Elektrowannen ausgelegt. Es existieren auch konventionell beheizte Schmelzwannen.

Dem Sektor Spezialglas wird auch die Glasfrittenproduktion zugeordnet. Glasfritten werden in Deutschland mittels Drehrohröfen erschmolzen. Die Drehrohröfen besitzen meist nur ein kleines Fassungsvermögen von etwa 1000 Kilogramm Gemenge und sind mit Oxy-Fuel Brennern ausgestattet. Die Öfen werden diskontinuierlich betrieben. Die Schmelzdauer beträgt etwa 2 bis 3 Stunden. Die Abgase und die freigesetzten Gemengegase werden auf der gegenüberliegenden Seite des Brenners über Abzugshauben und Blechleitungen abgesaugt und über isolierte Rohrleitungen der Abgasreinigungsanlage zugeführt. Ein Ringspalt zwischen Austrittsöffnung der Abgase und Abgasrohr bewirkt das Einströmen von Umgebungsluft und sorgt für die notwendige Abkühlung der Abgase. Die spezifischen Energieverbräuche sind sehr

unterschiedlich und können bei kleinen Anlagen mehr als 20000 Kilojoule pro Kilogramm Glas betragen. Es werden keine Anlagen ohne Abgasreinigungstechnologie betrieben.

**Tabelle 22: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Spezialglasindustrie**

2005	2010	2015	2020
27	31	45	58

Auch für die Spezialglasbranche konnten viele Messungen ausgewertet werden. Wie Tabelle 22 zeigt, konnten auch hier durch die Miteinbeziehung von Fremdbberichten, Kalibrierberichten und Berichten über die Funktionsprüfung mehr Daten für den aktuellen Zeitraum gesammelt werden.

#### 6.4.1 Spezialglas: Gasförmige Schadstoffe

**Tabelle 23: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	492,53	443,10	501,88	520,47
CO <sub>2</sub> (Prozess)	69,41	78,84	72,75	69,36
NO <sub>x</sub>	3,8506	4,0750	3,1261	3,5558
SO <sub>2</sub>	0,4295	0,0316	0,0468	0,1157
HCl	0,0390	0,0076	0,0116	0,0145
HF	0,0074	0,0086	0,0120	0,0094
CO	0,2489	0,3809	0,1691	0,1195
NH <sub>3</sub>	0,0493	0,0789	0,1267	0,0295

Die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren sind mit denen der Behälterglasindustrie vergleichbar. In der Summe aus prozess- und brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der Emissionsfaktor deutlich höher und liegt auf dem Niveau der Flachglasindustrie. Der vergleichsweise hohe NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor resultiert aus dem hohen spez. Energieverbrauch der Branche und den oft aus produktqualitätsgründen verwendeten Nitraten. Die NO<sub>x</sub>-Minderung findet meist primär durch Anwendung der Oxy-Fuel-Feuerung statt. Es sind aber auch sekundäre NO<sub>x</sub>-Minderungsanlagen installiert. NH<sub>3</sub>-Emissionen treten nur bei Anlagen mit sekundärer NO<sub>x</sub>-Minderungstechnik auf.

Die Emissionsfaktoren für SO<sub>2</sub>, HCl und HF liegen auf einem niedrigen Niveau. Der Emissionsfaktor für Kohlenmonoxid resultiert aus den Bemühungen niedrige NO<sub>x</sub>-Emissionen durch eine nahstöchiometrische Verbrennung zu erzielen.

## 6.4.2 Spezialglas: Partikelförmige Schadstoffe

Tabelle 24: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas

Komponente	2005	2010	2015	2020
<b>Staub</b>	29,02	42,69	7,51	7,65
<b>PM 10</b>	24,67	36,29	6,38	6,50
<b>PM 2,5</b>	13,35	19,64	3,45	3,52
<b>As</b>	0,4442	0,2735	0,2208	0,1143
<b>Cd</b>	0,0041	0,0003	0,0136	0,0028
<b>Co</b>	0,0091	0,0027	0,0074	0,0064
<b>Cr</b>	0,0152	0,0085	0,0150	0,0148
<b>Cu</b>	0,1103	0,0373	0,0806	0,0085
<b>F</b>	0,1116	0,0380	0,0320	0,0274
<b>Mn</b>	0,0028	0,0014	0,0112	0,0320
<b>Ni</b>	0,0219	0,0111	0,0192	0,0142
<b>Pb</b>	0,0692	0,0950	0,1373	0,1158
<b>Sb</b>	0,0134	0,0290	0,0169	0,0133
<b>Se</b>	0,0172	0,0239	0,0494	0,0454
<b>Sn</b>	0,0000	0,0031	0,1524	0,0056
<b>V</b>	0,0009	0,0000	0,0000	0,0004

In der Spezialglasindustrie werden nahezu ausschließlich Gewebefilteranlagen zur Abgasreinigung verwendet. Die Gesamtstaubgehalte liegen bei funktionstüchtigen Filteranlagen oft im Bereich der gravimetrischen Nachweisgrenze von 0,3 Milligramm. Zu erhöhtem Staubauswurf kommt es bei überlasteten Elektrofilteranlagen oder falls einzelne Filterelemente von Gewebefilteranlagen zerschlagen sind. Der aktuelle Emissionsfaktor für Gesamtstaub liegt bei 7,65 Gramm pro Tonne Glas.

## 6.4.3 Spezialglas: Bor und Quecksilber

Wie bereits erwähnt findet man im Spezialglasbereich häufig Borosilicatglasschmelzen vor. In Abhängigkeit vom Alkaligehalt des erschmolzenen Glases und weiterer Faktoren können beträchtliche filtergängige Boremissionen auftreten. Besonders auffällig waren zwei Messungen, bei denen gasförmige Boremissionen im hohen Milligramm-Bereich vorgefunden wurden. Trotz der geringen Tonnagen an beiden Anlagen ergaben sich hohe Emissionsfaktoren für die Spezialglasindustrie. Bezogen auf die gesamte Branche wurde ein aktueller Emissionsfaktor im Jahr 2019 von 59,84 Gramm pro Tonne Glas ermittelt.

Ergebnisse von Quecksilbermessungen liegen im Spezialglasbereich nicht vor.

## 6.5 Glasfasern/Glaswolle

Dem Subsektor Glasfasern/Glaswolle werden die Bereiche Glaswolle und Endlosglasfasern zugeordnet. In diesem Industriezweig der Glasindustrie sind in Deutschland überwiegend erdgasbeheizte Schmelzwannen mit rekuperativer Luftvorwärmung sowie Oxy-Fuel Wannen in Betrieb. Es existieren auch Elektrowannen. Alle Anlagen sind mit Abgasreinigungseinrichtungen ausgestattet. Bei einer Filteranlage handelt es sich um eine keramische Kerzenfilteranlage mit katalytischer Beschichtung zur sekundären NO<sub>x</sub>-Minderung.

Beim Aufbringen der organischen Bindemittel (genannt 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 Emissionswerte organischer Verbindungen eingehalten werden, die ansonsten in der Glasindustrie nicht vorkommen. Dazu gehören Phenol, Formaldehyd und Gesamtkohlenstoff. Ammoniak wird im Bereich der Weiterverarbeitung ebenfalls emittiert.

Die nachfolgenden Angaben beziehen sich ausschließlich auf Emissionen aus dem Schmelzprozess. Die Weiterverarbeitung wird im Kapitel Expertenvotum behandelt.

Ähnlich wie bei Wirtschaftsglas, verfügt die HVG auch für die Glaswolle nur über einen sehr begrenzten Datensatz, der durch 3 weitere aktuelle Berichte von Glaswollproduzenten anderer Messinstitute ergänzt werden konnte. In den Zeiträumen davor liegen nur Messberichte vor, die die Branche nicht repräsentativ darstellt.

**Tabelle 25: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Glaswollindustrie**

2005	2010	2015	2020
9	3	2	7

### 6.5.1 Glasfasern/Glaswolle: Gasförmige Schadstoffe (Schmelzwannen)

**Tabelle 26: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (ohne Elektrowannen)	655,83	662,12	536,91	357,22
CO <sub>2</sub>	386,38	161,02	203,88	307,62
CO <sub>2</sub> (Prozess)	113,91	182,12	172,41	95,44
NO <sub>x</sub>	0,9574	0,0834	1,2513	0,5883
SO <sub>2</sub>	0,1064	1,0501	0,0971	0,1847
HCl	0,0102	0,0035	0,0032	0,0143
HF	0,0135	0,0011	0,0065	0,0034
CO	0,0296	0,0261	0,0000	0,0000
NH <sub>3</sub>	NA	NA	0,0019	0,0002

Nachfolgend werden aufgrund der Datenlage bzw. der zur Verfügung stehenden Messberichte nur die aktuellen Emissionsfaktoren diskutiert, die im Jahr 2020 zusammengefasst sind.

Der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von 357,22 Kilogramm pro Tonne Glas (Summe ohne Berücksichtigung der Elektrowannen) beziehungsweise 307,62 inklusive der elektrisch betriebenen Wannen dürfte die Situation für den Sektor Glasfasern/Glaswolle gut abbilden. Der prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor ergibt sich aus der Karbonatzersetzung und dem vorherrschenden Scherbenanteil, der im Glaswollbereich meist zwischen 55 und 70 % liegt.

Auffallend niedrig ist der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor von 0,5883 Kilogramm pro Tonne Glas. Begründet wird der niedrige Wert einerseits durch den Einsatz von rekuperativ beheizten Konstantflammenwannen mit niedriger Luftvorwärmtemperatur und Oxy-Fuel-Wannen. Elektrowannen ohne Nitrateinsatz emittieren keine Stickstoffoxide.

Der geringe SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von 0,1847 Kilogramm pro Tonne Glas ist auf die meist nicht notwendige Sulfatläuterung bei der Schmelze von Glaswolle zurückzuführen.

Die HCl- und HF-Emissionsfaktoren zeigen keine Auffälligkeiten.

Der NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktor resultiert aus einer Anlage mit SCR-Technik im Glasfaserbereich.

CO-Emissionen sind nach den vorliegenden Berichten nicht aufgetreten.

### 6.5.2 Glasfasern/Glaswolle: Partikelförmige Schadstoffe (Schmelzwannen)

**Tabelle 27: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas**

Komponente	2005	2010	2015	2020
Staub	152,06	1,19	0,38	10,96
PM 10	114,05	1,01	0,32	9,32
PM 2,5	69,95	0,55	0,17	5,04
Cu	NA	NA	NA	0,0019
F	NA	NA	0,0204	0,0026
Mn	0,0011	NA	NA	0,0221
Ni	NA	NA	NA	0,0011
Pb	NA	NA	NA	0,0007

Insgesamt liegt eine unzureichende Datenlage vor. Der aktuelle Emissionsfaktor für Gesamtstaub ist plausibel.

### 6.5.3 Glasfasern/Glaswolle: Bor und Quecksilber

Aktuelle Messungen zur Bestimmung von gasförmigen Bor- und Quecksilberverbindungen liegen nicht vor. In zurückliegenden Untersuchungen wurde festgestellt, dass in Abhängigkeit des erschmolzenen Glases und der Abgasrandbedingungen man mit Emissionsfaktoren für gasförmiges Bor von 4 bis 40 Gramm pro Tonne Glas bei der Faserglas- beziehungsweise Glaswollproduktion rechnen kann. Im Fall von alkaliarmen oder gar alkalifreien Gläsern können weitaus höhere Emissionsfaktoren für gasförmige Borverbindungen auftreten. Aufgrund des hohen Recyclingscherbeinsatzes bei der Glaswollproduktion sind die Emissionen an Quecksilberverbindungen mit denen im Behälterglasbereich gleichzusetzen.

## 6.6 Steinwolle

Mineralwolle oder auch Steinwolle genannt wird in Deutschland schätzungsweise zu 60 Prozent in sogenannten Kupolöfen, zu 25 Prozent in erdgasbeheizten Glasschmelzwannen und zu etwa 15 Prozent in einem neuen Schmelzsystem (Schmelzzyklon) geschmolzen. Alle Anlagen sind mit Abgasreinigungseinrichtungen ausgestattet, wie den Elektrofilter, filternde Abscheider oder andere Sonderkonstruktionen. Steinwolle aus Glasschmelzwannen wird im Gegensatz zu früheren Jahren nicht mehr aus reinem Basaltmaterial erschmolzen, sondern aufgrund der geforderten physiologischen Eigenschaften des Produktes aus Gemengebestandteilen und Zuschlagstoffen, die in gebundener Form als Briketts vor der Einlage vorgewärmt werden.

Beim Kupolofen werden vulkanisches Gestein, Kalk, Mineralienzuschläge sowie Steinwolle-Recyclingmaterial durch Verbrennen von Koks auf mehr als 1500 Grad erhitzt. Die Abgase aus den Kupolöfen erfahren zunächst mittels Zyklon eine Grobkornabscheidung und werden durch Zusatz von Sorptionsmittel der Filteranlage zugeführt. Anschließend erfolgt eine Wiederaufheizung der Abgase insbesondere zur Aufoxidation von H<sub>2</sub>S zu SO<sub>2</sub>.

Der größte Steinwollproduzent hat an einem Standort in Deutschland im Jahr 2019 eine neue Produktionslinie mit neuem Schmelzverfahren gebaut. Die Rohstoffe werden aus den Bunkern entnommen und gemischt. Das Rohstoffgemenge wird dann zwischen dem zweiten und dritten Zyklon dem Schmelzprozess zugeführt, durch den heißen Rauchgasstrom aus dem Zyklon 2 vorgewärmt und gelangt in den Zyklon 3. Dort rieselt das Schmelzgut nach unten, wird durch den ca. 1500 Grad heißen Rauchgasstrom aus dem Schmelzzyklon (Zyklon 1) auf 700 Grad erwärmt und in den Zyklon 2 befördert. Das vorgewärmte Schmelzgut rieselt wieder nach unten und wird Zyklon 1 zugeführt, der mit vier tangential angeordneten Kohle-Brennern ausgestattet ist. Die Rohstoffe schmelzen nun auf. An zwei der vier Kohlebrenner kann Steinwollmehl zugegeben werden, das direkt aufschmilzt. Der Recyclinganteil kann bis zu 30 Prozent des Rohstoffinputs betragen. Die zähflüssige Schmelze wird mit einem weiteren Kohlebrenner sowie mit Oxy-Fuel Gasbrennern auf die erforderliche Verarbeitungstemperatur von etwa 1470 Grad gebracht.

Die flüssige Gesteinsschmelze wird an allen Anlagen zu Fasern versponnen, mit einem organischen Bindemittel versetzt und ausgehärtet. Wie bei der Glaswollproduktion müssen beim Aufbringen der organischen Bindemittel und Imprägniermittel (Ölprodukte) und dem anschließenden Weiterverarbeitungsprozess Maßnahmen zur Abluftreinigung ergriffen werden. Die Anlagengröße und die zu behandelnden Abluftvolumenströme übersteigen die Schmelzprozessabgase um das Zehnfache. Emittiert werden unter anderem organische Verbindungen (zum Beispiel Phenol, Formaldehyd, Gesamtkohlenstoff) und Ammoniak.

Belastbare Angaben zur Luftemission von Kupolöfen und Schmelzzyklonen und den Bereich der Nachverarbeitung liegen der HVG nicht vor. Wie beim Sektor Glasfasern / Glaswolle beziehen sich die nachfolgenden Angaben ausschließlich auf Emissionen aus dem Schmelzprozess. Die Weiterverarbeitung wird im Kapitel Expertenvotum behandelt. Sämtliche Angaben stützen sich auf Internetrecherchen, Angaben aus dem Schadstoffregister, Angaben von ProBas (kurz für Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme) und telefonischen Auskünften.

Zu den ProBas-Angaben ist anzumerken, dass bei den Emissionsfaktoren auch die sogenannte Vorkette berücksichtigt ist, sie somit also einen erhöhten Wert darstellen. Lediglich beim SO<sub>2</sub> und beim CO<sub>2</sub> werden Angaben zu den direkten Emissionsfaktoren gemacht.

Gemäß ProBas (Umweltbundesamt, 2020) liegen bei Kupolöfen zur Steinwollproduktion folgende relevanten Emissionsfaktoren vor, die in den folgenden Tabellen dargestellt sind.



Die Internetadresse zu den Daten steht im Quellenverzeichnis als Link zur Verfügung.

**Tabelle 28: Emissionsfaktoren für Kupolöfen nach ProBas für gasförmige Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	Emissionsfaktoren
CO <sub>2</sub>	670
NO <sub>x</sub>	1,12
SO <sub>2</sub>	1,8
HCl	0,0037
HF	0,0002
CO	50,6
NH <sub>3</sub>	0,0138
NMVOC	0,783

**Tabelle 29: Emissionsfaktoren für Kupolöfen nach ProBas für staubförmige Schadstoffe in Gramm pro Tonne Glas**

Komponente	Emissionsfaktor
Staub	303
As	0,0022
Cd	0,0035
Cr	0,0033
Hg	0,0020
Ni	0,0601
Pb	0,0148

Der CO-Emissionsfaktor gemäß ProBas bei Kupolöfen liegt mit 50,6 Kilogramm pro Tonne Glas auf einem extrem hohen Niveau. Vermutlich handelt es sich dabei um einen Wert, der unmittelbar nach Verlassen des Kupolofens vor der Nachverbrennung vorliegt. Der Wert ist als Emissionsfaktor im Reingas nicht plausibel.

Gleiches gilt für die Werte der organischen Verbindungen NMVOC und den Staub als Emissionsfaktor für den Schmelzprozess. Sie sind evtl. repräsentativ für den gesamten Prozess inklusive der Nachverarbeitung.

Für die Steinwollindustrie konnte die HVG aus eigenen Daten keine Ergebnisse liefern. 4 von anderen Messinstituten verfasste Messberichte von Schmelzwannen wurden im Rahmen der Datensammlung dazugewonnen.

Nachfolgend wird nur der Zeitraum 2020 betrachtet.

Der Mischwert bei der Steinwollproduktion wurde aus dem anteiligen Produktionsaufkommen abgeleitet. 75 Prozent Produktionskapazitäten fallen auf Kupolöfen inklusive Schmelzzyklon und 25 Prozent auf Schmelzwannen.

Aufgeführt sind bei den Kupolöfen nur Werte, die aus Sicht der HVG als plausibel einzuschätzen sind. Falls keine Angaben der jeweiligen Schmelztechnologie vorliegen wird der zur Verfügung stehende Wert auch als Mischwert angegeben.

### 6.6.1 Steinwolle: Gasförmige Schadstoffe (Schmelzanlagen)

**Tabelle 30: Aktuelle Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	Schmelzwannen	Kupolöfen	Mischwert
CO <sub>2</sub>	501,72	670	627,93
CO <sub>2</sub> (Prozess)	314,90	NA	314,90
NO <sub>x</sub>	0,8056	1,12	1,04
SO <sub>2</sub>	0,5161	1,8	1,4790
HCl	0,0143	0,0037	0,0064
HF	0,0044	0,0002	0,0013
CO	0,0396	NA	0,0396
NH <sub>3</sub>	NA	0,0138	0,0138

Die CO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren der Kupolöfen liegen zum Teil deutlich oberhalb der Werte für Schmelzwannen.

Angaben zu den Emissionsfaktoren des Gesamtprozesses inklusive Weiterverarbeitung werden im Kapitel Expertenvotum behandelt.

### 6.6.2 Steinwolle: Partikelförmige Schadstoffe (Schmelzanlagen)

**Tabelle 31: Aktuelle Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas**

Komponente	Schmelzwannen	Kupolöfen	Mischwert
Staub	7,05	50,00	39,26
PM 10	5,99	42,50	33,37
PM 2,5	3,24	23,00	18,06
As	0,0099	0,0022	0,0041
Cd	0,0059	0,0035	0,0041
Cr	0,0264	0,0033	0,0091
Cu	0,0037	NA	0,0037
Hg	NA	0,0020	0,0020
Mn	0,0369	NA	0,0369
Ni	0,0049	0,0601	0,0463

Komponente	Schmelzwannen	Kupolöfen	Mischwert
Pb	0,0182	0,0148	0,0156
Se	0,0210	NA	0,0210

Der Emissionsfaktor für Staub gemäß ProBas bei den Kupolöfen von 303 Gramm pro Tonne Glas berücksichtigt sehr wahrscheinlich auch die Emissionen aus der Nachverarbeitung und liegt nach Einschätzung der HVG auf einem viel zu hohen Niveau. Setzt man bei den Kupolöfen eine Staub-Reingaskonzentration von 20 Milligramm pro Kubikmeter an, dann entspricht dies einem Emissionsfaktor von rund 50 Gramm pro Tonne Glas. Dieser Wert wurde in der oben aufgeführten Tabelle eingesetzt. Bei den Feinstaubemissionsfaktoren wurden 85 Prozent der Staubemissionen als PM 10 und 46 Prozent als PM 2,5 eingestuft.

Weitere Angaben zu Staubinhalstoffen stehen nicht zur Verfügung.

## 6.7 Wasserglas

Der energieintensive Schmelzprozess erfolgt wie bei allen fossil beheizten Glasschmelzwannen bei sehr hohen Temperaturen. Zu den freigesetzten Stoffen gehören partikelförmige Emissionen, Stickstoffoxide, Schwefeloxide sowie anorganische gasförmige Chlor- und Fluorverbindungen. Staubinhalstoffe spielen aufgrund der Einsatzstoffe keine oder eine sehr untergeordnete Rolle. Es kommt zur brennstoff- und rohstoffbedingten Kohlendioxidfreisetzung und untergeordnet in einigen Fällen auch zu Kohlenmonoxid Emissionen.

Bei den in Deutschland betriebenen Wasserglasschmelzaggregaten handelt es sich um Brennstoff-Luft-befeuerte Anlagen. Oxy-Fuel-Feuerungen und Elektrowannen werden nicht betrieben. Insgesamt werden in Deutschland 8 Wasserglaswannen betrieben. 6 Wannen sind erdgasbeheizt, 2 Wannen werden mit einer Erdgas-Schweröl-Mischfeuerung betrieben.

Natriumsilikate (Wassergläser) werden in Deutschland überwiegend in Wannenöfen bei Temperaturen oberhalb von 1300 Grad hergestellt. Dabei wird ein Gemenge aus Quarzsand und Natriumcarbonat (auch Soda genannt) beziehungsweise Kaliumcarbonat (bekannt unter Pottasche) in verschiedenen Mischungsverhältnissen eingeschmolzen. Die angewandten Schmelztechniken unterscheiden sich hinsichtlich der eingesetzten Energieträger, der Art der Beheizung sowie der Methode der Wärmerückgewinnung. Zum Einsatz kommen kontinuierlich betriebene längsbefeuerte Glasschmelzwannen beziehungsweise U-Flammenwannen mit regenerativer Luftvorwärmung.

Drehrohröfen werden wegen verfahrenstechnischer Nachteile nur in speziellen Fällen eingesetzt. Dazu zählen die niedrige Reinheit des Festglases und der relativ hohe Anteil nicht umgesetzten Quarzsandes. Der Anteil von Drehrohröfen an der Gesamtproduktion in Deutschland wird auf unter 15 Prozent geschätzt und liegt in der Hand eines Herstellers. Drehrohröfen werden im Folgenden nicht berücksichtigt, da keine Messberichte zur Verfügung stehen.

**Tabelle 32: Ausgewertete Berichte je Zeitraum für die Wasserglasindustrie**

2005	2010	2015	2020
4	2	11	13

In der Wasserglasbranche musste weitestgehend auf die überschaubare Anzahl an Berichten der HVG zurückgegriffen werden. Die Datenbank konnte mit nur einem Fremdbbericht aus dem Jahre 2019 erweitert werden.

### 6.7.1 Wasserglas: Gasförmige Schadstoffe

**Tabelle 33: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	465,62	480,45	408,89	411,55
CO <sub>2</sub> (Prozess)	160,09	160,09	160,09	160,09
NO <sub>x</sub>	0,7272	0,9225	0,9434	0,9977
SO <sub>2</sub>	0,7093	1,3226	0,2289	0,2914
HCl	0,0313	0,0196	0,0046	0,0046
HF	0,0005	0,0015	0,0010	0,0005
CO	0,3266	0,6387	0,0220	NA
NH <sub>3</sub>	0,1091	NA	0,0164	0,0003

Die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind aufgrund der unveränderten Gemengerezeptur konstant. Der aktuelle prozess- und brennstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor beträgt 411,55 Kilogramm pro Tonne Glas und liegt damit deutlich unterhalb des Wertes aus den Zeiträumen 2005 und 2010. Die NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren sind leicht angestiegen. Die SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren resultieren nahezu ausschließlich aus den beiden Anlagen mit Mischfeuerung. Im Abgas von erdgasbefeuerten Wannen sind keine Schwefeloxide nachweisbar. Die Emissionsfaktoren für HCl und HF sind aktuell sehr niedrig. Beim Einsatz von Schweröl muss man mit höheren HCl-Werten rechnen. CO wurde im aktuellen Beobachtungszeitraum nicht nachgewiesen.

Drei der in Deutschland betriebenen Wasserglaswannen sind mit einer SNCR-Anlage zur NO<sub>x</sub>-Reduktion ausgerüstet. An diesen Anlagen findet man Ammoniak im Abgas. Sämtliche Emissionskomponenten werden im Kapitel Expertenvotum näher betrachtet.

### 6.7.2 Wasserglas: Partikelförmige Schadstoffe

**Tabelle 34: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas**

Komponente	2005	2010	2015	2020
Staub	2,28	0,77	4,27	3,43
PM 10	1,94	0,65	3,63	2,92
PM 10	1,05	0,35	1,96	1,34
Cr	0,0203	NA	0,0023	NA
Ni	0,0324	NA	NA	NA
Pb	NA	NA	0,0016	NA
V	0,0011	NA	NA	NA
Zn	0,0062	NA	NA	NA

Alle partikelförmigen Emissionsfaktoren sind sehr niedrig. Messdaten über weitere Staubinhaltsstoffe sind nicht bekannt.

### **6.7.3 Wasserglas: Bor und Quecksilber**

Ergebnisse von Bor- und Quecksilbermessungen liegen im Wasserglasbereich nicht vor.

## 7 Unsicherheitsbereiche

Für die ausgewerteten Ergebnisse der Emissionsfaktoren wurden Unsicherheitsbereiche geschätzt. Die Einstufung der Unsicherheiten wurde nach dem Einstufungsprinzip des Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019 durchgeführt. Zusätzlich, da der Guidebook nicht zureichend eine Einstufung der Unsicherheiten erlaubt, wurde zur internen Hilfestellung eine Methode der Unsicherheitseinschätzung erarbeitet. Somit konnten die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren aller Glasbranchen auf einheitliche Art und Weise bewertet werden.

### Onlinezugriff zum Guidebook

Die Emissionsfaktoren wurden für jede Glasbranche zunächst nach Messhäufigkeit und Messort klassiert. Die Unsicherheit fällt daher umso niedriger aus, je häufiger an verschiedenen Standorten gemessen wird. Die Repräsentativität der häufig gemessenen Komponente wird dadurch gestärkt. Dabei gibt es in Bezug auf die Messhäufigkeiten gravierende Unterschiede zwischen den einzelnen Glasbranchen, was bei der Darstellung der Ergebnisse bereits ersichtlich war. Zusätzlich wird die Einschätzung durch Probenahme und Analyse beeinflusst. Eine zusätzliche Unsicherheit kann auf die wechselnde Betriebsart der untersuchten Anlagen zurückgeführt werden, die von der HVG nicht geschätzt werden kann. Wird eine Messung nach §28 BImSchG gemacht, so wird diese nur alle drei Jahre getätigt. Die zum Zeitpunkt der Probenahme herrschenden Betriebsbedingungen werden als Teil der Emissionsmessung aufgenommen. Glasschmelzwannen sind in der Regel das ganze Jahr über täglich in Betrieb. Wechselnde Betriebseigenschaften sind daher selbstverständlich. Zu den sich ändernden Bedingungen zählen unter anderem Temperaturen, Volumenströme, Rohstoffeinsätze, Schmelzleistungen und eventuell auch Störbetriebe. Zum Zeitpunkt der Messung herrschende Konzentrationen wurden von der HVG bisher mit Zuversicht gemessen und analysiert, was sich auch in den regelmäßigen und erfolgreichen Teilnahmen an den Ringversuchen widerspiegelt.

- ▶ **NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub>:** Die meistens gegebene Häufigkeit der durchgeführten Messungen dieser beiden Komponenten wirkt sich positiv auf die Einschätzung der Unsicherheit auf. Stickoxide sind bis auf wenige Ausnahmen immer Bestandteil einer Messung. Sei es einer Messung nach § 28 BImSchG oder einer Kalibrierung beziehungsweise einer Funktionsprüfung. Der ausgewerteten Daten nach zu urteilen gibt es jedoch mehr Bestand an automatischen Emissionsmessgeräten für die Stickoxidmessung als für die Schwefeloxidmessung. Das bedeutet, dass in den Kalibrierberichten und Funktionsprüfungen insgesamt die Stickoxide öfters ausgewertet wurden. Außerdem werden Stickoxide mittels kontinuierlicher Messgeräte erfasst und das Ergebnis sofort ermittelt. Die Messgeräte werden jährlich funktionsgeprüft und vor jeder Messung mit zertifiziertem Prüfgas justiert. Eine Probenaufbewahrung, Probenaufbereitung und Analyse fällt daher aus. Zwar existierten auch solche automatischen Messgeräte für die Schwefeloxide, spielen momentan bei der HVG aber nur eine begleitende beziehungsweise orientierende Rolle. Die Probenahme für SO<sub>2</sub> erfolgt mittels nasschemischer Absorption. Danach folgen der Probentransport, die Aufbereitung der Probe und die anschließende Analyse mittels Titration. Das Ergebnis der Schwefeloxidanalysen unterliegt somit mehreren Quellen, die die Unsicherheitseinschätzung beeinflussen.
- ▶ **CO<sub>2</sub>:** Kohlenstoffdioxid wird in der Regel begleitend bei der Emissionsmessung mitbestimmt. Die Messwerte werden kontinuierlich erfasst und haben bei Glasschmelzwannen einen relativ stabilen Verlauf. Die Unsicherheit liegt daher in einem geringen Bereich, was sich jedoch aufgrund geringer Messdaten sehr stark nach oben korrigieren kann.

- ▶ **CO:** Aufgrund der Tatsache, dass Kohlenmonoxid oft unter der Nachweisgrenze liegt fallen weniger Ergebnisse an als zum Beispiel für NO<sub>x</sub>. Obwohl beide Komponenten kontinuierlich gemessen werden. Hinzu kommt, dass CO oft nicht Bestandteil einer Messung ist und nur begleitend mitgemessen wird und nicht mit in den Emissionsbericht aufgenommen wird.
- ▶ **NH<sub>3</sub>:** Trotz des in den letzten Jahren vermehrten Bestands an Katalysatoren stehen der HVG Daten zu Ammoniakemissionen in sehr begrenztem Umfang zur Verfügung. Die Vorkommnisse einer sekundären Maßnahme für die Reduzierung von Stickoxiden mittels katalytischer beziehungsweise nicht katalytischer Reduktion sind ohnehin eher gering. Repräsentativ lassen sich dadurch Ammoniakemissionen erschwert darstellen. Die Unsicherheit für alle Branchen fällt daher schlechter aus als bei anderen Komponenten.
- ▶ **HCl und HF:** Bis auf die Analyse erfolgt das Verfahren zur Bestimmung von HCl und HF identisch zu dem des Schwefeloxids. Was die Einschätzung der Unsicherheit jedoch negativ beeinflusst, ist die verringerte Messfrequenz dieser Komponenten zu der des SO<sub>2</sub>, nämlich nur im Rahmen der Messung nach § 28 BImSchG. Des Weiteren finden sich diese Komponenten verglichen oft in einem niedrigeren Konzentrationsniveau, wodurch ermittelte Messunsicherheiten eine relativ stärkere Auswirkung auf das Vertrauensniveau des Messergebnisses haben.
- ▶ **Staub:** Staub ist wie NO<sub>x</sub> sehr oft Bestandteil einer Messung. Bei einer Messung nach § 28 BImSchG erfolgt auch oft die Mitanalyse von Schwermetallen im Staub. Automatische Emissionsmessgeräte für Staub sind weit verbreitet und unterliegen der jährlichen Funktionsprüfung und der Kalibrierung alle drei Jahre. Damit ist Staub eine nahezu immer zu messende Komponente. Dennoch gestaltet sich ein aussagekräftiges Emissionsbild für einige Branchen nur sehr schwer, bedingt durch die Gesamtanzahl verwertbarer Daten.
- ▶ **Schwermetalle:** Die Einschätzung der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren der Schwermetalle wird durch mehrere Faktoren erschwert. Zumal ist die Messung der Schwermetalle Teil der Messung nach § 28 BImSchG, das heißt wird je Anlage nur alle drei Jahre gemessen. Außerdem teilt sich die Schwermetallanalyse in zwei Analysen auf. Zunächst die Analyse der partikelförmigen Schwermetalle, wo die Probenahmen mittels Planfilter erfolgen. Und die Analyse der gasförmigen beziehungsweise der filtergängigen Schwermetalle, mit der Absorptionslösung als Abscheidemedium. In die Summe der Ergebnisse fließen also zwei Unsicherheiten aus zwei Analysen mit ein. Des Weiteren kommt es oft vor, dass zwischen turnusmäßigen Messungen hohe Schwankungen der Metallanalysen vorkommen. Je nach Rohstoffeinsatz können bestimmte Metalle vermehrt vorkommen oder in so geringen Konzentrationen vorhanden sein, dass diese nicht nachweisbar sind. Letzteres birgt auch eine Unsicherheit mit sich, auch wenn diese eine eher untergeordnete Rolle spielt. So kann es durchaus möglich sein, dass bestimmte Schwermetallvorkommnisse aufgrund ihrer sehr geringen Konzentration nicht nachgewiesen werden können. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse der nachgewiesenen Schwermetalle im niedrigen Konzentrationsbereich mit den ermittelten Messunsicherheiten in einem relativ großen Vertrauensbereich liegen. Das bedeutet, dass Analysen beziehungsweise Ergebnisse im hohen Konzentrationsbereich viel genauer sind als im niedrigen. Insgesamt kommen hier die größten Unsicherheiten, auf nicht zuletzt auch wegen quasi nicht vorhandener Daten und extremen Schwankungen zwischen den Ergebnissen verschiedener Anlagen.

Ein rein mathematischer Ansatz erschien aufgrund vieler Faktoren nicht nachvollziehbar. DIN EN ISO 11771:2011 befasst sich mit der Ermittlung von zeitlich gemittelten Massenemissionen und Emissionsfaktoren. Die Vorgehensweise aus der Norm kann nur mit sehr vielen Annahmen aufwendig umgesetzt werden, dabei tragen die Annahmen erheblich zur Unsicherheit des Ergebnisses bei. Zusammengefasst befasst sich das Berechnungsbeispiel in der Norm mit einer einzigen Anlage, welche Lachgas emittiert. Die Überwachung der Emission erfolgt kontinuierlich und der zeitlich gemittelte Emissionsfaktor von einem Monat wird berechnet. Folgende Problemstellungen ergeben sich für die Ermittlung der Emissionsfaktoren der Glasindustrie auf Grundlage der der HVG zur Verfügung stehenden Datenlage:

- ▶ **Anlagenanzahl:** Wie bereits erwähnt, besteht die Aufgabe darin, für die einzelnen Branchen Emissionsfaktoren abzuleiten. Diese bestehen aus mehreren Anlagen und nicht nur einer einzigen untersuchten Anlage.
- ▶ **Schwankungen untersuchter Anlagen:** Schwankungen der von der HVG untersuchten Anlagen können in Abwesenheit der HVG natürlich nicht registriert werden. Dazu zählt: Die Emissionskonzentration, der Volumenstrom, die Tonnage, die Temperaturen und so weiter.
- ▶ **Unbekannte Anlagen:** Trotz vorhandener Messdaten ergeben sich sehr große Lücken für die einzelnen Branchen, da es Anlagen gibt, wo der HVG keinerlei Daten zur Verfügung stehen. So gibt es keine Informationen über die Auslastung, die Abgasmengen, die Schadstoffkonzentrationen der unbekanntenen Anlagen. Diese müssten geschätzt werden und bieten für die Berechnung keine feste Grundlage.
- ▶ **Betriebszeit:** Die Anzahl der sich in Betrieb befindlichen Anlagen ist im Betrachtungszeitraum nicht in allen Branchen konstant.
- ▶ **Zeitliche Überdeckung:** Aufgrund der Art der Messungen besteht eine sehr geringe zeitliche Überdeckung der Emissionsmessung mit der Laufzeit des Anlagenbetriebs. So wird die Beispielanlage in der oben genannten Norm über 29 Tage oder 696 Stunden überwacht, wobei nur 86 Stunden innerhalb dieses Zeitraums fehlen. Dies ergibt eine zeitliche Überdeckung von 88 Prozent. Nimmt man dagegen die am häufigsten vorkommende Art der Emissionsmessung (die Funktionsprüfung), so ergibt sich eine zeitliche Überdeckung einer Anlage von nur 0,03 Prozent, ausgehend von einer Messzeit von insgesamt 2,5 Stunden im gesamten Jahr. Zur Erinnerung: Eine Funktionsprüfung wird einmal jährlich durchgeführt und beinhaltet je nach Anlage variierend die Emissionskomponenten Staub, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> und CO. Hinzu kommt die Tatsache, dass mehrere Anlagen statt einer im Jahr untersucht werden. Somit ergeben sich zwei extrem unterschiedliche Messszenarien.

Um dennoch eine durchführbare Unsicherheitseinschätzung für jede Komponente durchzuführen wurden vier Kriterien ausgesucht und bewertet beziehungsweise benotet (mehr dazu in 7.1). Die Bewertung agierte als Hilfestellung für die Schätzung der Unsicherheit der Emissionsfaktoren für jede Komponente je Branche. Tabelle 35 listet die Kriterien auf, nach welchen die Einschätzung der Unsicherheit erfolgte. Tabelle 36 zeigt die Bewertung des Kriteriums „Anzahl der Anlagen“. Da sich die anderen Kriterien auf alle Emissionskomponenten einzeln beziehen werden diese aufgrund der enormen Anzahl nicht einzeln, sondern nur mit zwei Beispielen aufgeführt. Beim Kriterium „Anzahl untersuchter Anlagen“ wurde eingestuft, wie stark die Anzahl der Anlagen einer Branche der HVG-Datenbank repräsentativ die gesamte Branche darstellt.



**Tabelle 35: Ausschlaggebende Kriterien für die Einschätzung der Unsicherheit eines Emissionsfaktors**

Kriterium	Interpretation
Messunsicherheit	Die ermittelte Messunsicherheit des Gesamtverfahrens (Probenahme und Analyse) wurde für jede Komponente einzeln ermittelt und ist Bestandteil jedes Ergebnisses. Das bedeutet, dass jede Messung automatisch eine Messunsicherheit mit sich bringt.
Häufigkeit der Messungen	Je öfter eine Komponente gemessen wurde umso besser lässt sich diese repräsentativ darstellen.
Ergebnisschwankungen	Sollten Anlagen für die gleiche Komponente stark unterschiedliche Ergebnisse liefern, so legt sich das ebenfalls auf die geschätzte Unsicherheit des Gesamtergebnisses nieder, welches für die gesamte Branche vertretend wirken soll.
Anzahl untersuchter Anlagen	Je mehr unterschiedliche Anlagen in der Branche untersucht werden, umso stärker das Vertrauen in das Endergebnis. Bestehende Anlagen gewisser Branchen, für die keine Daten vorliegen, wirken sich negativ auf das Vertrauen des Endergebnisses aus. Die Einschätzung der Unsicherheit steigt.

Die Einstufung erfolgte mithilfe eines Schulnotensystems. Das vierte Kriterium „Anzahl untersuchter Anlagen“ wurde dagegen mit Buchstaben bewertet. Dabei steht A für sehr gute Repräsentativität, B für gute, C für befriedigende und D für nicht ausreichende. Je nach vergebener Buchstabennote wurde die mithilfe der anderen drei Kriterien vorher geschätzte Unsicherheit mit einem Zuschlag versehen.

**Tabelle 36: Bewertung der Datenbanken für Glasbranchen auf Repräsentativität anhand der Anzahl untersuchter Anlagen (viertes Kriterium)**

Glasindustrie	Bewertung der Repräsentativität der HVG-Datenbank	Unsicherheitszuschlag in Prozent
Behälterglas	A	0
Spezialglas	A	0
Flachglas	B	10
Wasserglas	B	10
Wirtschaftsglas	B	10
Glasfaser	C	20
Mineralwolle	C	20

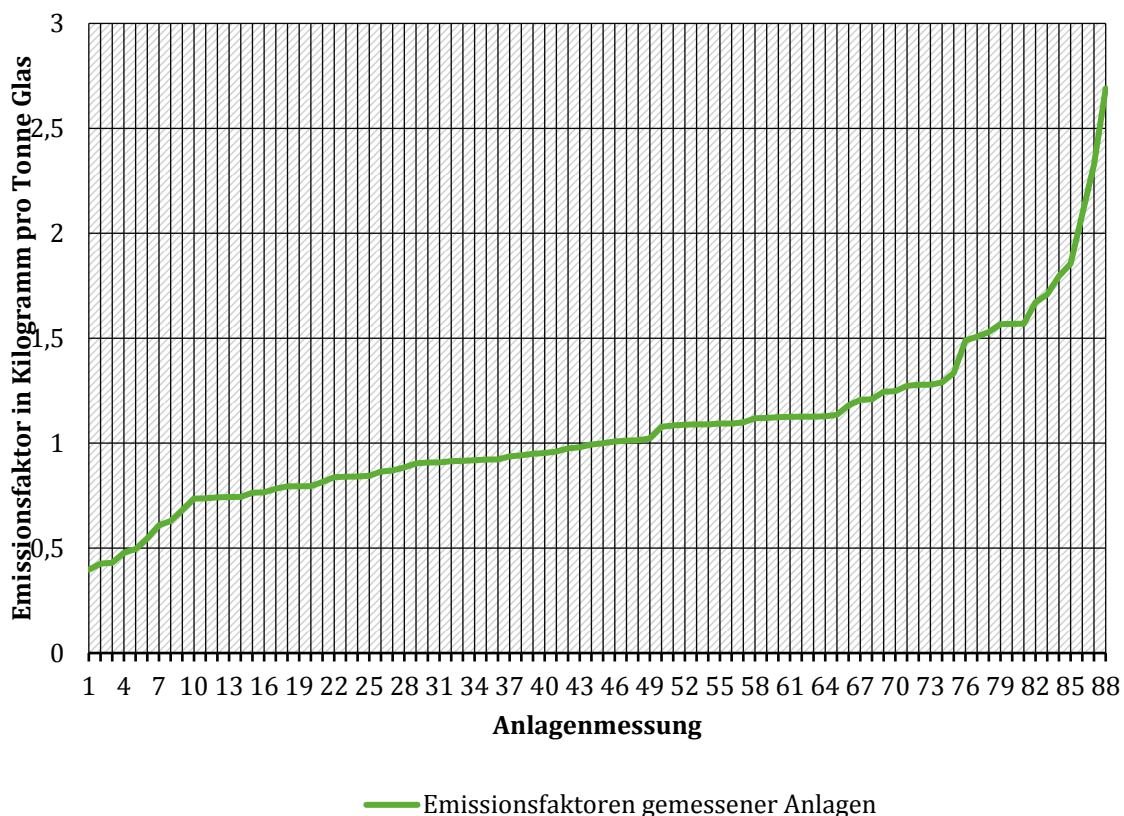
## 7.1 Beispiel zur Einschätzung der Unsicherheit

Für die Herangehensweise der Einschätzung der Unsicherheiten wurden die einzelnen Emissionswerte aus welchen sich ein Emissionsfaktor ergibt betrachtet. Hierfür wurden die Funktionen von Excel verwendet, um die Emissionswerte der gewünschten Zeiträume von der gesamten Datenbank zu filtern. Somit ließen sich wichtige Informationen zu den einzelnen Messungen tabellarisch aufzeigen wie Standort, Jahr der Messung, gemessene Konzentration der Emissionskomponente, vorherrschende Tonnage und Volumenstrom. Weitere interessante Details wie der Emissionsfaktor jeder einzelnen Anlage ließen sich durch Makros ganz einfach ermitteln. Das erwies sich als hilfreiches Tool bei der Bewertung der Daten nach den Kriterien aus Tabelle 35. Im letzten Bericht aus dem Jahre 2008 wurden die Ergebnisse für Behälterglas und Spezialglas mit 10 bis 15 Prozent angegeben. Die 10 Prozent Unsicherheit der Behälterglasindustrie wird in diesem Bericht als Ausgangspunkt gewählt. Anders als zum letzten Bericht wird für jede Emissionskomponente je Glasbranche auf Grundlage vorhandener Werte versucht eine Unsicherheit abzuschätzen.

Es kann stark davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse für  $\text{NO}_x$  am aussagekräftigsten sind. Es handelt sich um eine kontinuierlich zu erfassende Komponente, die fast immer Bestandteil eines Messprogramms ist. Die graphische Darstellung in Abbildung 1 zeigt die Emissionsfaktoren aller 88 Messwerte für  $\text{NO}_x$  im Zeitraum 2015 bis 2020 aufsteigend sortiert.

**Abbildung 1:  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren gemessener Anlagen in der Behälterglasindustrie**

Zeitraum 2015 bis 2020



Quelle: Eigene Darstellung, Hüttentechnische Vereinigung der deutschen Glasindustrie e. V.

Aufgrund der Messhäufigkeit in der Behälterglasindustrie lässt sich ein repräsentatives Emissionsbild der Branche für  $\text{NO}_x$  darstellen. Der Graph ähnelt stark einer Normalverteilung.

Die meisten Emissionsfaktoren lassen sich im Bereich 0,75 bis 1,25 Kilogramm pro Tonne Glas einordnen. Abweichungen nach oben und unten sind gering vorkommend und nicht ungewöhnlich. Anhand dieser Werte wurde jedes Kriterium ähnlich eines Schulnotensystems bewertet. Folgende Tabelle zeigt einen Ausschnitt der Bewertung für die gemessenen NO<sub>x</sub>-Ergebnisse aus der Behälterglasindustrie im Zeitraum 2015 bis 2020.

**Tabelle 37: Notenvergabe an die Kriterien für die NO<sub>x</sub>-Werte und abgeschätzte Unsicherheit**

	Bewertung	Gewichtung
<b>Messunsicherheit</b>	1	0,8
<b>Messhäufigkeit</b>	1	1,3
<b>Schwankungen</b>	2	0,8
<b>Anlagenanzahl</b>	A	Keine
<b>Gesamtnote</b>	1,2	1
<b>Unsicherheitseinschätzung</b>	10 bis 20 %	Keine

Aus den gewichteten Noten der Messunsicherheit, Messhäufigkeit und Schwankungen wird eine Gesamtnote arithmetisch ermittelt und daraus wird die Unsicherheitseinschätzung abgeleitet. Die Anlagenanzahl bestimmt den Unsicherheitszuschlag nach Tabelle 36. Im Fall der Behälterglasindustrie ist auf Grundlage der durchgeführten Messungen der HVG, ergänzt durch die freiwillige Bereitstellung weiterer Messergebnisse anderer Messinstitute durch die Glashütten selbst, eine sehr starke Vertretbarkeit der Branche gegeben. Dadurch ergibt sich eine sehr gute Wertung für die Repräsentativität der Anlagen und somit addiert sich kein Aufschlag auf die geschätzte Unsicherheit von 10 bis 20 Prozent.

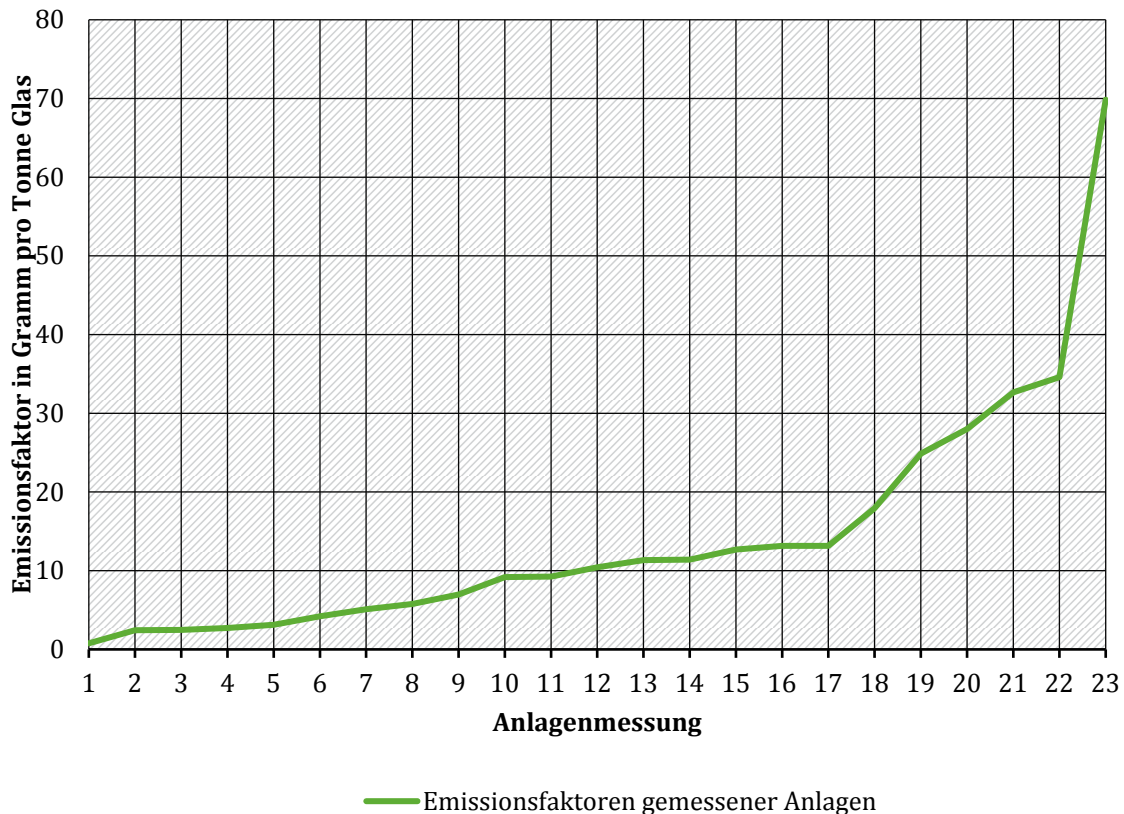
- ▶ **Messunsicherheit:** Jede Messung ist mit einer Messunsicherheit beschlagen. In Messberichten ist diese oft ausschlaggebend für die validierten Ergebnisse. Das bringt schlussendlich auch eine Unsicherheit für den Emissionsfaktor mit. Da die Messunsicherheit für kontinuierlich gemessene Emissionskomponenten ohnehin gering ist und typische NO<sub>x</sub>-Konzentrationen mehrere Hundert Milligramm pro Kubikmeter betragen wurde die Messunsicherheit mit der Note 1 versehen. Eine Gewichtung von nur 0,8 erscheint angemessen.
- ▶ **Messhäufigkeit:** Für statistische Aussagen bedarf es stets eine Vielzahl an Messergebnissen. Die Gewichtung mit dem Faktor 1,3 verdeutlicht, dass das Kriterium Messhäufigkeit den bedeutendsten Maßstab bei der Bewertung stellt. Mit 88 Werten (HVG und Fremdinstitute) konnte für keine weitere Emissionskomponente (außer Staub für Behälterglas) ein so anschauliches Emissionsbild generiert werden. Aus dem Grund wurde auch hier die Note 1 vergeben.
- ▶ **Schwankungen:** Da Schwankungen von Messergebnissen anlagenspezifisch und betriebsabhängig sind, und somit normal, wurde das Kriterium mit dem Faktor 0,8 gewichtet. Verschiedene Werte sind je nach Standort und Größe der Anlage selbstverständlich. Es kommt auch vor, dass dieselben Anlagen zeitlich versetzt verschiedene Schadstoffkonzentrationen aufweisen, was auch durchaus in den (tabellarischen) Rohdaten zu beobachten ist (nicht jedoch in Abbildung 1).

Die festgelegte Unsicherheit von 10 bis 20 Prozent wurde nach der Fertigstellung und Anwendung der Notenmethode als Referenz für weitere Benotungen durchgeführt. Diese Methode überschneidet sich nur im vierten Kriterium (Anlagenanzahl) mit dem Guidebook 2019. Mit den restlichen Kriterien und der Benotung dieser wurde versucht die Aussagekräftigkeit der vorhandenen Daten möglichst gut einzustufen. So konnte auch für jede Emissionskomponente aller Glasbranchen ein vereinheitlichtes Bewertungsverfahren angewendet werden. Bei vielen Messungen erwies es sich bedingt durch kleine Datensätze dennoch als sehr komplexe Aufgabe nachvollziehende Bewertungen durchzuführen, wodurch für Emissionskomponenten auch große Unsicherheitsintervalle und sehr große geschätzte Unsicherheiten entstanden sind. Beispielsweise war die Bewertung der Ergebnisschwankungen kaum nachvollziehend bewertbar, wenn nur wenige Anlagen im gegebenen Zeitraum untersucht wurden und auch keine Zweitmessungen dieser Anlagen im selben Zeitraum vorlagen.

Folgend wird die Unsicherheitseinschätzung für den Staubemissionsfaktor von Flachglas durchgeführt.

**Abbildung 1: Staub-Emissionsfaktoren gemessener Anlagen in der Flachglasindustrie**

Zeitraum 2015 bis 2020



Quelle: Eigene Darstellung, Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e. V.

Bedingt durch die schwächere Präsenz der Messtätigkeit der HVG in der Flachglasindustrie und der Tatsache, dass der Sektor Flachglas kleiner ist als der Sektor Behälterglas, kamen weniger Messwerte zusammen. Es konnte dennoch einiges an zusätzlichen Informationen mithilfe von Berichten anderer Messinstitute gesammelt werden. Je nach Anlage kamen unterschiedliche Emissionsfaktoren zusammen. Den Großteil der ermittelten Emissionsfaktoren je Anlage kann man dem Bereich 0,77 bis 13,15 Gramm Staub pro Tonne Glas einordnen.

**Tabelle 38: Notenvergabe an die Kriterien für die Staubwerte und abgeschätzte Unsicherheit**

	Bewertung	Gewichtung
<b>Messunsicherheit</b>	1	0,8
<b>Messhäufigkeit</b>	1,5	1,3
<b>Schwankungen</b>	3	0,8
<b>Anlagenanzahl</b>	B	Keine
<b>Gesamtnote</b>	1,7	1
<b>Unsicherheitseinschätzung</b>	30 bis 50 %	Keine

Einige Messungen bestimmter Anlagen sind nur einmalig im Zeitraum 2015 bis 2020 vorhanden. Turnusmäßige Messungen geben oft ein klareres Emissionsbild einer Anlage beziehungsweise eines Standortes, da dadurch mehrere zeitlich versetzte Werte desselben Standorts zusammenkommen. Anlagen, die mit mehreren Messungen vertreten waren, fielen mit Schwankungen im Messergebnis auf, wodurch das Kriterium „Schwankungen“ mit einer Note 3 versehen wurde. Insgesamt fiel die Gesamtnote etwas schlechter aus als im Beispiel davor. Die Anlagen im Datensatz der HVG bilden nicht vollständig die Flachglasindustrie ab, für das vierte Kriterium wurde daher eine B-Bewertung vergeben (siehe auch Tabelle 36) und daher erhielt die geschätzte Unsicherheit von 20 bis 40 Prozent einen Aufschlag von weiteren 10 Prozent.

## 7.2 Unsicherheiten für die Behälterglasindustrie

Wie bereits erwähnt stehen der HVG viele Daten im Bereich der Behälterglasindustrie zur Verfügung. Unter anderem auch dadurch, dass die Behälterglasherstellung den größten Sektor in der Glasindustrie darstellt. Eine Einschätzung der Unsicherheiten für die einzelnen Emissionskomponenten können der Tabelle 39 entnommen werden.

**Tabelle 39: Einschätzung der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Behälterglasindustrie**

Emissionskomponente	Schätzung in Prozent
NO <sub>x</sub>	10 bis 20
SO <sub>2</sub>	10 bis 20
HCl	10 bis 30
HF	10 bis 30
CO	20 bis 50
CO <sub>2</sub>	10 bis 20
NH <sub>3</sub>	Siehe Expertenvotum
Staub	10 bis 20
Cd, Cr, Co, F, Mn, Se, Sn, V	40 bis 60
As, B, Cu, Ni, Sb, Pb	60 bis 100

Die erhöhte Unsicherheit bei den Schwermetallen lässt sich im Allgemeinen auf die niedrigere aber dennoch vertretbare Messfrequenz zurückführen. Zusätzlich unterlagen einige Ergebnisse größeren Schwankungen oder konnten auch nicht nachgewiesen werden. Für Ammoniak stand nur ein Ergebnis zur Verfügung, was die Einschätzung der Unsicherheit nicht möglich machte.

### 7.3 Unsicherheiten für die Flachglasindustrie

**Tabelle 40: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Flachglasindustrie**

Emissionskomponente	Schätzung in Prozent
NO <sub>x</sub>	30
SO <sub>2</sub>	30 bis 50
HCl	40 bis 60
HF	40 bis 60
CO	80 bis 150
CO <sub>2</sub>	30 bis 50
NH <sub>3</sub>	70 bis 120
Staub	30 bis 50
As, Cd, Ni, Se	100 bis 160
Cr, Co, Pb, Sb, Sn, V	150 bis 250
Cu, F-	300 bis 500

### 7.4 Unsicherheiten für die Wirtschaftsglasindustrie

**Tabelle 41: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Wirtschaftsglasindustrie**

Emissionskomponente	Schätzung in Prozent
NO <sub>x</sub>	40 bis 60
SO <sub>2</sub>	50 bis 70
HCl	50 bis 70
HF	50 bis 80
CO	100 bis 200
CO <sub>2</sub>	20 bis 50
Staub	Siehe Expertenvotum
Cr, Cu, F, Ni, Sb, Se	150 bis 250
As, Cd, Mn, Pb	200 bis 400

## 7.5 Unsicherheiten für die Spezialglasindustrie

**Tabelle 42: Einschätzung der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Spezialglasindustrie**

Emissionskomponente	Schätzung in Prozent
NO <sub>x</sub>	10 bis 20
SO <sub>2</sub>	10 bis 30
HCl	10 bis 30
HF	10 bis 30
CO	20 bis 50
CO <sub>2</sub>	10 bis 20
NH <sub>3</sub>	200 bis 400
Staub	10 bis 20
Cd, Cr, Cu, F, Mn, Ni, Sb, Se, Sn, V	40 bis 80
As, B, Co, Pb	60 bis 120

## 7.6 Unsicherheiten für die Glasfasern- und Glaswollindustrie

**Tabelle 43: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Glaswollindustrie**

Emissionskomponente	Schätzung in Prozent
NO <sub>x</sub>	60 bis 90
SO <sub>2</sub>	80 bis 130
HCl	80 bis 130
HF	80 bis 130
CO	Siehe Expertenvotum
CO <sub>2</sub>	20 bis 50
Staub	60 bis 90
Cu, F, Mn, Ni, Pb	200 bis 400



## 7.7 Unsicherheiten für die Steinwollindustrie

**Tabelle 44: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Steinwollindustrie**

Emissionskomponente	Schätzung in Prozent
NO <sub>x</sub>	Siehe Expertenvotum
SO <sub>2</sub>	Siehe Expertenvotum
HCl	Siehe Expertenvotum
HF	Siehe Expertenvotum
CO <sub>2</sub>	Siehe Expertenvotum
Staub	Siehe Expertenvotum
Schwermetalle	300 bis 500

## 7.8 Unsicherheiten für die Wasserglasindustrie

**Tabelle 45: Einschätzungen der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren in der Wasserglasindustrie**

Emissionskomponente	Schätzung in Prozent
NO <sub>x</sub>	30 bis 50
SO <sub>2</sub>	30 bis 50
HCl	100 bis 300
HF	100 bis 300
CO <sub>2</sub>	10 bis 30
NH <sub>3</sub>	200 bis 400
Staub	10 bis 30

Trotz der guten Bewertung in Tabelle 36 fallen aufgrund des geringeren Messaufkommens die Unsicherheiten höher aus als bei den anderen Branchen wie der Behälterglas- oder Spezialglasindustrie. Schwermetalle spielen im Abgas der Wasserglasindustrie nahezu keine Rolle und es liegen auch keine aktuellen Ergebnisse für Schwermetallanalysen vor.

## 8 Expertenvotum zur Einschätzung aktueller Emissionsfaktoren

Der Fundus der HVG zur zeitraumbezogenen Dokumentation von Emissionsdaten in den einzelnen Branchen der Glasindustrie ist nicht lückenlos. Damit werden bei unzureichender Anzahl an Emissionsdaten unter Umständen verzerrende und nicht repräsentative Emissionsfaktoren errechnet. Aus diesem Grund ist es für einzelne Branchen oder Emissionskomponenten erforderlich anhand der Erfahrungen der HVG Korrekturen vorzunehmen, um ein möglichst repräsentatives Emissionsbild widerzuspiegeln.

Nachfolgend werden die anhand der vorliegenden Messberichte in Kapitel 6 dokumentierten Emissionsfaktoren für partikelförmige und gasförmige Emissionskomponenten aller Glassektoren erneut aufgeführt und zu überprüfende Komponenten durchleuchtet. Ergeben sich Änderungen zu den bestehenden Tabellen in Kapitel 6 so werden die neuen Werte (Expertenschätzungen) **fett** dargestellt und kommentiert.

In Kapitel 7 wurde die Vorgehensweise zur Einschätzung der Unsicherheiten beschrieben und prozentuale Spannweiten (Schätzung in Prozent) für die einzelnen Emissionskomponenten branchenbezogen ausgewiesen. In einigen Fällen wurden keine Angaben gemacht und auf das Kapitel 8 verwiesen. In Kapitel 8 werden die Unsicherheitsspannen in Einschätzungen nach unten und Einschätzungen nach oben aufgeteilt. Die Einschätzungen nutzen die Angaben in Kapitel 7 als Grundlage, werden jedoch ggf. angepasst. Das heißt, die neu versehenen Unsicherheiten basieren ebenso wie die Emissionsfaktoren auf einem Expertenvotum.

### 8.1 Behälterglas

**Tabelle 46: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Behälterglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	10	20	334,65	323,17	286,47	286,66
CO <sub>2</sub> (Prozess)	10	20	69,03	69,43	67,11	66,53
NO <sub>x</sub>	10	20	1,4933	1,3800	1,0996	1,0766
SO <sub>2</sub>	10	20	1,2493	1,1362	0,7393	0,7590
HCl	15	30	0,0254	0,0238	0,0162	0,0133
HF	15	30	0,0025	0,0028	0,0019	0,0016
CO	20	40	0,3452	0,2052	0,1482	0,0732
NH <sub>3</sub>	50	200	<b>0,0000</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0026</b>

Aufgrund der hohen Datendichte sind nahezu alle Emissionskomponenten repräsentativ abgebildet.

Bei dem Emissionsfaktor für Ammoniak (NH<sub>3</sub>) ist eine Anpassung erforderlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dem aktuellen Untersuchungszeitraum 2020 keine Messwerte hinter

SCR-Anlagen vorliegen, obwohl in dem dokumentierten Zeitraum zwei SCR-Anlagen im Betrieb waren. Die NH<sub>3</sub>-Emissionen liegen bei der einen Anlage nahe dem Nullpunkt, bei der anderen wurde bei einer aktuellen Messung im Juli 2020 eine mittlere Konzentration von 7,5 Milligramm pro Kubikmeter nachgewiesen. Berücksichtigt man die Anlagengröße der beiden genannten Produktionsstandorte, dann lässt sich für die beiden Anlagen ein Emissionsfaktor für Ammoniak von 8,3 Gramm pro Tonne Glas ableiten. Auf die gesamte Behälterglasindustrie hochgerechnet liegt der Wert bei 0,4 Gramm pro Tonne Glas. Dieser Wert ist repräsentativ für die Zeiträume 2010 und 2015. Im Zeitraum 2005 war nur die eine Anlage mit der niedrigen Konzentration in Betrieb. Ein vierstelliger Emissionsfaktor lässt sich damit nicht angeben. In den letzten zwei Jahren wurden mehrere Abgasreinigungsanlagen mit sekundärer NO<sub>x</sub>-Minderungstechnologie errichtet. Dabei handelt es sich um katalytisch beschichtete Filterkerzenanlagen beziehungsweise dem Elektrofilter nachgeschaltete SCR-Anlagen. Überschlagmäßig lässt sich für die Behälterglasbranche ein Anteil von rund 20 Prozent angeben, der mit SCR-Technologie ausgerüstet ist. Legt man die oben genannte Konzentration von 7,5 Milligramm pro Kubikmeter zu Grunde, dann lässt sich ein aktueller Emissionsfaktor für Ammoniak für die Behälterglasindustrie von 2,6 Gramm pro Tonne Glas ableiten.

**Tabelle 47: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Behälterglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
<b>Staub</b>	10	20	17,78	17,58	10,82	8,63
<b>PM 10</b>	10	20	15,29	15,12	9,30	7,42
<b>PM 2,5</b>	10	20	9,96	9,84	6,06	4,83
<b>As</b>	60	100	<b>0,0575</b>	<b>0,0568</b>	<b>0,0350</b>	<b>0,0279</b>
<b>Cd</b>	40	60	<b>0,0066</b>	<b>0,0065</b>	<b>0,0040</b>	<b>0,0032</b>
<b>Co</b>	40	60	<b>0,0004</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,0002</b>
<b>Cr</b>	40	60	<b>0,0383</b>	<b>0,0379</b>	<b>0,0233</b>	<b>0,0186</b>
<b>Cu</b>	60	100	<b>0,0072</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0044</b>	<b>0,0035</b>
<b>F</b>	40	60	<b>0,0540</b>	<b>0,0534</b>	<b>0,0382</b>	<b>0,0262</b>
<b>Mn</b>	40	60	<b>0,0119</b>	<b>0,0118</b>	<b>0,0073</b>	<b>0,0058</b>
<b>Ni</b>	60	100	<b>0,0099</b>	<b>0,0098</b>	<b>0,0060</b>	<b>0,0048</b>
<b>Pb</b>	60	100	<b>0,2549</b>	<b>0,2520</b>	<b>0,1551</b>	<b>0,1237</b>
<b>Sb</b>	60	100	<b>0,0068</b>	<b>0,0067</b>	<b>0,0041</b>	<b>0,0033</b>
<b>Se</b>	40	60	<b>0,5756</b>	<b>0,5692</b>	<b>0,3503</b>	<b>0,2794</b>
<b>Sn</b>	40	60	<b>0,2223</b>	<b>0,2198</b>	<b>0,1353</b>	<b>0,1079</b>
<b>V</b>	40	60	0,0114	0,0092	0,0007	0,0001

Die in Kapitel 6 aufgeführten Emissionsfaktoren für Staub beziehungsweise Feinstaub wurden nicht verändert.

Bei den Staubinhaltsstoffen wurden Anpassungen vorgenommen. Wie bereits in Kapitel 6 erwähnt werden in den Genehmigungsbescheiden der einzelnen Anlagen nicht immer alle

relevanten Staubinhaltsstoffe gefordert. Dementsprechend werden die Komponenten auch nicht explizit in den Messberichten aufgeführt. Die aus allen vorliegenden Messberichten resultierenden Emissionsfaktoren in den verschiedenen Zeiträumen sind damit für die Branche nicht immer repräsentativ abgebildet. Die HVG misst und analysiert in den letzten 5 Jahren immer alle oben aufgeführten Staubinhaltsstoffe. Für den Zeitraum 2020 wurden aus diesem Grund in der oben aufgeführten Tabelle 47 nur Messberichte herangezogen, bei denen alle Komponenten bestimmt wurden (41 Messberichte). Daraus wurden die Emissionsfaktoren für den aktuellen Zeitraum 2020 ermittelt. Bis auf Vanadium wurden die Emissionsfaktoren der Staubinhaltsstoffe für die Zeiträume 2005, 2010 und 2015 anteilig zu den Staubemissionen berechnet. Diese Vorgehensweise birgt Unschärfe in sich, da insbesondere leicht flüchtige Komponenten wie Arsen und Selen einen hohen filtergängigen Anteil aufweisen können. Die Werte für Vanadium wurden nicht verändert. Vanadium im Abgas von Behälterglaswannen resultiert nahezu ausschließlich über den im Schweröl sich befindenden Vanadiumgehalt. In den zurückliegenden Jahren wurden fast alle Wannen auf Erdgasfeuerung umgestellt.

## 8.2 Flachglas

**Tabelle 48: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Flachglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	10	20	528,27	541,14	515,13	550,16
CO <sub>2</sub> (Prozess)	10	20	151,18	168,25	168,45	165,91
NO <sub>x</sub>	20	30	3,4804	1,5448	1,6875	1,7708
SO <sub>2</sub>	20	30	2,1200	1,1395	1,3452	1,5677
HCl	20	40	0,0437	0,0406	0,0592	0,0446
HF	20	40	0,0026	0,0033	0,0050	0,0045
CO	40	80	0,0702	0,0293	0,0152	0,0241
NH <sub>3</sub>	50	200	NA	0,0125	0,0314	0,0191

Die in Kapitel 6 ermittelten Emissionsfaktoren für gasförmige Komponenten im Bereich der Flachglasindustrie wurden nicht verändert.

Unter der Annahme, dass zukünftig alle Float-Linien mit sekundärer NO<sub>x</sub>-Minderungstechnologie ausgerüstet werden und im Mittel 450 Milligramm pro Kubikmeter NO<sub>x</sub> emittieren, wird der Emissionsfaktor im Bereich von 1,2 Kilogramm pro Tonne Glas liegen.

Der NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktor wird im Fall der vollständigen Ausrüstung mit SCR-Anlagen etwas ansteigen. Überschlägig entsprechen 20 Milligramm pro Kubikmeter Ammoniakschlupf etwa 0,05 Kilogramm pro Tonne Glas

Der in der Tabelle angegebene Emissionsfaktor für Schwefeloxide resultiert aus dem Anteil der derzeit noch schwerölbefeuerten Anlagen. Zukünftig ist mit einer Umstellung bei allen Anlagen auf Erdgasfeuerung zu rechnen. Ein leichter Rückgang des Emissionsfaktors für SO<sub>2</sub> ist zu

erwarten. Wenngleich in vielen Fällen die Umstellung mit einer geänderten Gemengerezeptur hinsichtlich des Sulfateinsatzes zu erwarten ist.

**Tabelle 49: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Flachglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
<b>Staub</b>	15	30	26,90	22,01	17,11	16,81
<b>PM 10</b>	15	30	22,87	18,71	14,54	14,29
<b>PM 2,5</b>	15	30	12,37	10,12	7,87	7,73
<b>As</b>	60	160	<b>0,0166</b>	<b>0,0136</b>	<b>0,0106</b>	<b>0,0104</b>
<b>Cd</b>	60	160	<b>0,0008</b>	<b>0,0007</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0005</b>
<b>Co</b>	80	250	<b>0,0008</b>	<b>0,0007</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0005</b>
<b>Cr</b>	80	250	<b>0,0046</b>	<b>0,0038</b>	<b>0,0030</b>	<b>0,0029</b>
<b>Cu</b>	90	500	<b>0,0320</b>	<b>0,0262</b>	<b>0,204</b>	<b>0,0200</b>
<b>F</b>	90	500	<b>0,0331</b>	<b>0,0271</b>	<b>0,0211</b>	<b>0,0207</b>
<b>Ni</b>	60	160	<b>0,0098</b>	<b>0,0080</b>	<b>0,0062</b>	<b>0,0061</b>
<b>Pb</b>	80	250	<b>0,00166</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0106</b>	<b>0,0104</b>
<b>Sb</b>	80	250	<b>0,0011</b>	<b>0,0009</b>	<b>0,0007</b>	<b>0,0007</b>
<b>Se</b>	60	160	<b>0,063</b>	<b>0,0515</b>	<b>0,0435</b>	<b>0,0427</b>
<b>Sn</b>	80	250	<b>0,0014</b>	<b>0,0011</b>	<b>0,0009</b>	<b>0,0009</b>
<b>V</b>	80	250	<b>0,0013</b>	<b>0,0011</b>	<b>0,0008</b>	<b>0,0008</b>

Die in Kapitel 6 aufgeführten Emissionsfaktoren für Staub beziehungsweise Feinstaub wurden nicht verändert.

Bei den Staubinhaltsstoffen wurden bei der Berechnung der Emissionsfaktoren für den Zeitraum 2020 aktuelle Messberichte von 3 Float-Glaslinien und einer Gussglaswanne herangezogen. In diesen Berichten wurde alle Staubinhaltsstoffe gemessen. Wie beim Behälterglas bilden die Emissionsfaktoren des aktuellen Zeitraums 2020 die Basis dafür, die Emissionsfaktoren der Staubinhaltsstoffe für die Zeiträume 2005, 2010 und 2015 anteilig zu den Staubemissionen zu berechnen.

### 8.3 Wirtschaftsglas

Nach dem Kenntnisstand der HVG gibt es 5 größere Produktionsstandorte mit kontinuierlich betriebenen Schmelzwannen und einer Tonnage von mehr als 30 Tonnen pro Tag und Standort. Die Anlagen sind mit Elektrofilteranlagen beziehungsweise mit filternden Abscheidern ausgerüstet.

Die Emissionsfaktoren für den Zeitraum 2020 sind aus Sicht der HVG repräsentativ für die ganze Branche und bedürfen keiner Anpassung. Für den Emissionsfaktor CO im Zeitraum 2015 und für alle anderen gasförmigen Emissionsfaktoren im Zeitraum 2010 stehen keine Daten zur

Verfügung. Um die Tabelle 50 dennoch lückenlos zu gestalten wurde für CO im Jahr 2015 der Wert aus dem Jahr 2020 herangezogen. Die Werte für das Jahr 2010 wurden als Mittelwert aus 2005 und 2015 berechnet.

Die relativ hohen NO<sub>x</sub> Emissionen resultieren zum großen Teil auch aus den produktionsbedingten Nitratzugaben zum Gemenge.

**Tabelle 50: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Wirtschaftsglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	15	20	513,16	<b>467,64</b>	422,11	431,51
CO <sub>2</sub> (Prozess)	15	20	73,17	<b>70,97</b>	68,76	65,88
NO <sub>x</sub>	20	40	4,4875	<b>3,2483</b>	2,0091	2,8602
SO <sub>2</sub>	20	40	1,9726	<b>1,0163</b>	0,0599	0,0599
HCl	30	60	0,0207	<b>0,0116</b>	0,0025	0,0049
HF	40	80	0,0012	<b>0,0008</b>	0,0004	0,0004
CO	50	100	0,0116	<b>0,0389</b>	<b>0,0661</b>	0,0661

Der starke Rückgang des Emissionsfaktors für SO<sub>2</sub> aus dem Zeitraum 2005 (1,97 Kilogramm pro Tonne Glas) zu den folgenden Zeiträumen ist durch den Wegfall eines Produktionsstandortes mit Schwerölfeuerung zurückzuführen. Alle aktuell produzierenden Wirtschaftsglashersteller nutzen Erdgas und eventuell Elektrozusatzheizung als Energieträger.

Die Emission an anorganischen gasförmigen Chlorverbindungen (HCl) stehen im engen Zusammenhang mit den SO<sub>2</sub> Emissionen. Durch den Wegfall der Schwerölfeuerung gab es hier auch eine deutliche Abnahme des Emissionsfaktors.

Die Datenlage zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für Staub im Bereich Wirtschaftsglas ist sehr dünn beziehungsweise bei den Staubinhaltsstoffen nicht vollständig. Die HVG hat im Jahr 2016 im Rahmen von Forschungsaktivitäten zwei erdgasbefeuerte Wirtschaftsglaswannen mit jeweils nachgeschalteten Elektrofilteranlagen intensiv untersucht und auch im Rohgas vollständige Emissionsmessungen durchgeführt. Die Staubkonzentrationen im Reingas lagen jeweils unterhalb der gravimetrischen Nachweisgrenze von 0,3 Milligramm pro Kubikmeter. Damit lassen sich mit den Staubinhaltsstoffanalysen keine Rückschlüsse für die gesamte Branche ableiten. Die normierte Staubkonzentration im Rohgas lag im Mittel bei 242,6 Milligramm pro Kubikmeter (entsprechend 0,73 Kilogramm pro Tonne Glas) bei der einen Anlage und 227,8 Milligramm pro Kubikmeter (entsprechend 0,73 Kilogramm pro Tonne Glas) bei der anderen Anlage. Beide Schmelzwannen hatten zum Zeitpunkt der Untersuchungen die gleiche Schmelzleistung.

Im Mittel lagen bei den HVG-Untersuchungen im Jahr 2016 im Rohgas folgende Emissionsfaktoren vor:

**Tabelle 51: Emissionsfaktoren aus dem Jahr 2016 für Staubinhaltsstoffe im Rohgas von Wirtschaftsglaswannen in Gramm pro Tonne Glas**

As	Cd	Co	Cr	Cu	F-	Mn	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V
0,1132	0,0020	0,0000	0,0320	0,0084	0,0005	0,0192	0,0124	0,3698	51,1888	6,1958	0,0000	0,0000

Nach der Einschätzung der HVG kann man die mittlere Staubkonzentration im Reingas der Branche mit 5 Milligramm pro Kubikmeter ansetzen. Dies entspricht einem Emissionsfaktor von rund 15 Gramm pro Tonne Glas. Die aktuellen Emissionsfaktoren für den Zeitraum 2020 in Tabelle 52 wurden durch Multiplikation des Emissionsfaktors von 15 Gramm pro Tonne Glas (Reingas) dividiert durch den Emissionsfaktor von 730 Gramm pro Tonne Glas (Rohgas) mit den in Tabelle 51 dokumentierten Werten berechnet. Der Emissionsfaktor für Staub im Zeitraum 2005 wurde beibehalten, dazwischen wurde linear interpoliert. Die Gleiche Vorgehensweise wurde auch bei den Staubinhaltsstoffen vollzogen. Im Zeitraum 2005 existierten noch schwerölbefeuerte Anlagen. Die Emissionsfaktoren für Co, Ni, Pb, Se und V wurden für den Zeitraum 2005 nicht verändert.

**Tabelle 52: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Wirtschaftsglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
<b>Staub</b>	40	60	25,29	<b>21,86</b>	<b>18,43</b>	<b>15,00</b>
<b>PM 10</b>	40	60	21,50	<b>18,63</b>	<b>15,77</b>	<b>12,90</b>
<b>PM 2,5</b>	40	60	11,63	<b>10,02</b>	<b>8,48</b>	<b>6,90</b>
<b>As</b>	80	150	<b>0,0039</b>	<b>0,0033</b>	<b>0,0028</b>	<b>0,0023</b>
<b>Cd</b>	80	150	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>
<b>Co</b>	60	100	0,0008	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
<b>Cr</b>	60	100	<b>0,0011</b>	<b>0,0010</b>	<b>0,0008</b>	<b>0,0007</b>
<b>Cu</b>	60	100	<b>0,0003</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,00022</b>	<b>0,0002</b>
<b>F-</b>	60	100	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
<b>Mn</b>	80	150	<b>0,0007</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0004</b>
<b>Ni</b>	60	100	0,0122	<b>0,0004</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0003</b>
<b>Pb</b>	80	150	0,0122	<b>0,0111</b>	<b>0,0093</b>	<b>0,0076</b>
<b>Sb</b>	60	100	<b>1,7734</b>	<b>1,5329</b>	<b>1,2926</b>	<b>1,0518</b>
<b>Se</b>	60	100	0,2597	<b>0,1855</b>	<b>0,1564</b>	<b>0,1273</b>
<b>Sn</b>	60	100	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>
<b>V</b>	60	100	0,0384	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

## 8.4 Spezialglas

Die in Kapitel 6 dokumentierten Emissionsfaktoren für gasförmige Schadstoffe werden nicht geändert. Spezialgläser werden im Normalfall nicht mit Sulfat geläutert. In einzelnen Fällen oder in der Glasfrittenproduktion kommen schwefelhaltige Rohstoffe in unterschiedlichen Mengen zum Einsatz.

**Tabelle 53: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum – Spezialglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	10	20	492,53	443,10	501,88	520,47
CO <sub>2</sub> (Prozess)	10	20	69,41	78,84	72,75	69,36
NO <sub>x</sub>	10	20	3,8506	4,0750	3,1261	3,5558
SO <sub>2</sub>	15	30	0,4295	0,0316	0,0468	0,1157
HCl	15	30	0,0390	0,0076	0,0116	0,0145
HF	15	30	0,0074	0,0086	0,0120	0,0094
CO	20	40	0,2489	0,3809	0,1691	0,1195
NH <sub>3</sub>	50	200	0,0493	0,0789	0,1267	0,0295

**Tabelle 54: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Spezialglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
Staub	10	20	29,02	<b>26,88</b>	7,51	7,65
PM 10	10	20	24,67	<b>22,85</b>	6,38	6,50
PM 2,5	10	20	13,35	<b>12,36</b>	3,45	3,52
As	40	60	0,4442	0,2735	0,2208	0,1143
Cd	20	40	0,0041	0,0003	0,0136	0,0028
Co	40	60	0,0091	0,0027	0,0074	0,0064
Cr	40	60	0,0152	0,0085	0,0150	0,0148
Cu	40	60	0,1103	0,0373	0,0806	0,0085
F	40	60	0,1116	0,0380	0,0320	0,0274
Mn	40	60	0,0028	0,0014	0,0112	0,0320
Ni	40	60	0,0219	0,0111	0,0192	0,0142
Pb	40	60	0,0692	0,0950	0,1373	0,1158
Sb	40	60	0,0134	0,0290	0,0169	0,0133



Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
Se	40	60	0,0172	0,0239	0,0494	0,0454
Sn	40	60	0,0000	0,0031	0,1524	0,0056
V	40	60	0,0009	0,0000	0,0000	0,0004

Glasschmelzanlagen im Spezialglasbereich nutzen nahezu ausschließlich filternde Abscheider zur Staubreduktion. Bei funktionstüchtigen Gewebefilteranlagen liegen die Staubkonzentrationen oft im Bereich der gravimetrischen Nachweisgrenze und erhöhte Staubemissionen resultieren überwiegend aus Anlagen mit verschlissenen Filterschläuchen. In den Zeiträumen 2005 und 2010 war eine große Elektrofilteranlage mit mehreren angeschlossenen Glasschmelzwannen in Betrieb. Im Zeitraum 2010 wurden an der Elektrofilteranlage überproportional viele Messungen durchgeführt. Aus diesem Grund wurde eine Messserie aus dem Jahr 2008 aus der Auswertung herausgenommen. Damit wird die Branche Spezialglas für diesen Zeitraum repräsentativer abgebildet. In den späteren Zeiträumen wurde die Elektrofilteranlage durch Ertüchtigungsmaßnahmen beziehungsweise das Abkoppeln von Schmelzanlagen erheblich entlastet. In der Tabelle 54 wurden für den Zeitraum 2010 nur die Emissionsfaktoren für Staub und Feinstaub gegenüber den Angaben in Kapitel 6 geändert. Die Emissionsfaktoren der Staubinhaltsstoffe spiegeln die Schwankungen in der Realität wider.

## 8.5 Glasfasern- und Glaswolle

Aufgrund der unzureichenden Datenlage zur statistischen Auswertung gestaltet sich das Expertenvotum relativ schwierig. Am belastbarsten sind die aktuellen Werte im Zeitraum 2020. Zur Auswertung stehen 5 Glasschmelzwannen aus 4 Produktionsstandorten zur Verfügung, die aus Sicht der HVG durchaus repräsentativ für die ganze Branche anzusehen sind. In den anderen Zeiträumen stehen zum Teil nur Messwerte einer Anlage zur Verfügung, die keine Rückschlüsse auf die gesamte Branche erlauben. Die Emissionsfaktoren für den Zeitraum 2020 wurden gegenüber den in Kapitel 6 aufgeführten Werten bis auf die Komponente CO nicht verändert. Beim CO wurde eine aktuelle mittlere Konzentration im Abgas von 20 Milligramm pro Kubikmeter angenommen. Daraus resultiert ein Emissionsfaktor für CO von 0,06 Kilogramm pro Tonne Glas. Bei allen Komponenten (bis auf CO) wurde die Annahme getroffen, dass die Emissionsfaktoren im zuvor betrachteten Zeitraum jeweils 5 Prozent höher lagen. Beim CO wird von einer 5-prozentigen Abnahme ausgegangen.

**Tabelle 55: Emissionsfaktoren gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Glasfasern / Glaswolle - Schmelzwannen) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (ohne Elektrowannen)	15	30	413,53	393,84	375,08	357,22
CO <sub>2</sub>	15	30	356,11	339,15	323,00	307,62
CO <sub>2</sub> (Prozess)	15	30	110,48	105,22	100,21	95,44
NO <sub>x</sub>	30	60	0,6810	0,6486	0,6177	0,5883

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
SO <sub>2</sub>	40	80	0,2138	0,2036	0,1939	0,1847
HCl	40	80	0,0166	0,0158	0,0150	0,0143
HF	40	80	0,0039	0,0037	0,0036	0,0034
CO	80	100	0,0514	0,0542	0,0570	0,0600

Bei den Emissionsfaktoren für partikelförmige Schadstoffe ist nur der aktuelle Wert (2020) für Staub belastbar. Die Datenlage für Staubinhaltsstoffe ist ungenügend. Um dennoch Werte anzugeben wird folgendermaßen verfahren: Da bei der Glaswollproduktion ähnliche Gemenge- und Scherbensätze eingeschmolzen werden wie im Behälterglasbereich, werden die Werte aus der Behälterglasbranche von dem Zeitraum 2020 übernommen, auf den Unterschied zum Emissionsfaktor für Staub umgerechnet und mit einer Steigerung von 5 Prozent im 5-Jahresrhythmus zurückgerechnet.

**Tabelle 56: Emissionsfaktoren für Staub und Staubinhaltsstoffe in Gramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Glasfasern / Glaswolle - Schmelzwannen) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
Staub	40	80	12,69	12,08	11,51	10,96
PM 10	40	80	10,79	10,28	9,79	9,32
PM 2,5	40	80	5,83	5,56	5,29	5,04
As	80	200	0,0410	0,0390	0,0372	0,0354
Cd	80	200	0,0047	0,0045	0,0043	0,0041
Co	80	200	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Cr	80	200	0,0273	0,0260	0,0248	0,0236
Cu	80	200	0,0065	0,0062	0,0059	0,0056
F	80	200	0,0385	0,0367	0,0350	0,0333
Mn	80	200	0,0086	0,0082	0,0078	0,0074
Ni	80	200	0,0071	0,0067	0,0064	0,0061
Pb	80	200	0,1819	0,1732	0,1650	0,1571
Sb	80	200	0,0049	0,0046	0,0044	0,0042
Se	90	300	0,0116	0,0110	0,0105	0,0100
Sn	90	300	0,0116	0,0110	0,0105	0,0100
V	80	200	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

Bei den Komponenten Selen und Zinn werden die Werte der Behälterglasindustrie nicht übernommen. Dort werden im Gegensatz zur Glaswollproduktion Selenverbindungen bewusst

als Gemengebestandteil beim Wießglas zum Entfärben eingesetzt. Zinnverbindungen im Abgas von Behälterglaswannen resultieren überwiegend aus der Abluft der Heißendvergütungsanlagen, die den Wannengasen beigemischt werden. Angenommen werden für beide Komponenten jeweils Emissionsfaktoren von 0,0100 Gramm pro Tonne Glas.

Ammoniakemissionen oder Emissionen organischer Verbindungen aus dem Schmelzprozess sind nicht zu erwarten, im Bereich der Weiterverarbeitung dagegen treten beachtliche Emissionen auf. Die nachfolgenden Ausführungen stützten sich ausschließlich auf Recherchen aus dem Internet beziehungsweise uns zur Verfügung stehenden Daten hinsichtlich der Schmelzleistung von Anlagen ab. Für Ammoniak lässt sich daraus ein Emissionsfaktor für die Weiterverarbeitung von 0,88 Kilogramm pro Tonne Glas ableiten.

Aus den Recherchen lässt sich weiterhin ableiten, dass der Emissionsfaktor in der Summe aus organischen Verbindungen im Bereich der Weiterverarbeitung in einer ähnlichen Größenordnung vorliegt wie die NO<sub>x</sub>-Emissionen aus der Schmelze. Für die NMVOC-Emissionen wird ein Emissionsfaktor von 0,6 Kilogramm pro Tonne Glas geschätzt.

Die aktuellen Emissionsfaktoren für Staub, NO<sub>x</sub>, Gesamt-C, Formaldehyd und Phenol aus der Weiterverarbeitung sind geschätzt und orientieren sich an den anschließenden Ableitungen im Steinwollsektor.

Die zurückliegenden Zeiträume wurden mit einer Steigerung von 5 Prozent im 5-Jahresrythmus zurückgerechnet.

**Tabelle 57: Emissionsfaktoren in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Glasfasern / Glaswolle - Weiterverarbeitung) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
Staub	40	80	0,69	0,66	0,63	0,60
NO <sub>x</sub>	40	80	0,93	0,88	0,84	0,80
C-gesamt	40	80	0,69	0,66	0,63	0,60
NH <sub>3</sub>	60	100	1,27	1,21	1,16	1,10
Phenol	60	100	0,23	0,22	0,21	0,20
Formaldehyd	60	100	0,12	0,11	0,11	0,10

## 8.6 Steinwolle

In Kapitel 6 wurde bereits erwähnt, dass die HVG für die Steinwollindustrie keine eigenen Daten liefern konnte. 4 von anderen Messinstituten verfasste Messberichte von Schmelzwannen wurden im Rahmen der Datensammlung dazugewonnen. Messwerte von Kupolöfen oder Schmelzzyklonen stehen nicht zur Verfügung. Mineralwolle aus Kupolöfen beziehungsweise Zyklonschmelzen stellen aber etwa 75 Prozent der Gesamtproduktion dar. Sämtliche Angaben in diesem Bereich stützen sich auf Internetrecherchen, Angaben aus dem Schadstoffregister, Angaben von ProBas und telefonischen Auskünften ab. Gleiches gilt für den Bereich der

Weiterverarbeitung, sowohl bei den Schmelzwannen als auch bei den Kupolöfen / Zyklonschmelzen.

Zu informativen Zwecken wird nachfolgend ein aus dem Internet öffentlich zugänglicher Bescheid vom 20.03.2019 einer Genehmigungsbehörde zur Errichtung einer neuen Mineralwollproduktionslinie mit einer Schmelzleistung der Zyklonschmelze von 360 Tonnen pro Tag (Landratsamt Neuburg-Schrobenhausen, 2019) herangezogen. Die Veröffentlichung ist im Quellenverzeichnis verlinkt. Anhand der dort genannten Emissionswerte lassen sich sowohl für die Schmelze als auch für die Weiterverarbeitung entsprechende Emissionsfaktoren ableiten.

Für die verschiedenen Produktionseinrichtungen der neuen Produktionslinie resultieren folgende Daten.

**Tabelle 58: Abgeleitete Emissionsfaktoren einer neuen Steinproduktionslinie aus einem aktuellen Genehmigungsbescheid in Kilogramm pro Tonne Glas**

Komponente	Schmelze	WBS-Kammer	Härteofen	Kühlzone	Linien-entstaubung	Platten-beschichtung	Summe
<b>Staub</b>	0,023	0,467	0,2	0,080	0,016	0,007	0,793
<b>HCl</b>	0,058						0,058
<b>HF</b>	0,012						0,012
<b>SO<sub>2</sub></b>	2,800						2,800
<b>NO<sub>x</sub></b>	1,167		1				2,167
<b>CO</b>	0,233						0,233
<b>C-gesamt</b>	0,047	0,700	0,065			0,013	0,825
<b>NH<sub>3</sub></b>	0,070	1,167	0,1	0,120			1,457
<b>H<sub>2</sub>S</b>	0,0047						0,0047
<b>Phenol</b>		0,233	0,03	0,020			0,283
<b>Formaldehyd</b>		0,117	0,03	0,020			0,167
<b>Summe aus As, Co, Ni, Cd, Se, Cr<sub>6</sub></b>	0,0023						0,0023
<b>Summe aus As, Co, Ni, Cd, Se, Cr<sub>VI</sub>, Sb, Pb, Cr<sub>III</sub>, Cu, Mn, V, Sn</b>	0,0047						0,0047

Im Schadstoffregister ([www.thru.de](http://www.thru.de)) sind für den Steinwollbereich standortbezogen Emissionsfrachten ausgewiesen. Für die Komponenten Staub, Schwefeloxide, Ammoniak, Stickstoffoxide und organische Verbindungen lassen sich die oben aufgeführten Daten mit leichten Abweichungen verifizieren.

Um die bisherige Vorgehensweise bei den Zeitreihen weiterzuführen wird folgendermaßen vorgegangen: Für den aktuellen Zeitraum 2020 werden die Emissionsfaktoren in Kapitel 6 für die Schmelzwannen übernommen. Für die Kupolöfen / Schmelzzyklon werden die oben aus dem Genehmigungsbescheid abgeleiteten Werte angesetzt. Die Grenzwerte des Bescheids orientieren sich an den in der Novellierung sich befindenden TA Luft für Neuanlagen. Bei den Kupolöfen

handelt es sich um ältere Anlagen. Aus diesem Grund werden für die Schmelzanlagen Daten verwendet, die sich aus der vollständigen Ausschöpfung der oben aufgeführten Grenzwerte ergeben. Daraus wird der Mischwert aus Kupolöfen / Schmelzzyklon und Schmelzwannen in Tabelle 58 berechnet.

Bei der Weiterverarbeitung wird davon ausgegangen, dass die Grenzwerte zu 80 Prozent ausgeschöpft werden. Diese Werte gelten auch für die Steinwollproduktion aus Schmelzwannen.

Beim Zurückrechnen der Emissionsfaktoren wurde mit einer Steigerung von 5 Prozent im 5-Jahresrhythmus gearbeitet. CO<sub>2</sub>, PM 10 und PM 2,5 werden bei den folgenden Ausführungen nicht berücksichtigt.

**Tabelle 59: Aktuelle Emissionsfaktoren für den Zeitraum 2020 in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Steinwolle)**

Komponente	Mischwert	WBS-Kammer	Härteofen	Kühlzone	Linienentstaubung	Plattenbeschichtung	Summe
Staub	0,019	0,381	0,160	0,0640	0,013	0,006	0,643
HCl	0,047						0,047
HF	0,010						0,010
SO <sub>2</sub>	2,229						2,229
NO <sub>x</sub>	1,077		0,800				1,877
CO	0,185						0,185
C-gesamt	0,035	0,560	0,052			0,010	0,657
NH <sub>3</sub>	0,053	0,934	0,080	0,096			1,163
H <sub>2</sub> S	0,0035						0,0035
Phenol		0,186	0,024	0,016			0,226
Formaldehyd		0,094	0,024	0,016			0,134
Summe aus As, Co, Ni, Cd, Se, Cr <sub>6</sub>	0,0023						0,0023
Summe aus As, Co, Ni, Cd, Se, Cr <sub>VI</sub> , Sb, Pb, Cr <sub>III</sub> , Cu, Mn, V, Sn	0,0047						0,0047

**Tabelle 60: Emissionsfaktoren in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum - Steinwolle – Schmelze und Weiterverarbeitung) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
Staub	40	80	0,744	0,709	0,675	0,643
HCl	40	80	0,054	0,052	0,049	0,047

Komponente	Unsicherheit nach unten	Unsicherheit nach oben	2005	2010	2015	2020
HF	40	80	0,012	0,011	0,011	0,010
SO <sub>2</sub>	40	80	2,580	2,457	2,341	2,229
NO <sub>x</sub>	40	80	2,173	2,069	1,971	1,877
CO	60	100	0,214	0,204	0,194	0,185
C-gesamt	40	80	0,761	0,724	0,690	0,657
NH <sub>3</sub>	60	100	1,346	1,282	1,221	1,163
H <sub>2</sub> S	80	200	0,0041	0,039	0,037	0,0035
Phenol	60	100	0,262	0,249	0,237	0,226
Formaldehyd	60	100	0,155	0,148	0,141	0,134
Summe aus As, Co, Ni, Cd, Se, Cr <sub>6</sub>	80	500	0,0027	0,0025	0,0024	0,0023
Summe aus As, Co, Ni, Cd, Se, Cr <sub>VI</sub> , Sb, Pb, Cr <sub>3</sub> , Cu, Mn, V, Sn	80	500	0,0054	0,0052	0,0049	0,0047

## 8.7 Wasserglas

Im Wasserglasbereich fand im letzten Jahrzehnt eine weitgehende Umstellung von der Schwerölfeuerung hin zur Erdgas- beziehungsweise Erdgas-Schweröl-Mischfeuerung statt. Im Rahmen einer gutachtlichen Stellungnahme der HVG konnte nachgewiesen werden, dass im Zuge der Brennstoffumstellung ein signifikanter Rückgang der Emissionen an Schwefeloxiden beziehungsweise anorganischen gasförmigen Fluor- und Chlorverbindungen stattgefunden hat. In vielen Fällen wurde der Betreiber von der Überwachungspflicht der genannten Komponenten befreit. Aus diesem Grund stehen die Daten in den offiziellen Berichten nicht zur Verfügung.

In den einzelnen Untersuchungszeiträumen wurden die drei Produktionsstandorte für Wasserglas erneut unter die Lupe genommen. Zwischen den Zeiträumen 2005 und 2015 gab es Umstellungen von der Schwerölfeuerung hin zur Mischfeuerung beziehungsweise Gasfeuerung. Falls keine Messwerte in dem Untersuchungszeitraum zur Verfügung stehen werden die von der HVG abgeschätzten Werte herangezogen.

Durch das Bemühen einer nahstöchiometrischen Verbrennung muss man mit geringen CO-Konzentrationen im Abgas rechnen. Der abgeschätzte Emissionsfaktor für CO bei einer mittleren Konzentration von 30 Milligramm pro Kubikmeter liegt bei 0,06 Kilogramm pro Tonne Glas.

3 große Wasserglaswannen nutzen seit 25 Jahren SNCR-Anlagen zur Reduktion von Stickstoffoxiden. Die Anlagen unterliegen nicht der Messverpflichtung. Die HVG hat im Jahr 2013 interne Messungen an den Anlagen durchgeführt. Dabei wurde an diesen Anlagen ein mittlerer Emissionsfaktor für Ammoniak von 0,030 Kilogramm pro Tonne Glas festgestellt. Bezogen auf die gesamte Branche entspricht dies einem Wert von 0,016 Kilogramm pro Tonne Glas.

Die Werte für CO und NH<sub>3</sub> werden über alle Zeiträume als konstant angenommen. Die Werte für HCl und HF wurden nicht verändert. Staubinhalstoffe spielen bei der Wasserglasschmelze keine bedeutende Rolle. Emissionsfaktoren für Staubinhalstoffe werden nicht ausgeführt.

**Tabelle 61: Emissionsfaktoren partikelförmiger und gasförmiger Schadstoffe in Kilogramm pro Tonne Glas (Expertenvotum – Wasserglas) mit dazu gehörigen Unsicherheiten**

Komponente	Unsicherheiten nach unten	Unsicherheiten nach oben	2005	2010	2015	2020
CO <sub>2</sub> (Summe)	10	20	465,62	480,45	408,89	411,55
CO <sub>2</sub> (Prozess)	10	20	160,09	160,09	160,09	160,09
NO <sub>x</sub>	20	40	<b>0,9154</b>	<b>0,9695</b>	<b>1,0178</b>	<b>1,1518</b>
SO <sub>2</sub>	30	60	<b>0,6285</b>	<b>0,5488</b>	<b>0,1904</b>	<b>0,1126</b>
HCl	60	120	0,0313	0,0196	0,0046	0,0046
HF	60	120	0,0005	0,0015	0,0010	0,0005
CO	60	120	<b>0,060</b>	<b>0,060</b>	<b>0,060</b>	<b>0,060</b>
NH <sub>3</sub>	60	120	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>
Staub	80	200	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>	<b>0,002</b>

Der Emissionsfaktor für Staub liegt auf einem sehr niedrigen Niveau. An zwei Produktionsstandorten dienen Gewebefilter zur Staubabscheidung. Die beiden Elektrofilter an einem weiteren Standort sind großzügig dimensioniert und emittieren je nach Beaufschlagung zwischen einem und fünf Milligramm pro Kubikmeter.

Der Anstieg bei den Emissionsfaktoren für Stickstoffoxide dürfte mit der Umstellung von Schwerölfeuerung zur Mischfeuerung beziehungsweise Gasbeheizung zusammenhängen.

## 9 Vorher- und Nachher-Abgleich

Im Schlussbericht über die Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Glas- und Mineralfaserindustrie (FKZ: 206 425 300/02) aus dem Jahr 2008 wurden branchenbezogen Emissionsfaktoren für alle relevanten Emissionskomponenten ermittelt und Prognosen bis zum Jahr 2020 abgegeben. Nachfolgend werden die aktuellen Emissionsfaktoren den Prognosen gegenübergestellt und bewertet.

Auf die Gegenüberstellung von Staubinhalstoffen und der Feinstaubanteile wird verzichtet. Gleiches gilt für die Komponenten Phenol, Formaldehyd und Schwefelwasserstoff im Bereich der Weiterverarbeitung bei den Fasern. Beim Kohlendioxid handelt sich um die Summe aus brennstoff- und rohstoffbedingen CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die aktuellen Emissionsfaktoren sind in der Tabelle 62 **fett** dargestellt

**Tabelle 62: Zusammenstellung von aktuellen und prognostizierten Emissionsfaktoren in Kilogramm pro Tonne Glas für den Zeitraum 2020**

Komponente	Behälter-glas	Flach-glas	Wirtsch.-glas	Spezial-glas	Glasfaser-Glaswolle	Stein-wolle	Wasser-glas
<b>CO<sub>2</sub> (2020)</b>	<b>287</b>	<b>550</b>	<b>432</b>	<b>520</b>	<b>357</b>	<b>628</b>	<b>412</b>
CO <sub>2</sub> (Prognose)	335	527	550	551	453	522	495
<b>NO<sub>x</sub> (2020)</b>	<b>1,08</b>	<b>1,77</b>	<b>2,86</b>	<b>3,56</b>	<b>1,39</b>	<b>1,88</b>	<b>1,15</b>
NO <sub>x</sub> (Prognose)	1,15	1,84	2,23	3,08	1,19	0,54	0,73
<b>SO<sub>2</sub> (2020)</b>	<b>0,76</b>	<b>1,57</b>	<b>0,06</b>	<b>0,12</b>	<b>0,18</b>	<b>2,23</b>	<b>0,11</b>
SO <sub>2</sub> (Prognose)	1,19	1,77	0,53	0,39	0,46	1,35	0,76
<b>CO (2020)</b>	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>	<b>0,07</b>	<b>0,12</b>	<b>0,06</b>	<b>0,19</b>	<b>0,06</b>
CO (Prognose)	0,26	0,26	0,26	0,24	0,12	0,37	0,10
<b>HCl (2020)</b>	<b>0,0133</b>	<b>0,0446</b>	<b>0,0049</b>	<b>0,0145</b>	<b>0,0143</b>	<b>0,0470</b>	<b>0,0046</b>
HCl (Prognose)	0,0258	0,0394	0,0394	0,0512	0,0578	0,0204	0,0310
<b>HF (2020)</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0045</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0094</b>	<b>0,0034</b>	<b>0,0100</b>	<b>0,0005</b>
HF (Prognose)	0,0026	0,0053	0,0053	0,0088	0,0092	0,0035	0,0021
<b>Staub (2020)</b>	<b>0,0086</b>	<b>0,0168</b>	<b>0,0150</b>	<b>0,0077</b>	<b>0,6110</b>	<b>0,6430</b>	<b>0,0002</b>
Staub (Prognose)	0,0219	0,0394	0,0394	0,0330	0,3090	0,3780	0,0002
<b>NH<sub>3</sub> (2020)</b>	<b>0,0026</b>	<b>0,0191</b>	<b>NA</b>	<b>0,0295</b>	<b>1,1000</b>	<b>1,1630</b>	<b>0,0160</b>
NH <sub>3</sub> (Prognose)	0,0000	0,0000	NA	0,0250	1,2300	1,3100	0,0400
<b>C-gesamt (2020)</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>0,6000</b>	<b>0,6570</b>	<b>NA</b>
C-gesamt (Prognose)	NA	NA	NA	NA	0,9600	0,7700	NA



- ▶ **Kohlendioxid:** Bei den als CO<sub>2</sub> ausgewiesenen Kohlendioxid-Emissionsfaktoren handelt es sich um die Summe aus brennstoff- und rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bei fünf der sieben Sektoren liegen die prognostizierten Werte zum Teil deutlich oberhalb der aktuellen Emissionsfaktoren. Nur im Flachglasbereich und bei der Steinwolleproduktion sind die aktuellen Werte höher. Bei der Steinwolle muss man berücksichtigen, dass die Angaben der dominierenden Kupolöfen nicht aus Messdaten generiert wurden.
- ▶ **Stickstoffoxide:** Die Emissionsfaktoren für Stickstoffoxide weisen ein gemischtes Bild auf. Im Kalk-Natron-Silicatglasbereich liegen die prognostizierten und die aktuellen Emissionsfaktoren für die beiden großen Sektoren Behälterglas und Flachglas sehr nahe beisammen. Sie bewegen sich mit 1,08 im Behälterglasbereich bzw. 1,77 Kilogramm pro Tonne Glas beim Flachglas nur wenige Prozentpunkte unterhalb der vorhergesagten Werte. Anders verhält es sich in den anderen Sektoren. Die Prognosen im Wirtschaftsglasbereich im Jahr 2008 gingen davon aus, dass im Jahr 2020 eine Emissionswert von 850 Milligramm NO<sub>x</sub> pro Kubikmeter erreicht werden. Diese Konzentration bzw. ein Äquivalenzwert für Oxy-Fuel-Wannen wurde offenbar nicht eingehalten. Ein Grund dafür könnte darin liegen, dass die sich in der Novellierung sich befindenden Verwaltungsvorschrift TA Luft Ausnahmeregelungen für nitratgeläuterte Gläser mit einer Tagestonnage von weniger als 100 Tonnen pro Tag gewährt. Ähnliche verhält es sich auch im Spezialglasbereich. Beide Branchen sind relativ klein und schmelzen etwa 4 Prozent der Gesamtglasproduktion in Deutschland. Bei der Wasserglasschmelze hat sich die Umstellung von der Schwerölföuerung hin zur Mischföuerung bzw. Gasföuerung offensichtlich negativ auf die Höhe der NO<sub>x</sub>-Emissionen ausgewirkt. Die Prognosen in den Bereichen Glasfaser / Glaswolle und Steinwolle berücksichtigten nur die Stickstoffoxidemissionen aus der Schmelze. Die NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren aus den Schmelzanlagen sind mit 0,58 Kilogramm pro Tonne Glas (Glasfaser / Glaswolle), 0,81 Kilogramm pro Tonne Glas (Mineralwollewannen) bzw. 1,12 Kilogramm pro Tonne Glas relativ niedrig. Die in Tabelle 58 aufgeführten Werte resultieren in beiden Sektoren aus dem Hinzuaddieren der Emissionen aus dem Härteofenprozess der Weiterverarbeitung.
- ▶ **Schwefeldioxid:** Bis auf den Steinwollebereich konnten bei allen Sektoren zum Teil sehr deutliche Abnahmen der SO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren nachgewiesen werden. Ursache ist der stetige Rückgang des Einsatzes von Schweröl als Energieträger. Kupolöfen bzw. Schmelzzyklone dürfen immer noch hohe Mengen an Schwefeloxiden emittieren.
- ▶ **Anorganische gasförmige Fluor- und Chlorverbindungen:** Nahezu alle Sektoren der Glasindustrie unterschreiten die prognostizierten HCl- und HF-Emissionsfaktoren. Lediglich im Flachglasbereich liegt der HCl-Emissionsfaktor etwa 10 Prozent über dem prognostizierten Wert, im Steinwollbereich sind beide aktueller Emissionsfaktoren höher als die prognostizierten Daten.
- ▶ **Staub:** Ein vergleichbares Bild wie beim HCl und HF zeigt sich auch bei den Staub-Emissionsfaktoren. Auch hier bilden die Sektoren Glasfaser / Glaswolle und Steinwolle eine Ausnahme. Bei beiden Sektoren wurden in den Prognosen die Staubemissionen aus der Weiterverarbeitung offenbar unterschätzt.
- ▶ **Ammoniak:** Ammoniakemissionen (NH<sub>3</sub>) resultieren im Abgas von Glasschmelzanlagen durch den Betrieb von SCR-Katalysatoren oder SNCR-Anlagen in Form von Ammoniak schlupf. Mineral- und glasfaserproduzierende Betriebe emittieren insbesondere bei der Nachbearbeitung große Mengen an Ammoniak. Bei beiden Branchen liegen die aktuellen NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktoren unterhalb der prognostizierten Werte.

- ▶ **Gesamtkohlenstoff:** Auch bei den  $C_{\text{gesamt}}$ -Emissionsfaktoren liegen die aktuellen Werte in den Bereichen Glasfaser / Glaswolle und Mineralwolle unterhalb der prognostizierten Werte. Die anderen Sektoren der Glasindustrie sind von dieser Emissionskomponente nicht betroffen.

## 10 Quellenverzeichnis

Umweltbundesamt (2020): Prozessdetails: Steine-ErdenSteinwolle-DE-2020 3. Umweltaspekte. Besuchen Sie die Webseite für weitere Details zur Steinwollproduktion (14.09.2020)

Landratsamt Neuburg-Schrobenhausen (2019): 20.03.2019 Rockwool Operations GmbH & Co. KG, Werk Neuburg a.d.Donau – Geplante Produktionslinie 9. Bescheide des Landratsamtes zum Download (15.09.2020)