

TEXTE

07/2021

**Abschlussbericht**

# Umweltrelevanz und Stand der Technik von Tierkrematorien

**von:**

Dr. Gebhard Schetter

Schetter GmbH & Co. KG, Köngen

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt



TEXTE 07/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für  
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 53 302 1  
FB000455/1

Abschlussbericht

# **Umweltrelevanz und Stand der Technik von Tierkrematorien**

von  
Dr. Gebhard Schetter  
Schetter GmbH & Co. KG, Köngen

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)

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

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

### Durchführung der Studie:

Schetter GmbH & Co. KG  
Hermann Hesse Weg 11  
73257 Köngen

### Abschlussdatum:

November 2020

### Redaktion:

Fachgebiet III 2.4 Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer  
Sue Martina Starke

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2021

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

### **Kurzbeschreibung**

In Deutschland sind aktuell 27 Heimtierkrematorien in Betrieb, für die es derzeit keine einheitlichen immissionsschutzrechtlichen Regelungen gibt. Um einen Überblick über die genehmigungsrechtliche Praxis und den Stand der Technik bundesdeutscher Tierkrematorien zu bekommen, wurde eine Situationsanalyse durchgeführt. Sie basiert in einem ersten Schritt auf einer Datenerhebung durch Befragung der Eigner der Krematorien und durch Auswertung der zur Verfügung gestellten Genehmigungsbescheide. Ergänzend hierzu wurden die eingesetzten technologischen Baugruppen bewertet und mit dem Stand der Technik gemäß der VDI-Richtlinie 3890 (Emissionsminderung – Anlagen zur Heimtierkremation) verglichen. Daraus konnte eine technisch-wirtschaftliche Analyse abgeleitet werden.

Aufbauend auf der durchgeführten Datenerhebung wurden sechs Kremationslinien – 5 Heimtieröfen und 1 Pferdekremationsofen – mit und ohne Abgasreinigungssysteme ausgewählt, um sie umfassenden Abgasmessungen zu unterziehen. Die Untersuchungen erstreckten sich auf Kohlenmonoxid, Gesamtkohlenstoff, Gesamtstaub, Schwefel- und Stickstoffoxide, Chlor- und Fluorwasserstoff, Quecksilber sowie polychlorierte Dibenzo-(p)-dioxine und Dibenzofurane.

Aus den in dieser Studie gewonnenen Erkenntnissen wurden Handlungsempfehlungen für potenzielle zukünftige Entscheidungen des Gesetzgebers abgeleitet, die sowohl auf Anforderungen zur Emissionsminderung als auch auf praxisorientierte Empfehlungen zu Betriebsweisen abstellen.

### **Abstract**

Actually, in Germany 27 pet crematoria are in operation for which no uniform regulation of air pollution control exists. In order to get an overview of practice of permission and of the state of the art of German pet crematoria, a situation analysis was carried out. In a first step, it is based on a data collection by interviewing the owners of the pet crematoria and by evaluation of the available notifications of permission. In addition, the installed technologies were evaluated with regard to the state of the art given in the VDI Guideline 3890 (Emission control – Pet cremation facilities). From this a technical-economic analysis has been derived.

Based on the results of the data collection in total six cremation lines – 5 ovens for pet and 1 for horse cremation – with and without flue gas cleaning equipment were selected for further emission measurements. These investigations covered carbon monoxide, total organic carbon, dust, sulfur and nitrogen oxides, hydrogen chloride and fluoride, mercury as well as polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo furans.

From the results of this study policy recommendations were derived for potential further decisions which are focused on emission reduction requirements and on practical aspects of plant operation.

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildungsverzeichnis.....                                                          | 8  |
| Tabellenverzeichnis .....                                                           | 9  |
| Abkürzungsverzeichnis .....                                                         | 10 |
| Zusammenfassung.....                                                                | 11 |
| Summary .....                                                                       | 16 |
| 1 Datenerhebung .....                                                               | 21 |
| 1.1 Methodik der Datenerhebung und gewonnene Erfahrungen .....                      | 21 |
| 1.2 Tierkrematorien in Deutschland .....                                            | 21 |
| 2 Situationsanalyse zu rechtlichen Vorgaben .....                                   | 23 |
| 2.1 Genehmigungsrechtliche Einordnung und Folgerungen für Heimtierkrematorien ..... | 24 |
| 2.2 Sonderfall Pferdekrematorien .....                                              | 26 |
| 2.3 Genehmigungspraxis.....                                                         | 26 |
| 3 Emissionsentstehung und -minderung.....                                           | 30 |
| 3.1 Physikalisch-chemische Grundlagen .....                                         | 30 |
| 3.2 Verbrennungsabhängige Schadstoffe .....                                         | 32 |
| 3.3 Abgaskonditionierung .....                                                      | 33 |
| 3.4 Stäube und Aerosole .....                                                       | 33 |
| 3.5 Schwefeloxide .....                                                             | 34 |
| 3.6 Stickstoffoxide.....                                                            | 35 |
| 3.7 Chlor- und Fluorwasserstoff.....                                                | 35 |
| 3.8 Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane .....                              | 36 |
| 4 Situationsanalyse und technische Bewertung der Tierkrematorien .....              | 39 |
| 4.1 Überblick über die installierte Technik .....                                   | 39 |
| 4.1.1 Kremationsofen .....                                                          | 40 |
| 4.1.2 Abgasreinigung .....                                                          | 43 |
| 4.1.3 Einhaltung der Temperatur- und Verweilzeitforderungen .....                   | 45 |
| 4.1.4 Bewertung des Status quo in Deutschland .....                                 | 46 |
| 4.1.5 Technologischer Vergleich mit der Humankremation .....                        | 47 |
| 4.2 Wirtschaftlichkeitsaspekte.....                                                 | 49 |
| 4.2.1 Kostenansätze .....                                                           | 50 |
| 4.2.2 Ansätze für eine betriebswirtschaftliche Betrachtung .....                    | 51 |
| 4.2.3 Kremationspreise .....                                                        | 55 |
| 4.3 Vergleich mit Nachbarstaaten .....                                              | 56 |

|       |                                                     |    |
|-------|-----------------------------------------------------|----|
| 4.3.1 | Schweiz .....                                       | 56 |
| 4.3.2 | Niederlande .....                                   | 57 |
| 4.3.3 | Frankreich .....                                    | 57 |
| 4.3.4 | Emissionsgrenzwerte im Überblick.....               | 58 |
| 5     | Emissionsmessungen an ausgewählten Anlagen .....    | 60 |
| 5.1   | Auswahl der untersuchten Tierkremationsanlagen..... | 60 |
| 5.2   | Messprogramm .....                                  | 61 |
| 5.3   | Messergebnisse.....                                 | 63 |
| 5.3.1 | Anlage A .....                                      | 63 |
| 5.3.2 | Anlage B .....                                      | 67 |
| 5.3.3 | Anlage C .....                                      | 71 |
| 5.3.4 | Anlage D .....                                      | 75 |
| 5.3.5 | Anlage E .....                                      | 83 |
| 5.3.6 | Gesamtbewertung der Emissionssituation .....        | 92 |
| 6     | Handlungsempfehlungen .....                         | 96 |
| 7     | Quellenverzeichnis .....                            | 99 |

## Abbildungsverzeichnis

|               |                                                                                                          |    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1:  | Reaktionsschema der Verbrennung .....                                                                    | 30 |
| Abbildung 2:  | Berechneter spezifischer Erdgasverbrauch zur Einhaltung der geforderten Nachverbrennungstemperatur ..... | 31 |
| Abbildung 3:  | Kohlenmonoxid und Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt .....                      | 32 |
| Abbildung 4:  | Abscheidegrade von Staubabscheidern (entnommen aus [12]) .....                                           | 34 |
| Abbildung 5:  | Dualistisches Prinzip der Bildung und Zerstörung von PCDD/F (entnommen aus [20]) .....                   | 36 |
| Abbildung 6:  | Prinzipieller Aufbau eines Tierkremationsofens .....                                                     | 40 |
| Abbildung 7:  | Gasbefeuerte Tierkremationsofensysteme .....                                                             | 41 |
| Abbildung 8:  | Aschen in getrennten Behältnissen nach einer Sammelkremation .....                                       | 42 |
| Abbildung 9:  | Ofenbeschickungsvorrichtungen am Beispiel des Tierkrematoriums Schwäbisch Hall .....                     | 43 |
| Abbildung 10: | Prinzipieller Aufbau einer Abgasbehandlungsanlage .....                                                  | 44 |
| Abbildung 11: | Abgasreinigung nach dem Kugelrotorlaufverfahren im Tierkrematorium Badbergen .....                       | 44 |
| Abbildung 12: | Mindestvolumen der Nachbrennzone (entnommen aus [1]) ..                                                  | 46 |
| Abbildung 13: | Jahresbetriebskosten untergliedert nach Kostengruppen .....                                              | 53 |
| Abbildung 14: | Spezifische Gesamtbetriebskosten untergliedert nach Kostengruppen .....                                  | 54 |
| Abbildung 15: | Einfluss der Anlagenauslastung auf die spezifischen Gesamtkosten .....                                   | 54 |
| Abbildung 16: | Spezifische Kremationspreise (Stand: September 2018; Angaben in Euro, netto) .....                       | 56 |
| Abbildung 17: | Anlage A – Kontinuierliche Schwefeloxidmessung (13.2.2020) .....                                         | 66 |
| Abbildung 18: | Anlage A – Kontinuierliche Stickstoffoxidmessung (13.2.2020) .....                                       | 66 |
| Abbildung 19: | Anlage C – Kontinuierliche Stickstoffoxidmessung (26.3.2020) .....                                       | 74 |
| Abbildung 20: | Anlage E – Kontinuierliche Schwefeloxidmessung (10.3.2020) Rohgas .....                                  | 87 |
| Abbildung 21: | Anlage E – Kontinuierliche Schwefeloxidmessung (11.3.2020) Rohgas .....                                  | 91 |

## Tabellenverzeichnis

|             |                                                                                      |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1:  | Tierkrematorien in Deutschland (Stand: Sept. 2018) .....                             | 21 |
| Tabelle 2:  | Emissionswerte bei Kremationsanlagen für Heimtiere nach VDI-Richtlinie 3890 [1]..... | 23 |
| Tabelle 3:  | Genehmigungsbescheide (Stand: Sept. 2018).....                                       | 26 |
| Tabelle 4:  | Unterschiedliche Emissionsanforderungen (Stand: Sept. 2018) .....                    | 28 |
| Tabelle 5:  | PCDD/F-Messungen im Abgas nach Tierkrematorien (aus [23]) .....                      | 38 |
| Tabelle 6:  | Installierte Abgasreinigungstechnik (Stand: Sept. 2018).....                         | 39 |
| Tabelle 7:  | Anforderungen an Human- und Heimtierkremationsanlagen ..                             | 47 |
| Tabelle 8:  | Kostenansätze für Heimtierkremationsanlagen (Euro, netto, Stand 2018).....           | 50 |
| Tabelle 9:  | Emissionsgrenzwerte in den Nachbarstaaten zum Vergleich ..                           | 58 |
| Tabelle 10: | Ausgewählte Tierkrematorien für die Durchführung der Abgasmessungen .....            | 61 |
| Tabelle 11: | Durchführung der Messkampagnen.....                                                  | 61 |
| Tabelle 12: | Messkomponenten, Vorschriften und Normen .....                                       | 61 |
| Tabelle 13: | Krematorium A - 1. Messtag (12.2.2020) .....                                         | 63 |
| Tabelle 14: | Krematorium A - 2. Messtag (13.2.2020) .....                                         | 64 |
| Tabelle 15: | Krematorium A – PCDD/F-Messungen (12./13.2.2020) .....                               | 64 |
| Tabelle 16: | Krematorium B - 1. Messtag (7.10.2020) .....                                         | 67 |
| Tabelle 17: | Krematorium B - 2. Messtag (8.10.2020) .....                                         | 68 |
| Tabelle 18: | Krematorium B – PCDD/F-Messungen (7./8.10.2020) .....                                | 69 |
| Tabelle 19: | Krematorium C - 1. Messtag (24.3.2020) .....                                         | 71 |
| Tabelle 20: | Krematorium C - 2. Messtag (25.3.2020) .....                                         | 71 |
| Tabelle 21: | Krematorium C - 3. Messtag (26.3.2020) .....                                         | 72 |
| Tabelle 22: | Krematorium C – PCDD/F-Messungen (25./26.3.2020) .....                               | 73 |
| Tabelle 23: | Krematorium D - 1. Messtag (26.5.2020) - Rohgas .....                                | 76 |
| Tabelle 24: | Krematorium D - 3. Messtag (28.5.2020) - Rohgas .....                                | 76 |
| Tabelle 25: | Krematorium D - 1. Messtag (26.5.2020) - Reingas.....                                | 77 |
| Tabelle 26: | Krematorium D - 3. Messtag (28.5.2020) - Reingas.....                                | 77 |
| Tabelle 27: | Krematorium D - 2. Messtag (27.5.2020) - Rohgas .....                                | 80 |
| Tabelle 28: | Krematorium D - 2. Messtag (27.5.2020) - Reingas.....                                | 80 |
| Tabelle 29: | Krematorium D – PCDD/F-Messungen (26./27.5.2020) .....                               | 83 |
| Tabelle 30: | Krematorium E - 1. Messtag (10.3.2020) - Rohgas .....                                | 84 |
| Tabelle 31: | Krematorium E - 1. Messtag (10.3.2020) - Reingas .....                               | 85 |
| Tabelle 32: | Krematorium E - 2. Messtag (11.3.2020) - Rohgas .....                                | 88 |
| Tabelle 33: | Krematorium E - 2. Messtag (11.3.2020) - Reingas .....                               | 89 |
| Tabelle 34: | Krematorium E – PCDD/F-Messungen (10./11.3.2020) .....                               | 92 |
| Tabelle 35: | Messergebnisse im Überblick.....                                                     | 92 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                                      |                                                                         |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>ARE, AGR</b>                      | Abgasreinigungseinrichtung, Abgasreinigung                              |
| <b>BImSchG</b>                       | Bundes-Immissionsschutzgesetz                                           |
| <b>BImSchV</b>                       | Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes         |
| <b>C<sub>Ges</sub>,<br/>Gesamt-C</b> | Gesamtkohlenstoff                                                       |
| <b>DeNOx</b>                         | Technische Verfahren zur Abgasentstickung                               |
| <b>ECO</b>                           | Economiser (Abgas-Flüssigkeits-Wärmeübertrager)                         |
| <b>EU, EG</b>                        | Europa, Europäische Gemeinschaft                                        |
| <b>FS</b>                            | Flugstromverfahren (Trockenadditivverfahren)                            |
| <b>GF</b>                            | Gewebefilter                                                            |
| <b>KUV</b>                           | Kugelrotorlaufverfahren (Trockenadditivverfahren)                       |
| <b>LBO</b>                           | Landesbauordnung                                                        |
| <b>LUVO</b>                          | Luftvorwärmer (Abgas-Luft-Wärmeübertrager)                              |
| <b>Nm<sup>3</sup></b>                | Normkubikmeter (Normzustand bei 1,01325 bar und 273,15 K)               |
| <b>NO<sub>x</sub></b>                | Stickoxide (meist angegeben als NO <sub>2</sub> )                       |
| <b>PCDD</b>                          | Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine                                        |
| <b>PCDF</b>                          | Polychlorierte Dibenzofurane                                            |
| <b>PE</b>                            | Polyethylen (Strukturformel: $[-CH_2-CH_2-]_n$ )                        |
| <b>SCR</b>                           | Selektive katalytische Reduktion (Verfahren zur Abgasentstickung)       |
| <b>SNCR</b>                          | Selektive nicht-katalytische Reduktion (Verfahren zur Abgasentstickung) |
| <b>SO<sub>x</sub></b>                | Schwefeloxide                                                           |
| <b>TA-Luft</b>                       | Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft                           |
| <b>TE, TEQ</b>                       | Toxizitätsäquivalent für PCDD und PCDF                                  |
| <b>TS</b>                            | Trockensorptionsverfahren (auch Trockenadditivverfahren genannt)        |
| <b>TierNebG</b>                      | Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz                              |
| <b>VDI</b>                           | Verein Deutscher Ingenieure                                             |

## Zusammenfassung

Nach der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten bundesweiten Erhebung sind in Deutschland 27 Heimtierkrematorien in Betrieb (Stand September 2018). Weitere 3 Krematorien sind im Bau bzw. stehen kurz vor der Inbetriebnahme. Abgesehen von den beiden Tierkrematorien in Badbergen und Schwäbisch Hall sind alle Krematorien mit einer Kremationslinie ausgestattet. In Schwäbisch Hall befindet sich neben einer Kremationslinie für Heimtiere auch die erste in Deutschland für die Kremation von Pferden zugelassene Verfahrenslinie, die seit Dezember 2017 in Betrieb ist.

Um einen Überblick über die bisherige Genehmigungspraxis einerseits und den nationalen Stand der Technik von Heimtierkrematorien andererseits zu erhalten, wurde eine bundesweite Datenerhebung durch Befragung aller Anlagenbetreiber der Tierkrematorien durchgeführt. Diese Datenerhebung stützt sich auf die freiwillige Mitwirkung der jeweiligen Verantwortlichen. Zu vier der Anlagen war es nicht möglich, Informationen bezüglich der Genehmigung von den jeweiligen Betreibern oder den zuständigen Behörden zu erhalten.

Auf der Grundlage der vorliegenden 87 % Genehmigungsbescheide lässt sich die aktuelle und uneinheitliche Genehmigungspraxis dennoch bewerten. So wurden vor allem ältere Anlagen zunächst nach dem Baurecht genehmigt und später in einigen Fällen um eine Genehmigung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) erweitert. Die Zuordnung, der nach dem BImSchG genehmigungspflichtigen Tierkrematorien, erfolgt nach der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV). Bei den Durchsatzleistungen zeigt sich, dass die überwiegende Mehrheit der Tierkrematorien für kleine Durchsatzleistungen ( $< 50 \text{ kg/h}$ ) gemäß der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV genehmigt ist. Lediglich 5 Tierkrematorien sind für höhere Durchsatzleistungen nach der Nr. 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV genehmigt. Uneinheitlich sind auch die Zulassungen für Maximalgewichte der zu kremierenden Tierkörper. Neben vereinzelt Gewichtsbeschränkungen wurde z. T. der Jahresmassenstrom begrenzt. In einigen Fällen wurde ganz auf eine Limitierung verzichtet.

Aufgrund der europäischen Richtlinie 2008/98/EG, die Tierkörper, auch Heimtiere, dem „Abfall“ zuordnet, wurden in nahezu allen Genehmigungsbescheiden die Einhaltung der Temperatur- und Verweilzeitforderung in der Nachbrennkammer aufgenommen. In der Regel sind  $850 \text{ °C}$  und 2 s in der Nachverbrennung einzuhalten. Lediglich in einem Fall wurde antragsgemäß ein Tierkrematorium mit  $1100 \text{ °C}$  und 0,2 s genehmigt.

Auch bei den Anforderungen zur Emissionsbegrenzung waren zum Teil erhebliche Unterschiede festzustellen. Da der Kremationsofen im Fokus des genehmigungsrechtlichen Interesses steht, wurde in nahezu allen Bescheiden die Einhaltung des Kohlenmonoxidgehalts von  $50 \text{ mg/Nm}^3$  gefordert; in der Regel normiert auf 11 %  $\text{O}_{2, \text{tr}}$  und als Stundenmittelwert anzugeben. In einigen Fällen sind Halbstundenmittelwerte gefordert; z. T. sind höhere CO-Emissionen zulässig. Abgesehen von den Fällen, in denen CO-Emissionsbegrenzungen von mehr als  $50 \text{ mg/Nm}^3$  zulässig sind, werden an die Ofentechnik die Anforderungen nach dem Stand der Technik gestellt, wie er in der VDI-Richtlinie 3890 festgeschrieben ist.

Die vorgeschriebenen Begrenzungen des Staubaustrags in den einzelnen Krematorien reichen bei Anlagen der Nr. 7.12.1.3 Anhang 1 der 4. BImSchV von 10 bis  $150 \text{ mg/Nm}^3$ , wobei in einigen Fällen ergänzend eine Massenstromvorgabe zwischen 0,02 bis  $0,2 \text{ kg/h}$  gemäß Bescheid gefordert wird. In der Regel können daher die Kleinkremationsanlagen ( $< 50 \text{ kg/h}$ ) bei entsprechender Betriebsweise auch bei Einhaltung der Staubemissionsvorgaben ohne

Abgasfilter betrieben werden. Bei den Anlagen der Nr. 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV sind grundsätzlich Staubemissionsbegrenzungen von  $10 \text{ mg/Nm}^3$  einzuhalten. Da zudem weitergehende Emissionsanforderungen für diese Anlagen einzuhalten sind, verfügen mit einer Ausnahme alle in Deutschland gemäß dieser Kategorie genehmigten Anlagen über einen Gewebefilter.

Sehr uneinheitlich stellt sich die Genehmigungspraxis auch bei den Schwefel- und Stickstoffoxidbegrenzungen dar. Bei den Schwefeloxiddkonzentrationen sind je nach Standort Werte zwischen  $200$  und  $700 \text{ mg/Nm}^3$ , i. d. R.  $350 \text{ mg/Nm}^3$ , als Stunden- oder in einigen Fällen als Halbstundenmittelwerte einzuhalten. Ähnlich divergent sind die Anforderungen bei den Stickoxidemissionsbegrenzungen, die von  $100 \text{ mg/Nm}^3$  bis zu  $700 \text{ mg/Nm}^3$  variieren. Bei beiden Schadstoffgruppen werden i. d. R. Massenstrombegrenzungen alternativ oder ergänzend gefordert.

Die Genehmigungsbescheide weisen meist eine Emissionsbegrenzung für polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF) auf, die i. d. R. mit  $0,1 \text{ ng TE/Nm}^3$  festgelegt ist. Auch hier gibt es einige Ausnahmefälle. In einigen Fällen, überwiegend Anlagen der Nr. 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV, wird auch der Ausstoß einiger Schwermetalle und anderer toxikologisch relevanter Stoffgruppen limitiert.

In der Summe lässt sich festhalten, dass bundesweit und sogar innerhalb der Länder die Genehmigungspraxis sehr uneinheitlich und von der jeweiligen Genehmigungsbehörde abhängig ist. Dies beeinflusst die installierte Verfahrenstechnik und in der Konsequenz auch den Wettbewerb zwischen den Krematorien.

Technologisch sind sämtliche Heimtierkrematorien in Deutschland mit Mehrkammerofensystemen, in Flachbettausführung, ausgestattet, von denen jedoch nur 6 über eine adsorptive Abgasreinigung verfügen. Abgesehen von einem Elektroofen werden alle Kremationsofensysteme mit gasbefeuelten Brennern betrieben, so dass die konstruktiven Voraussetzungen nach dem Stand der Technik, wie er in der VDI-Richtlinie 3890 beschrieben ist, weitgehend gegeben sind.

Durch den Ofenaufbau als Mehrkammersystem können die Ofensysteme so betrieben werden, dass in der Hauptbrennkammer, in der die eigentliche Kremation stattfindet, die Verbrennung bei geringen Gasgeschwindigkeiten ablaufen kann. Dadurch wird die Partikelmitführung über das Abgas weitgehend minimiert. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund niedriger Staubemissionswerte von Bedeutung. Außerdem verbleiben dadurch die Aschen im Ofen und können den Urnen zugeführt werden. Die Nachbrennkammern sind auf die Nachverbrennung der verbrennungsabhängigen Schadstoffe (Kohlenmonoxid, Gesamtkohlenstoff und in begrenztem Umfang PCDD/PCDF) ausgelegt. Hierbei werden turbulente Strömungsbedingungen angestrebt. Um den Prozess mit Blick auf CO-Emissionen optimal zu betreiben, kommen in den meisten Kremationsanlagen bereits sauerstoffgeregelter Prozesssteuerungen, wie sie auch in der Humankremation eingesetzt werden, zur Anwendung. Sämtliche Ofensysteme sind im Ofeninnern nach feuerungstechnischen Grundsätzen mit unterschiedlichen Feuerfestmaterialien (Schamotte, Betone), Isoliersteinen und sonstigen Isolierschichten aufgebaut. Damit werden Wärmeverluste minimiert und die im Ofen verbleibende Wärmeenergie steht der nachfolgenden Kremation zur Verfügung.

Die in Deutschland vorhandenen Ofensysteme neuerer Bauart entsprechen demnach in Konstruktion, Aufbau und Betrieb dem Stand der Technik gemäß VDI 3890. Bei älteren

Kremationsanlagen sind nach Bedarf regelmäßige Mauerwerkssanierungen angezeigt. Da im Gegensatz zur Humankremation i. d. R. keine kontinuierliche CO-Emissionsmessung vorgeschrieben ist, obliegt der ggf. erforderliche Handlungsbedarf allein der Entscheidung des Anlagenbetreibers. Aus den vereinzelt im Zuge der Datenerhebung freiwillig übermittelten Emissionsberichten war kein Handlungsbedarf für eine Anlage erkennbar.

Die über die EU-Richtlinie 2008/98/EG zu erfüllenden Temperatur- und Verweilzeitbedingungen stellen an den Anlagenbetrieb und auch an die Nachweisführung zusätzliche Anforderungen, die nicht zwangsläufig als Qualitätsmerkmal einzustufen sind. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund zu sehen, dass der Kremationsvorgang aufgrund des sehr instationären Verbrennungsverhaltens der Tierkörper starken Schwankungen unterliegt, die sich sowohl in den Abgasvolumen- und Wärmeströmen als auch in den sich einstellenden Temperaturen und Sauerstoffgehalten zeigen. Vor diesem Hintergrund wurde in der VDI 3890 eine quasistationäre Betrachtung vorgeschlagen, die auf einer Verbrennungsrechnung unter stationären Rahmenbedingungen aufbaut ist. Wie von einigen Betreibern zu erfahren war, werden in einzelnen Tierkrematorien aufwendige Studien zur Nachweisführung verlangt. Es wäre daher angezeigt, eine bundeseinheitliche Nachweisführung für alle Krematorien, z. B. auf der Grundlage der VDI 3890, einzuführen.

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen in den Genehmigungsbescheiden sind einige Kremationsanlagen mit Abgasreinigungstechnologien versehen, die i. d. R. auf der sogenannten Trockensorptionstechnik aufbauen. Diese setzt sich aus zwei Kernbausteinen – Sorptionsmittelzugabe in einem Reaktor und nachgeschaltetem Gewebefilter – zusammen. Diese Technologie, die sich auch in anderen Anwendungsbereichen für kleine Abgasvolumenströme bewährt hat (z. B. Humankremation) gilt als erprobt. Durch den Einsatz geeigneter Sorbentien (z.B. Aktivkohle-Kalk-Mischungen) lassen sich die Emissionsanforderungen in den Genehmigungsbescheiden für Staub, Schwefeloxide, Schwermetalle sowie PCDD/PCDF im bestimmungsgemäßen Betrieb sicher einhalten. Dies gilt auch bei der Kremation von besonders langhaarigen Tierkörpern.

Obwohl in einigen Tierkrematorien alternativ zu Massenstrombegrenzungen (1,8 kg/h) Stickstoffoxidemissionskonzentrationen (angegeben als  $\text{NO}_2$ ) auf  $100 \text{ mg/Nm}^3$  begrenzt sind, ist nur ein Tierkrematorium mit einem selektiven nicht-katalytischen Reduktionsverfahren (SNCR) ausgestattet. Leider liegen von dieser Anlage keine Erkenntnisse über die Betriebserfahrungen vor. Es muss bezweifelt werden, dass vorgenannte Stickstoffoxidkonzentrationsbegrenzungen ohne Sekundärmaßnahmen erreicht werden können. In der VDI-Richtlinie 3890 ist für Stickstoffoxidemissionen nach dem Stand der Technik ein Bereich von 200 bis  $500 \text{ mg/Nm}^3$  genannt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch Wirtschaftlichkeitsaspekte in die Betrachtung einbezogen. Die durchgeführte Analyse erstreckte sich auf die folgenden Fallbetrachtungen:

- Kremationsofenanlage (< 50 kg/h) der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV ohne Abgasbehandlung,
- Nachrüstung einer Abgasbehandlung für eine Kremationsofenanlage der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV,
- Kremationsofenanlage (100 kg/h) der Nr. 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV inkl. Abgasbehandlung.

In einem ersten Schritt wurden Kostenansätze für die Investitionen auf der Grundlage des Stands der Technik unter Zugrundelegung aktueller Marktpreise ermittelt. Auf dieser Basis wurde eine Betriebskostenrechnung durchgeführt, aus der sich zwei wesentliche Aussagen ableiten:

- 1) Die auf den Durchsatz bezogenen Gesamtbetriebskosten für eine Kremationsofenanlage (<50 kg/h) der Nr. 7.12.1.3 ohne Abgasbehandlung entsprechen etwa denen für eine Kremationsofenanlage (100 kg/h) der Nr. 7.12.1.2 inkl. Abgasbehandlung.
- 2) Die Nachrüstung einer Kremationsofenanlage (<50 kg/h) der Nr. 7.12.1.3 um eine Abgasbehandlung, die der einer Kremationsofenanlage (100 kg/h) der Nr. 7.12.1.2 entspricht, führt zu einer Steigerung der auf den Durchsatz bezogenen Gesamtbetriebskosten um rund 40 %.

Daher gilt es abzuwägen, welche emissionsmindernden Maßnahmen für Kleinanlagen unter wirtschaftlichen Aspekten zweckmäßig erscheinen.

Um einen Vergleich zu europäischen Nachbarländern zu erhalten, wurde entsprechend den Vorgaben des Umweltbundesamtes die Tierkremation in der Schweiz, den Niederlanden und in Frankreich betrachtet. Dabei zeigten sich erhebliche Unterschiede bei den vorgegebenen Emissionsbegrenzungen, insbesondere bei Anlagen mit kleiner Durchsatzleistung, die zwangsläufig unterschiedliche technische Standards zur Folge haben. Von den drei betrachteten Nachbarländern sind die Anforderungen in der Schweiz als besonders hoch einzustufen. Aufgrund der heutigen Anforderungen sind in der Schweiz auch Kleinanlagen zwingend mit einer Abgasreinigungseinrichtung zu versehen, wohingegen in Frankreich bei Anlagen bis zu einer Kremationsleistung von 10 Mg/d höhere Emissionskonzentrationen zulässig sind. In den Niederlanden können aufgrund der aktuell gültigen gesetzlichen Vorschriften Kremationslinien auch mit höherer Durchsatzleistung ohne Abgasbehandlung betrieben werden, was auch geschieht.

Im Vergleich zu den Anforderungen in den Nachbarstaaten sind die Standards in Deutschland für Anlagen der Nr. 7.12.1.2 mit Durchsatzleistungen von mehr als 50 kg/h technologisch vergleichbar zu denen in der Schweiz. Für Anlagen der Nr. 7.12.1.3 entsprechen die aktuellen Anforderungen in Deutschland eher denen in Frankreich.

Im Zuge der Bearbeitung wurde dieses Vorhaben dahingehend erweitert, dass an 5 ausgewählten Tierkrematorien Emissionsmessungen durchgeführt wurden. Die Auswahl erfolgte unter der Maßgabe einerseits den Querschnitt der installierten Anlagen abzubilden und andererseits das Emissionsminderungspotenzial durch Abgasreinigungsmaßnahmen aufzuzeigen. Vor diesem Hintergrund wurden 3 Tierkremationsanlagen (bis 50 kg/h) ohne Abgasreinigung und 2 Tierkremationsanlagen mit Abgasreinigung untersucht. Bei letztgenannten Anlagen wurde zeitgleich im Roh- und Reingas gemessen. Das Messprogramm umfasste die Emissionsparameter Kohlenmonoxid (CO), gasförmige organische Stoffe (C<sub>Ges</sub>), Gesamtstaub, Schwefel- und Stickstoffoxide (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), Chlor- und Fluorwasserstoff (HCl, HF), Quecksilber und seine Verbindungen (Hg), polychlorierte Dibenzo-(p)-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F) sowie eine begleitende Erfassung der Abgasparameter und Betriebsdaten.

Die Emissionsmessungen belegen, dass die eingesetzten Mehrkammerofensysteme, die hinsichtlich Bau und Betrieb den Anforderungen der VDI-Richtlinie 3890 entsprechen, die Grenzwerte der TA-Luft für die verbrennungsabhängigen Emissionsparameter CO und C<sub>Ges</sub> mit

ausreichendem Sicherheitsabstand einhalten. Um dem Referentenentwurf zur Neufassung der TA-Luft (Stand 26.07.2018) zu genügen, sind, wie die Messungen zeigen, auch Kleintierkrematorien zwingend mit Staubfiltern auszustatten. Nur so lassen sich Staubemissionskonzentrationen von weniger als  $20 \text{ mg/Nm}^3$  gesichert einhalten. Da beim Einsatz von Gewebefiltern die Abgase abgekühlt werden müssen, bietet es sich an, durch zusätzliche Zugabe von Sorbentien, z. B. einer Aktivkohle-Kalk-Mischung, auch Schadgase, wie  $\text{SO}_x$ , HCl und HF, sowie PCDD/F wirkungsvoll nach dem Trockensorptionsverfahren abzuscheiden. Wie die Emissionsmessungen belegen, können bei Verwendung geeigneter Sorbentien die  $\text{SO}_x$ -Emissionen um 30 bis 40 % und HCl um etwa 85 % reduziert werden. Auch lassen sich auf diese Weise PCDD/F-Emissionen auf Konzentrationen nahe der Nachweisgrenze absenken. Aus den Untersuchungen geht ferner hervor, dass HF- und Hg-Emissionen bei Tierkrematorien nach heutiger Datenlage vernachlässigbar sind.

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen wird die Empfehlung ausgesprochen, dass jede Tierkremationsanlage mit einer leistungsstarken Abgasreinigung ausgestattet sein sollte. Diese Forderung erscheint trotz des damit verbundenen zusätzlichen Investitionsaufwands auch deshalb gerechtfertigt, dass damit eine Gleichbehandlung mit der Humankremation gegeben ist. In diesem Zusammenhang sollte auf Gewichtslimitierungen der zu kremierenden Tierkörper (Heimtiere und Pferde) verzichtet werden, da dies einer praxisorientierten Anwendung widerspricht.

Das Ziel, Mensch und Umwelt vor Schadstoffemissionen zu schützen, wird dann umfassend erreicht, wenn sichergestellt wird, dass die installierte Ofentechnik und Abgasreinigung sicher und kontinuierlich arbeiten. Deshalb wird analog zur Humankremation empfohlen, die Qualität der Verbrennung durch eine kontinuierliche CO-Messung und die Filterfunktion durch einen Filterwächter zu überwachen. Durch regelmäßig wiederkehrende Emissionsmessungen können nach heutiger Einschätzung die Emissionen wie bisher in geeigneter Weise überprüft werden.

## Summary

According to the nationwide data collection carried out as part of this project, 27 pet crematoria are in operation in Germany (as of September 2018). Further 3 pet crematoria are under construction or respectively in the commissioning phase. Except for the pet crematoria in Badbergen and in Schwäbisch Hall all pet crematoria are equipped with one cremation line. In the pet crematorium of Schwäbisch Hall the first horse cremation line in Germany is in operation since December 2017.

In order to get an overview of the previous practice of permit procedures as well as on the national state of the art of pet crematoria a nationwide data collection was conducted by interviewing all operators of such plants. This data collection was based on voluntary information given by the responsible persons of the pet crematoria. Only in 4 of 30 cases no information on notifications of permission was obtained, neither by the operators nor by the responsible permit authorities.

Based on the available notifications of permission, in total 87 %, the actual and non-uniform practice of permit procedures can be evaluated. Thus, former notifications of permission were issued in compliance with building legislation and in some cases at a later date extended to a permission according to the German Federal Immission Control Act (BImSchG). According to the Fourth Ordinance for the Implementation of the Federal Immission Control Act (4. BImSchV) pet crematoria are related to facilities requiring official approval for operation. Regarding cremation capacity it is shown that most of the plants are approved according to no. 7.12.1.3 of Annex 1 to 4. BImSchV which corresponds to a cremation capacity of less than 50 kg/h. Only 5 crematoria are approved for higher cremation capacities acc. to no. 7.12.1.2 of Annex 1 to 4. BImSchV. It was further clearly indicated that also the maximum weight of pets, permitted to cremation, are varying in the different notifications of permission. Some of the notifications of permission include regulations for maximum weight loads whereas in a few cases yearly mass flow rates are limited. Some permits do not have any weight limitation.

With respect to European Directive 2008/98/EC which classifies animal carcasses according to “waste” nearly all notifications of permission include requirements for temperature and residence time in the post combustion chamber. In general 850 °C for at least 2 seconds have to be achieved in post combustion. Only in one case a pet crematorium is approved for 1100 °C and 0.2 seconds.

As further shown in the study the notifications of permission reveal partly significant differences in emission requirements. Since the cremator itself is in focus of permission interest, almost all notifications of permission request emission of carbon monoxide of less than 50 mg/Nm<sup>3</sup>, normally based on 11 % O<sub>2</sub>, dry, as an hourly mean value. In some cases half-hourly mean values are required whereas in other cases CO emission limits of more than 50 mg/Nm<sup>3</sup> are tolerated. Disregarding these crematoria with higher CO emission limits all other cremators have to be designed according to the state-of-the-art as defined in the VDI (Verein Deutscher Ingenieure) Guideline no. 3890.

The required emission limitations for dust for the different crematoria according to no. 7.12.1.3 of Annex 1 to 4. BImSchV are varying between 10 to 150 mg/Nm<sup>3</sup> whereas in some notifications of permission the mass flow rate additionally is limited to between 0.02 to 0.2 kg/h. In consequence, small pet cremators of less than 50 kg/h are able to be operated in order to meet the emission limitations for dust without any filter system. Pet crematories according to no.

7.12.1.2 of Annex 1 to 4. BImSchV, in general, have to meet  $10 \text{ mg/Nm}^3$  for emission of particulates. In addition these plants have to meet further emission requirements, with one exception, all crematoria of this category are equipped with a baghouse filter system.

Also the practice of permit procedures regarding the emission limitations for sulfur oxides and nitrogen oxides is very non-uniform. Depending on the local permit authorities the emission limitation for sulfur oxide is varying between 200 and  $700 \text{ mg/Nm}^3$ , mostly  $350 \text{ mg/Nm}^3$ , as hourly or half-hourly mean values. Similarly, the requirements for emission of nitrogen oxides is varying between 100 and  $700 \text{ mg/Nm}^3$ . For both groups of pollutants in general the mass flow rates are limited too, alternatively or in addition.

The notifications of permission normally include emission limitations for polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) and dibenzofurans (PCDF), mostly set at  $0.1 \text{ ng TEQ/Nm}^3$ . Also for this group of pollutants some exceptional cases exist. In some cases, mainly pet crematories acc. to no. 7.12.1.2 of Annex 1 to 4. BImSchV, emission limits for heavy metals and other pollutants of toxicological relevance have to be met.

In summary, it can be stated that nationwide and even within the federal states the practice of permit procedures is very non-uniform and depends on the local permit authorities. This has an impact on the technical installations and in consequence also on the competition between pet crematoria.

From a technical point of view all pet crematoria in Germany are equipped with multi-chamber incinerators, designed as flatbed cremators, of which only 6 plants have an adsorptive flue gas cleaning device. Apart from one electrical heated oven all cremators are heated using gas-fired burners so that the design conditions represent the German state of the art as described by the VDI Guideline no. 3890 to a large extend.

Caused by the design as a multi-chamber system the cremators can be operated in such a way that in the main combustion chamber, in which cremation takes place, the process runs with low gas velocity. Thereby, the entrainment of cremated ash particles via the flue gas path is minimized, which is very important regarding low dust emissions. Furthermore cremated ash remains in the cremator and can be added to the urn. On the contrary, post combustion chambers are designed to high combustion efficiency of combustion-dependent harmful substances, such as carbon-monoxide, total organic carbon and to a smaller extend of PCDD and PCDF. To achieve high combustion efficiency high turbulence is aimed in post combustion chambers. With respect to low emissions of CO most of the cremators are equipped with oxygen-controlled computer-aided process controllers which are well-proven in human cremation systems. All pet cremators are refractory-lined using firebricks and refractory concretes, insulating bricks and other insulation layers. Caused by this design heat loss is minimized and heat release from cremation is partly stored within the cremator and can be used for starting-up of the following cremation process.

In Germany, new type pet cremators correspond in construction, design and operation to the state of the art acc. to the VDI Guideline no. 3890. Older cremators have to be rehabilitated in regular intervals particularly with regard to the renovation of the brick layering. Since in contrast to human cremation continuous monitoring of CO in general is not required, the date for brick re-layering is entirely in the decision of the plant operators. From the scattered emission reports received during the nationwide data collection presented in this study no need for rehabilitation was identified.

Temperature and residence time conditions acc. to the European Directive 2008/98/EC impose further requirements to plant operation as well all as to its verification which does not necessarily represent a quality characteristic. Especially, in view of the fact that the cremation process itself is characterized by very unsteady combustion conditions of the pets leading to high variations in flue gas volume and heat flows as well as in flue gas temperature and oxygen content. Therefore in the VDI Guideline no. 3890 a quasi-stationary model was proposed which is based on steady combustion calculation. As informed by some plant operators in some crematoria very extensive investigations for verification are requested by local authorities. In consequence a uniform nationwide verification in all crematoria would be desirable which is based on the proposals of the VDI Guideline no. 3890, for example.

Due to the different requirements in the notifications of permission some of the crematoria are equipped with flue gas treatment systems normally based on dry sorbent reaction technology. It consists of two main components – sorbent injection within a reactor followed by a baghouse filter. This technology approved in other plants with low flue gas volume flows (such as in human crematoria) can be considered as well-proven for this application, too. By the use of adapted reagents (for example mixtures of hydrated lime and activated carbon) emission requirements for dust, sulfur oxides, heavy metals and PCDD/PCDF as requested in the notifications of permission can be met under specified normal operation. It can be met even in the case of cremation of extremely long-haired pets.

Although alternatively to mass flow limits of 1.8 kg/h some pet crematoria have to meet emission limits for nitrogen oxides (given as  $\text{NO}_2$ ) of 100 mg/ $\text{Nm}^3$ , only one plant is equipped with selective non-catalytic reduction (SNCR) technology. Unfortunately no information on the experiences of this plant is available. Despite this, it has to be questioned whether emission limits of nitrogen oxides of 100 mg/ $\text{Nm}^3$  can be met without any secondary measures for  $\text{DeNO}_x$ . The VDI Guideline no. 3890 describes for the emission of nitrogen oxides a range from 200 to 500 mg/ $\text{Nm}^3$  as state-of-the-art.

As part of this study also aspects of profitability have been considered. The analysis focused on the following cases:

- pet crematorium (< 50 kg/h) acc. to no. 7.12.1.3 of Annex 1 to 4. BImSchV without flue gas cleaning device,
- retrofitting of flue gas cleaning system in a pet crematorium of the category acc. to no. 7.12.1.3 of Annex 1 to 4. BImSchV,
- pet crematorium (100 kg/h) acc. to no. 7.12.1.2 of Annex 1 to 4. BImSchV including flue gas cleaning.

In a first step investment costs for technologies acc. to the state-of-the-art are estimated whereas actual market prices are taken as a basis. From the following operational cost analysis two essential conclusions can be drawn:

- 1) Related to the operational pet capacity the total operational costs for a cremation plant (< 50 kg/h) acc. to no. 7.12.1.3 without flue gas cleaning device are in the order of a pet crematorium (100 kg/h) acc. to no. 7.12.1.2, which includes a flue gas cleaning system.
- 2) Retrofitting of a cremation plant (< 50 kg/h) acc. to no. 7.12.1.3 with a flue gas cleaning system, which corresponds to that of a cremation plant (100 kg/h) acc. to no. 7.12.1.2, leads to an increase of total operational costs related to operational pet capacity in the order of 40 %.

In order to compare with European neighbouring countries and corresponding to the specifications of the German Environment Agency the requirements in Switzerland, the Netherlands and in France are taken into account. It is shown that especially for small pet cremation plants large differences in emission limits occur which lead to quite different technical standards of the plants. The highest technical emission standards are established in Switzerland. According to the actual requirements in Switzerland all cremation plants have to be equipped with flue gas cleaning devices, whereas in France even in cremation plants with operational pet capacity up to 10 Mg/d higher emission limits are accepted. According to the actual regulations in the Netherlands cremation plants of even higher throughput capacity can be operated without any flue gas cleaning system.

Compared to the requirements in the neighbouring countries the technical standard for cremation plants in Germany acc. to no. 7.12.1.2 with an operational pet capacity of more than 50 kg/h are similar to those in Switzerland. For plants acc. to no. 7.12.1.3 the requirements in Germany correspond rather to those in France.

In the course of this study the scope of work was extended to emission measurements in 5 pet crematoria. These crematoria were selected with respect to represent the cross section of all pet crematoria on one hand side and to demonstrate the potential of emission reduction by use of flue gas cleaning systems on the other hand. Against this background 3 pet cremation lines (up to 50 kg/h) without flue gas cleaning equipment and 2 lines which are equipped with flue gas cleaning systems were investigated. At the latter crematoria emission measurements were carried out in the raw gas and in the cleaned gas in parallel. The emission measurement program contained carbon monoxide (CO), total organic carbon (TOC), dust, sulfur and nitrogen oxides (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), hydrogen chloride and fluoride (HCl, HF), mercury and its compounds (Hg), polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo furans (PCDD/F) as well as accompanying detection of relevant flue gas parameters and operational data.

The results from the emission measurements show that the multi-chamber designed oven technology constructed and operated according to VDI Guideline no. 3890 meets the requirements for the combustion-dependent parameters CO and TOC regulated in the German Technical Instructions on Air Quality Control (TA Luft) with sufficient safety margin. However, as the emission measurements show, also small pet crematoria have to be equipped with dust filters in order to meet the dust emission limits of less than 20 mg/Nm<sup>3</sup> as set in the draft for amendment to TA Luft. Since the application of dust filters requires cooling down the flue gas, additional injection of sorbents, e. g. mixtures of lime and activated carbon, is proposed to reduce pollutants such as SO<sub>x</sub>, HCl, HF as well as PCDD/F in an effective way acc. to the dry sorbent reaction process. As demonstrated by the emission measurements SO<sub>x</sub> can be reduced by 30 to 40 % and HCl by approx. 85 % by using suitable sorbents. In addition, PCDD/F emissions can be reduced close to the detection limits of several congeners. The results from the measurements show further that HF and Hg emissions from pet crematoria can be neglected to the actual data base.

Based on the results of the investigations it is recommended that every pet crematorium should be equipped with a powerful flue gas cleaning system. This recommendation seems to be warrantable in the face of additional capital investment not least to meet technically equal treatment to human cremation. In this connection the use of body weight of the animal carcass (pets and horses) should be withdrawn because these limitations are not conform with practice of operation.

The objective of protecting humans and the environment from emissions of harmful substances is comprehensively achieved if it is ensured that the installed oven and removal technology works continuously and safely. On the lines of human crematoria it is therefore recommended to monitor the quality of the combustion process by the use of a continuous working CO analyzer and the functioning of the dust filter by a filter monitoring device. The monitoring of the intended continuous operation of the flue gas cleaning treatment should be carried out at defined intervals as done so far.

# 1 Datenerhebung

Die Datenerhebung stützt sich auf freiwillige Angaben der befragten Anlagenbetreiber. Eine Verifizierung, insbesondere der abgefragten betriebswirtschaftlichen Daten, ist nicht möglich.

## 1.1 Methodik der Datenerhebung und gewonnene Erfahrungen

Ausgehend von einer Internetrecherche wurde eine Liste existierender Tierkrematorien erstellt, die in Gesprächen mit dem Bundesverband Deutscher Tierkrematorien e. V., dem jedoch nicht alle Tierkrematorien angehören, sowie mit Anlagenbetreibern weiter vervollständigt wurde. In einem weiteren Schritt wurde den Eigentümern bzw. Anlagenbetreibern die Notwendigkeit der Datenerhebung erläutert. Bei 87 % der Anlagenbetreiber war Bereitschaft festzustellen, sich auf freiwilliger Basis an der Datenerhebung zu beteiligen. Soweit zugänglich, wurden die fehlenden Informationen im Rahmen einer Internetrecherche ergänzt.

Besonders schwierig war die Erhebung der betriebswirtschaftlichen Daten, wie jährliche Betriebsstunden und Kremationsleistung, da hierbei wettbewerbliche Interessen zwischen den einzelnen Tierkrematorien betroffen waren. Gleiches gilt für die Erfassung der Bypassfälle, über die keine Auskünfte erteilt wurden.

Die überwiegende Mehrheit der befragten Betreiber unterstützte dieses Vorhaben vor allem vor dem Hintergrund, zukünftig eine bundesweit einheitliche Genehmigungspraxis zu erreichen.

## 1.2 Tierkrematorien in Deutschland

In Deutschland sind – Stand September 2018 – 27 Tierkrematorien mit insgesamt 29 Verfahrenslinien unterschiedlicher Größe in Betrieb (Tabelle 1). Drei weitere Heimtierkrematorien mit jeweils einer Verfahrenslinie sind derzeit in Bau bzw. stehen vor der Inbetriebnahme. Im Dezember 2017 hat das erste Pferdekrematorium in Schwäbisch Hall seinen Betrieb aufgenommen. Dort können Pferdekörper bis zu einem Einzelgewicht von 1.000 kg kremiert werden. Weitere Tierkrematorien befinden sich in der Planung/Genehmigung; darunter zwei Anlagen zur Pferdekremation.

**Tabelle 1: Tierkrematorien in Deutschland (Stand: Sept. 2018)**

| Postleitzahl | Standort               | Bundesland          | Anzahl der Linien |
|--------------|------------------------|---------------------|-------------------|
| 03096        | Werben                 | Brandenburg         | 1                 |
| 13127        | Berlin                 | Berlin              | 1                 |
| 14513        | Teltow                 | Brandenburg         | 1                 |
| 16928        | Pritzwalk              | Brandenburg         | 1                 |
| 21271        | Hanstedt               | Niedersachsen       | 1                 |
| 24594        | Hohenweststedt         | Schleswig-Holstein  | 1                 |
| 26340        | Zetel-Bohlenbergerfeld | Niedersachsen       | 1                 |
| 29559        | Emern                  | Niedersachsen       | 1                 |
| 34439        | Willebadessen          | Nordrhein-Westfalen | 1                 |

| Postleitzahl | Standort                  | Bundesland          | Anzahl der Linien |
|--------------|---------------------------|---------------------|-------------------|
| 35315        | Homberg/Ohm               | Hessen              | 1                 |
| 46485        | Wesel                     | Nordrhein-Westfalen | 1                 |
| 47877        | Willich Münchheide IV     | Nordrhein-Westfalen | 1                 |
| 49635        | Badbergen                 | Niedersachsen       | 2                 |
| 50181        | Bedburg                   | Nordrhein-Westfalen | 1                 |
| 51647        | Gummersbach               | Nordrhein-Westfalen | 1                 |
| 56751        | Polch                     | Rheinland-Pfalz     | 1                 |
| 61250        | Usingen                   | Hessen              | 1 (Bau)           |
| 64293        | Darmstadt                 | Hessen              | 1                 |
| 67065        | Ludwigshafen-Rheingönheim | Rheinland-Pfalz     | 1                 |
| 69514        | Laudenbach                | Baden-Württemberg   | 1                 |
| 71686        | Remseck-Aldingen          | Baden-Württemberg   | 1                 |
| 74229        | Oedheim                   | Baden-Württemberg   | 1                 |
| 74523        | Schwäbisch Hall           | Baden-Württemberg   | 2                 |
| 78713        | Schramberg-Sulgen         | Baden-Württemberg   | 1                 |
| 81829        | München                   | Bayern              | 1                 |
| 85764        | Oberschleißheim           | Bayern              | 1 (Bau)           |
| 88453        | Erolzheim                 | Baden-Württemberg   | 1                 |
| 91207        | Lauf a. d. Pegnitz        | Bayern              | 1                 |
| 97855        | Triefenstein              | Bayern              | 1 (Bau)           |
| 99310        | Dornheim                  | Thüringen           | 1                 |

## 2 Situationsanalyse zu rechtlichen Vorgaben

Die Situationsanalyse basiert auf der Datenerhebung bei allen Tierkrematorien in Deutschland (Stand September 2018). In Ermangelung einer bis dato für Tierkrematorien bundesweit einheitlichen Immissionsschutzpraxis werden die erfassten Kremationsanlagen in Bezug auf die jeweiligen Genehmigungsbescheide sowie des Standes der Technik gemäß der VDI-Richtlinie 3890 [1] bewertet.

Im Gegensatz zu den Humankrematorien unterliegen Tierkrematorien in Deutschland derzeit keiner einheitlichen Genehmigungspraxis. Gemäß der EG-Verordnung Nr. 1069/2009 werden verstorbene Heimtiere als Abfall zur Beseitigung eingestuft [2]. Da Heimtiere und auch Pferde als Begleiter des Menschen einen anderen Stellenwert als Nutztiere genießen, legen viele Tierbesitzer großen Wert darauf, dass die verstorbenen Tiere einer würdevollen Kremation zugeführt werden. Derartige Anlagen sind nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigungsbedürftig; jedoch werden in Deutschland unterschiedliche Anforderungen an diese Anlagen gestellt, die von der TA Luft [3] bis zu immissionsschutzrechtlichen Anforderungen in Anlehnung an die 17. BImSchV [4] reichen. Mit der VDI-Richtlinie 3890 wurde der Stand der Technik beschrieben und die erreichbaren Emissionswerte für Heimtierkrematorien zusammengestellt (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Emissionswerte bei Kremationsanlagen für Heimtiere nach VDI-Richtlinie 3890 [1]**

| Emissionsparameter                              | Überwachung                                                                                               | Erreichbare Emissionswerte gemäß beschriebenem Stand der Technik bei Einzel- und Sammelkremationen | Emissionsanforderung     |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| CO                                              | diskontinuierlich als Halbstundenmittelwert                                                               | (3 ... 50) mg/m <sup>3</sup>                                                                       | 50 mg/m <sup>3</sup>     |
| Gesamt-C                                        | diskontinuierlich als Halbstundenmittelwert                                                               | (3 ... 10) mg/m <sup>3</sup>                                                                       | 20 mg/m <sup>3</sup>     |
| Gesamtstaub                                     | diskontinuierlich als Halbstundenmittelwert                                                               | (2 ... 5) mg/m <sup>3</sup>                                                                        | 20 mg/m <sup>3</sup>     |
| HCl                                             | diskontinuierlich als Halbstundenmittelwert                                                               | (5 ... 30) mg/m <sup>3</sup>                                                                       | 30 mg/m <sup>3</sup>     |
| SO <sub>x</sub> ;<br>angeg. als SO <sub>2</sub> | diskontinuierlich als Halbstundenmittelwert                                                               | (0,01 ... 0,2) g/m <sup>3</sup>                                                                    | 0,35 g/m <sup>3</sup>    |
| NO <sub>x</sub> ;<br>angeg. als NO <sub>2</sub> | diskontinuierlich als Halbstundenmittelwert                                                               | (200 ... 500) mg/m <sup>3</sup>                                                                    | 1,8 kg/h                 |
| Dioxine/Furane                                  | diskontinuierlich als 6h-Mittelwert (3 Messungen bei Erstmessung, 2 Messungen bei Wiederholungsmessungen) | < 0,01 ngTEQ/m <sup>3</sup>                                                                        | 0,1 ngTEQ/m <sup>3</sup> |

Sauerstoffbezug bei allen Angaben: 11 % O<sub>2</sub>

## 2.1 Genehmigungsrechtliche Einordnung und Folgerungen für Heimtierkrematorien

Aus der EG-Verordnung Nr. 1069/2009 leitet sich ab, dass tierische Nebenprodukte, zu denen nach Art. 8 dieser Verordnung auch Tierkörper von verstorbenen Heimtieren zählen, als Abfall zu beseitigen sind. Abfall ist hierbei im Sinne von Artikel 3 Absatz 1 der Richtlinie 2008/98/EG zu verstehen. Die Beseitigung kann gemäß EG-Verordnung Nr. 1069/2009, Art. 12, durch Verbrennung oder Vergraben in einer genehmigten Deponie erfolgen. Gemäß Art. 24 sind nur solche Anlagen zur Verbrennung zugelassen, die über eine Betriebsgenehmigung gemäß der Richtlinie 2000/76/EG (Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Dezember 2000 über die Verbrennung von Abfällen) verfügen. Demnach unterliegen Heimtierkrematorien gemäß EU-Recht der Abfallverbrennungsrichtlinie.

Die EG-Verordnung Nr. 1069/2009 beschreibt vornehmlich in Art. 25 die beim Betrieb von Anlagen zur Verbrennung umzusetzenden allgemeinen Hygieneanforderungen. Diese beinhalten sowohl konstruktive Maßnahmen und Einrichtungen (Lagerung, Kühlung, Desinfektionssektoren...) als auch betriebliche Abläufe (Arbeitskleidung, Desinfektionspflichten...). Ergänzend zur EG-Verordnung Nr. 1069/2009 ist die EU Durchführungsverordnung Nr. 142/2011 [5] zu berücksichtigen, die zudem in den Anhängen bindende Anforderungen für Tierkrematorien enthalten, wie beispielsweise die nachfolgende Verbrennungsbedingung (vgl. Anhang III, Abschnitt 2):

*Abfallverbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen sind so auszulegen, auszurüsten, auszuführen und zu betreiben, dass die Temperatur des entstehenden Verbrennungsgases kontrolliert, gleichmäßig und selbst unter den ungünstigsten Bedingungen 2 s auf 850 °C erreicht oder für 0,2 s auf 1 100 °C erhöht wird; die Messung muss in der Nähe der Innenwand oder an einer anderen repräsentativen Stelle des Brennraums, in dem die Abfallverbrennung oder Mitverbrennung erfolgt, entsprechend der Genehmigung der zuständigen Behörde erfolgen.*

Nach der Vierten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4. BImSchV) sind Tierkrematorien genehmigungsbedürftige Anlagen, die gemäß Anhang I Nr. 7.12.1 zu genehmigen sind. Die Verfahrensart wird bestimmt in Abhängigkeit der Durchsatzleistung. Anlagen mit einer Durchsatzleistung von 50 kg/h bis weniger als 10 Tonnen pro Tag sind entsprechend Nr. 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV nach dem großen Genehmigungsverfahren **mit** Öffentlichkeitsbeteiligung gemäß § 10 des BImSchG zu genehmigen. Bei Anlagen, die einen Durchsatz von weniger als 50 kg/h **und** weniger als 50 kg pro Charge aufweisen, ist nach Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV das vereinfachte Genehmigungsverfahren **ohne** Öffentlichkeitsbeteiligung gemäß § 19 des BImSchG anzuwenden. Der Vollständigkeit halber sei darauf verwiesen, dass bei Anlagen der Nr. 7.12.1.1 des Anhangs 1 der 4. BImSchV (10 Tonnen und mehr pro Tag) die Anlage nicht nur gemäß § 10 des BImSchG zu genehmigen ist, sondern darüber hinaus Art. 10 der europäischen Richtlinie 2010/75/EU anzuwenden ist. Wie die Recherche in dieser Arbeit zeigt, fallen die Heimtier- und Pferdekrematorien in Deutschland aufgrund Ihrer Größe allesamt in die Nrn. 7.12.1.2 oder 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV.

In einer Petitionsanfrage an das Umweltministerium in Baden-Württemberg wurde die Frage aufgeworfen, ob bei einer Anlage der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV, also mit einer Verbrennungskapazität von weniger als 50 kg/h, auch das Beschickungsgewicht der Charge auf unter 50 kg begrenzt ist [6]. In der Argumentation führte der Petent aus, dass durch eine

verlängerte Brenndauer der stündliche Massenstrom eingehalten werden könne. Mit der Klarstellung der in der 4. BImSchV vom 9. Januar 2017, in Kraft getreten am 14. Januar 2017, wurde bei der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV, charakterisiert mit „weniger als 50 Kilogramm je Stunde“, der Zusatz „und weniger als 50 Kilogramm pro Charge“ eingeführt. In der Konsequenz bedeutet dies, dass in den Anlagen der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV keine Tierkörper mit einem Gewicht von 50 kg oder mehr kremiert werden können. Der Petition konnte daher nicht abgeholfen werden.

Grundsätzlich sind bei Anlagen der Nrn. 7.12.1.2 und 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen die Vorschriften der TA Luft [3] einzuhalten. Dabei obliegt es der genehmigenden Behörde, über die TA Luft hinausgehende einzelne strengere Emissionsbegrenzungen festzulegen bzw. andere Verordnungen, wie die 17. BImSchV (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen [4]) oder die 27. BImSchV (Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung [7]) heranzuziehen.

Aus der TA Luft [3] leiten sich folgende Emissionsbegrenzungen, jeweils bezogen auf 11 % O<sub>2, tr</sub>, ab:

- Gesamtstaub: 0,20 kg/h oder 20 mg/Nm<sup>3</sup>
- Gesamtkohlenstoff (C<sub>Ges</sub>): 0,50 kg/h oder 50 mg/Nm<sup>3</sup>
- Stickoxide (als NO<sub>2</sub>): 1,8 kg/h oder 0,35 g/Nm<sup>3</sup>
- Schwefeloxide (als SO<sub>2</sub>): 1,8 kg/h oder 0,35 g/Nm<sup>3</sup>
- Chlorwasserstoff (HCl): 0,15 kg/h oder 30 mg/Nm<sup>3</sup>
- Dioxine/Furane (PCDD/F): 0,25 µg TEQ/h oder 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup>.

Für Kohlenmonoxid lässt sich aus der TA-Luft kein Grenzwert ableiten, der für Tierkrematorien anzuwenden wäre. Daher erfolgt in der Regel ein Rückgriff auf die 17. oder 27. BImSchV, wobei in beiden Verordnungen keine Massenstrombegrenzung für Kohlenmonoxid angegeben ist:

- Kohlenmonoxid (CO): 50 mg/Nm<sup>3</sup>.

Die vorgenannten, in der TA Luft festgelegten Emissionsbegrenzungen der zulässigen Massenströme und Massenkonzentrationen für die einzelnen Schadstoffe sind als Alternativen zu verstehen; es sei denn, es wird im Genehmigungsbescheid ausdrücklich bei Einhaltung des Massenstromwertes die Einhaltung einer Massenkonzentration gefordert. Gerade bei kleinen Verbrennungseinheiten der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV, also mit einer Leistung von weniger als 50 kg/h, kann mit der Einhaltung der Massenkonzentrationen eine technologische Änderung der Anlagentechnik ausgelöst werden, wie das nachfolgende Beispiel belegt. Aus den Angaben für den Gesamtstaub lässt sich folgern, dass die beiden Anforderungen nur dann gleichwertig sind, wenn der

$$\text{Abgasvolumenstrom} = 0,2 \text{ [kg/h]} / 20 \text{ [mg/Nm}^3\text{]} = 10.000 \text{ [Nm}^3\text{/h]}$$

beträgt. Bei Anlagen der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV liegt der mittlere Abgasvolumenstrom üblicherweise in der Größenordnung von etwa 1.000 Nm<sup>3</sup>/h und teilweise noch darunter, so dass die Anforderungen zur Einhaltung der Massenkonzentration von 20 mg/Nm<sup>3</sup> um etwa den Faktor 10 strenger zu bewerten ist als bei der Einhaltung des vorgegebenen Massenstromes. An dieser Frage kann sich entscheiden, ob die Anlage mit oder ohne einen Staubfilter auszustatten ist.

## 2.2 Sonderfall Pferdekrematorien

Mit der Änderung des Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetzes (TierNebG) [8] wurde den zuständigen Behörden die Möglichkeit eingeräumt, für Equiden die Verbrennung im Sinne des Artikels 3 Nummer 6 Buchstabe b der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009, soweit diese in einer Verbrennungsanlage, die die Voraussetzungen des Artikels 6 Nummer 1 der Verordnung (EU) Nr. 142/2011 erfüllt, zu genehmigen. Dabei ist sicherzustellen, dass die Verbrennung nur in folgenden Anlagen stattfinden kann:

- a) Abfallverbrennungsanlagen und Mitverbrennungsanlagen, die über eine Betriebsgenehmigung gemäß der Richtlinie 2000/76/EG verfügen; oder
- b) Abfallverbrennungsanlagen und Mitverbrennungsanlagen, die, sofern sie keiner Genehmigung gemäß der Richtlinie 2000/76/EG bedürfen, gemäß Artikel 24 Absatz 1 Buchstaben b oder c der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 von der zuständigen Behörde für die Beseitigung durch Abfallverbrennung oder die Beseitigung oder Verwertung tierischer Nebenprodukte oder Folgeprodukte, wenn sie Abfall sind, durch Mitverbrennung zugelassen wurden.

Damit sind die Voraussetzungen für die Errichtung und Betrieb von Pferdekrematorien gegeben, wenn ergänzend zu den veterinärrechtlichen, baurechtlichen und sonstigen Anforderungen die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen der 17. BImSchV umgesetzt werden.

## 2.3 Genehmigungspraxis

Die im Zuge der Datenerhebung erhaltenen Genehmigungsbescheide sind in anonymisierter Form in Tabelle 3 zusammengestellt. Da bis dato keine bundeseinheitliche gesetzliche Verordnung für Heimtierkrematorien in Deutschland existiert, ist eine uneinheitliche Genehmigungspraxis festzustellen. So wurden vor allem ältere Anlagen zunächst nach dem Baurecht genehmigt und später in einigen Fällen um eine Genehmigung nach dem BImSchG erweitert. Auch in der Zuordnung zu den einzelnen Kategorien spiegelt sich die Entwicklung des 4. BImSchG wider. Bei den Durchsatzleistungen zeigt sich, dass die überwiegende Mehrheit der Tierkrematorien für kleine Leistungen (< 50 kg/h; heutige Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV) genehmigt ist. Lediglich 5 Tierkrematorien (Stand September 2018) sind für höhere Durchsatzleistungen (heutige Kategorie 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV) genehmigt; hierzu gehört das erste, 2017, in Schwäbisch Hall zugelassene Pferdekrematorium.

**Tabelle 3: Genehmigungsbescheide (Stand: Sept. 2018)**

| Standort        | Kategorie          | Durchsatz [kg/h] | max. Gewicht [kg] |
|-----------------|--------------------|------------------|-------------------|
| 1               | 8.1. & 7.12 (Sp.1) | 100              | 3000 Krem/a       |
| 2 <sup>1)</sup> |                    |                  |                   |
| 3               | 7.12.1.2           | <50              | <50               |
| 4               | LBO                | 50               | <150 Mg/a         |
| 5 <sup>1)</sup> |                    |                  |                   |
| 6               | 8.1a (Sp.2)        | 50               | 60                |
| 7               | LBO                | k. A.            | k. A.             |

| Standort         | Kategorie          | Durchsatz [kg/h]    | max. Gewicht [kg]  |
|------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 8 <sup>1)</sup>  |                    |                     |                    |
| 9                | 7.12.1.3           | 49,9                | 438 Mg/a           |
| 10               | 7.12 (Sp.1)        | 49                  | -                  |
| 11               | 8.1a (Sp.2)        | 40                  | 85                 |
| 12               | 7.12.1.3           | 45                  | <50                |
| 13               | 8.1 (Sp.2)         | 50                  | -                  |
| 14               | 7.12.1.3           | 49                  | -                  |
| 15               | 8.1 (Sp.1)         | 70                  | 100                |
| 16               | 8.1.1.4.           | <50                 | 150                |
| 17               | LBO                | 49                  | 150 Mg/a           |
| 18               | 7.12.1.3           | <50                 | -                  |
| 19               | 7.12 (Sp.1)        | 50                  | -                  |
| 20               | 1774/2002 (Art. 4) | <50                 | <150 Mg/a          |
| 21 <sup>1)</sup> |                    |                     |                    |
| 22               | 7.12.1.2           | s. u. <sup>2)</sup> | -                  |
| 23               | 8.1a (Sp.2)        | 50                  | 60                 |
| 24               | 8.1 (Sp.2)         | < 50                | > 50 <sup>3)</sup> |
| 25               | 7.12.1.3           | <50                 | 80                 |
| 26               | 7.12 (Sp.1)        | 50                  | -                  |
| 27               | 7.12.1.2           | 100                 | -                  |
| 28               | 7.12 (Sp.1)        | 80                  | -                  |
| 29               | 7.12 (Sp.1)        | -                   | -                  |
| 30               | 7.12 (Sp.1)        | 50                  | -                  |

Hinweise: <sup>1)</sup> keine Informationen erhältlich; <sup>2)</sup> Heimtiere und Pferde; <sup>3)</sup> bei Tierkörpern größer 50 kg ist die Kremationszeit zu verlängern.

Unterschiedliche Auffassungen sind ferner beim maximalen zu kremierenden Tiergewicht festzustellen. So enthalten einige Bescheide keine Vorgaben zu den maximal zulässigen Tiergewichten während in anderen Fällen Beschränkungen auferlegt wurden. In Einzelfällen wurden jahresbezogene Durchsatzleistungen als limitierende Größe festgelegt, die, bezogen auf die stündliche Durchsatzleistung, mit rund 3000 jährlichen Betriebsstunden ausreichend dimensioniert ist.

Da der Kremationsofen im Fokus des genehmigungsrechtlichen Interesses steht, wurde in nahezu allen Bescheiden die Einhaltung des Kohlenmonoxidgehalts von 50 mg/Nm<sup>3</sup> gefordert; in der Regel normiert auf 11 % O<sub>2, tr</sub> und als Stundenmittelwert anzugeben. In einigen Fällen sind Halbstundenmittelwerte gefordert; z. T. sind höhere CO-Emissionen zulässig.

Die Zuordnung als „Abfall“ gemäß der europäischen Richtlinie 2008/98/EG führte in nahezu allen bundesdeutschen Tierkrematorien dazu, dass Temperatur-Verweilzeitforderungen in den Genehmigungsbescheiden aufgenommen wurden. In der Regel werden 850 °C und 2 s in der Nachverbrennung gefordert. Abweichungen hiervon waren in Einzelfällen festzustellen. So wurde antragsgemäß ein Tierkrematorium mit 1100 °C und 0,2 s genehmigt; in einem anderen Fall wurde auf die Verweilzeitforderung verzichtet. Auf die Nachweisführung der Temperatur-Verweilzeitforderung wird ausführlich in Abschnitt 1.3.4. eingegangen.

Auch bei den Emissionsbegrenzungen waren unterschiedliche Anforderungen in den einzelnen Genehmigungsbescheiden festzustellen. Dies zeigt sich deutlich anhand der drei Schadstoffgruppen, die in Tabelle 4 aufgeführt sind. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 1.2.1. angeführten beispielhaften Vergleichsbetrachtung zwischen Emissionsanforderungen auf der Basis von Konzentrationen versus Massenströmen wird deutlich, dass in Einzelfällen Anlagen der Kategorie 1.12.1.3. höheren Anforderungen unterliegen als andere. Die Genehmigungsbescheide enthalten i. d. R. eine Emissionsbegrenzung für PCDD/PCDF, die i. d. R. mit 0,1 ng TEQ/Nm<sup>3</sup> festgelegt ist. Auch hier gibt es einige Ausnahmefälle. In einigen Fällen, überwiegend Anlagen der Nr. 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV, wird auch der Ausstoß einiger Schwermetalle und anderer toxikologisch relevanter Stoffgruppen begrenzt.

**Tabelle 4: Unterschiedliche Emissionsanforderungen (Stand: Sept. 2018)**

| Standort | Gesamtstaub<br>mg/Nm <sup>3</sup> | Gesamtstaub<br>kg/h | Schwefeloxide<br>(SO <sub>x</sub> ) mg/Nm <sup>3</sup> | Schwefeloxide<br>(SO <sub>x</sub> )<br>kg/h | Stickstoffoxide<br>(NO <sub>x</sub> )<br>mg/Nm <sup>3</sup> | Stickstoffoxide<br>(NO <sub>x</sub> )<br>kg/h |
|----------|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1        | 30 (10) <sup>5)</sup>             |                     | 200 (50) <sup>5)</sup>                                 | -                                           | 400 (200) <sup>5)</sup>                                     | -                                             |
| 2        |                                   |                     |                                                        |                                             |                                                             |                                               |
| 3        | 50                                | -                   | -                                                      | -                                           | -                                                           | -                                             |
| 4        | 20                                | 0,02                | 350                                                    | 1,8                                         | 100                                                         | 1,8                                           |
| 5        |                                   |                     |                                                        |                                             |                                                             |                                               |
| 6        | 10                                | 0,2                 | -                                                      | -                                           | 100                                                         | 1,8                                           |
| 7        | 20                                | 0,1                 | 350                                                    | 1,8                                         | 350                                                         | 1,8                                           |
| 8        |                                   |                     |                                                        |                                             |                                                             |                                               |
| 9        | 10                                | -                   | -                                                      | -                                           | -                                                           | -                                             |
| 10       | 100                               | 0,2 <sup>1)</sup>   | 350                                                    | -                                           | 350                                                         | -                                             |
| 11       | 10                                | 0,02                | 350                                                    | 1,8                                         | 100                                                         | 1,8                                           |
| 12       | 20                                | 0,2                 | 350                                                    | 1,8                                         | 350                                                         | 1,8                                           |
| 13       | 20 <sup>4)</sup>                  | 0,2                 | 250 <sup>4)</sup>                                      | 0,25                                        | 350 <sup>4)</sup>                                           | 0,35                                          |
| 14       | 20                                | 0,2                 | -                                                      | 1,3                                         | -                                                           | 1,5                                           |
| 15       | 20 <sup>3)</sup>                  | -                   | 350 <sup>3)</sup>                                      | -                                           | 350 <sup>3)</sup>                                           | -                                             |
| 16       | 20                                | 0,1                 | 350                                                    | 1,8                                         | 100                                                         | 1,8                                           |
| 17       | 10 <sup>2)</sup>                  | 0,2                 | 350 <sup>2)</sup>                                      | 1,8                                         | 350 <sup>2)</sup>                                           | 1,8                                           |

| Standort | Gesamtstaub<br>mg/Nm <sup>3</sup> | Gesamtstaub<br>kg/h | Schwefeloxide<br>(SO <sub>x</sub> ) mg/Nm <sup>3</sup> | Schwefeloxide<br>(SO <sub>x</sub> )<br>kg/h | Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> )<br>mg/Nm <sup>3</sup> | Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> )<br>kg/h |
|----------|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 18       | 10                                | 0,2                 | -                                                      | -                                           | 350                                                      | 1,8                                        |
| 19       | 100                               | 0,2                 | -                                                      | -                                           | -                                                        | -                                          |
| 20       | 20                                | 0,02                | 350                                                    | 1,8                                         | 350                                                      | 1,8                                        |
| 21       |                                   |                     |                                                        |                                             |                                                          |                                            |
| 22       | 10                                | 0,2                 | 350                                                    | 1,8                                         | 350                                                      | 1,8                                        |
| 23       | 30                                | 0,2                 | -                                                      | -                                           | -                                                        | -                                          |
| 24       | - 6)                              | - 6)                | - 6)                                                   | - 6)                                        | - 6)                                                     | - 6)                                       |
| 25       | 10                                | 0,2                 | 350                                                    | 1,8                                         | 350                                                      | 1,8                                        |
| 26       | 30                                | -                   | -                                                      | -                                           | -                                                        | -                                          |
| 27       | 150                               | 0,2                 | -                                                      | 1,8                                         | -                                                        | 1,8                                        |
| 28       | 10                                | -                   | -                                                      | -                                           | -                                                        | -                                          |
| 29       | 20                                | -                   | -                                                      | -                                           | -                                                        | -                                          |
| 30       | 40 (20) <sup>5)</sup>             | 0,2                 | 700 (350) <sup>5)</sup>                                | 1,8                                         | 700 (350) <sup>5)</sup>                                  | 1,8                                        |

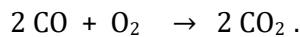
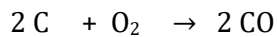
Hinweise: <sup>1)</sup> Es sind Konzentration **und** Massenstrom einzuhalten; <sup>2)</sup> Bezug 15 % O<sub>2</sub> trocken; <sup>3)</sup> Halbstundenmittelwerte; <sup>4)</sup> Bezug 6 % O<sub>2</sub> trocken; <sup>5)</sup> Halbstundenmittelwert (Tagesmittelwert); <sup>6)</sup> nach Auskunft des Betreibers liegen zum Zeitpunkt der Recherche keine Begrenzungen vor.

Aufgrund der uneinheitlichen Praxis in Deutschland im Umgang mit Tierkrematorien, und zwar nicht nur hinsichtlich der Genehmigung sondern auch bei der Überwachung der Anlagen, ist davon auszugehen, dass der in der VDI 3890 formulierte Stand der Technik **nicht** von allen in Betrieb befindlichen Anlagen einzuhalten ist.

### 3 Emissionsentstehung und -minderung

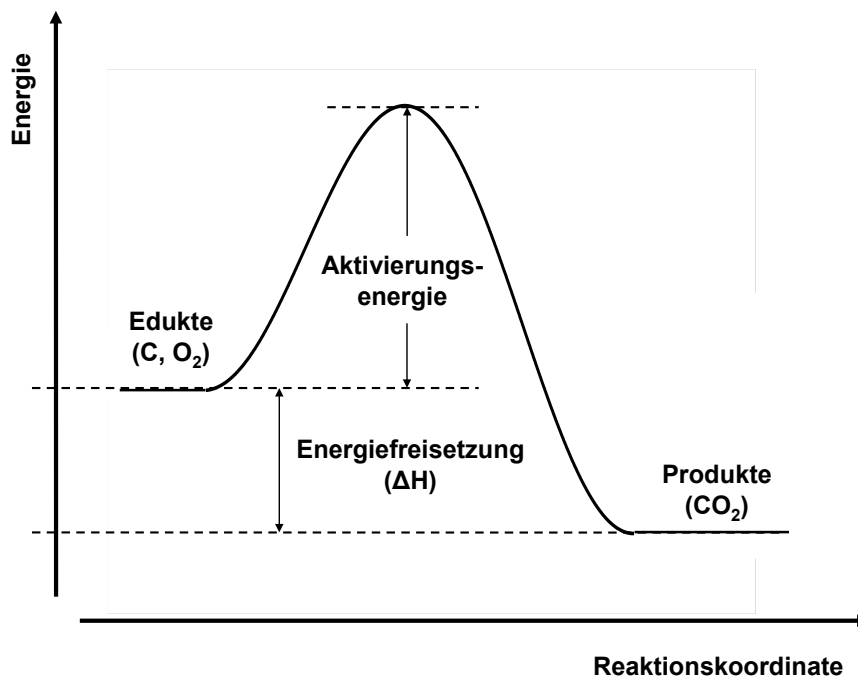
#### 3.1 Physikalisch-chemische Grundlagen

Bei der Verbrennung von Feststoffen wird im Wesentlichen der enthaltene Kohlenstoff durch Energiezufuhr zunächst in die Gasphase übergeführt, bevor er an der Verbrennung teilnimmt. Die Verbrennungsreaktion erfolgt mit Hilfe von Oxidationsmitteln, z. B. Sauerstoff, nach folgendem Schema:



Die Verbrennung ist dann vollständig abgeschlossen, wenn der gesamte Kohlenstoff in Kohlenstoffdioxid umgesetzt ist. Obwohl es sich hierbei um eine exotherme Reaktion handelt, wird zum Start (Zündung) Aktivierungsenergie benötigt (Abbildung 1). Diese ist entweder durch Energiezufuhr, durch Strahlungswärme aus im Ofenmauerwerk eingespeicherter Wärme, Stützfeuerung über Brenner und/oder aus der freigesetzten Reaktionswärme bereits laufender Reaktionen bereitzustellen.

**Abbildung 1: Reaktionsschema der Verbrennung**



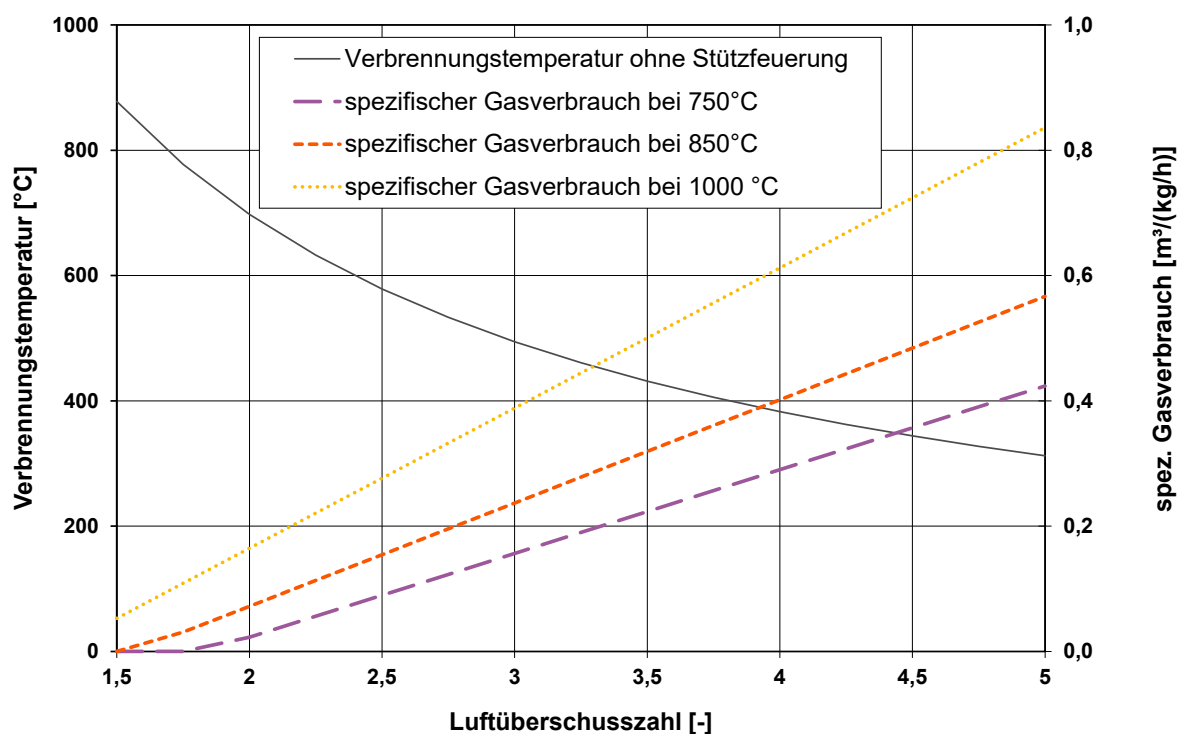
Quelle: Darstellung nach Moore und Hummel [9]

Bei unvollständiger Verbrennung, z. B. durch lokalen Sauerstoffmangel, wird also gemäß vorgenanntem Reaktionsschema nicht der gesamte Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid umgesetzt; es verbleibt das Zwischenprodukt „Kohlenmonoxid“. Je unvollständiger, also „schlechter“, der Verbrennungsprozess verläuft, desto höher ist der Kohlenmonoxidgehalt im Abgas. Die Güte der Verbrennung wird demnach durch die CO-Konzentration im Abgas charakterisiert. Wie aus vorgenanntem Reaktionsschema ferner hervorgeht, wird zur vollständigen Umsetzung des Kohlenstoffs im Idealfall eine exakt definierte Sauerstoffmenge (Mindestsauerstoffbedarf)

benötigt, wobei unterstellt wird, dass jedes Kohlenstoffatom mit Sauerstoff reagiert. Dies lässt sich bei Verbrennungsprozessen mit heterogenen Einsatzstoffen, wie sie bei der Tierkremation gegeben sind, nicht erreichen. Deshalb werden derartige Anlagen unter Sauerstoff-, respektive Verbrennungsluftüberschussbedingungen betrieben.

Andererseits stellt der Verbrennungsluftüberschuss eine Belastung des Verbrennungsprozesses dar, da ein zusätzliches, an der Verbrennung nicht teilnehmendes Abgasvolumen erwärmt werden muss, wodurch die Verbrennungstemperatur absinkt. Dies hat zur Folge, dass zur Einhaltung der vorgegebenen Temperatur- und Verweilzeitbedingungen (z. B. 850 °C und 2 s) zusätzlich Energie eingebracht (Zusatzfeuerung) werden muss, die ebenfalls das Abgasvolumen erhöht. Zur näherungsweisen Abschätzung der hierfür erforderlichen zusätzlichen Energie ist eine Massen- und Energiebilanz unter Einbeziehung der Verbrennungsrechnung für den Verbrennungsraum durchzuführen [10]. Beim Einsatz von Gasbrennern zur Stützfeuerung lässt sich damit der erforderliche, auf das Tiergewicht bezogene Erdgasverbrauch berechnen (Abbildung 2).

**Abbildung 2: Berechneter spezifischer Erdgasverbrauch zur Einhaltung der geforderten Nachverbrennungstemperatur**



Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG

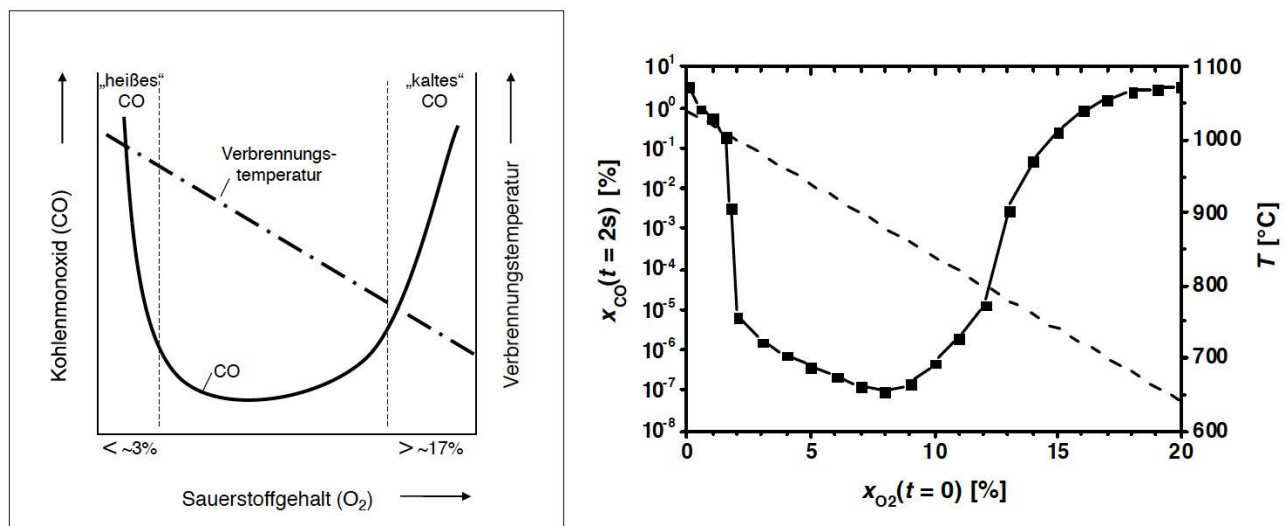
Es zeigt sich, dass mit zunehmender Luftüberschusszahl die sich einstellende Verbrennungstemperatur deutlich abnimmt. Des Weiteren lässt sich aus der Modellrechnung folgern, dass bereits bei niedrigen Luftüberschusszahlen, respektive geringe Sauerstoffkonzentrationen im Abgas in der Nachbrennzone, die Verbrennungstemperatur im Mittel unter 850 °C sinkt, so dass der Prozess durch Zusatzfeuerung unterstützt werden muss. Um die Temperatur- und Verweilzeitbedingungen von 850 °C und 2 sec in der Nachbrennzone einzuhalten, muss zur Kompensation der Wärmeverluste in dieser Zone die Eintrittstemperatur

höher liegen. In Abbildung 2 ist daher zum Vergleich auch der spezifische Gasverbrauch für die Eintrittstemperatur von 1000 °C in die Nachbrennzone angegeben. Unterstellt man eine Luftüberschusszahl von etwa 2,5, das einem O<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas nach der Brennkammer von ca. 11 % entspricht, so ist mit einem zusätzlichen Erdgasverbrauch von rund 0,28 m<sup>3</sup>/kg Tierkörper zu rechnen. Für einen Heimtierofen mit einer Durchsatzleistung von 50 kg/h ergibt sich ein rechnerischer Gasverbrauch von mindestens 14 m<sup>3</sup>/h (ohne Vorwärmen des Ofens).

### 3.2 Verbrennungsabhängige Schadstoffe

Wie das im vorangegangenen Abschnitt angegebene Reaktionsschema zeigt, handelt es sich bei Kohlenmonoxid (CO) um den klassischen Vertreter verbrennungsabhängiger Schadstoffe. Bei unvollständiger Verbrennung, d. h. nicht jeder Kohlenstoff oxidiert zu Kohlenstoffdioxid, verbleibt das Zwischenprodukt Kohlenmonoxid. Bei Verbrennungsprozessen mit heterogenen Einsatzstoffen, wie sie bei der Tierkremation gegeben sind, können nicht vorhersehbare Verbrennungsbedingungen auftreten, die zeitlich und lokal zu Sauerstoffmangel führen können. Deshalb werden Kremationsofensysteme unter Sauerstoff-, respektive Luftüberschussbedingungen betrieben. Andererseits stellt der Verbrennungsluftüberschuss, wie in 3.1. beschrieben, eine Belastung des Verbrennungsprozesses dar, da ein zusätzliches, an der Verbrennung nicht teilnehmendes Abgasvolumen erwärmt werden muss. Diese grundsätzlichen Zusammenhänge wurden von Schetter [10] für Humankrematorien in qualitativer Form angegeben (Abbildung 3 – links). Bachmann et al. [11] bestätigten die qualitativen Zusammenhänge mit einem reaktionskinetischen Modellansatz und stellten fest, dass bei einer Verweilzeit von 2 s mindestens 780 °C erforderlich sind, um den CO-Grenzwert von 50 mg/Nm<sup>3</sup> in jedem Betriebspunkt zu erreichen (Abbildung 3 – rechts).

**Abbildung 3: Kohlenmonoxid und Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt**



Quelle: Links: qualitatives Modell nach Schetter [10]; rechts: Modellrechnung zur Quantifizierung nach Bachmann et al. [11]

Die verbrennungstechnische Aufgabe besteht nun darin, den Tierkremationsofen so zu gestalten und zu betreiben, dass

- der Sauerstoffgehalt bei einem Sicherheitsabstand im Bereich von etwa 3 bis 17 % gehalten wird,
- turbulente Strömungsverhältnisse in der Abgasnachbrennzone erzielt werden, die auch Strahlen unvollständiger Verbrennung erfassen.

Diese Anforderungen zielen gleichermaßen auf die konstruktive Gestaltung der Verbrennungsluft- und Abgasführung innerhalb des Kremationsofens wie auf die Prozessregelung ab.

Zu den verbrennungsabhängigen Schadstoffen gehören ferner Kohlenwasserstoffe, ausgedrückt als Gesamtkohlenstoff (Gesamt-C), die ein analoges Verbrennungsverhalten zeigen und durch die vorgenannten konstruktiven und regeltechnischen Maßnahmen minimiert werden können.

### 3.3 Abgaskonditionierung

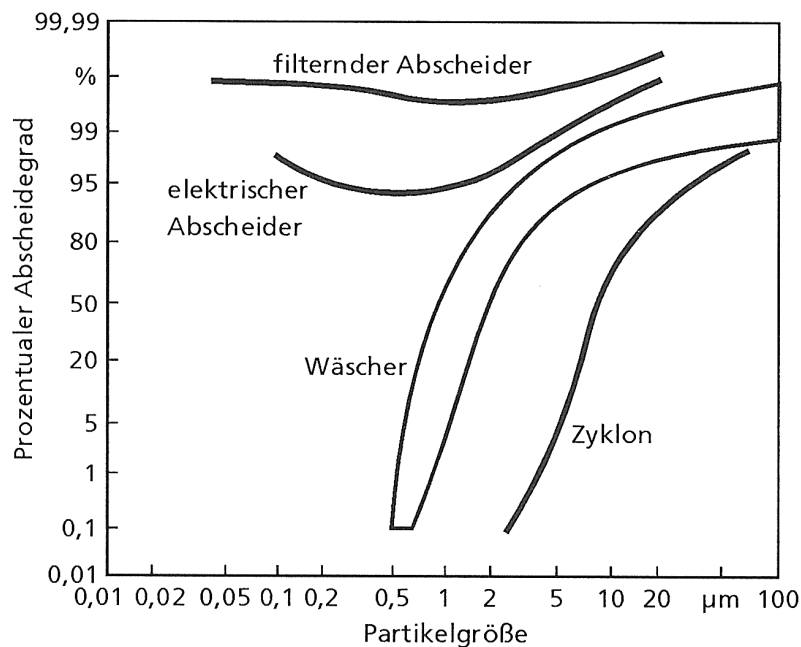
In Tierkrematorien, die über keine Abgasreinigungstechnologie verfügen, werden die Abgase, die den Abgaskanal nach dem Ofen üblicherweise mit Temperaturen im Bereich von 800 bis 1000 °C verlassen, zum Schutz der Kaminanlage in der Regel durch Kaltluftzuführung auf etwa 500 °C abgekühlt. Häufig kommen dabei sogenannte temperaturgeregelte Injektorgebläse zum Einsatz. Diese kostengünstige Maßnahme führt zu einer deutlichen Zunahme der Abgasmenge.

Der Einsatz von Staubabscheidern und andere weiterführende Maßnahmen zur Abgasreinigung erfordern einen begrenzten Temperaturarbeitsbereich, der, abhängig von den nachgeschalteten Abgasreinigungstechniken, meist auf etwa 130 bis 160 °C festgelegt wird. Um die Abgase auf dieses Temperaturfenster abzukühlen ist die „einfache“ Kaltluftbeimischung nicht zielführend, da sich u.a. die resultierende Abgasmenge deutlich erhöhen würde. Um vorgenannten Temperaturanforderungen zu genügen, erfolgt die Abgaskühlung **indirekt**, d. h. über Wärmeübertragungssysteme, oder **direkt** durch Verdampfungskühlung (vgl. [1]). Beim Einsatz von Verdampfungskühlern (Nutzung der Verdampfungsenthalpie von Wasser zur Abgaskühlung) können bei ungünstigen Wetterbedingungen sichtbare Wasserdampffahnen am Kaminaustritt entstehen, weshalb die Abgaskühlung meist indirekt erfolgt. Dabei kommen Wärmeübertragersysteme zur Anwendung, die mit Rohrbündelwärmetauschern bestückt und entweder als Abgas-/Luft-Wärmeübertrager, auch Luftvorwärmer (LUVO) genannt, oder als Abgas-/Flüssigkeits-Wärmeübertrager, häufig auch als Economiser (ECO) bezeichnet, ausgeführt werden. Auf die Bedeutung der „schnellen“ Abgaskühlung für die Rückbildungsmechanismen von polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen und Furanen wird auf Abschnitt 3.8 verwiesen.

### 3.4 Stäube und Aerosole

Mit Blick auf Emissionsbegrenzungen in Heimtierkrematorien kommt den Stäuben eine zentrale Bedeutung bei, da sie gleichzeitig in begrenztem Umfang als Träger gasförmiger Schadstoffe, wie Dioxine und Furane sowie Schwermetalle einzustufen sind. Sie werden in Kleinverbrennungsanlagen meist über Fliehkraftabscheider (Zyklone) und filternde Abscheider (Gewebefiltersysteme) abgeschieden, wobei die erzielbaren Abscheideleistungen maßgeblich von der Partikelgröße der abzuscheidenden Stäube abhängen (Abbildung 4) [12]. Mit Kombinationen aus Vorabscheidern für gröbere und teilweise noch glimmende Staubpartikel (Funkenflug; ca. 5 bis 50 µm) und Gewebefilter zur Feinstaubabscheidung lassen sich die Staubemissionen gesichert auf Werte unter 10 mg/Nm<sup>3</sup> begrenzen.

**Abbildung 4: Abscheidegrade von Staubabscheidern (entnommen aus [12])**



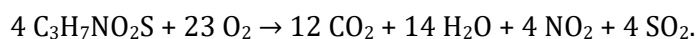
Quelle: aus [12]

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass grundsätzlich auch Heißgasfilter zur Staubabscheidung denkbar sind. Deren betriebstechnische Eignung ist jedoch für derartige Anwendungen bis dato nicht nachgewiesen.

### 3.5 Schwefeloxide

Bei der Tierkremation ist vor allem mit Schwefeloxidemissionen infolge der Verbrennung von Tierhaaren, insbesondere bei Tierkörpern mit langhaarigen Fellen, zu rechnen. Diese in der Praxis beobachteten Effekte leiten sich aus dem Umstand ab, dass Haare hauptsächlich aus Keratin bestehen, das, wie alle anderen Proteine, aus Aminosäuren aufgebaut ist. Besonders angereichert sind in den Haaren, Hufen und Nägeln die zur Gruppe der 22 unterschiedlichen Aminosäuren gehörende "Cystein", das einen erhöhten Schwefelgehalt aufweist [13].

Aus der Summenformel von Cystein ( $C_3H_7NO_2S$ ) lässt sich unter der Maßgabe einer vollständigen Verbrennung eine mögliche Reaktionsgleichung angeben zu



In Abhängigkeit der Reaktionsbedingungen (z. B. Sauerstoffgehalt und Verbrennungstemperaturen) können aus den Aminosäuren auch Schwefel- und Stickstofftrioxide ( $SO_3$  und  $NO_3$ ) sowie Produkte unvollständiger Verbrennung (u.a. CO) entstehen.

Die entstehenden Schwefel- und Stickstoffoxidverbindungen sind für die, vor allem bei der Kremation von langhaarigen Tierkörpern, entstehenden unangenehmen Gerüche verantwortlich, die gelegentlich festzustellen sind.

Als Sekundärmaßnahmen zur Schwefeloxidabscheidung kommen grundsätzlich Nassverfahren, quasitrockene Verfahren und Trockensorptionsverfahren in Betracht. Bei Kleinanlagen haben sich Trockensorptionsverfahren bewährt [14]. Als Sorptionsmittel können Calciumhydroxid

(Ca(OH)<sub>2</sub>) oder Natriumhydrogencarbonat (NaHCO<sub>3</sub>) dem Abgas zugeführt und in einem Reaktor mit diesem intensiv vermischt werden. In Abhängigkeit der eingesetzten Sorbentien ergeben sich partikelförmige Verbindungen, wie Calciumsulfit (CaSO<sub>3</sub>) und Calciumsulfat (CaSO<sub>4</sub>) oder Natriumsulfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), die zusammen mit Stäuben im Gewebefilter abgeschieden werden können. Die optimale Reaktionstemperatur für den Einsatz von Calciumhydroxid liegt im Bereich 130 bis 140 °C wohingegen Natriumhydrogencarbonat bei Temperaturen über 140 °C sehr wirkungsvoll ist [15].

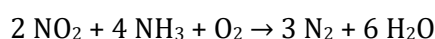
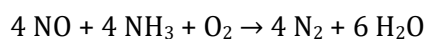
Zur gleichzeitigen Abscheidung organischer Schadstoffe, wie PCDD/F (vgl. Abschnitt 3.8), werden in Kleinanlagen kombinierte Sorptionsmittel (Kalk/Aktivkohle) eingesetzt.

### 3.6 Stickstoffoxide

Analog zu der Situation bei Schwefel zeigen Stickstoffoxidemissionsmessungen ebenfalls erhebliche Spitzenkonzentrationswerte, die sich mit dem Eintrag von „Brennstoff-NO<sub>x</sub>“ über die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Verbrennung von „Cystein“ und anderen proteinogenen Aminosäuren erklären lässt. Ein weiterer Bildungsmechanismus führt nach dem von Zeldovic [16] beschriebenen Mechanismus, wonach der in der Verbrennungsluft enthaltene atmosphärische Stickstoff zu NO oxidiert. Als Haupteinflussgrößen für diesen, in der Literatur als „thermische NO<sub>x</sub>-Bildung“ bezeichneten, Mechanismus gelten die Verbrennungstemperatur und die Verweilzeit der Gase bei hohen Temperaturen. Der von Fenimore [17] beschriebene Mechanismus zur Entstehung von „promptem NO<sub>x</sub>“ tritt vorzugsweise an den Flammengrenzflächen durch Reaktion von über die Verbrennungsluft eingetragenen Stickstoff mit CH-Radikalen auf. Letztgenannter Bildungsweg kann in technischen Feuerungen, bei denen der Brennstoffeinsatz zur Stützfeuerung gering ist, vernachlässigt werden.

Zur Minderung der Stickstoffoxidemissionen kommen grundsätzlich primärseitige Maßnahmen, wie gestufte Verbrennung und der Einsatz NO<sub>x</sub>-armer Brenner, ebenso in Betracht wie selektive nicht-katalytische (SNCR) oder selektive katalytische (SCR) Reduktionsverfahren als sekundäre Minderungsmaßnahmen. Bei Kleinanlagen, wie Heimtierkrematorien, steht der bei SCR-Verfahren erforderliche apparatetechnische Aufwand in keinem Verhältnis zum Ergebnis, so dass allenfalls SNCR-Verfahren in Frage kommen.

Für die Stickoxidabscheidung nach dem SNCR-Verfahren ist es notwendig, dass Ammoniakwasser (NH<sub>4</sub>OH) oder Harnstoff (NH<sub>2</sub>CONH<sub>2</sub>) dem Abgas in einem Temperaturbereich von etwa 850 bis 1.100 °C zugeführt wird. Im vorgenannten Temperaturbereich werden Stickoxide über das sofort frei werdende Ammoniak nach den Reaktionsgleichungen



in elementaren Stickstoff und Wasser überführt. Zu beachten ist hierbei der sog. NH<sub>3</sub>-Schlupf, der sich als stechender Geruch im Anlagenbereich bemerkbar machen kann.

### 3.7 Chlor- und Fluorwasserstoff

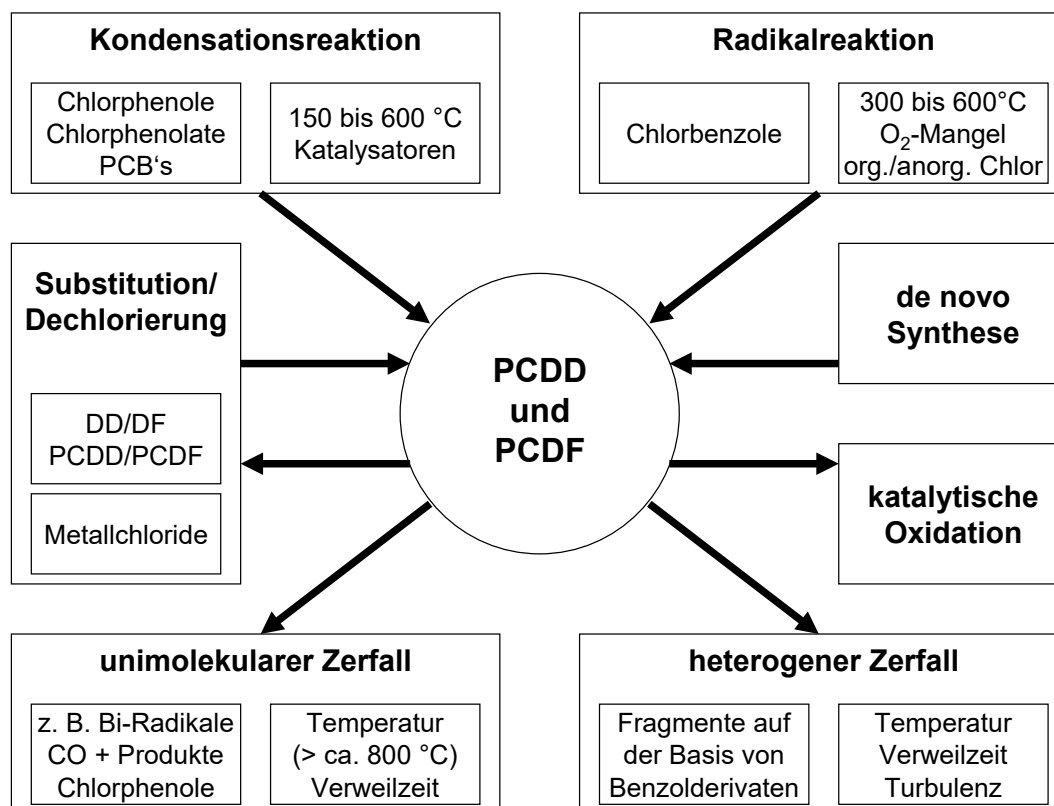
Neben Schwefel und anderen anorganischen Bestandteilen sind auch Chlor und Fluor in Tierkörpern vorhanden. Chlor findet sich vorwiegend im Blut sowie in weichem Gewebe und Organen, wie beispielsweise Haut, Lunge, Milz, Niere usw. [18]. Ähnlich verhält es sich mit Fluor, das sich ebenfalls in tierischen Organen ablagert. Auch wenn entsprechend den Empfehlungen

der VDI 3890 [1] bei der Tierkremation der Einsatz von Behältnissen und Verpackungen auf PE Basis empfohlen wird sowie auf Beigaben von Tierspielzeug aus PVC zu verzichten ist, ist davon auszugehen, dass bei der Tierkremation Chlor- und Fluorwasserstoff (HCl und HF) freigesetzt werden. Analog zu den Ausführungen in Abschnitt 3.5 – Schwefeloxide – stehen mit den in der VDI Richtlinie [1] beschriebenen Adsorptionsverfahren Möglichkeiten zur Emissionsminderung von HCl und HF zur Verfügung.

### 3.8 Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane

Die Mechanismen für das Auftreten polychlorierter Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und -dibenzofurane (PCDF) im Abgas einer Verbrennungsanlage lassen sich als dualistisches Prinzip von Bildung und Zerstörung beschreiben. Die bei der Verbrennung maßgebenden PCDD/F-Bildungsmechanismen sind Kondensations- und Radikalreaktionen, die bevorzugt im Temperaturbereich unterhalb von 600 °C ablaufen, also in einem Temperaturbereich, das die Verbrennungsprodukte im Ofen durchlaufen müssen. Andererseits werden bei der Nachverbrennung PCDD und PCDF sehr wirkungsvoll durch Zerfallsreaktionen zerstört [19, 20] (Abbildung 5).

**Abbildung 5: Dualistisches Prinzip der Bildung und Zerstörung von PCDD/F (entnommen aus [20])**



Quelle: aus [20]

Voraussetzung für eine effektive primärseitige Zerstörung dieser Schadstoffgruppen sind geeignete Temperatur-, Verweilzeit- und Turbulenzbedingungen im Nachverbrennungsraum. Diese Bedingungen für einen wirkungsvollen Abbau von PCDD/F korrespondieren mit den Anforderungen, die an eine möglichst vollständige Verbrennung, charakterisiert durch niedrige

CO- und  $C_{\text{Ges}}$ -Konzentrationen, gestellt werden (siehe 3.2). Vor diesem Hintergrund wäre es also naheliegend, die kontinuierlich gemessene CO-Konzentration als Leitgröße für ein günstiges PCDD/F-Potenzial nach der Nachverbrennung zu wählen. Jedoch haben Untersuchungen an anderen technischen Verbrennungsanlagen ergeben, dass bei geringen CO-Konzentrationen, wie sie in Kremationsanlagen auftreten, keine Korrelation zwischen CO und PCDD/F festgestellt werden konnte, so dass bei niedrigen CO-Konzentrationen, wie sie beim Betrieb von Tierkremationsanlagen unter Einhaltung der Grenzwerte von  $50 \text{ mg/Nm}^3$  üblicherweise auftreten, CO als Leitgröße für das zu erwartende PCDD/F-Emissionspotenzial nicht geeignet ist [10].

Wie in einer Vielzahl von Untersuchungen, vornehmlich an Abfallverbrennungsanlagen, festgestellt wurde, ist der Abgaskühlung eine entscheidende Bedeutung für das Emissionspotential der Dioxine und Furane beizumessen, da unter Sauerstoffüberschussbedingungen PCDD und PCDF zurückgebildet werden können [21]. Aus umfangreichen Untersuchungen geht hervor, dass die Abkühlzeit eine maßgebliche Rolle für den Grad der Rückbildung nach dieser sogenannten „de-novo Synthese“ spielt [22]. Für Kleinverbrennungsanlagen, wie bei der Human- und Heimtierkremation, hat sich als Richtgröße für die Abgasabkühlung eine Aufenthaltszeit in den Wärmeübertragungssystemen von 0,5 s und weniger als zweckmäßig erwiesen.

In Heimtierkrematorien, die nicht mit einer Abgasbehandlungsanlage, also auch ohne Abgaskühlung, ausgestattet sind, verlassen die Abgase die Kaminmündung mit rund  $500^\circ\text{C}$ . Bei diesen Temperaturen sind mögliche Rückbildungseffekte nach der de-novo Synthese noch nicht abgeschlossen. Es ist also nicht auszuschließen, dass PCDD/F-Rückbildungseffekte nach Verlassen der Kaminanlage in der Umgebung auftreten können.

Erste Indikationen lassen sich anhand den von Bachmann [23] für diese Studie zur Verfügung gestellten PCDD/F-Emissionsmessergebnissen an unterschiedlichen Tierkrematorien ableiten (Tabelle 5). Die Anlagen 3 und 7, die mit einer Abgasreinigung nach dem Trockensorptionsverfahren (TS) ausgestattet sind, liefern erwartungsgemäß sehr niedrige Abgaskonzentrationen. Bei Tierkrematorien ohne Abgasreinigungsanlagen, bietet sich ein Vergleich zu anderen Anlagentechniken, wie der Abfallverbrennung, an. Basierend auf den Erkenntnissen, wonach dort die PCDD-Rückbildung vornehmlich im Temperaturbereich von etwa  $250$  bis  $500^\circ\text{C}$  und die PCDF-Rückbildung auch bei höheren Temperaturen festgestellt wurden (vgl. [22]), könnte man schlussfolgern, dass bei Tierkrematorien mit Abgastemperaturen von etwa  $500^\circ\text{C}$  und darüber die PCDD/F-Emissionswerte denen der Nachverbrennung entsprechen. Verlassen die Abgase die Kaminmündung mit Temperaturen von weniger als  $250^\circ\text{C}$  könnte man davon ausgehen, dass die Rückbildung nach der de-novo Synthese weitgehend abgeschlossen wäre, immer vorausgesetzt, dass die primärseitige Zerstörung der PCDD/F durch geeignete Verbrennungsbedingungen gegeben ist. Die Ergebnisse der Anlagen 1, 2, 9 und 10 würden demnach den Zustand zum Beginn der de-novo Synthese entsprechen und weisen niedrige PCDD/F-Konzentrationen auf. Auch die Ergebnisse der Anlagen 5, 6 und 7 lassen sich mit der PCDD/F-Rückbildung erklären, die bei diesen Anlagen bereits zumindest zum Teil stattgefunden hat. Die Anlage Nr. 4 passt zunächst nicht in dieses Schema; hier stellt sich die Frage, ob ungeeignete Verbrennungsbedingungen oder andere Faktoren hierfür verantwortlich sind.

**Tabelle 5: PCDD/F-Messungen im Abgas nach Tierkrematorien (aus [23])**

| Anlage           | ARE   | Abgastemperatur <sup>1)</sup><br>°C | Jahr der<br>Messung | Anzahl der<br>Messungen | Dauer der<br>Messung<br>h | PCDD/F µg/m <sup>3</sup>    |
|------------------|-------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1                | -     | 435                                 | 2018                | 1                       | 6                         | 0,036                       |
| 2                | -     | 445                                 | 2018                | 3                       | 2                         | < 0,01 / < 0,01<br>/ < 0,01 |
| 3                | TS+GF | 104                                 | 2017                | 2                       | 6                         | < 0,01 / < 0,01             |
| 4 <sup>2)</sup>  | -     | 605                                 | 2017                | 2                       | 6                         | 0,10 / 0,40                 |
| 5                | -     | 369                                 | 2017                | 1                       | 2                         | 0,12                        |
| 6                | -     | 192                                 | 2017                | 1                       | 6                         | 0,17                        |
| 7 <sup>3)</sup>  | -     | 239                                 | 2017                | 2                       | 2                         | 0,11 / 0,08                 |
| 8                | TS+GF | 118                                 | 2017                | 2                       | 2                         | < 0,01 / < 0,01             |
| 9                | -     | 511                                 | 2017                | 1                       | 6                         | 0,02                        |
| 10 <sup>2)</sup> | -     | 484                                 | 2017                | 1                       | 2                         | 0,01                        |

Hinweise: <sup>1)</sup> Mittelwerte; <sup>2)</sup> Bezug 15 % O<sub>2</sub> trocken; <sup>3)</sup> kein Sauerstoffbezug.

Wie Abbildung 5 zeigt, können durch katalytische Oxidation PCDD/F im Temperaturbereich von etwa 200 °C in unkritische Verbindungen, wie CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und vernachlässigbare Spuren von HCl, zerlegt werden. In Abfallverbrennungsanlagen, die gegenüber Tierkrematorien einen um ein Vielfaches höheren Abgasvolumenstrom aufweisen, kommen Oxidationskatalysatoren zur Anwendung [21]. In einigen Humankrematorien werden sogenannte katalytisch wirkende Filterschläuche mit sehr guten PCDD/F-Abbauraten eingesetzt [24]. In Verbindung mit Maßnahmen zur Abscheidung saurer Schadgase, insbesondere SO<sub>x</sub>, sind bei Heimtierkrematorien Adsorptionstechniken aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhafter. Hierbei empfiehlt sich der Einsatz eines Trockensorptionsverfahrens nach dem Flugstromprinzip, wobei der geeigneten Auswahl des Sorptionsmittels eine entscheidende Bedeutung beizumessen ist. Üblicherweise werden Sorptionsmittel auf der Basis einer Kalk-Kohle-Mischung eingesetzt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Minimierung der PCDD/F-Emissionen nur über eine ganzheitliche Minderungsstrategie, die alle verfahrenstechnischen Bereiche – Ofen, Abgaskühlung und Abgasreinigung – beinhaltet, erreicht werden kann.

## 4 Situationsanalyse und technische Bewertung der Tierkrematorien

Der nachfolgend ermittelte Stand der Tierkremationsanlagen basiert auf der Datenerhebung bei den Tierkrematorien in Deutschland. Hierbei wird eine Klassifizierung der eingesetzten technologischen Bausteine der Kremationstechnik vorgenommen und mit dem Stand der Technik, wie er in der VDI-Richtlinie 3890 beschrieben ist, verglichen und bewertet. Periphere Einrichtungen zur Zwischenlagerung von Tierkörpern, zum Umgang mit Aschen von verstorbenen Tieren sowie Schutzvorrichtungen zur Einhaltung veterinärrechtlicher, abfallrechtlicher, brandschutzrechtlicher Anforderungen und dgl. sind nur insofern Gegenstand der Betrachtungen, als dass dadurch die Kremationstechnik betroffen ist.

### 4.1 Überblick über die installierte Technik

Von den in Deutschland eingesetzten Tierkremationsanlagen sind alle als Flachbett-ofensysteme ausgeführt, die sich im Wesentlichen in der Größe und Gestaltung der Brennkammern sowie in der Art der Beheizung unterscheiden. Üblicherweise sind alle Ofenanlagen mit Gasbrenner ausgerüstet; lediglich ein Kremationsofen wird über elektrische Heizwendeln beheizt. Bis auf zwei Tierkrematorien sind sämtliche Tierkrematorien mit einer Ofenlinie ausgestattet.

Die meisten Kremationsanlagen werden ohne Abgasbehandlungsanlagen betrieben. Dabei handelt sich im Wesentlichen um Anlagen mit einer Kremationsleistung von max. 50 kg/h. Sofern Abgasreinigungsanlagen vorhanden sind, kommen von wenigen Ausnahmen abgesehen, die nur eine Staubabscheidung (Zyklon oder Gewebefilter) aufweisen, Trockensorptionsverfahren unterschiedlicher Bauart und Konzeption zum Einsatz. Meist handelt es sich dabei um Flugstromverfahren mit nachgeschalteten Gewebefiltern. Ein Tierkrematorium ist darüber hinaus mit einer zusätzlichen thermischen Nachverbrennung und Abgasentstickung nach dem Prinzip der selektiven nicht-katalytischen Reduktion (SNCR) ausgestattet. Zusätzlich wird im Tierkrematorium München nach dem sogenannten BICAR-Prinzip dem Abgasstrom Natriumhydrogencarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) als Absorptionsmittel für saure Abgasbestandteile – Schwefeloxide ( $\text{SO}_x$ ) und Chlorwasserstoff ( $\text{HCl}$ ) – zugeführt [25]. In Badbergen sind zwei autarke Kremationslinien, jeweils bestehend aus Ofen mit nachgeschalteter Abgasreinigung, installiert, wohingegen in Schwäbisch Hall die Abgase aus den beiden Kremationsofenanlagen (Pferde und Heimtiere) auf eine gemeinsame Abgasreinigungsanlage geführt werden (Tabelle 6).

**Tabelle 6: Installierte Abgasreinigungstechnik (Stand: Sept. 2018)**

| Standort | Abgasreinigung                                                                        |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Zyklon                                                                                |
| 2        | Flugstromverfahren mit Gewebefilter                                                   |
| 3        | Flugstromverfahren mit Gewebefilter                                                   |
| 4        | nur Abgaskühlung                                                                      |
| 5        | Linie A: Gewebefilter und Chemisorption; Linie B: Flugstromverfahren mit Gewebefilter |
| 6        | Gewebefilter                                                                          |

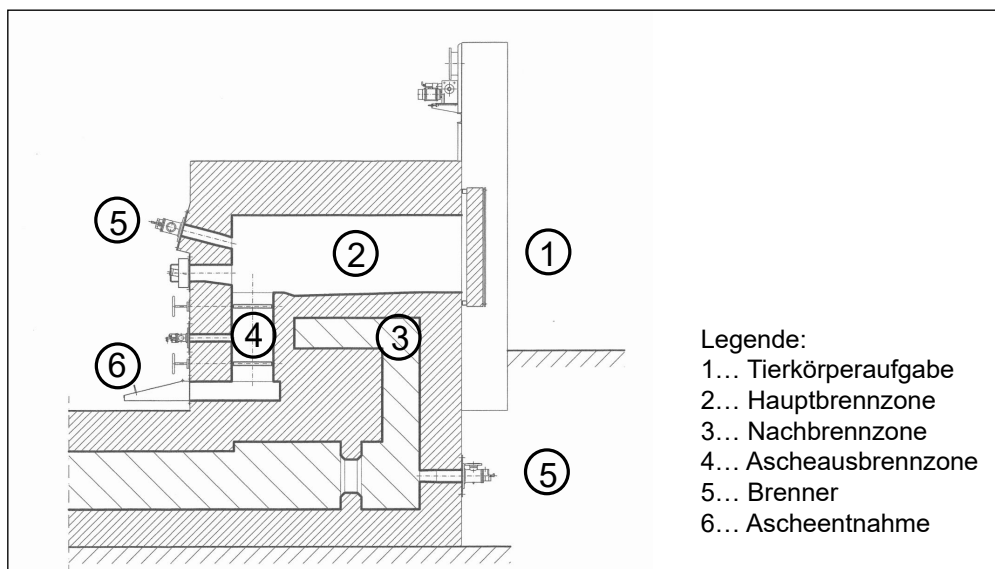
| Standort | Abgasreinigung                                                                                   |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7        | Flugstromverfahren mit Gewebefilter <sup>1)</sup>                                                |
| 8        | Flugstromverfahren mit Gewebefilter                                                              |
| 9        | Thermische Nachverbrennung, Entstickung nach SNCR-Verfahren, Flugstromverfahren mit Gewebefilter |

Hinweise: <sup>1)</sup> gemeinsame AGR für Heimtier- und Pferdekremationsöfen.

#### 4.1.1 Kremationsöfen

Zentraler Baustein der Kremationsanlagen sind die Öfensysteme, die zweckmäßigerweise als Mehrkammeröfensysteme, bestehend aus Hauptbrennkammer und Abgasnachbrennkammer, ausgeführt sind. Bei den zum Einsatz kommenden Flachbettöfensystemen ist die Hauptbrennkammer mit einer ebenen Herdplatte versehen, auf die die Tierkörper, häufig in PE-Säcken verpackt, aufgegeben werden. Der prinzipielle Ofenaufbau ist in Abbildung 6 für das Fabrikat IFZW dargestellt.

**Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau eines Tierkremationsöfens**



Quelle: © IFZW GmbH (Zwickau)

Nach der Materialaufgabe auf den Herdboden der Hauptbrennzone verbleibt der Tierkörper bis zum Abschluss des Kremationsvorgangs an dieser Stelle. Die räumliche Gestaltung dieser Brennkammer und das bauartbedingt geschlossene Flachbett erlauben den kontrollierten Zugriff auf das Verbrennungsgut während der gesamten Kremationszeit unter definierten Bedingungen. Die Einzelschritte der Kremation sowie Gas- und Ascheausbrand laufen in der Hauptbrennzone zeitlich überlagert ab. Sie werden durch die Luft- und Rauchgasführung und bei Bedarf durch Stützfeuer über den Hauptbrenner thermisch unterstützt. In den meisten Fällen ist, wie Abbildung 6 zeigt, der Beginn der Nachbrennzone direkt unterhalb der Hauptbrennzone angeordnet. Damit wird dem Tierkörper, der in der Hauptbrennzone abgelegt ist, zusätzlich Energie für die Kremationsvorgänge zugeführt. Das aus der Hauptbrennzone abgeleitete Abgas gelangt in die Nachbrennzone. Unter weiterer Verbrennungsluftzugabe

werden dort die noch vorhandenen unverbrannten Gasbestandteile, wie CO und Gesamtkohlenstoff, nahezu vollständig oxidiert. Die Einhaltung der gewünschten Nachverbrennungstemperatur wird durch den Nachbrenner sichergestellt.

In einigen Ofenanlagen wird die Asche nach der Kremation in einer zusätzlichen Ascheausbrennzone thermisch nachbehandelt. Der praktisch vollständige Ascheausbrand wird durch gesteuerte Luftzugabe und temperaturgeregelten Brenneinsatz sichergestellt. Die Abgase aus der Ascheausbrennzone werden in diesem Fall zusammen mit denen aus der Hauptbrennzone gemeinsam in die Nachbrennzone geleitet und dort nachverbrannt.

Die Flachbettofensysteme sind grundsätzlich durch ihren kompakten Aufbau gekennzeichnet und meist mit mehreren Lagen aus Feuerfestmaterialien und Isolierschichten ausgekleidet. Herstellerbedingt werden unterschiedliche Zielsetzungen in den Brennzonen im Ofen verfolgt. In der Hauptbrennzone, in der die eigentliche Kremation abläuft, sehen die Ofenkonzepte meist niedrige Gasgeschwindigkeiten vor (man spricht gelegentlich von einer „weichen“ Flamme), um den Partikelaustrag möglichst gering zu halten. In der hiervon getrennten Nachbrennzone strebt man dagegen hohe Turbulenz zwischen den Reaktionspartnern an, um auf diese Weise den Gasausbrand zu unterstützen. Auf die herstellersistemische Luft- und Abgasführung wird auch die Prozesssteuerung abgestimmt, die mit einer sauerstoffgeführten Verbrennungsluftzuführung in der Nachbrennzone ausgeführt werden (vgl. hierzu Ausführungen in Abschnitt 3.2).

Abbildung 7 zeigt zwei Beispiele von ausgeführten gasbefeuerten Tierkremationsofensystemen. Bei dem von IFZW GmbH konzipierten Kremationsofen ist die Ascheausbrennzone mit einem zusätzlichen Brenner ausgerüstet, so dass die Kremationsasche einer weiteren thermischen Behandlung zur Verbesserung der Ausbrandgüte unterzogen werden kann. Auch bei dem Ofensystem der Firma Metall- & Ofentechnik GmbH findet eine zusätzliche Aschenachverbrennung statt. Hierbei wird jedoch die Strahlungswärme der Hauptbrennzone genutzt.

**Abbildung 7: Gasbefeuerte Tierkremationsofensysteme**



Quelle: Links: Mehrkammerofen System IFZW (© IFZW GmbH); rechts: Mehrkammerofen System Metalltechnik (Photo: Schetter GmbH & Co. KG)

Das Bedienpersonal überwacht den Verlauf der Kremation durch Sichtkontrolle und Beobachtung des Temperaturverlaufes. Es entscheidet über das Ende einer Kremation, die je nach Größe des Tierkörpers oder bei Sammelkremationen unterschiedlich andauert. Nach dem Abschluss einer Kremation wird die Asche von dem Muffelboden geräumt und zur Abkühlung bzw. Abfüllung in Urnen bereitgestellt. Bei Sammelkremationen mit getrennten Behältnissen werden die Aschen ebenfalls nach der Abkühlung der einzelnen Behältnisse in Urnen abgefüllt (Abbildung 8). Sofern Sammelkremationen ohne Separierung der Tierkörper in getrennten Behältnissen durchgeführt werden, wird die gesamte anfallende Asche in der Regel auf dafür vorgesehene Gemeinschaftsgrabfelder ausgestreut.

**Abbildung 8: Aschen in getrennten Behältnissen nach einer Sammelkremation**



Photo: Schetter GmbH & Co. KG

Eine Besonderheit stellt der einzige, in Deutschland in Betrieb befindliche, elektrisch beheizte Kremationsofen dar. Hierbei sind im Mauerwerk der Haupt- und Nachbrennkammer elektrische Heizwendeln eingelassen. Die Prozesssteuerung erfolgt dabei ausschließlich über die Verbrennungsluftzuführung.

Das Einbringen schwerer Tierkörper, z. B. größere Hunde oder Pferde, in den „heißen“ Kremationsofen erfordert Hilfseinrichtungen. Bei Heimtierkremationsanlagen kommen meist freibewegliche Hubvorrichtungen zum Einsatz. Pferde, die Körpergewichte von bis zu 1.000 kg aufweisen können, werden zweckmäßigerweise auf einem fahrbaren Unterofen (Herdwagen) abgelegt, der während der Kremation den Ofen im unteren Bereich abschließt. Dieses Prinzip, das in anderen technischen Anwendungen als „Schubwagen“ bekannt ist, hat sich als vorteilhaft für den Umgang mit schweren Tierkörpern erwiesen, da die Ablage der Tierkörper auf den Herdwagen sowie die Aufnahme der Kremationsasche außerhalb des „heißen“ Ofens erfolgen kann (Abbildung 9).

**Abbildung 9: Ofenbeschickungsvorrichtungen am Beispiel des Tierkrematoriums Schwäbisch Hall**



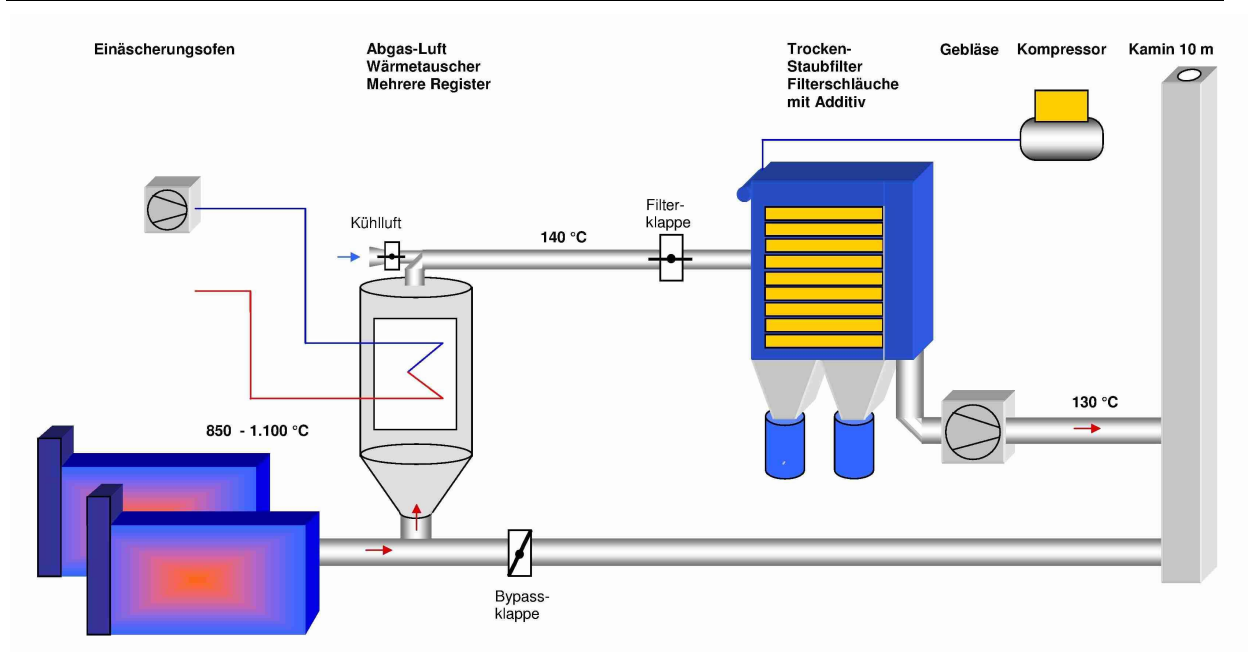
Links: Einfahrwagen für schwere Heimtiere; Rechts: Fahrbarer Herdwagen für die Pferdekremation (Photos: Schetter GmbH & Co. KG)

#### **4.1.2 Abgasreinigung**

Sämtliche der in Deutschland in Betrieb befindlichen Heimtierkremationsanlagen, die über eine Abgaskühlung verfügen, haben diese mit indirekt arbeitenden Wärmeübertragern ausgestattet. Die Abgaswärme wird entweder in einem Abgas/Luft-Wärmeübertrager an die Luft abgegeben, die nach außen geführt wird, oder in einem Abgas/Wasser-Wärmeübertrager zur Wassererwärmung genutzt. Letzteres hat sich aus energetischen Gründen (Abwärmenutzung zur Gebäudeheizung oder Brauchwassererwärmung) bewährt.

Bei den Verfahren zur Abgasreinigung hat sich das Trockensorptionsverfahren nach dem Flugstromprinzip etabliert (Abbildung 10). Hierbei werden Sorptionsmittel, meist ein pulverförmiges Kalk-Kohle-Gemisch, zur Abscheidung von Schwefeloxiden, Chlor- und Fluorwasserstoffen, Dioxinen und Furanen, sowie von Schwermetallen, dem Rauchgasstrom zugeführt. Nach intensiver Durchmischung mit dem Abgasstrom in einer Mischstrecke, in der die abzuscheidenden Schadgase an das Sorptionsmittel angelagert werden, gelangt das Sorbens-Abgasgemisch in den nachgeschalteten Gewebefilter. An den Oberflächen der Gewebefilterschläuche werden die schadstoffbeladenen Sorbentien zusammen mit Feinstäuben abgeschieden. Durch regelmäßiges Abblasen der Filterschläuche mittels Druckluftimpulsen werden die Filterschläuche gereinigt und die adsorbierten Schadgase als Filterstäube aus dem Gewebefilter ausgetragen. Die so abgeschiedenen Filterstäube werden in Staubsammelbehälter gesammelt und einer Entsorgung unter Tage zugeführt.

**Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau einer Abgasbehandlungsanlage**



Quelle: © Metall- & Ofentechnik GmbH (Florstadt)

Bei neueren Anlagen kommt dabei häufig das in anderen Kleinverbrennungsanlagen, z. B. in Humankrematorien, eingesetzte Kugelrotorumlauf-Verfahren zur Anwendung (Abbildung 11). Die Besonderheit dieses Verfahrens liegt im Kugelrotor, in dem das Sorbens mechanisch aufgeschlossen wird. Herstellerangaben zufolge wird dadurch die Adsorptionsoberfläche des eingesetzten Sorbens vergrößert und die Adsorptionsleistung gesteigert. Weitere Informationen hierzu findet man in [26 ,27].

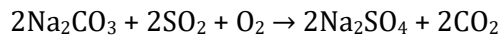
**Abbildung 11: Abgasreinigung nach dem Kugelrotorumlaufverfahren im Tierkrematorium Badbergen**



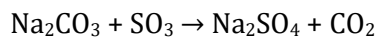
Photo: IFZW GmbH (Zwickau): rechtes Bauteil: Kugelrotor, linkes Bauteil: Ascheaustrag aus dem Gewebefilter

Eines der ersten in Deutschland genehmigten Tierkrematorien erhielt zur Auflage, die Konzentration an Schwefel- und Stickstoffoxiden von jeweils 350 mg/h (als Halbstundenmittelwert) im Abgas einzuhalten (siehe Tabelle 4). Um diesen Forderungen zu genügen, sind ergänzend zu den zuvor beschriebenen Maßnahmen zur Dosierung von Kalk-Kohle-Gemischen weitere verfahrenstechnische Maßnahmen erforderlich.

Zur Schwefeloxidabscheidung wird Natriumbicarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) zugeführt, das sich im Kontakt mit dem heißen Abgasstrom thermisch zu Natriumcarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) zersetzt. Gleichzeitig vergrößert sich die aktive Oberfläche des Sorbens. Über die Reaktionen



und



werden die Schwefeloxide in Natriumsulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) überführt (vgl. hierzu [9]). Analog hierzu reagieren auch Chlor- und Fluorwasserstoff mit Natriumcarbonat zu Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ ) bzw. Natriumfluorid ( $\text{NaF}$ ). Diese Reaktionsprodukte werden zusammen mit den Filterstäuben ebenfalls im Gewebefilter abgeschieden.

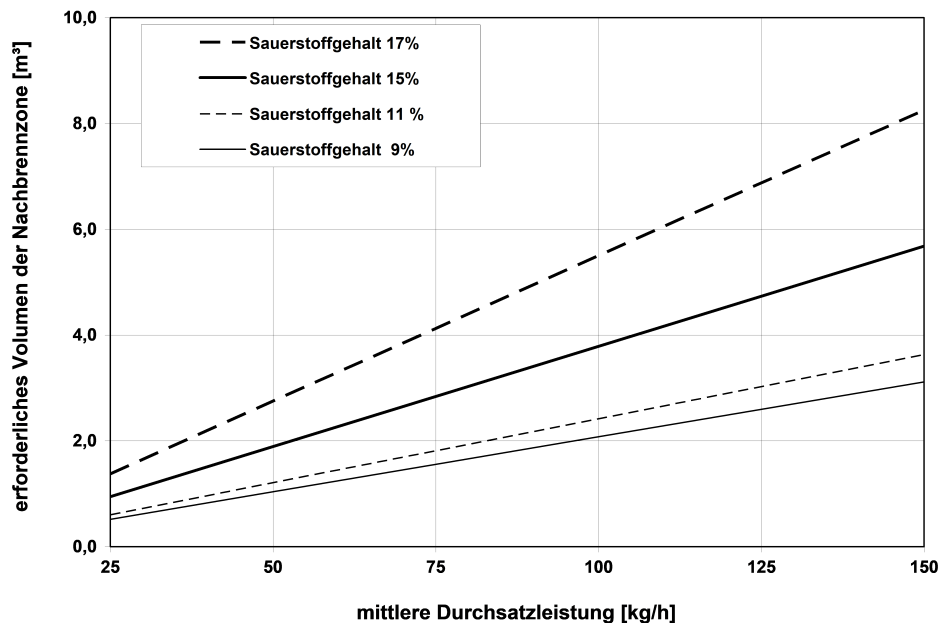
Für die Stickoxidabscheidung nach dem SNCR-Verfahren ist es notwendig, dass Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) oder Harnstoff ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ ) dem Abgas in einem Temperaturbereich von etwa 850 bis 1.100 °C zugeführt wird. Daher verfügt das Tierkrematorium München über eine thermische Nachverbrennung, in der diese Bedingungen sichergestellt werden. In dem gewünschten Temperaturfenster wird Harnstoff in wässriger Lösung eingedüst. Über die Bildung von  $\text{NH}_2$ -Radikalen werden Stickoxide zu Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) reduziert. Auf die damit in Zusammenhang stehenden Reaktionsmechanismen wird auf einschlägige Literatur (z. B. [28]) verwiesen.

#### 4.1.3 Einhaltung der Temperatur- und Verweilzeitforderungen

Die Einhaltung der Temperatur- und Verweilzeitforderungen von 850 °C und 2 s oder von 1100 °C und 0,2 s stellt an den Anlagenbetrieb und auch an die Nachweisführung erhebliche Anforderungen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Kremationsvorgang aufgrund des sehr instationären Verbrennungsverhaltens der Tierkörper starken Schwankungen unterliegt, die sich sowohl in erheblichen Schwankungen in den Abgasvolumen- und Wärmeströmen als auch in den sich einstellenden Temperaturen und Sauerstoffgehalten zeigen. In der Konsequenz bedeutet dies, dass zu jedem Zeitpunkt einer Kremation die korrespondierende Verweilzeit bei einer einzuhaltenden Temperatur ein geändertes Raumvolumen für die Nachverbrennung zur Folge hat.

Zur Berechnung des Raumvolumens für die Nachverbrennung geht man daher zweckmäßigerweise von stationären Verbrennungsbedingungen aus. Aus der Massen- und Energiebilanz sowie unter Anwendung der Verbrennungsrechnung mit empirisch ermittelten Stoffwerten kann das erforderliche Volumen der Nachbrennzone für unterschiedliche Durchsatzleistungen sowie unterschiedliche Sauerstoffgehalte ermittelt werden. In der VDI-Richtlinie 3890 [1] sind unter Abwägung einer Vielzahl von Einflussfaktoren die erforderlichen Volumina für die Nachbrennzonen zur Einhaltung der Temperatur- und Verweilzeitbedingungen von 850 °C und 2 s angegeben (Abbildung 12). Reaktionskinetische Spitzenwerte für Abgasvolumina und Wärmeströme werden demnach bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

**Abbildung 12: Mindestvolumen der Nachbrennzone (entnommen aus [1])**



Die Nachbrennzone mit den in Abbildung 12 angegebenen erforderlichen Volumina ist in den meisten Fällen innerhalb der Ofenkontur nicht unterzubringen. Daher ist entsprechend der VDI-Richtlinie 3890 der Abgaskanal bis zum Eintritt in den Abgaskühler in die Nachbrennzone einzubeziehen, sofern keine zusätzliche Verbrennungsluft oder Kühlluft zugeführt wird. Die Nachbrennzone setzt sich unter diesen Bedingungen aus der „Nachbrennkammer im Ofen **nach** der letzten Verbrennungsluftzuführung“ und dem „Abgaskanal“ zusammen. Bei der Auslegung des Abgaskanals sind außerdem Wärmeverluste entlang des Abgasweges zu berücksichtigen. Ferner ist darauf zu achten, dass der zu erwartende Sauerstoffgehalt am Ende der Nachbrennzone zugrunde gelegt wird. Mit der Platzierung der Temperaturmesssonde am Ende der Nachbrennzone kann der Nachweis für die Einhaltung der Verweilzeitbedingung erbracht werden, sofern zu jeder Zeit die Mindesttemperatur erreicht wird.

#### 4.1.4 Bewertung des Status quo in Deutschland

Der aktuelle Stand der in Deutschland in Betrieb befindlichen Tierkremationsanlagen ist ein Abbild der unterschiedlichen genehmigungsrechtlichen Praxis.

Aufgrund der in der Regel geforderten Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid von 50 mg/Nm<sup>3</sup> ist verbrennungstechnisch ein Standard vorgegeben, der, sofern er eingehalten wird, dem Stand der Technik entspricht. Dies setzt zum Einen voraus, dass jeder Kremationsofen als Mehrkammersystem mit einer Nachbrennkammer für den Gasausbrand unter turbulenten Strömungsbedingungen ausgestattet ist und zum Andern, dass eine darauf abgestimmte, möglichst sauerstoffgeregelte Prozessführung gegeben ist. Ersteres trifft auf alle Anlagentypen, soweit aus der Datenerhebung erkennbar, zu. Aus diversen Gesprächen mit Anlagenherstellern und -betreibern geht zudem hervor, dass meist sehr komplexe Regelalgorithmen den einzelnen Prozesssteuerungen zugrunde liegen.

Die Einhaltung der Temperatur-Verweilzeitanforderungen, i. d. R. 850 °C und 2 s, kann als weiteres Indiz für einen hohen technischen Standard der Ofensysteme gewertet werden.

Gleichwohl führt die Einhaltung dieser aus dem EU-Recht abgeleiteten Forderung nicht zwangsläufig zu einem niedrigen Niveau der verbrennungsabhängigen Schadstoffe.

Legt man bei der Abgasreinigung den Stand der Technik gemäß VDI 3890 zugrunde, so genügen 6 Tierkrematorien, vornehmlich Anlagen der Nr. 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV, diesem technologischen Standard. Bei ordnungsgemäßigem Betrieb kann man davon ausgehen, dass mit den eingesetzten Adsorptionsverfahren nach dem Flugstromprinzip mit nachgeschaltetem Gewebefilter die gewünschten **Emissionskonzentrationen** für Gesamtstaub, Schwefeloxid, Chlor- und Fluorwasserstoff sowie Schwermetalle und PCDD/F einzuhalten sind. Die verfahrenstechnischen Bausteine stehen hierfür grundsätzlich zur Verfügung.

Bei Heimtierkrematorien der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV mit üblichen Abgasvolumenströmen in der Größenordnung von  $1.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  ist zu erwarten, dass die alternativ geforderten **Emissionsmassenströme** für Gesamtstaub,  $\text{SO}_x$ , HCl, HF, Schwermetalle sowie PCDD/F auch ohne Abgasreinigung eingehalten werden können.

Werden auch für Stickstoffoxide die Einhaltung von Emissionskonzentrationen gefordert, so kommt aufgrund der Ausführungen in Abschnitt 3.6 das SNCR-Verfahren zur selektiven nichtkatalytischen Reduktion infrage. Für Anlagen dieser Größenordnung liegen lediglich vereinzelte Erfahrungswerte aus anderen Anwendungsbereichen vor, weshalb auch in der VDI-Richtlinie 3890 [1] sekundärseitige Entstickungsmaßnahmen in Heimtierkrematorien nicht als Stand der Technik beschrieben sind.

#### 4.1.5 Technologischer Vergleich mit der Humankremation

Um die Situation mit der in Humankrematorien vergleichen zu können, werden zunächst die unterschiedlichen Anforderungen gegenübergestellt (Tabelle 7). Die Basis für die Humankrematorien ist mit der 27. BImSchV gegeben [7]. In Ermangelung einer eigenständigen Bundesimmissionsschutzverordnung für Heimtierkrematorien werden nachfolgend die aus den vorliegenden Genehmigungsbescheiden zu entnehmenden Anforderungen herangezogen. Dabei zeigen sich erhebliche Unterschiede in den Anforderungen an die Heimtierkrematorien, die nicht nur den unterschiedlichen Anlagengrößen geschuldet sind.

**Tabelle 7: Anforderungen an Human- und Heimtierkremationsanlagen**

| Parameter                  | Humankrematorien<br>(27.BImSchV)                                               | Heimtierkrematorien<br>(Genehmigungsbescheide <sup>1)</sup> )                                             |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nachverbrennungstemperatur | 850 °C                                                                         | 850 °C und 2 s<br>oder<br>1100 °C und 0,2 s                                                               |
| Sauerstoffbezug Emissionen | 11 %, O <sub>2</sub> trocken                                                   | meist 11 %, O <sub>2</sub> trocken<br>Einzelfälle: 6 % und 15 %, O <sub>2</sub> trocken                   |
| CO                         | 50 mg/Nm <sup>3</sup><br>als Stundenmittelwert<br>(kontinuierliche Messung)    | 50 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>2)</sup><br>(diskontinuierliche Messung)                                       |
| Gesamt-C                   | 20 mg/Nm <sup>3</sup><br>als Stundenmittelwert<br>(diskontinuierliche Messung) | 20 ... 50 mg/Nm <sup>3</sup><br>Einzelfälle: alternativ 0,05 ... 0,5 kg/h<br>(diskontinuierliche Messung) |

| Parameter                                          | Humankrematorien<br>(27.BImSchV)                                                        | Heimtierkrematorien<br>(Genehmigungsbescheide <sup>1)</sup> )                                                    |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gesamtstaub                                        | 10 mg/Nm <sup>3</sup><br>als Stundenmittelwert<br>(diskontinuierliche Messung)          | 20 ... 50 mg/Nm <sup>3</sup><br>Einzelfälle: alternativ 0,02 ... 0,2 kg/h<br>(diskontinuierliche Messung)        |
| HCl                                                | -                                                                                       | Einzelfälle: 30 mg/Nm <sup>3</sup><br>Einzelfälle: alternativ 0,05 ... 0,15 kg/h<br>(diskontinuierliche Messung) |
| SO <sub>x</sub> ;<br>angegeben als SO <sub>2</sub> | -                                                                                       | meist 250 ... 350 mg/Nm <sup>3</sup><br>häufig: alternativ 0,25 ... 1,8 kg/h<br>(diskontinuierliche Messung)     |
| NO <sub>x</sub> ;<br>angegeben als NO <sub>2</sub> | -                                                                                       | meist 100 ... 350 mg/Nm <sup>3</sup><br>häufig: alternativ 0,35 ... 1,8 kg/h<br>(diskontinuierliche Messung)     |
| Quecksilber                                        | in Diskussion                                                                           | Einzelfall: 0,05 mg/Nm <sup>3</sup>                                                                              |
| Sonstige Schwermetalle                             | -                                                                                       | Einzelfall: Schwermetalle gemäß 17. BImSchV                                                                      |
| Dioxine/Furane                                     | 0,1 ng TEQ/Nm <sup>3</sup><br>Mittelwert über 6 Stunden<br>(diskontinuierliche Messung) | meist 0,1 ng TEQ/Nm <sup>3</sup><br>Einzelfälle: alternativ 0,25 µg TEQ/h<br>(diskontinuierliche Messung)        |

Hinweise: <sup>1)</sup> Stundenmittelwerte, in einem Fall Halbstundenmittelwert; <sup>2)</sup> in einem Fall alternativ 0,1 kg/h.

Auch wenn sich die Tierkremation von der Humankremation in einigen Punkten deutlich unterscheidet – kein energiereicher Sarg, Einzel- und Sammelkremation, Fell und Gefieder – so handelt es sich um vergleichbare Verbrennungsvorgänge, so dass eine Vielzahl der Erkenntnisse aus der Humankremation auf die Tierkremation übertragen werden können. Dies gilt insbesondere für die Kremationsvorgänge im Ofen und deren Konsequenzen auf die Ofenkonzeption. Die bei der Humankremation in Deutschland häufig zum Einsatz kommenden Etagenofensysteme [26], die mit Sargauflegerosten konzipiert sind, sind für die Anwendung bei der Heimtierkremation aus diesem Grund ungeeignet. Die bei der Humankremation eingesetzten, erdgasbeheizten Flachbett-ofensysteme bieten sich für den Anwendungsfall Tierkrematorien an (vgl. Abschnitt 4.1.1.). Die Unterschiede sind im Wesentlichen in der Ofengröße begründet, wobei von den Herstellern meist identische Materialien (Feuerfest, Isolierung) und Baugruppen (Brenner, Luftversorgung, Messfühler und Regelungsbaugruppen) verwendet werden. Auch die prozesstechnische Trennung zwischen Haupt- und Nachbrennkammer erfolgt in Analogie zur Humankremation. So wird mit Blick auf einen geringen Ascheaustrag aus der Hauptbrennkammer meist dafür Sorge getragen, dass die Gasgeschwindigkeiten möglichst gering sind. Im Gegensatz dazu werden in beiden Fällen die Nachbrennkammern so konzipiert, dass durch turbulente Strömungsbedingungen der erforderliche Gasausbrand erreicht wird. Die über mehrere Dekaden gewonnenen Erkenntnisse im Aufbau und Betrieb von Flachbett-ofensystemen lassen sich auf die Ofentechnik der Heimtierkrematorien übertragen. Mit den Vorgaben für die verbrennungsabhängigen Schadstoffe, die in den meisten Genehmigungsbescheiden für CO (50 mg/Nm<sup>3</sup>) und Gesamt-C (20 mg/Nm<sup>3</sup>) vergleichbar zu den Humankrematorien sind, unterliegen die Ofensysteme der Heimtierkremation gleichen Maßstäben wie die der Humankremation.

Hiervon ausgenommen sind die Temperatur- und Verweilzeitforderungen in der Nachbrennzone. Durch die zusätzlich einzuhaltende Mindestverweilzeit, i. d. R. 2 s bei 850 °C, werden an die Dimensionierung und auch ggf. Materialwahl gegenüber der Humankremation erhöhte Anforderungen an die Nachbrennzone von Tierkrematorien gestellt. Da gemäß der EG-Verordnung Nr. 1069/2009 verstorbene Heimtiere als Abfall zur Beseitigung eingestuft werden, ist ein Durchgriff auf die Genehmigungspraxis gegeben, so dass im Gegensatz zur Humankremation dem Gesetzgeber wenig Spielräume bei der Festlegung der Temperatur- und Verweilzeitbedingungen zur Verfügung stehen. Ob vor diesem Hintergrund Maßnahmen zur Temperaturabsenkung in der Nachbrennzone zur Schonung von Ressourcen (geringerer Gasverbrauch) und Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, wie sie für Humankrematorien aufgezeigt wurden [29], möglich sind, kann derzeit nicht beurteilt werden.

Bei der Abgasbehandlung sind die Erkenntnisse von der Humankremation grundsätzlich auf die Tierkremation übertragbar. Losgelöst von der Frage, welches Abgasreinigungsverfahren zur Anwendung kommt, sind die Abgase nach der Nachverbrennung zunächst einer Abgaskühlung zuzuführen. Sie ist wesentlicher Bestandteil der Abgasbehandlung und erfolgt bei der Humankremation wie auch bei der Heimtierkremation meist indirekt; d. h. die heißen Abgase werden in Wärmetauschern abgekühlt, indem die Wärme an luft- oder wassergekühlte Rohrbündel übertragen werden (vgl. hierzu Ausführungen in [26]).

Bei der Humankremation kommen nach dem heutigen Stand der Technik [30] zur Einhaltung der Vorgaben der 27. BImSchV adsorptive Verfahren ebenso zur Anwendung wie die katalytische Filtration. Letztere ist für die Anwendung in der Tierkremation nicht von Relevanz, da sie nur auf Staubabscheidung und Zerstörung von Dioxinen und Furanen ausgelegt ist [26]. Bei den adsorptiven Verfahren unterscheidet man Festbettadsorption und Trockensorptionsverfahren nach dem Flugstromprinzip. In Humankrematorien werden, von wenigen Fällen abgesehen, üblicherweise Adsorptionsverfahren mit Sorbenseindüsung nach dem Flugstromprinzip (FS) eingesetzt. Diese technische Lösung hat sich in Tierkrematorien und anderen Kleinverbrennungsanlagen [26] im praktischen Betrieb bewährt. Die Dimensionierung der einzelnen Baugruppen – Mischungsreaktor, Gewebefilter und Saugzuggebläse – ist hierbei auf die i. d. R. geringeren Abgasvolumenströme bei der Heimtierkremation gegenüber der Humankremation anzupassen. Mit der Trockensorptionstechnik, wie sie in einigen Anlagen realisiert ist (Tabelle 6), stehen auch für Heimtierkrematorien die verfahrenstechnischen Baugruppen zur Staubabscheidung **und** Einhaltung von Emissionsanforderungen, wie SO<sub>x</sub>, HCl/HF, PCDD und PCDF sowie für Schwermetalle grundsätzlich zur Verfügung, wobei über die Wahl des Sorptionsmittels Einfluss auf die schadstoffspezifische Abscheidung genommen werden kann.

## 4.2 Wirtschaftlichkeitsaspekte

Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit von Tierkrematorien werden durch eine Vielzahl von Facetten beeinflusst, die einzelfallbezogen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Hierzu gehören insbesondere Aspekte zur mehr oder minder intensiven Betreuung der Tierbesitzer während des Kremationsvorgangs ebenso wie weitergehende Leistungen, wie beispielsweise Ascheausstreue auf Grabfeldern, Lieferung von Schmuckurnen, Herstellung von Ascheamuletten, Brillanten oder Pfotenabdrücken der verstorbenen Tiere. Diese Aspekte werden nachfolgend nicht betrachtet. Vielmehr werden die Betrachtungen auf die technische Anlage in Verbindung mit dem Bauwerk beschränkt. **Es wird ausdrücklich darauf verwiesen,**

**dass aus den nachfolgenden Betrachtungen keine anlagenspezifischen Projektaussagen gefolgert werden können.**

#### 4.2.1 Kostenansätze

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Kostenansätze sind Tabelle 8 zu entnehmen. Die ausgewiesenen Kostenansätze basieren auf dem Anlagenstandard der VDI 3890 [1] für einen prozessgesteuerten Anlagenbetrieb und eigenen Kostenansätzen aus vergleichbaren Projekten. Abhängig von den projektspezifischen technischen Standards, den unterschiedlichen Genehmigungsanforderungen sowie der konzeptionellen Ausrichtung des Tierkrematoriums können erhebliche Abweichungen hiervon auftreten.

**Tabelle 8: Kostenansätze für Heimtierkremationsanlagen (Euro, netto, Stand 2018)**

| Kostenansätze                                 | Kleinanlage ohne AGR<br>(bis 50 kg/h) | Nachrüstung AGR<br>für Kleinanlage | Großanlage mit AGR<br>(ab 100 kg/h) |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Einfahrvorrichtung                            | 10.000                                | -                                  | 30.000                              |
| Kremationsofen (inkl. Brenner)                | 150.000                               | -                                  | 280.000                             |
| Abgaskanal (gemauert)                         | 10.000                                | -                                  | 20.000                              |
| Wärmetauscher/Abgaskühlung                    | -                                     | 150.000                            | 150.000                             |
| Abgasreinigung                                | -                                     | 130.000                            | 130.000                             |
| Injektorgebläse / Saugzug                     | 5.000                                 | 15.000                             | 15.000                              |
| Abgasleitungen / Bypass                       | 5.000                                 | 25.000                             | 40.000                              |
| Kaminanlage                                   | 15.000                                | -                                  | 30.000                              |
| EMSR (mit Visualisierung)                     | 60.000                                | 60.000                             | 110.000                             |
| Emissionsüberwachung                          | 25.000                                | -                                  | 30.000                              |
| Druckluftanlage                               | -                                     | 25.000                             | 25.000                              |
| Ascheaufbereitung                             | 30.000                                | -                                  | 40.000                              |
| Stahlbau                                      | 25.000                                | -                                  | 50.000                              |
| Abnahmemessungen                              | 15.000                                | -                                  | 15.000                              |
| Unvorhergesehenes (5%)                        | 17500                                 | 20.250                             | 48.250                              |
| Bauwerk (inkl. Außenanlagen; ohne Grundstück) | 550.000                               | 150.000                            | 600.000                             |
| <b>Summe</b>                                  | <b>917.500</b>                        | <b>575.250</b>                     | <b>1.613.250</b>                    |

Der technischen Ausführung der Kleinanlage liegt ein Mehrkammerofen, neuester Bauart, zugrunde, der, in Verbindung mit der angesetzten Prozesssteuerung, die Einhaltung der verbrennungstechnischen Anforderungen für Kohlenmonoxid mit 50 mg/Nm<sup>3</sup> ermöglicht. Die kontinuierliche Emissionsüberwachung entspricht den Vorgaben der VDI 3890, Absatz 10.4.

Sofern über den Genehmigungsbescheid eine kontinuierliche CO-Messwerterfassung gefordert ist, ist der Kostenansatz um rund 20.000 Euro zu erhöhen. Für das Bauwerk/Außenanlagen wurde ein Zweckbau (einfacher Standard) zugrunde gelegt.

Die Baugruppen für die verfahrenstechnische Nachrüstung der Abgasreinigungsanlage (AGR) setzen sich zusammen aus Abgaskühlung einschließlich der Wärmeabführung über einen geschlossenen Wasser-/Glykolkreis mit Rückkühlwerk sowie aus einer Abgasreinigung, bestehend aus Additivdosierung und Gewebefilter. Mit diesem Konzept werden Stäube, Schwefeloxide, Schwermetalle sowie Dioxine und Furane wirkungsvoll abgeschieden. Auf eine Betrachtung des Sonderfalls zur alleinigen Nachrüstung einer Entstaubung wurde verzichtet, da hierbei auch die entsprechende Abgaskühlung zum Schutz der Gewebefilterschläuche notwendig ist. Der Mehraufwand für die Additivdosierung, eine Voraussetzung zur Abscheidung der gasförmigen Schadstoffe, Schwefeloxide und Schwermetalle sowie Dioxine und Furane, ist mit Blick auf die dadurch erzielbare Umweltrelevanz von untergeordneter Bedeutung. Mit dem Ansatz von 150.000 Euro für eine Erweiterung des Bauwerks wurde dem Umstand Rechnung getragen, dass die Nachrüstung der AGR mit einem zusätzlichen Raumbedarf einhergeht. Gleichwohl ist i.d.R. das Gebäude bei Kleinanlagen für diese und andere Erweiterungen größer ausgelegt, so dass bei einer Nachrüstung die Kostenansätze für das Bauwerk geringer sein können.

Bei der Großanlage mit Abgasreinigung wurde der Kremationsofen mit Abgaskühlung und -reinigung heutigen Standards, also VDI 3890, einschließlich eines entsprechenden Kostenansatzes für ein Zweckgebäude angenommen. Die Kosten der einzelnen Baugruppen sind durchaus vergleichbar mit denen in der Humankremation. Neben einem Mehrkammerofen (Flachbettofen in „schwerer“ Ausführung) ist für die Abgasreinigung ein Flugstromverfahren (vgl. hierzu 4.1.2 und [26]) unterstellt. Mit dieser Konfiguration wird der Stand der Technik abgebildet. Nicht enthalten sind sekundäre DeNO<sub>x</sub>-Maßnahmen. Für die Emissionsüberwachung gelten die Ausführungen entsprechend denen bei der Kleinanlage.

#### **4.2.2 Ansätze für eine betriebswirtschaftliche Betrachtung**

Basierend auf den vorgenannten Kostenansätzen wird nachfolgend eine vereinfachte Betriebskostenanalyse durchgeführt. Die Berechnung erfolgt unter folgenden allgemeinen Annahmen:

- Kein Grunderwerb,
- Kein Rückbaukostenansatz,
- Lineare Abschreibung (Bauwerk 50 Jahre / Technik 10 Jahre),
- Zinssatz 2 %.

Des Weiteren werden Planungsaufwendungen sowie Kosten für die Genehmigungsplanung nicht berücksichtigt. Die sich ergebenden Kostenbaugruppen werden in fixe und variable Betriebskosten untergliedert. Zu den fixen Kostenbaugruppen gehören die Kapitalkosten, bestehend aus Zins und Abschreibung, aber auch die Aufwendungen für die jährliche Wartung und Reparatur, das Personal sowie die Grundverbräuche bis zu anderen festen Betriebskosten, wie allgemeine Verwaltung, Versicherung, Steuern usw.

Für die jährlichen Wartungs- und Reparaturaufwendungen werden für sämtliche verfahrenstechnischen Einrichtungen 5 % der Investitionssumme angenommen.

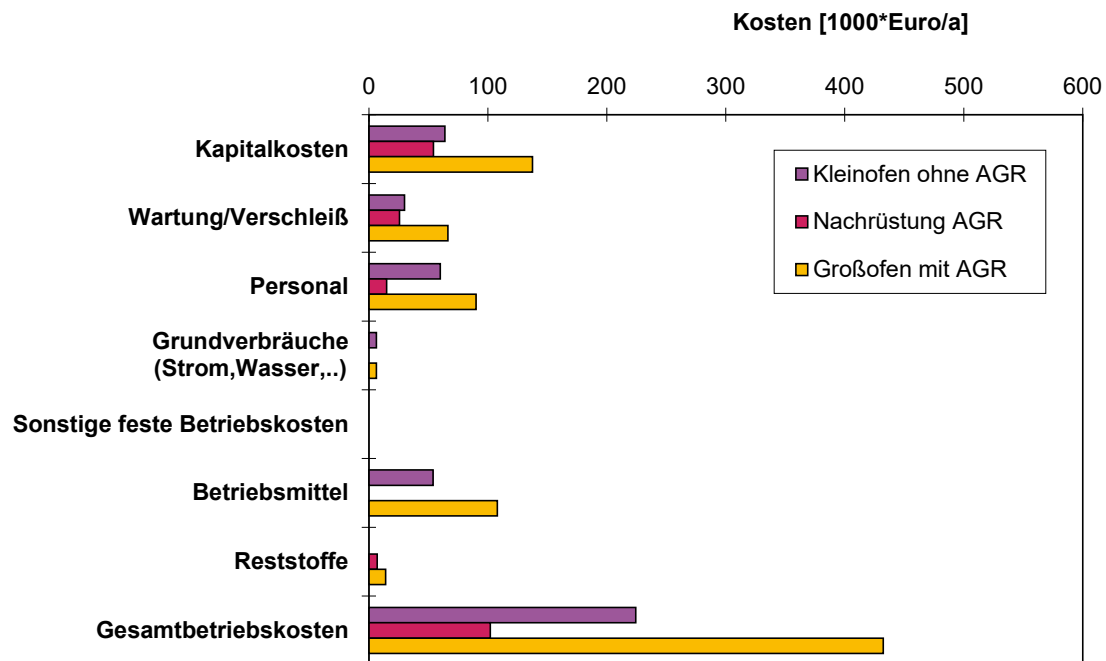
Erfahrungsgemäß liegen die Aufwendungen in den ersten 5 Jahren meist niedriger, jedoch steigen sie mit zunehmender Betriebszeit an. Für Bauwerke und Außenanlagen/Infrastruktur werden einheitlich 1,5 % der jeweiligen Investitionssumme sowie ein allgemeiner Pauschbetrag für Kleinreparaturen angenommen.

Für den Betrachtungsfall mit einem Kleinofen ohne Abgasreinigung werden die Personalkosten mit einem Mitarbeiter angenommen. Sofern die Abgasreinigungsanlage nachgerüstet wird, wird der zusätzliche Personalaufwand, der für den Wechsel der Additiv- und Reststoffbehälter sowie weitere regelmäßige Kontrollgänge anfällt, mit 0,25 Mitarbeiter zum Ansatz gebracht. Für die Großanlage mit höherer stündlicher Durchsatzleistung und Betreuung der Abgasbehandlungseinrichtung werden 1,5 Mitarbeiter zugrunde gelegt. Die Personalkosten werden pro Mitarbeiter und Jahr mit 50.000 Euro zuzüglich 20 % Nebenkosten angenommen.

Die Grundverbräuche (Gas, Strom, Wasser) werden in allen Betrachtungsszenarien einheitlich angesetzt. Die sonstigen festen Betriebskosten, wie allgemeiner Verwaltungsaufwand, Versicherungen, Steuern usw. werden nicht berücksichtigt. Für die variablen Betriebskosten, die von der Durchsatzleistung abhängen, werden in allen Szenarien Verbrauchsangaben für Erdgas, Strom, Sorptionsmittel und Rückstandsentsorgung einheitliche Angaben namhafter Hersteller zugrunde gelegt. Entgelte durch Wärmenutzung, die insbesondere bei Großanlagen Sinn machen, werden bei diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Die sich daraus ergebende Zusammenstellung der Kostenbausteine ist für den Auslegungsfall (Kleinanlagen 50 kg/h und Großanlagen 100 kg/h) für eine Jahresbetriebszeit von 250 Arbeitstagen in Abbildung 13 dargestellt. Es ist nicht überraschend, dass vor allem Kapitaldienst, Wartung und Verschleiß sowie die Personalkosten, den wesentlichen Anteil der Gesamtjahresbetriebskosten ausmachen. Dabei sind zwei Aspekte zu berücksichtigen. Zum einen repräsentiert der angenommene Zinssatz von 2 % den derzeit günstigen Kapitaldienst und zum anderen geht mit zunehmender Betriebszeit einer Anlage ein steigender Verschleißaufwand einher. Der Anteil der variablen Betriebsmittel (im wesentlichen Gasverbrauch) und Reststoffkosten liegen erwartungsgemäß bei unter 20 % der Gesamtbetriebskosten.

**Abbildung 13: Jahresbetriebskosten untergliedert nach Kostengruppen**

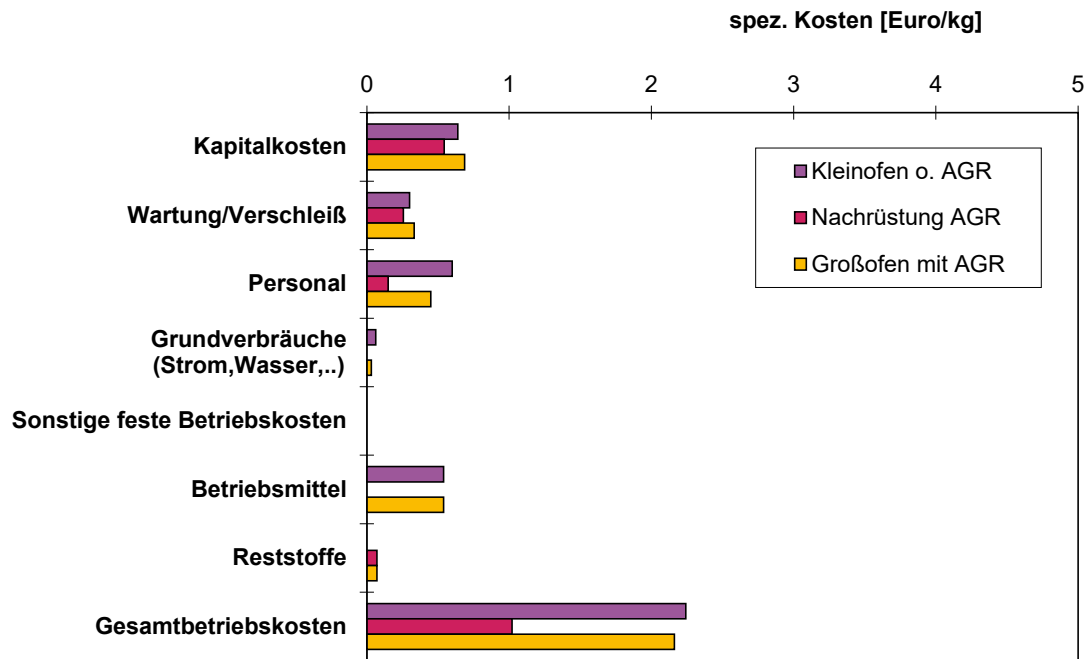


Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG

Da Tierkremationsanlagen mit unterschiedlichen Durchsatzleistungen betrieben werden, ist es zweckmäßig, die Kostenbaugruppen auf die jeweilige Jahresdurchsatzleistung zu beziehen. Für den Betrachtungsfall der Kleinanlage (50 kg/h) sowie die Nachrüstung der darauf bezogenen Abgasbehandlungseinrichtung wird als Bezugsgröße im 100 % Lastfall 100 Mg/a (50kg/h \* 8h/d \* 250 d/a) angenommen. Bei der Großanlage liegt die Bezugsgröße bei 200 Mg/a. Dies unterstellt, ergeben sich die in Abbildung 14 dargestellten spezifischen Gesamtbetriebskosten für die Betrachtungsszenarien. Wie erwartet, verschieben sich die Verhältnisse aufgrund des Durchsatzbezugs der festen Betriebskosten. Im Ergebnis bedeutet dies, dass die spezifischen Betriebskosten einer Großanlage mit Abgasbehandlungstechnologie etwa auf dem Niveau einer Kleinanlage ohne Abgasbehandlungstechnik liegen. Als mittlere Betriebskosten im Auslegungspunkt sind etwa 2,50 Euro pro kg Tierkörper (netto) zu erwarten. Es sei ausdrücklich darauf verwiesen, dass bei Einzelkremationen, bei denen die Ofenanlage nur zum Teil ausgelastet ist, deutlich höhere spezifische Betriebskosten anfallen werden (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 4.2.3.). Eine weitere, für Betreiber von Kleinverbrennungsanlagen relevante Aussage lässt sich aus diesen Betrachtungen ebenfalls ableiten. Die Nachrüstung einer Abgasbehandlung, wie sie in dieser Studie beschrieben ist, führt zu einer Steigerung der Gesamtbetriebskosten um etwa 40 %.

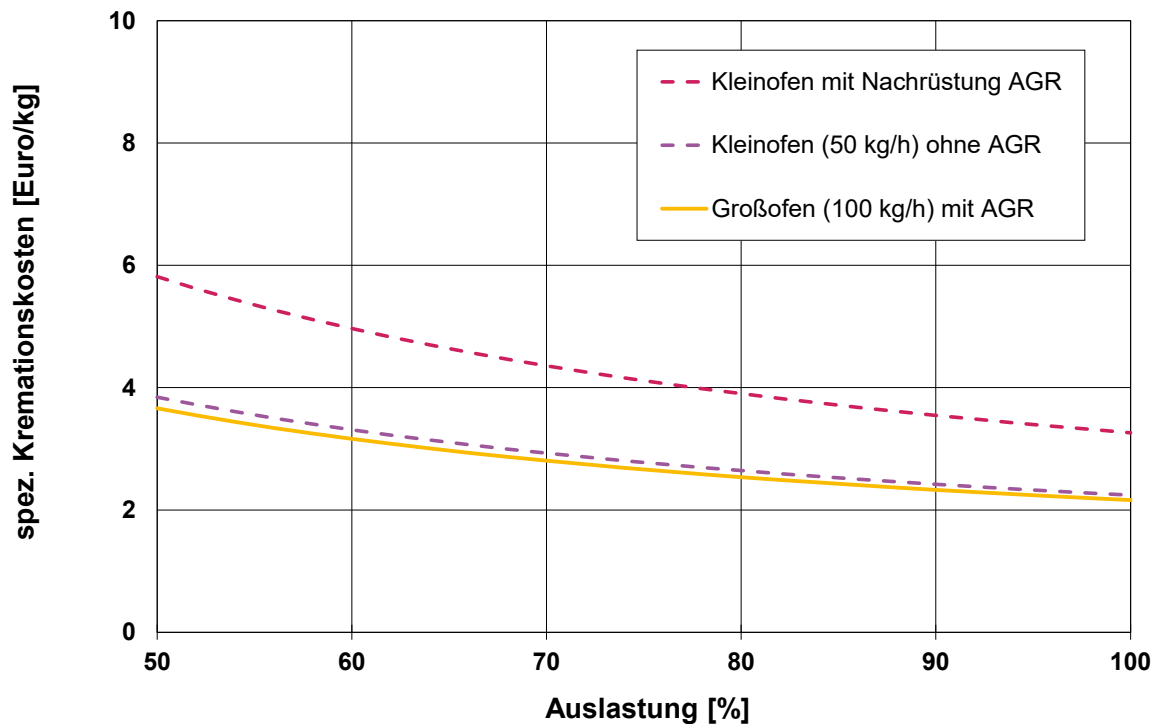
Aus den hier vorgestellten betriebswirtschaftlichen Betrachtungen lassen sich auch Erkenntnisse über die Anlagenauslastung und die damit verbundenen Projektrisiken diskutieren (Abbildung 15). Bedingt durch den Umstand, dass weniger als 20 % der Gesamtbetriebskosten variabel, also durchsatzabhängig, sind, steigen die spezifischen Kremationskosten bei Minderauslastung deutlich an.

**Abbildung 14: Spezifische Gesamtbetriebskosten untergliedert nach Kostengruppen**



Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG

**Abbildung 15: Einfluss der Anlagenauslastung auf die spezifischen Gesamtkosten**



Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG

Gerade bei Tierkrematorien ist die chargenbezogene Minderauslastung auch ein Ergebnis der unterschiedlichen Betriebsweise „Einzel- oder Sammelkremation“. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Preisgestaltung auf diese beiden Betriebsweisen Rücksicht nimmt (vgl. 4.2.3).

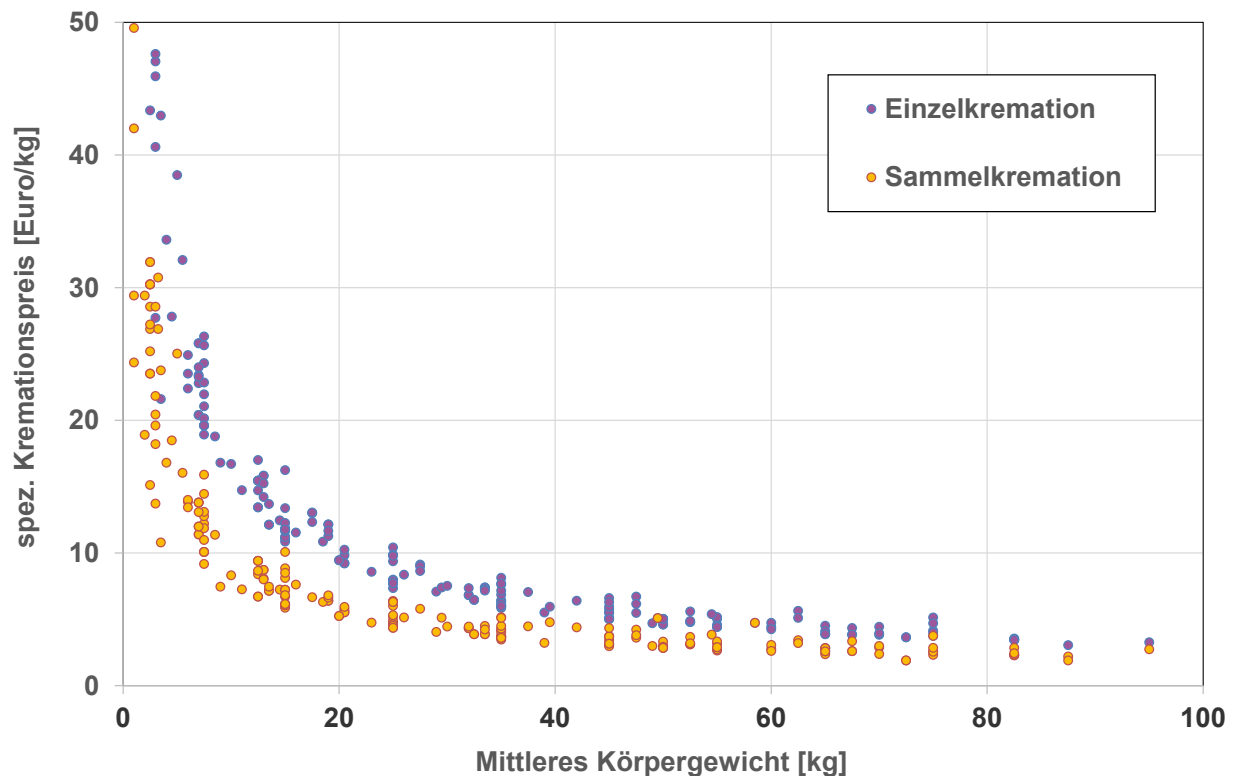
#### **4.2.3 Kremationspreise**

Den Webseiten der einzelnen Tierkrematorien sind die Preislisten für die angebotenen Leistungen zu entnehmen. Die Preisgestaltung hängt von den jeweils zugrunde liegenden Serviceleistungen ab. In der Regel sind die Preise für die eigentliche Kremation separat ausgewiesen, so dass diese erfasst werden konnten. Dabei wird zwischen Einzel- und Sammelkremation unterschieden. Bei der Einzelkremation werden Tierkörper einzeln kremiert, wodurch eine eindeutige Zuordnung der verbleibenden Asche gegeben ist. Zum Teil wird unter Einzelkremation auch verstanden, dass beispielsweise zwei oder mehrere kleine Tierkörper in jeweils getrennten Schalen in den Ofenraum aufgegeben werden. Die Aschen der jeweiligen Tierkörper verbleiben getrennt in den Schalen, so dass auch in diesem Fall die Aschen zugeordnet werden können.

Die Krematoriumsbetreiber geben auf ihren Webseiten Staffelpreise in Abhängigkeit der Tiergewichte an, wobei die Preise jeweils für eine Bandbreite des Tierkörpergewichtes ausgewiesen werden. Diese Bandbreiten sind z. T. sehr eng gefasst (z. B. 5 kg) und in anderen Fällen deutlich breiter (z. B. 20 kg). Für die Darstellung in Abbildung 16 wurden die Preisangaben auf den Mittelwert der angegebenen Bandbreite als Nettopreis gewählt. Es ist trivial festzustellen, dass die spezifischen Preise mit steigendem Gewicht sinken. Ebenso ist festzuhalten, dass die Preise für die Sammelkremation etwa im Bereich von 40 bis 70 % der Einzelkremation liegen. Mit steigendem Tierkörpergewicht werden hierbei die Preisunterschiede zwischen Einzel- und Sammelkremation geringer. Dieser Effekt ist auch dem Umstand geschuldet ist, dass man dabei zunehmend den Bereich der Leistungsgrenze des Kremationsofens erreicht.

Es wird ausdrücklich darauf verwiesen, dass die Preisgestaltung vielen weiteren Facetten der Serviceleistungen und der Vertriebswege unterliegen, so dass ein Vergleich mit der in Abschnitt 4.2.2. ausgeführten Betriebskostenanalyse als nicht zielführend erachtet wird, wenngleich eine gewisse Plausibilität gegeben ist.

**Abbildung 16: Spezifische Kremationspreise (Stand: September 2018; Angaben in Euro, netto)**



Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG

### 4.3 Vergleich mit Nachbarstaaten

Die relevanten Anforderungen an den Betrieb von Tierkrematorien in den drei Nachbarstaaten, Schweiz, Niederlande und Frankreich, lassen sich zweckmäßigerweise durch Vergleich der gesetzlichen Vorschriften in den einzelnen Ländern aufzeigen, aus denen sich schließlich die technologischen Konsequenzen ableiten lassen.

#### 4.3.1 Schweiz

In der Schweiz werden Tierkrematorien gemäß Luftreinhalteverordnung [31] unter Ziffer 71 „Anlagen zum Verbrennen von Siedlungs- und Sonderabfällen“, deren Geltungsbereich sich auch auf „Tierkörper und Fleischabfälle“ erstreckt, geregelt. Damit unterliegen Tierkrematorien den umfassenden Emissionsauflagen wie Abfallverbrennungsanlagen (siehe Tabelle 9).

Bei den Grenzwerten für Stickstoffoxide gilt, dass die vorgegebene Emissionsbegrenzung von 80 mg/Nm<sup>3</sup> nur bei einem Massenstrom von über 2,5 kg/h einzuhalten ist. Unterstellt man eine mittlere Emissionskonzentration im Abgas vor einer DeNOx-Anlage mit 350 mg/Nm<sup>3</sup> (vgl. hierzu auch 3.6), so müsste der Abgasvolumenstrom über 7.000 Nm<sup>3</sup>/h liegen, damit diese Emissionsbegrenzung zur Anwendung kommt. Verglichen mit den üblichen Abgasvolumenströmen, die bei Heimtierkrematorien mit einer stündlichen Verbrennungsleistung bei rund 1.000 Nm<sup>3</sup>/h liegen, kommen vorgenannte Emissionsbegrenzungen für Stickstoffoxide daher nicht in Betracht und wurden in Tabelle 9 ebenso wenig aufgeführt, wie Emissionsbegrenzungen für Ammoniak und

Ammoniumverbindungen (angegeben als  $\text{NH}_3$ ), die in der Praxis nur dann auftreten, wenn DeNOx-Anlagen im Einsatz sind.

Über die Zuordnung zur Abfallverbrennung sind formal auch Emissionsbegrenzungen für Schwermetalle und deren Verbindungen – Blei und Zink als Summe mit  $1 \text{ mg/Nm}^3$  sowie Quecksilber und Cadmium mit jeweils  $0,05 \text{ mg/Nm}^3$  – enthalten. Da diese Abgasbegrenzungen für Tierkrematorien nicht von Relevanz sind, werden sie ebenfalls nicht in Tabelle 9 aufgeführt.

Aufgrund der Vorgaben der Schweizer Luftreinhalteverordnung sind Tierkremationsanlagen überwiegend mit einer Abgasreinigungstechnik ausgestattet. Dabei kommen in der Regel Trockensorptionsverfahren nach Flugstromprinzip in Frage.

Einer Internetrecherche zufolge sind in der Schweiz rund 10 Tierkrematorien in Betrieb, die teilweise über mehrere Kremationslinien verfügen, z. B. das Tierkrematorium Seon mit insgesamt drei Ofenlinien unterschiedlicher Kapazität. Im Tierkrematorium Kirchberg wird neben einem Heimtierkrematorium auch das bis dato einzige Pferdekrematorium der Schweiz betrieben.

#### **4.3.2 Niederlande**

Die Anforderungen für Tierkrematorien in den Niederlanden sind im Aktivitätenbeschluss Umweltmanagement ("Activiteitenbesluit milieubeheer") niedergelegt [32]. Die Vorgaben für eine „gute Verbrennung“ beziehen sich auf die Einhaltung der Temperatur- und Verweilzeitbedingung in der Nachbrennkammer, die mit  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $1,5 \text{ s}$  angegeben werden. Ferner werden zur Aufrechterhaltung der Temperaturen „Low-NOx-Brenner“, also Brenner mit gestufter Luftführung vorgeschrieben.

Neben dem Minimierungsgebot für PCDD/F-Emissionen enthält der aktuelle Aktivitätenbeschluss lediglich die Begrenzung der Staubemission mit  $50 \text{ mg/Nm}^3$ , sofern die stündlich emittierte Staubmenge unter  $200 \text{ g}$  (korrespondierend mit einem Abgasvolumenstrom von  $4.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) liegt (vgl. Tabelle 9). Bei höheren stündlichen Staubfrachten sind  $5 \text{ mg/Nm}^3$  als Grenzwert einzuhalten. Für die Praxis bedeutet dies, dass Kremationsanlagen mit einem Durchsatz von bis zu etwa  $200 \text{ kg/h}$  nicht zwingend einen Staubfilter benötigen, wenn es durch feuerungstechnische Maßnahmen (geringe Gasgeschwindigkeiten in der Hauptbrennkammer) gelingt, den Staubaustrag gering zu halten. Da die Kremationszeit bei der Pferdekremation üblicherweise deutlich länger als 2 Stunden beträgt, ist auch in diesem Fall ein Filtersystem nicht zwingend erforderlich.

Insgesamt sind in den Niederlanden (Stand 2018) 49 Tierkrematorien in Betrieb, darunter zwei Pferdekrematorien.

#### **4.3.3 Frankreich**

Die Anforderungen, denen neu zu genehmigende französische Tierkrematorien unterliegen, sind in der Verordnung vom 6. Juni 2018 festgeschrieben [33]. Darin sind veterinärrechtliche Aspekte (z. B. Umgang mit Tierkörpern) und mit Verweis auf die EU-Verordnung Nr. 142/2011 [5] betriebstechnische Vorgaben zur Einhaltung der Nachverbrennungstemperatur von  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  über  $2 \text{ s}$  verankert. Außerdem sind bauliche Vorgaben, wie Abstand zur Wohnbebauung (mindestens  $100 \text{ m}$ ), Kaminhöhe (mindestens  $6 \text{ m}$ ), sowie Dokumentationspflichten in der aktualisierten Verordnung enthalten.

Bei den Emissionsgrenzwerten werden in Abhängigkeit von der täglichen Kremationsleistung der Anlage (größer oder kleiner 10 Mg/d) unterschiedliche Emissionsgrenzwerte vorgegeben (Tabelle 9). Aufgrund der Emissionsvorgaben in Abhängigkeit der täglichen Kremationsleistung können Kremationsanlagen mit Durchsatzleistungen von weniger als 10 Mg/d (entsprechend 1.000 kg/h bei 10 Betriebsstunden) aus technischer Sicht ohne Filtersysteme konzipiert werden.

Die französische Verordnung enthält zudem Emissionsbegrenzungen für Quecksilber, Cadmium und andere Schwermetalle sowie für Ammoniak, auf deren Darstellung in Tabelle 9 verzichtet wurde (vgl. hierzu die Ausführungen in Abschnitt 4.3.1.). Der Vollständigkeit halber sei darauf verwiesen, dass in der französischen Verordnung Grenzwerte für Lärm- und Geruchsemissionen enthalten sind.

Wie von der Unternehmensgruppe Cremare [34] zu erfahren war, befinden sich in Frankreich ca. 15 Tierkrematorien in Betrieb, die meist mit Flachbettöfensystemen ausgestattet und für Durchsatzleistungen von 40 bis 150 kg/h konzipiert sind. Ferner werden 3 größere Kremationsanlagen betrieben, die als Drehrohrofensysteme ausgeführt und auf Durchsatzleistungen von 250 und 450 kg/h ausgelegt sind (80 % der Kremationen werden als Sammelkremationen durchgeführt). Letztere sind mit Trockensorptionsverfahren zur Abgasreinigung ausgestattet. Alle in Frankreich in Betrieb befindlichen Kremationsöfensysteme sind gasbefeuert.

#### 4.3.4 Emissionsgrenzwerte im Überblick

Zusammenfassend zeigen die in den Nachbarstaaten – Schweiz, Niederlande und Frankreich – vorgegebenen Emissionsbegrenzungen Unterschiede bei Anlagen mit kleiner Leistung (Tabelle 9), die zwangsläufig unterschiedliche technische Standards zur Folge haben. So sind Tierkrematorien in der Schweiz aufgrund der heutigen Anforderungen zwingend mit einer Abgasreinigungseinrichtung zu versehen, wohingegen in Frankreich bei Anlagen bis zu einer Kremationsleistung von 10 Mg/d höhere Emissionskonzentrationen zulässig sind. In den Niederlanden können aufgrund der aktuell gültigen gesetzlichen Vorschriften Kremationslinien auch mit höherer Durchsatzleistung ohne Abgasfilter/-reinigung betrieben werden.

**Tabelle 9: Emissionsgrenzwerte in den Nachbarstaaten zum Vergleich**

| Anforderung                          | Schweiz               | Niederlande                                                                         | Frankreich (< 10 Mg/d)               | Frankreich (> 10 Mg/d)    |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Hauptverbrennung Temperatur          | -                     | -                                                                                   | mindestens 500 °C                    | mindestens 500 °C         |
| Temperatur Nachverbrennung           | -                     | 800 °C / 1,5 sec                                                                    | mindestens 850 °C / 2 sec            | mindestens 850 °C / 2 sec |
| Kohlenmonoxid                        | 50 mg/Nm <sup>3</sup> | -                                                                                   | 100 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>1)</sup> | 25 mg/Nm <sup>3</sup>     |
| Gesamt-C                             | 20 mg/Nm <sup>3</sup> | -                                                                                   | 20 mg/Nm <sup>3</sup> <sup>2)</sup>  | 10 mg/Nm <sup>3</sup>     |
| Staub                                | 10 mg/Nm <sup>3</sup> | 50 mg/Nm <sup>3</sup><br>(bei < 200 g/h)<br>5 mg/Nm <sup>3</sup><br>(bei ≥ 200 g/h) | 100 mg/Nm <sup>3</sup>               | 10 mg/Nm <sup>3</sup>     |
| Schwefeloxide (als SO <sub>2</sub> ) | 50 mg/Nm <sup>3</sup> | -                                                                                   | 300 mg/Nm <sup>3</sup>               | 30 mg/Nm <sup>3</sup>     |

| Anforderung                            | Schweiz                   | Niederlande | Frankreich<br>(< 10 Mg/d) | Frankreich<br>(> 10 Mg/d) |
|----------------------------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|---------------------------|
| Stickstoffoxide (als NO <sub>2</sub> ) |                           | -           | 500 mg/Nm <sup>3</sup>    | 175 mg/Nm <sup>3</sup>    |
| Chlorwasserstoff (HCl)                 | 20 mg/Nm <sup>3</sup>     | -           | 100 mg/Nm <sup>3</sup>    | 10 mg/Nm <sup>3</sup>     |
| Fluorwasserstoff (HF)                  | 2 mg/Nm <sup>3</sup>      | -           | -                         | -                         |
| PCDD / PCDF                            | 0,1 ng TE/Nm <sup>3</sup> | -           | 0,1 ng TE/Nm <sup>3</sup> | 0,1 ng TE/Nm <sup>3</sup> |

Hinweise: <sup>1)</sup> 150 mg/Nm<sup>3</sup> bei Anlagen mit geringer Leistung; <sup>2)</sup> 40 mg/Nm<sup>3</sup> bei Anlagen mit geringer Leistung.

Im Vergleich zu den Anforderungen in den Nachbarstaaten, sind die Standards in Deutschland für Anlagen der Nr. 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV mit Durchsatzleistungen von mehr als 50 kg/h technologisch vergleichbar zu denen in der Schweiz. Für Anlagen der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV mit Kremationsleistungen bis 50 kg/h entsprechen die Anforderungen an deutsche Tierkrematorien und die umgesetzten Standards eher den französischen, wenn man bedenkt, dass mit Mehrkammerofensystemen neuesten Standards die CO- und C<sub>ges</sub>-Emissionsgrenzwerte, wie sie in Deutschland gelten, generell eingehalten werden können.

## 5 Emissionsmessungen an ausgewählten Anlagen

Die Datenerhebung in Abschnitt 4.1 ergab, dass der überwiegende Teil der Tierkremationsanlagen in Deutschland, i. d. R. Kleinanlagen mit max. 50 kg/h, ohne Abgasreinigung betrieben werden. Wie in Abschnitt 3 ausführlich diskutiert, ergeben sich mit Blick auf eine nachhaltige, möglicherweise einheitliche Emissionsbegrenzung folgende Fragestellungen:

- Mit welchen Staubemissionen ist bei Kleinanlagen zu rechnen?
- Welche Emissionskonzentrationen an SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> sind im ungereinigten Abgas von Tierkremationsanlagen aller Kategorien zu erwarten?
- Welches PCDD/F-Emissionsminderungspotential ist durch den Einsatz adsorptiver Abgasreinigungssysteme zu erwarten?
- Ist der monetäre Aufwand zur Nachrüstung von Abgasreinigungsanlagen bei Kleinanlagen mit einem maximalen Durchsatz von 50 kg/h als verhältnismäßig einzustufen?
- Ist der monetäre Aufwand für DeNO<sub>x</sub>-Maßnahmen bei Anlagen mit einem Durchsatz von mehr als 50 kg/h als verhältnismäßig einzustufen?

Um möglichst umfassende Antworten auf vorgenannte Fragen zu erhalten, wurden Emissionsmessungen an unterschiedlichen Tierkremationsanlagen durchgeführt.

### 5.1 Auswahl der untersuchten Tierkremationsanlagen

Die Auswahl der untersuchten Tierkremationsanlagen erfolgte entsprechend der Unterteilung in

- **Anlagen der Nr. 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV (bis 50 kg/h):**

Da Anlagen dieser Kategorie meist ohne Abgasreinigungsanlagen betrieben werden, wurden Anlagen **ohne** und **mit** Abgasreinigung gewählt. Sämtliche Anlagen ohne Abgasreinigung bestehen aus einem Flachbettofen mit Abgasnachbrennkammer wodurch das frei werdende Abgas über eine Kaminanlage in die Umgebung abgeführt wird. In der Anlage mit Abgasreinigung wird das Abgas nach einem Ofen, der mit zwei Beschickungskammern ausgestattet ist, über eine gemeinsame Abgasnachverbrennung geführt, anschließend gekühlt und in die Abgasreinigung geleitet. Bei der eingesetzten Abgasreinigung handelt es sich um das Kugelrotorlaufverfahren, das mit sehr gutem Erfolg in vielen Humankrematorien eingesetzt ist [35]. Die Anlage ist seit Anfang 2020 in Betrieb.

- **Anlagen der Nr. 7.12.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV (mehr als 50 kg/h):**

Für diesen Anlagentyp werden die Messungen in einem Tierkrematorium durchgeführt, in dem zwei Verbrennungslinien installiert sind, deren Abgas auf eine gemeinsame Abgasreinigung geführt wird. Der Ofen der Linie 1 ist als Flachbettofen für die Heimtierkremation bis 50 kg/h ausgeführt. Die Linie 2 wurde für die Pferdekremation konzipiert. Dabei sind pro Charge Pferdekörper bis zu 1000 kg genehmigungsrechtlich zugelassen; die Kremationsleistung dieses Ofens ist auf 125 kg/h limitiert. Sofern beide Ofensysteme parallel betrieben werden, gilt dieselbe Leistungsbegrenzung. Bei der gemeinsamen Abgasreinigung kommt ein Trockensorptionsverfahren zur Anwendung, wobei vor dem Gewebefilter Additiv dosiert wird.

Die für das Messprogramm ausgewählten Tierkrematorien sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

**Tabelle 10: Ausgewählte Tierkrematorien für die Durchführung der Abgasmessungen**

| Krematorium | Anlagentyp      | Ofentyp                | Abgasreinigung            |
|-------------|-----------------|------------------------|---------------------------|
| Anlage A    | Nr. 7.12.1.3    | FBO                    | -                         |
| Anlage B    | Nr. 7.12 (Sp.1) | FBO                    | -                         |
| Anlage C    | Nr. 7.12.1.2    | FBO                    | -                         |
| Anlage D    | Nr. 7.12.1.3    | FBO mit 2 Brennkammern | Kugelrotorlaufverfahren   |
| Anlage E1   | Nr. 7.12.1.3    | FBO                    | Trockensorptionsverfahren |
| Anlage E2   | Nr. 7.12.1.2    | FBO als Herdwagen      | Trockensorptionsverfahren |

## 5.2 Messprogramm

Nach Kontaktaufnahme mit den Betreibern vorgenannter Krematorien wurde die jeweilige Messplatzsituation begutachtet und die Position fehlender Messstutzen festgelegt. Tabelle 11 zeigt die zeitliche Abfolge der Messkampagnen. Aufgrund eines Eigentumswechsels musste für die ursprünglich vorgesehene Anlage B eine alternative Anlage gesucht und die geplante Messkampagne in der zweiten Jahreshälfte durchgeführt werden. Zusätzlich stellten sich zeitliche Verzögerungen infolge der Corona-Pandemie ein.

**Tabelle 11: Durchführung der Messkampagnen**

| Krematorium      | Messkampagne |
|------------------|--------------|
| Anlage A         | KW 07-2020   |
| Anlage B         | KW 41-2020   |
| Anlage C         | KW 13-2020   |
| Anlage D         | KW 22-2020   |
| Anlage E1 und E2 | KW 11-2020   |

Die Messungen für die relevanten Schadstoffe Hg, CO, Gesamt-C, Gesamtstaub, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl und HF sowie PCDD/F erfolgten bei allen Anlagen im Reingas. Bei den Anlagen D, E1 und E2 wurden zeitgleich auch im Rohgas die Schadstoffe Hg, CO, Gesamt-C, Gesamtstaub, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl und HF gemessen. Tabelle 12 gibt einen Überblick über die für die einzelnen Schadstoffe relevanten Probenahme- und Analyseverfahren.

**Tabelle 12: Messkomponenten, Vorschriften und Normen**

| Messkomponenten                              | Probenahme- und Analyseverfahren                        | Probenahme [h] |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------|
| Kohlenmonoxid (CO) *)                        | DIN EN 15058 Nichtdispersive Infrarottechnologie (NDIR) | kontinuierlich |
| Gasförmige organische Stoffe (Gesamt-C) *)   | DIN EN 12619<br>Flammenionisationsdetektor (FID)        | kontinuierlich |
| Gesamtstaub<br>(einschließlich Feinstaub) *) | DIN EN 13284-1<br>Endbestimmung mittels Gravimetrie     | ½              |

| Messkomponenten                                                     | Probenahme- und Analyseverfahren                                                                                   | Probenahme [h]         |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Schwefeloxide (SO <sub>x</sub> ), als SO <sub>2</sub> *)            | DIN EN 14791<br>Endbestimmung mit Ionenchromatographie                                                             | ½ (und kontinuierlich) |
| Stickoxide (NO <sub>x</sub> ), als NO <sub>2</sub> *)               | DIN EN 14792<br>Chemilumineszenz                                                                                   | kontinuierlich         |
| Chlorwasserstoff (HCl)                                              | DIN EN 1911<br>Endbestimmung mit Ionenchromatographie                                                              | ½                      |
| Fluorwasserstoff (HF)                                               | VDI 2470 Bl. 1<br>Endbestimmung mittels Direktpotentiometrie                                                       | ½                      |
| Quecksilber und seine Verbindungen *)                               | Probenahme und Analytik: DIN EN 13211,<br>Endbestimmung: Kaltdampf-<br>Atomabsorptionsspektroskopie (CV-AAS)       | ½                      |
| Polychlorierte Dibenzo-(p)- dioxine und -furane (PCDD/PCDF) *)      | DIN 1948 Teile 1 – 3<br>Endbestimmung: hochauflösende<br>Gaschromatographie und<br>Massenspektrometrie (HRGC/HRMS) | 6                      |
| Begleitende Messungen der Abgasparameter zur Volumenstrombestimmung |                                                                                                                    |                        |
| O <sub>2</sub> * / CO <sub>2</sub>                                  | Kontinuierliche Messung: DIN EN 14789<br>Paramagnetischer Sensor / NDIR                                            | kontinuierlich         |

Die mit \*) gekennzeichneten Parameter sind akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005. Anmerkung: Beim Parameter PCDD/PCDF ist die Probenahme nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditiert; die Analyse erfolgt durch ein akkreditiertes Labor.

Aufgrund der unterschiedlichen Genehmigungspraxis unterliegen die einzelnen Kremationsanlagen unterschiedlichen Emissionsanforderungen, die auch unterschiedliche Mittelwertbildungen als Halbstundenmittelwert (HSMW), Stundenmittelwert (SMW) und Tagesmittelwert (TMW) festschreiben. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten sind mit Ausnahme der PCDD/PCDF-Messungen sämtliche Schadstoffkonzentrationen im Roh- und Reingas als Halbstundenmittelwerte erfasst und bewertet worden. Der Messbeginn jeder Messung erfolgte mit dem jeweiligen Kremationsbeginn; damit wird sichergestellt, dass die maximalen Emissionskonzentrationen, die i. d. R. in der ersten Phase der Kremation auftreten, erfasst werden. Die PCDD/PCDF-Messungen wurden, wie in anderen Prozessen auch, über einen Zeitraum von 6 Stunden durchgeführt. Diese Vorgehensweise entspricht dem Stand der Technik für Anlagen zur Heimtierkremation, wie er in der VDI-Richtlinie 3890 festgelegt ist [1].

Ergänzend zu den zuvor genannten Schadstoffen wurden die Abgasrandparameter Abgasgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsverteilung über den Messquerschnitt, Abgasfeuchte, Abgastemperatur, Abgasdruck sowie die Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidkonzentrationen während der Messkampagnen erfasst und dokumentiert.

Die Messungen erfolgten jeweils an aufeinander folgenden Tagen durch die als Messstelle nach § 29b BImSchG bekanntgegebene VDZ Service GmbH, Düsseldorf.

## 5.3 Messergebnisse

Bei den durchgeführten Messkampagnen in den unterschiedlichen Anlagen wurden sowohl Proben zur späteren Analyse genommen als auch kontinuierliche Messungen durchgeführt, deren Halbstundenmittelwerte jeweils über die gesamten Messtage ermittelt werden konnten. Dadurch ergaben sich bei den kontinuierlichen Messwertaufzeichnungen pro Messkampagne mehr Messwerte als bei den Beprobungen. In den nachfolgenden tabellarischen Messwertzusammenstellungen sind daher mehr Messwerte der kontinuierlichen Messwertauswertung enthalten. Zu den Messzeiten, an denen auch Beprobungen durchgeführt wurden, sind die entsprechenden Messwerte angegeben, ansonsten mit „-“ gekennzeichnet.

### 5.3.1 Anlage A

Die Messkampagne an der Anlage A fand am 12.02. und 13.02.2020 statt. Die Abgasmessungen einschließlich Probenahmen erfolgten an der vorhandenen behördlichen Emissionsmessstelle.

Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb betrieben. Vor Beginn der jeweiligen täglichen Messkampagne wurden Kremationen durchgeführt, um den Kremationsofen in den Betriebsmodus zu bringen. Obwohl bei einzelnen Chargen teilweise mehrere Tierkörper kremiert wurden, lagen ausschließlich Einzelkremationen vor, da die Tierkörper so auf der Herdplatte platziert werden konnten, dass eine zweifelsfreie Zuordnung der Aschen gegeben war. In den Tabellen 13 bis 15 sind die Ergebnisse beider Messtage im Überblick zusammengefasst.

**Tabelle 13: Krematorium A - 1. Messtag (12.2.2020)**

| Messung                                                                   | 1             | 2             | 3             | 4                     | 5             |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|
| Uhrzeit                                                                   | 11:14 - 11:44 | 12:20 - 12:50 | 13:37 - 14:07 | 14:38 - 15:08         | 15:34 - 16:04 |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                      | 1/31,6        | 1/21,4        | 1/19          | 2/43,4<br>langes Fell | 2/30,3        |
| Abgastemperatur [°C]                                                      | 464           | 471           | 478           | 490                   | 471           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 16,9          | 17,5          | 16,9          | 16,2                  | 16,9          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | 2000          | 2100          | 2000          | 2000                  | 2100          |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 4,3           | 4,2           | 2,0           | 1,9                   | 2,4           |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 2,9           | 3,4           | 2,9           | 2,2                   | 3,0           |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -             | 73,0          | 97,4          | -                     | 134,3         |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 174           | 100           | 198           | 335                   | 157           |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -             | 105,6         | 223,3         | -                     | 177,8         |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 232           | 255           | 297           | 398                   | 251           |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | -             | 43,4          | 61,3          | -                     | 60,7          |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -             | 0,22          | 0,27          | -                     | 0,27          |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -             | 0,94          | 1,4           | -                     | 0,71          |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen.

**Tabelle 14: Krematorium A - 2. Messtag (13.2.2020)**

| Messung                                                                   | 1                    | 2                    | 3             | 4             | 5             |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| Uhrzeit                                                                   | 09:40 - 10:10        | 10:50 - 11:20        | 11:33 - 12:02 | 12:47 - 13:17 | 13:52 - 14:22 |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                      | 2/79,2<br>langhaarig | 3/44,7<br>langhaarig | 1/34,8        | 1/29,7        | 2/18,5        |
| Abgastemperatur [°C]                                                      | 464                  | 497                  | 497           | 466           | 430           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 16,2                 | 16,5                 | 16,5          | 17,1          | 17,8          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | 1900                 | 1800                 | 1700          | 1900          | 1900          |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 2,5                  | 5,7                  | 5,0           | 2,6           | 3,9           |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 2,7                  | 3,0                  | 3,2           | 2,9           | 5,1           |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -                    | 107,1                | -             | 78,1          | 53,6          |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 439                  | 254                  | 248           | 203           | 113           |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | 475,3                | -                    | -             | 198,9         | 108,1         |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 300                  | 338                  | 278           | 326           | 346           |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | 77,7                 | -                    | -             | 49,8          | 46,2          |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | 0,27                 | -                    | -             | 0,28          | <0,28         |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -                    | 0,61                 | -             | 0,33          | 0,26          |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen.

**Tabelle 15: Krematorium A – PCDD/F-Messungen (12./13.2.2020)**

| Messung                                          | 1             | 2             |
|--------------------------------------------------|---------------|---------------|
| Datum                                            | 12.2.2020     | 13.2.2020     |
| Uhrzeit                                          | 10:55 - 16:55 | 08:49 - 14:49 |
| Tierkörper (Anzahl/Gewicht [kg])                 | 10/208,6      | 9/206,9       |
| Abgastemperatur [°C]                             | 448           | 460           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                   | 17,5          | 17,4          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                  | 2000          | 1900          |
| PCDD/F <sup>1)2)</sup> [ng TEQ/Nm <sup>3</sup> ] | 0,065         | 0,025         |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> Angaben in Toxizitätsäquivalent gemäß Nato-CCMS.

Die Abgase der Anlage A durchströmen nach dem Ofen eine ausreichend dimensionierte Abgasnachverbrennung, in der die geforderten Nachverbrennungsbedingungen von 850 °C und 2 s einzuhalten sind. Im Anschluss daran werden sie direkt über die Kaminanlage in die

Atmosphäre abgeleitet. Die Temperatur an der Messstelle in der Kaminanlage lag während der Messungen zwischen 430 °C und knapp 500 °C. Das Abgasvolumen betrug 1.700 bis 2.100 Nm<sup>3</sup>/h bei Sauerstoffgehalten zwischen 16,2 und 17,8 Vol. % O<sub>2</sub>.

### **Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff**

An beiden Messtagen lagen die gemessenen und auf 11 % normierten CO-Konzentrationen mit 2 bis 6 mg/Nm<sup>3</sup> im Kamin mit deutlichem Sicherheitsabstand unter dem Grenzwert von 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Ähnliches war für Gesamtkohlenstoff mit 2,2 bis 5,1 mg/Nm<sup>3</sup>, respektive 0,02 kg/h bis 0,03 kg/h, im Vergleich zum Grenzwert von 0,5 kg/h festzustellen. Die verbrennungstechnischen Eigenschaften des Kremationsofens mit nachgeschalteter Abgasnachverbrennung sind demnach als sehr gut zu bewerten und erfüllen den Stand der Technik mit deutlichem Sicherheitsabstand.

### **Staubgehalt**

Der Staubgehalt im Abgas lag, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zwischen 53,6 und 134,3 mg/Nm<sup>3</sup>; der emittierte Massenstrom lag bei den Messungen im Bereich von 0,03 bis 0,11 kg/h. Gemäß Genehmigungsbescheid dürfen die Emissionen von Gesamtstaub, einschließlich Feinstaub, die Massenkonzentration von 20 mg/Nm<sup>3</sup> oder den Massenstrom von 0,2 kg/h nicht überschreiten. Die Massenkonzentration von 0,15 g/Nm<sup>3</sup> darf auch bei Einhaltung oder Unterschreitung des Massenstroms von 0,2 kg/h nicht überschritten werden. Die Anforderungen des Genehmigungsbescheides sind damit erfüllt. Da die Anlage über keine Filtertechnik verfügt, sind die gemessenen Staubgehalte plausibel.

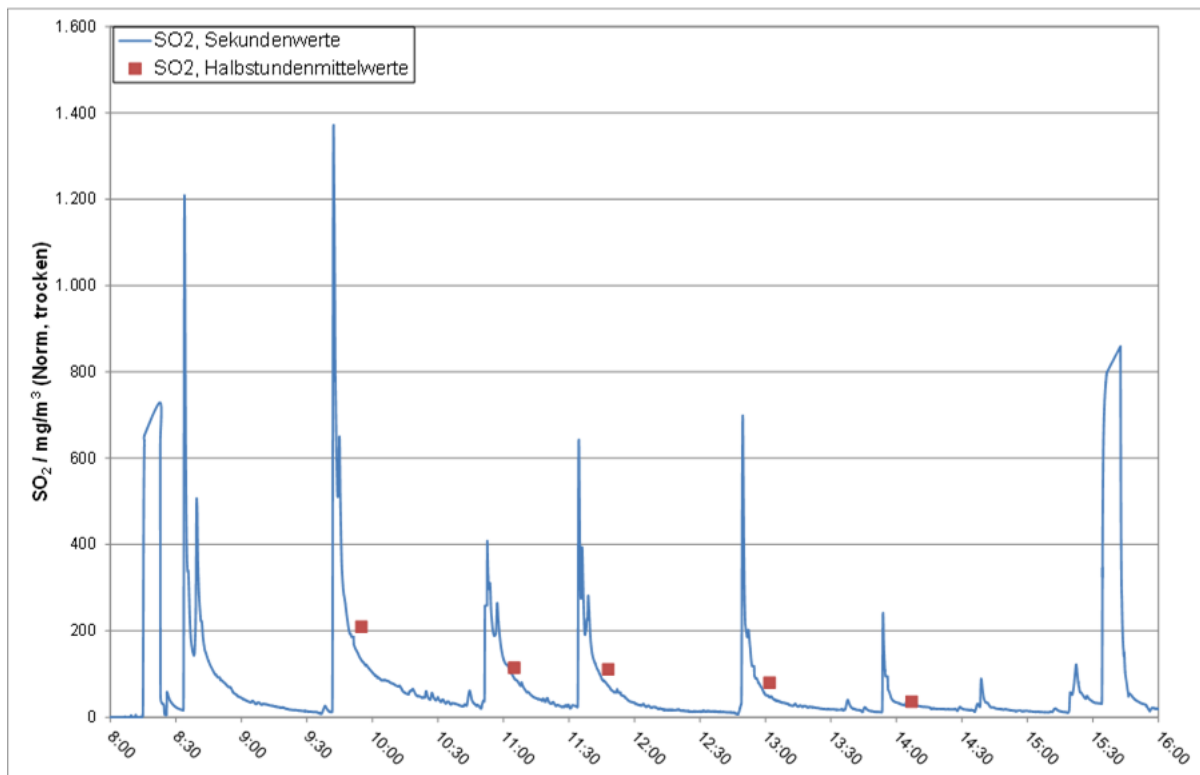
### **Schwefeloxide**

Wie die kontinuierliche Schwefeloxidsmessung zeigt, treten zu Beginn jeder Kremation SO<sub>x</sub>-Spitzen auf, die kurzzeitig bis 1.400 mg/Nm<sup>3</sup> (angegeben als SO<sub>2</sub>) erreichen können. Abbildung 17 zeigt beispielhaft den gemessenen Verlauf am 2. Messtag. Die aus den kontinuierlichen Messungen bestimmten Halbstundenmittelwerte lagen im Bereich von 100 bis 439 mg/Nm<sup>3</sup>, respektive als Massenströme zwischen 0,07 und 0,40 kg/h. Die parallel hierzu durchgeführte Probenahme mit anschließender Analyse gemäß DIN EN 14791 lieferte eine gute Übereinstimmung mit der kontinuierlichen Messung; die Abweichung beträgt max. etwa 10 %. Verglichen mit den Anforderungen des Genehmigungsbescheides, wonach der SO<sub>2</sub>-Massenstrom von 1,3 kg/h nicht überschritten werden darf, ist diese Begrenzung mit ausreichendem Sicherheitsabstand eingehalten. Da die Schwefeloxidemissionen maßgeblich vom Eintrag, insbesondere von Tierkörpern mit langen Haaren abhängen (vgl. Abschnitt 3.5.), erscheint die besonders signifikante SO<sub>2</sub>-Spitze bei der Charge, beginnend um 9.40 Uhr, plausibel, zumal bei dieser Charge das Aufgabegewicht erhöht war.

### **Stickstoffoxide**

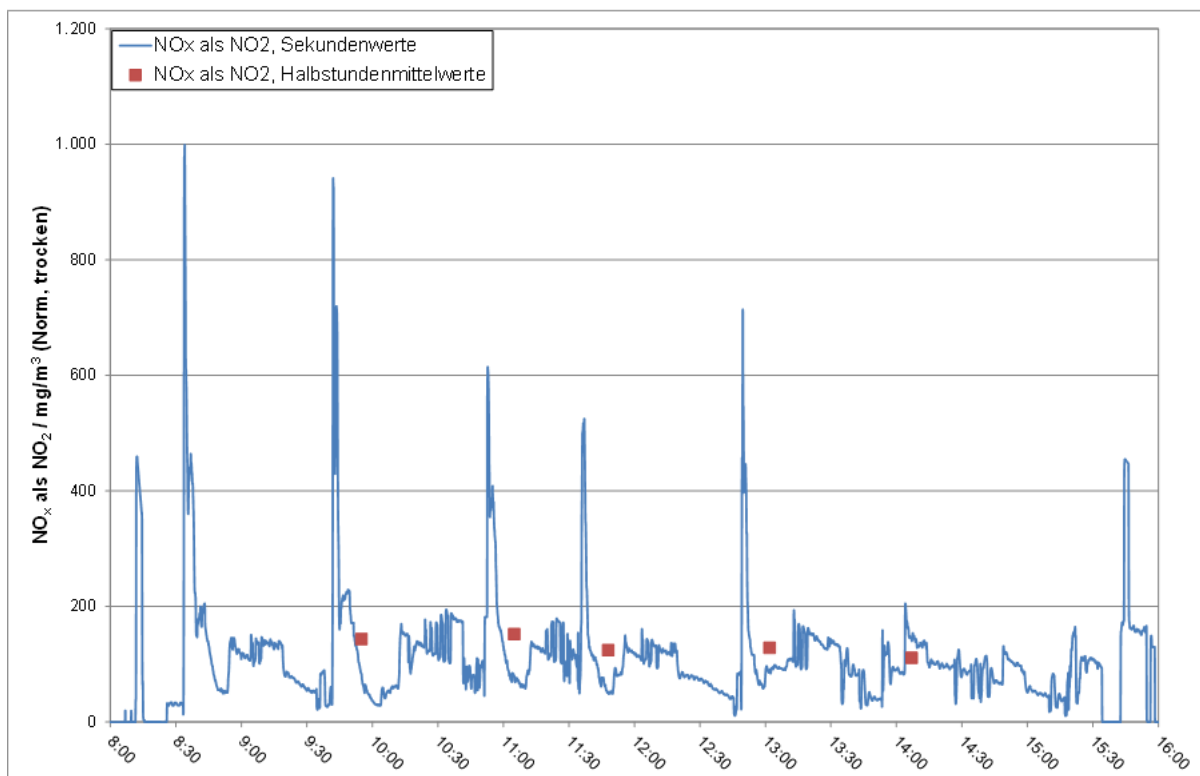
Die kontinuierliche Stickstoffoxidsmessung zeigt den erwarteten zeitlichen Verlauf von NO<sub>x</sub>, angegeben als NO<sub>2</sub> und bezogen auf 11 % O<sub>2</sub> (Abbildung 18). So zeigt sich, dass nach Beginn der Kremation bei jeder Charge eine mehr oder minder ausgeprägte NO<sub>x</sub>-Spitze festzustellen ist. Wie in Abschnitt 3.6. ausgeführt, sind sie nach heutigem Stand des Wissens auf die Bildungsmechanismen aus Brennstoff-NO<sub>x</sub> und thermischen NO<sub>x</sub> zurückzuführen. Aussagen über den Anteil beider Mechanismen lassen sich aus den Messungen nicht ableiten. Die aus der kontinuierlichen Stickstoffoxidsmessung berechneten und auf 11 % bezogenen Halbstundenmittelwerte lagen zwischen 232 und 398 mg/Nm. Der emittierte NO<sub>x</sub>-Massenstrom lag demnach im Bereich von 0,19 bis 0,40 kg/h und damit deutlich unter dem für die Anlage A festgelegten Grenzwert von 1,5 kg/h.

**Abbildung 17: Anlage A – Kontinuierliche Schwefeloxidmessung (13.2.2020)**



Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG - Messung im Rahmen dieses Vorhabens

**Abbildung 18: Anlage A – Kontinuierliche Stickstoffoxidmessung (13.2.2020)**



Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG - Messung im Rahmen dieses Vorhabens

## Chlor- und Fluorwasserstoff

Die gemessenen Chlorwasserstoffkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zwischen 43,4 und 77,7 mg/Nm<sup>3</sup>; die korrespondierenden emittierten Massenströme ergaben einen Bereich von 0,028 bis 0,070 kg/h. Damit werden die Vorgaben des Genehmigungsbescheides mit 0,15 kg/h sicher eingehalten. Die gemessenen Fluorwasserstoffkonzentrationen lagen, ebenfalls bezogen auf 11 % O<sub>2</sub> im Bereich von 0,22 und 0,28 mg/Nm<sup>3</sup>. Ein Grenzwert ist im Genehmigungsbescheid nicht vorgegeben. Die gemessenen HF-Konzentrationen liegen bei weniger als 1 % der gemessenen HCl-Konzentrationen und sind somit vernachlässigbar.

## Quecksilber

Die an Anlage A gemessenen Quecksilberkonzentrationen lagen in einem Bereich von 0,26 bis 1,4 µg/Nm<sup>3</sup>. Im Genehmigungsbescheid ist für Quecksilber kein Emissionsgrenzwert festgelegt. Die sehr geringen gemessenen Hg-Konzentrationen bestätigen den Umstand, dass Quecksilber infolge amalgamierter Zähne bei der Humankremation von Relevanz ist, bei Tierkrematorien jedoch vernachlässigt werden kann.

## Dioxine und Furane

Die ermittelten Abgaskonzentrationen für Dioxine und Furane liegen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, bei 0,065 ng-TE/Nm<sup>3</sup> und 0,025 ng-TE/Nm<sup>3</sup>. Die Massenströme ergaben sich zu 0,045 respektive 0,017 µg-TE/h. Verglichen mit dem im Genehmigungsbescheid festgesetzten Grenzwert von 0,25 µg/h ist ein ausreichender Sicherheitsabstand gegeben. Die Messwerte der Anlage A zeigen außerdem, dass durch sehr gute Verbrennungsbedingungen geeignete Voraussetzungen für ein günstiges PCDD/F-Potential geschaffen werden.

### 5.3.2 Anlage B

Die Messkampagne an der Anlage B fand am 07. und 08.10.2020 statt. Die Abgasmessungen einschließlich Probenahmen erfolgten an der vorhandenen behördlichen Emissionsmessstelle; zusätzlich wurde auf dem Dach eine normkonforme Messstelle für die Bestimmung der partikelförmige Schadstoffe genutzt. Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb betrieben. Bei allen durchgeführten Kremationen handelte es sich um Einzelkremationen, die jeweils nacheinander durchgeführt wurden. Die Ofenbeladung variierte an beiden Messtagen deutlich. In den Tabellen 16 bis 18 sind die Ergebnisse der Messkampagne zusammengestellt.

**Tabelle 16: Krematorium B - 1. Messtag (7.10.2020)**

| Messung                           | 1             | 2                 | 3                 | 4                 | 5             | 6             | 7             | 8             |
|-----------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Uhrzeit                           | 08:43 - 09:13 | 09:50 - 10:20     | 10:20 - 10:50     | 11:05 - 11:35     | 11:45 - 12:15 | 13:10 - 13:40 | 14:26 - 14:56 | 15:33 - 16:03 |
| Tierkörper (Anzahl/ Gewicht [kg]) | 2/30,9        | 1/6               | 1/33,3            | 2/7,6             | 2/46,3        | 2/10,4        | 2/39,7        | 1/15,4        |
| Abgastemperatur [°C]              | -             | 375 <sup>4)</sup> | 329 <sup>4)</sup> | 345 <sup>4)</sup> | 290           | 314           | 368           | 351           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]    | 17,5          | 18,1              | 16,7              | 18,2              | 17,1          | 18,3          | 17,7          | 17,7          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]   | -             | -                 | -                 | -                 | 1680          | 1350          | 1440          | 1190          |

| Messung                                                                   | 1   | 2   | 3   | 4               | 5               | 6               | 7 | 8 |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---|---|
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 0,2 | 0,7 | 0,1 | 0,7             | 0,6             | 0,4             | - | - |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 4,0 | 4,4 | 3,4 | - <sup>3)</sup> | 4,4             | 5,1             | - | - |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -   | -   | -   | -               | 67,5            | 84,4            | - | - |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 282 | 55  | 297 | 77              | 357             | 47              | - | - |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -   | -   | -   | -               | 411             | 87,2            | - | - |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 107 | 202 | 156 | 151             | 134             | 250             | - | - |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | -   | -   | -   | -               | 44,7            | 99,6            | - | - |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -   | -   | -   | -               | 0,39            | 0,58            | - | - |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -   | -   | -   | -               | - <sup>5)</sup> | - <sup>5)</sup> | - | - |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> Sintermetallfilter verstopft; <sup>4)</sup> Temperaturmessung erfolgte auf Ebene der PCDD/F-Probenahme; <sup>5)</sup> Messung wurde verworfen, da die Messapparatur vorkontaminiert war.

**Tabelle 17: Krematorium B - 2. Messtag (8.10.2020)**

| Messung                                                                   | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Uhrzeit                                                                   | 08:57 - 09:27 | 10:08 - 10:38 | 10:38 - 11:08 | 11:38 - 12:08 | 12:39 - 13:09 | 14:05 - 14:35 | 14:45 - 15:15 |
| Tierkörper (Anzahl/ Gewicht [kg])                                         | 1/39,8        | 1/7,3         | 1/43,1        | 1/39          | 1/28,8        | 1/18,6        | 1/17,4        |
| Abgastemperatur [°C]                                                      | 290           | 358           | 297           | 324           | 283           | 278           | -             |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 17,4          | 18,2          | 16,6          | 15,9          | 17,5          | 18,7          | -             |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | -             | -             | 1730          | 1740          | 1540          | 1600          | -             |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 0,1           | 0,4           | 0,1           | 4,4           | 0,1           | 0,1           | 0,3           |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 4,7           | 4,4           | 2,9           | 3,7           | 3,7           | 5,2           | 5,3           |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -             | -             | 101,2         | 101,2         | 92,8          | 72,0          | -             |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 350           | 122           | 521           | 458           | 312           | 170           | 284           |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -             | -             | 264           | 456           | 315           | 169           | -             |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 86            | 221           | 156           | 203           | 184           | 144           | 129           |

| Messung                                 | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6     | 7 |
|-----------------------------------------|---|---|------|------|------|-------|---|
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | - | - | 36,4 | 42,8 | 65,8 | 103,0 | - |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]  | - | - | 0,24 | 0,32 | 0,52 | 0,64  | - |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]  | - | - | 0,5  | 0,35 | 0,54 | 1,3   | - |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> Temperaturmessung Ebene der PCDD/F-Probenahme.

**Tabelle 18: Krematorium B – PCDD/F-Messungen (7./8.10.2020)**

| Messung                                          | 1             | 2             |
|--------------------------------------------------|---------------|---------------|
| Datum                                            | 7.10.2020     | 8.10.2020     |
| Uhrzeit                                          | 09:50 - 15:50 | 08:56 - 15:01 |
| Tierkörper (Anzahl/Gewicht [kg])                 | 11/158,7      | 7/194         |
| Abgastemperatur [°C]                             | 352           | 316           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                   | 17,9          | 18,1          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h] <sup>3)</sup>    | 1420          | 1650          |
| PCDD/F <sup>1)2)</sup> [ng TEQ/Nm <sup>3</sup> ] | 0,011         | 0,010         |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> Angaben in Toxizitätsäquivalent gemäß Nato-CCMS; <sup>3)</sup> Mittelwert ermittelt aus den gemessenen Volumenströmen während der Staubmessung.

Die Abgase der Anlage B passieren nach dem Ofen zur Einhaltung der geforderten Temperatur-Verweilzeitbedingungen (850 °C / 2 s) eine ausreichend dimensionierte Abgasnachverbrennungsstrecke. Im Anschluss daran werden sie über ein Saugzuggebläse und die Kaminanlage in die Atmosphäre abgeleitet. Die Temperatur an der Emissionsmessstelle für die Staubmessung variierte während der Messungen zwischen 290 und etwa 370 °C. Der Abgasvolumenstrom lag im Bereich von etwa 1190 bis 1740 Nm<sup>3</sup>/h bei Sauerstoffgehalten zwischen 15,9 und 18,7 Vol. % O<sub>2</sub>.

### Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

An beiden Messtagen lagen die gemessenen und auf 11 % normierten CO-Konzentrationen mit 0,1 bis 4,4 mg/Nm<sup>3</sup> an der Emissionsmessstelle mit deutlichem Sicherheitsabstand unter dem Grenzwert von 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Gleiches war für Gesamtkohlenstoff mit 2,9 bis 5,3 mg/Nm<sup>3</sup> im Vergleich zum Grenzwert des Genehmigungsbescheids von 20 mg/Nm<sup>3</sup> festzustellen. Die verbrennungstechnischen Eigenschaften des Kremationsofens mit nachgeschalteter Abgasnachverbrennung sind demnach als sehr gut zu bewerten und erfüllen den Stand der Technik mit deutlichem Sicherheitsabstand.

### Staubgehalt

Der Staubgehalt im Abgas lag, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zwischen 50,5 und 101,2 mg/Nm<sup>3</sup>. Gemäß Genehmigungsbescheid dürfen die Emissionen von Gesamtstaub, einschließlich Feinstaub, die Massenkonzentration von 30 mg/Nm<sup>3</sup> nicht überschreiten. Angesichts des Umstands, dass die

Anlage über keine Filtertechnik verfügt, sind die gemessenen Staubgehalte als niedrig einzustufen. Vor diesem Hintergrund sollte der im Genehmigungsbescheid festgelegte Grenzwert für die Staubemission einer Überprüfung unterzogen werden, zumal mit weniger als 0,1 kg/h die Massenstrombegrenzung der aktuell geltenden TA-Luft von 0,2 kg/h unterschritten wird.

### **Schwefeloxide**

Sehr prägnant zeigt sich die Auswirkung der Ofenbeladung auf die  $\text{SO}_x$ -Konzentration im Abgas; siehe hierzu insbesondere die Messungen 1 bis 6 am 7.10.2020 (Tabelle 16). Die aus den kontinuierlichen Messungen bestimmten Halbstundenmittelwerte lagen im Mittel bei 256  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  (47 bis 521  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ). Die parallel hierzu durchgeführte Probenahme mit anschließender Analyse gemäß DIN EN 14791 lieferte bei den Proben 4 bis 6 eine sehr gute Übereinstimmung mit der kontinuierlichen Messung. Dagegen waren bei den Beprobungen 1 bis 3 erhebliche Abweichungen festzustellen. Da sich in einer Nachanalyse die Ergebnisse bestätigt haben, verbleibt als eine mögliche Erklärung lediglich der Umstand, dass sich bei diesen Beprobungen die Filter immer wieder zusetzten. Im Genehmigungsbescheid ist kein Grenzwert für  $\text{SO}_x$  enthalten; die ermittelten Massenströme liegen mit max. 0,41 kg/h deutlich unter dem Grenzwert der aktuell geltenden TA Luft.

### **Stickstoffoxide**

Die kontinuierliche Stickstoffoxidmessung zeigt keine Auffälligkeiten gegenüber anderen Anlagen. Die aus der kontinuierlichen Stickstoffoxidmessung berechneten Halbstundenmittelwerte für  $\text{NO}_2$  lagen bei 163  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  (86 bis 250  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ). Die so festgestellten  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Abgas entsprechen der erwarteten Bandbreite. Auch für  $\text{NO}_x$  enthält der Genehmigungsbescheid keinen Grenzwert; die ermittelten Massenströme liegen mit max. 0,18 kg/h um mehr als den Faktor 10 unter dem Grenzwert der TA Luft.

### **Chlor- und Fluorwasserstoff**

Die gemessenen Chlorwasserstoffkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 %  $\text{O}_2$ , zwischen 36,4 und 103,0  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ . Die HCl-Konzentrationen sind für Anlagen ohne Abgasreinigung nicht ungewöhnlich. Ebenfalls bezogen auf 11 %  $\text{O}_2$  lagen die gemessenen Fluorwasserstoffkonzentrationen von 0,24 bis 0,64  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ , also in der Größenordnung von weniger als 3 % der HCl-Konzentration. Der Genehmigungsbescheid enthält keine Emissionsvorgaben für HCl und HF; die Massenstrombegrenzung gemäß TA Luft wird für HCl und HF deutlich unterschritten.

### **Quecksilber**

Die an Anlage B gemessenen Quecksilberkonzentrationen lagen in einem Bereich von 0,5 bis 1,3  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Im Genehmigungsbescheid ist für Quecksilber kein Emissionsgrenzwert festgelegt. Die Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den festgestellten Größenordnungen in anderen Anlagen.

### **Dioxine und Furane**

Die ermittelten Abgaskonzentrationen für Dioxine und Furane liegen, bezogen auf 11 %  $\text{O}_2$ , bei 0,011  $\text{ng-TE}/\text{Nm}^3$  und 0,010  $\text{ng-TE}/\text{Nm}^3$ . Im Genehmigungsbescheid ist kein Grenzwert vorgegeben. Die Messwerte halten dennoch die TA-Luft mit ausreichendem Sicherheitsabstand ein und belegen, dass die Anlage B durch sehr gute Verbrennungsbedingungen geeignete Voraussetzungen für ein günstiges PCDD/F-Potential bietet.

### 5.3.3 Anlage C

Die Messkampagne an der Anlage C fand in der Zeit vom 24.03. bis 26.03.2020 statt. Die Abgasmessungen einschließlich Probenahmen erfolgten an der vorhandenen behördlichen Emissionsmessstelle. Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb betrieben. Vor Beginn der jeweiligen täglichen Messkampagne wurden Kremationen durchgeführt, so dass sich der Kremationsofen im Betriebsmodus befand. Bei allen durchgeführten Kremationen handelte es sich um Einzelkremationen, wobei pro Charge stets ein Tierkörper aufgegeben wurde. Damit ist eine zweifelsfreie Zuordnung der Aschen gegeben. Die Messkampagne teilte sich in 3 Messtage auf, wobei am Vormittag des ersten Messtages noch der Aufbau der Messeinrichtung erfolgte. In den Tabellen 19 bis 22 sind die Ergebnisse der Messkampagne zusammengestellt.

**Tabelle 19: Krematorium C - 1. Messtag (24.3.2020)**

| Messung                                                                   | 1             | 2                | 3             | 4             |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|---------------|---------------|
| Uhrzeit                                                                   | 13:07 - 13:37 | 13:48 - 14:18    | 15:10 - 15:40 | 16:05 - 16:35 |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                      | 1/6,8         | 1/20,4<br>haarig | 1/14,9        | 1/5,8         |
| Abgastemperatur [°C]                                                      | 405           | 412              | 432           | 444           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 15,0          | 15,0             | 15,3          | 15,5          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | 720           | 900              | 610           | 680           |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 2,9           | 2,9              | 1,5           | 1,3           |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 1,4           | 1,6              | 1,2           | 1,5           |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -             | 70,1             | 62,0          | 36,2          |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 39            | 281              | 89            | 45            |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -             | 200,2            | 83,5          | 56,9          |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 260           | 275              | 262           | 254           |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | -             | 53,7             | 47,9          | 27,7          |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -             | 0,26             | 0,29          | 1,25          |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -             | - <sup>3)</sup>  | 0,39          | 0,90          |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> Messwert als unplausibel verworfen.

**Tabelle 20: Krematorium C - 2. Messtag (25.3.2020)**

| Messung | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                | 8                |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Uhrzeit | 08:37 -<br>09:07 | 09:36 -<br>10:06 | 10:48 -<br>11:18 | 11:22 -<br>11:52 | 12:14 -<br>12:44 | 13:00 -<br>13:30 | 14:01 -<br>14:31 | 14:34 -<br>15:04 |

| Messung                                                                      | 1               | 2                    | 3                   | 4                   | 5                    | 6      | 7               | 8      |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------|-----------------|--------|
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                         | 1/8,5<br>haarig | 1/20,0<br>langhaarig | 1/4,4<br>langhaarig | 1/8,6<br>langhaarig | 1/11,2<br>langhaarig | 1/10,0 | 1/5,0<br>haarig | 1/18,5 |
| Abgastemperatur [°C]                                                         | 430             | 400                  | 422                 | 429                 | 438                  | 449    | 454             | 449    |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                               | 13,6            | 15,0                 | 15,7                | 15,7                | 15,8                 | 16,2   | 16,1            | 15,6   |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                              | 790             | 810                  | 880                 | 840                 | 830                  | 850    | 820             | 820    |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                     | 1,5             | 1,6                  | 1,8                 | 2,5                 | 3,5                  | 2,2    | 1,3             | 1,9    |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 1,5             | 2,7                  | 2,9                 | 2,8                 | 2,4                  | 2,6    | 2,3             | 2,5    |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -               | -                    | 36,3                | -                   | 77,5                 | -      | 50,5            | -      |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 19              | 82                   | 23                  | 99                  | 144                  | 89     | 65              | 205    |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -               | -                    | 30                  | -                   | 151,9                | 82,2   | -               | -      |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 238             | 208                  | 264                 | 279                 | 260                  | 219    | 293             | 276    |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                      | -               | -                    | 27,2                | -                   | 50,7                 | 57,6   | -               | -      |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                       | -               | -                    | 0,31                | -                   | 0,32                 | 0,33   | -               | -      |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                       | -               | -                    | 0,36                | -                   | 0,27                 | -      | 0,43            | -      |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen.

**Tabelle 21: Krematorium C - 3. Messtag (26.3.2020)**

| Messung                                           | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                   | 8                   | 9                |
|---------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| Uhrzeit                                           | 08:19 -<br>09:49 | 09:11 -<br>09:41 | 09:54 -<br>10:24 | 10:23 -<br>10:53 | 11:34 -<br>12:04 | 12:09 -<br>12:39 | 12:55 -<br>13:25    | 13:38 -<br>14:08    | 14:11 -<br>14:41 |
| Tierkörper<br>(Anzahl/Gewicht<br>[kg])            | 1/11,1<br>haarig | 1/4,0<br>haarig  | 1/2,9<br>haarig  | 1/19,0           | 1/7,1            | 1/8,0            | 1/5,0<br>langhaarig | 1/2,4<br>langhaarig | 1/4,8<br>haarig  |
| Abgastemperatur<br>[°C]                           | 430              | 423              | 436              | 431              | 450              | 462              | 467                 | 476                 | 481              |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                    | 14,8             | 15,3             | 16,0             | 15,5             | 15,8             | 16,0             | 16,1                | 16,1                | 16,3             |
| Abgasmenge<br>[Nm <sup>3</sup> /h]                | 940              | 810              | 890              | 860              | 810              | 760              | 660                 | 710                 | 740              |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]          | 2,3              | 1,5              | 1,8              | 2,1              | 1,5              | 1,4              | 1,2                 | 2,1                 | 2,3              |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 4,0              | 2,1              | 2,9              | 2,4              | 2,5              | 2,5              | 2,4                 | 4,0                 | 4,0              |

| Messung                                                                      | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 69  | 65  | 28  | 174 | 89  | 89  | 49  | 45  | 69  |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 238 | 253 | 229 | 207 | 265 | 295 | 336 | 257 | 238 |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen.

**Tabelle 22: Krematorium C – PCDD/F-Messungen (25./26.3.2020)**

| Messung                                          | 1             | 2             |
|--------------------------------------------------|---------------|---------------|
| Datum                                            | 25.3.2020     | 26.3.2020     |
| Uhrzeit                                          | 09:36 - 15:36 | 09:11 - 15:11 |
| Tierkörper (Anzahl/Gewicht [kg])                 | 8/82,7        | 9/59,3        |
| Abgastemperatur [°C]                             | 434           | 454           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                   | 15,7          | 16,0          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                  | 830           | 740           |
| PCDD/F <sup>1)2)</sup> [ng TEQ/Nm <sup>3</sup> ] | 0,033         | 0,030         |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> Angaben in Toxizitätsäquivalent gemäß Nato-CCMS.

Die Abgase der Anlage C durchströmen nach dem Ofen eine ausreichend dimensionierte Abgasnachverbrennung, in der die geforderten Nachverbrennungsbedingungen von 850 °C und 2 s einzuhalten sind. Im Anschluss daran werden sie über einen etwa 9 m langen Abgasfuchs und die Kaminanlage in die Atmosphäre abgeleitet. Die Temperatur an der Messstelle in der Kaminanlage lag während der Messungen zwischen 400 °C und etwa 480 °C. Der Abgasvolumenstrom lag im Bereich von etwa 600 bis 950 Nm<sup>3</sup>/h bei Sauerstoffgehalten zwischen 13,6 und 16,2 Vol. % O<sub>2</sub>. Der vergleichsweise geringe Abgasvolumenstrom korrespondiert mit den geringen Tierkörpergewichten, die pro Charge (2,4 bis 20,4 kg) aufgegeben wurden.

### Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

An den Messtagen lagen die gemessenen und auf 11 % normierten CO-Konzentrationen mit 1,3 bis 3,5 mg/Nm<sup>3</sup> im Kamin mit deutlichem Sicherheitsabstand unter dem Grenzwert von 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Gleiches war für Gesamtkohlenstoff mit 1,2 bis 4,0 mg/Nm<sup>3</sup> im Vergleich zum Grenzwert von ebenfalls 50 mg/Nm<sup>3</sup> festzustellen. Die verbrennungstechnischen Eigenschaften des Krematoriumsofens mit nachgeschalteter Abgasnachverbrennung sind demnach als sehr gut einzustufen und erfüllen den Stand der Technik mit deutlichem Sicherheitsabstand.

### Staubgehalt

Der Staubgehalt im Abgas lag, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zwischen 36,2 und 77,5 mg/Nm<sup>3</sup>. Gemäß Genehmigungsbescheid dürfen die Emissionen von Gesamtstaub, einschließlich Feinstaub, die Massenkonzentration von 50 mg/Nm<sup>3</sup> nicht überschreiten. Angesichts des Umstands, dass die Anlage über keine Filtertechnik verfügt, sind die gemessenen Staubgehalte als niedrig

einzustufen. Vor diesem Hintergrund sollte der im Genehmigungsbescheid festgelegte Grenzwert für die Staubemission einer Überprüfung unterzogen werden, zumal mit weniger als 0,1 kg/h die Massenstrombegrenzung der aktuell geltenden TA-Luft von 0,2 kg/h unterschritten wird.

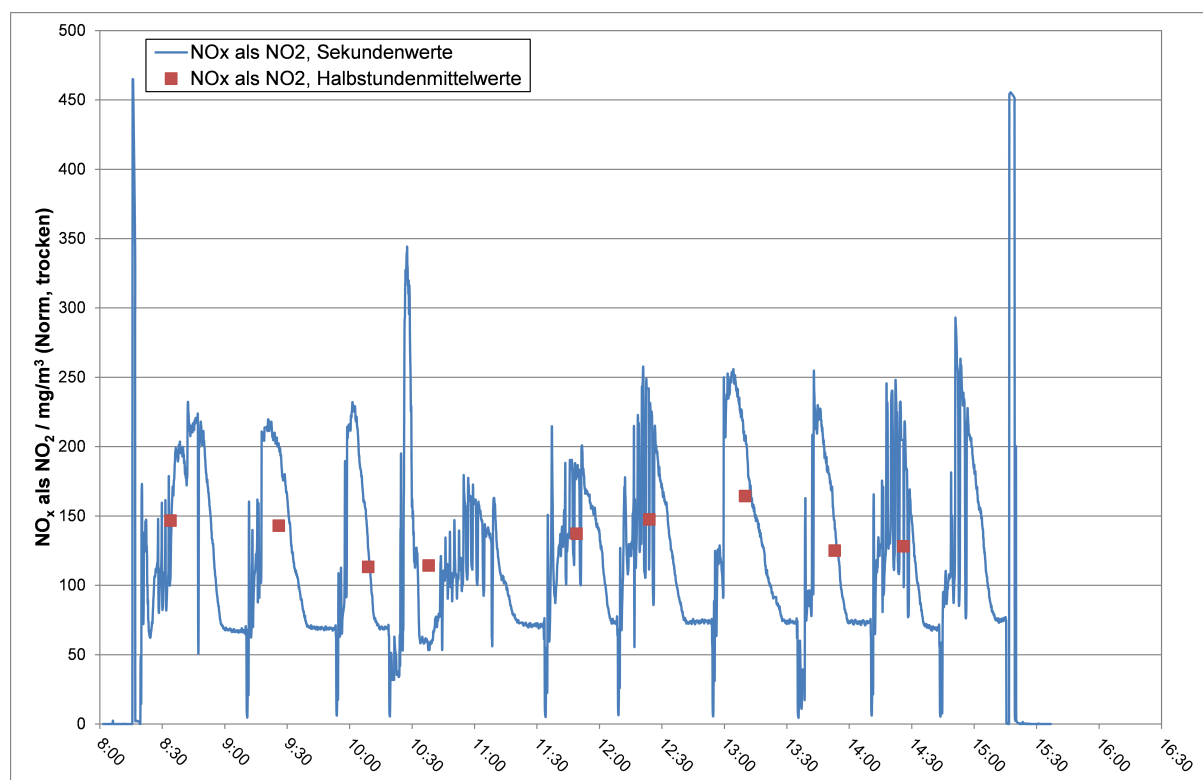
### Schwefeloxide

Auch bei dieser Messkampagne waren zu Beginn jeder Kremation  $\text{SO}_x$ -Spitzen festzustellen, die jedoch insgesamt geringer ausgefallen sind als bei anderen Messkampagnen. Dies lässt sich mit den geringen Kremierungsgewichten erklären, d. h. die über die Tierkörper eingetragene geringe Schwefelmenge verteilte sich auf eine vergleichsweise große Abgasmenge. Die aus den kontinuierlichen Messungen bestimmten Halbstundenmittelwerte lagen im Mittel bei 88  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  (19 bis 281  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ). Die parallel hierzu durchgeführte Probenahme mit anschließender Analyse gemäß DIN EN 14791 lieferte eine gute Übereinstimmung mit der kontinuierlichen Messung.

### Stickstoffoxide

Die kontinuierliche Stickoxidmessung zeigt den erwarteten zeitlichen Verlauf von  $\text{NO}_x$ , angegeben als  $\text{NO}_2$  und bezogen auf 11 %  $\text{O}_2$  (Abbildung 19). Demnach ist nach Beginn der Kremation bei jeder Kremation eine mehr oder minder ausgeprägte  $\text{NO}_x$ -Spitze festzustellen. Die aus der kontinuierlichen Stickoxidmessung berechneten Halbstundenmittelwerte für  $\text{NO}_2$  lagen bei 257  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  (208 bis 336  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ). Die so festgestellten  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Abgas entsprechen der erwarteten Bandbreite.

**Abbildung 19: Anlage C – Kontinuierliche Stickstoffoxidmessung (26.3.2020)**



Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG - Messung im Rahmen dieses Vorhabens

### **Chlor- und Fluorwasserstoff**

Die gemessenen Chlorwasserstoffkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zwischen 27,2 und 57,6 mg/Nm<sup>3</sup>. Bei den Fluorwasserstoffkonzentrationen wurden, ebenfalls bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, Abgaskonzentrationen im Bereich von 0,26 und 0,33 mg/Nm<sup>3</sup> mit einem Einzelwert von 1,25 mg/Nm<sup>3</sup> festgestellt. Die gemessenen HF-Konzentrationen liegen, von dem Einzelwert abgesehen, im Bereich von weniger als 1 % der gemessenen HCl-Konzentrationen und sind somit vernachlässigbar.

### **Quecksilber**

Die an Anlage C gemessenen Quecksilberkonzentrationen lagen in einem Bereich von 0,27 bis 0,90 µg/Nm<sup>3</sup>. Die sehr niedrigen Hg-Emissionskonzentrationen decken sich mit den Messungen im Abgas anderer Tierkrematorien.

### **Dioxine und Furane**

Die ermittelten Abgaskonzentrationen für die Dioxine und Furane ergaben sich, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zu 0,033 ng-TE/Nm<sup>3</sup> und 0,030 ng-TE/Nm<sup>3</sup>. Verglichen mit dem im Genehmigungsbescheid festgesetzten Grenzwert von 0,12 ng-TE/Nm<sup>3</sup> ist ein ausreichender Sicherheitsabstand gegeben. Die Messwerte der Anlage C bestätigen außerdem, dass durch sehr gute Verbrennungsbedingungen geeignete Voraussetzungen für ein günstiges PCDD/F-Potential geschaffen werden.

#### **5.3.4 Anlage D**

Die Messungen an der Anlage D wurden in der Zeit vom 26. bis 28.5.2020 durchgeführt. In dieser Anlage stellt der Kremationsofen insofern eine Besonderheit dar, als dass er aus zwei Kremierungskammern besteht, die parallel betrieben und unterschiedlich beschickt werden können. Die Abgase aus beiden Kremierungskammern werden gemeinsam über die vorgeschriebene Nachverbrennungsstrecke geführt und der gemeinsamen Abgasreinigung zugeleitet. Daher ist es möglich, Einzelkremationen und Sammelkremationen parallel durchzuführen. In Abstimmung mit dem Betreiber der Anlage wurde die Messkampagne mit unterschiedlichen Modi betrieben. Bei den Einzelkremationen wurden die Tierkörper nacheinander aufgegeben.

##### **a) 1. Messtag (26.5.2020) und 3. Messtag (28.5.2020)**

Am ersten und dritten Messtag wurden beide Kremierungskammern ausschließlich zur Einzelkremation genutzt, wobei sich der stündliche Leistungsbereich an dem Genehmigungswert von 50 kg/h orientierte. Bedingt durch den Ausfall einer Messsonde musste der ursprünglich auf den ersten Messtag beschränkte Betriebsmodus am dritten Messtag komplettiert werden. Die Gewichte der kremierten Tiere variierten während der Messungen an beiden Messtagen zwischen 2,4 kg und 48,6 kg. Die Messergebnisse sind in den Tabellen 23 und 24 für das Rohgas sowie in den Tabellen 25 und 26 für das Reingas zusammengefasst. Die im Reingas am 26.5. und 27.5.2020 gemessenen PCDD/F-Konzentrationen sind in Tabelle 29 angegeben.

**Tabelle 23: Krematorium D - 1. Messtag (26.5.2020) - Rohgas**

| Messung                                                                   | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Uhrzeit                                                                   | 09:55 - 10:25 | 10:56 - 11:26 | 11:56 - 12:26 | 12:54 - 13:24 | 13:54 - 14:24 | 14:53 - 15:23 | 15:54 - 16:24 |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                      | 4/52,1        | 4/45,2        | 2/54,0        | 2/53,6        | 3/55,7        | 2/52,8        | 2/52,8        |
| Abgastemperatur [°C]                                                      | 128           | 128           | 128           | 128           | 128           | 128           | 128           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 12,1          | 12,5          | 13,4          | 12,3          | 12,5          | 13,3          | 13,7          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | 1400          | 1300          | 1300          | 1200          | 1300          | 1300          | 1300          |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 3,7           | 2,6           | 2,1           | 2,1           | 12,6          | 8,3           | 3,5           |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 0,4           | 0,3           | 0,4           | 0,2           | 0,5           | 0,6           | 0,5           |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 33,0          |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 220           | 191           | 146           | 184           | 302           | 269           | 260           |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 38,6          |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 289           | 258           | 358           | 219           | 248           | 228           | 279           |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 15,9          |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 0,30          |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 1,5           |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen.

**Tabelle 24: Krematorium D - 3. Messtag (28.5.2020) - Rohgas**

| Messung                                                                   | 8             | 9                  | 10            |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------|---------------|
| Uhrzeit                                                                   | 08:44 - 09:14 | 09:45 - 10:15      | 10:44 - 11:14 |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                      | 2/57,5        | 2/52,3             | 2/47,8        |
| Abgastemperatur [°C]                                                      | 129           | -                  | 130           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 14,1          | 10,6               | 13,9          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | 1700          | 1200               | 1700          |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 2,2           | 26,1 <sup>3)</sup> | 2,2           |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 2,0           | 4,0 <sup>3)</sup>  | 1,8           |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | 60,2          | -                  | 56,0          |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 302           | 379 <sup>3)</sup>  | 196           |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | 153,7         | -                  | 91,2          |

| Messung                                                                   | 8    | 9   | 10   |
|---------------------------------------------------------------------------|------|-----|------|
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 347  | 146 | 409  |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | 67,1 | -   | 45,0 |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | 0,40 | -   | 0,47 |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | 0,50 | -   | 0,45 |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> Gerätemessbereich zeitweise überschritten.

**Tabelle 25: Krematorium D - 1. Messtag (26.5.2020) - Reingas**

| Messung                                                                   | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Uhrzeit                                                                   | 09:55 - 10:25 | 10:56 - 11:26 | 11:56 - 12:26 | 12:54 - 13:24 | 13:54 - 14:24 | 14:53 - 15:23 | 15:54 - 16:24 |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                      | 4/52,1        | 4/45,2        | 2/54,0        | 2/53,6        | 3/55,7        | 2/52,8        | 2/52,8        |
| Abgastemperatur [°C]                                                      | 111           | 110           | 110           | 110           | 109           | 110           | 110           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 13,2          | 13,6          | 14,2          | 13,3          | 13,5          | 14,2          | 14,5          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | 1400          | 1300          | 1300          | 1200          | 1300          | 1300          | 1300          |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 5,8           | 6,8           | 5,5           | 4,6           | 13,7          | 9,8           | 4,6           |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 1,0           | 0,8           | 0,9           | 0,7           | 0,9           | 1,0           | 0,9           |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 2,1           |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 76            | 61            | 30            | 47            | 150           | 107           | 128           |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 185,9         |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 282           | 249           | 345           | 211           | 246           | 219           | 270           |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 7,5           |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -             | -             | -             | -             | -             | -             | <0,13         |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 2,9           |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen.

**Tabelle 26: Krematorium D - 3. Messtag (28.5.2020) - Reingas**

| Messung                              | 8             | 9             | 10            |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Uhrzeit                              | 08:44 - 09:14 | 09:45 - 10:15 | 10:44 - 11:14 |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg]) | 2/57,5        | 2/52,3        | 2/47,8        |
| Abgastemperatur [°C]                 | 105           | 105           | 105           |

| Messung                                                                   | 8     | 9                  | 10    |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------|-------|
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 15,2  | 12,1               | 15,5  |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | 1700  | 1200               | 1700  |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 1,4   | 14,8 <sup>3)</sup> | 1,1   |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 1,8   | 2,5 <sup>3)</sup>  | 1,3   |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | 3,0   | -                  | 2,0   |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 302   | 379 <sup>3)</sup>  | 196   |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | 171,4 | -                  | 91,4  |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 367   | 161                | 435   |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | 4,5   | -                  | 3,8   |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | <0,15 | -                  | <0,12 |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | 0,43  | -                  | 0,48  |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> Gerätemessbereich zeitweise überschritten.

Die gemessene Abgasmenge lag in diesem Betriebsmodus im Bereich von 1200 bis 1700 Nm<sup>3</sup>/h. Die zeitgleich als Halbstundenmittelwerte gemessenen Sauerstoffkonzentrationen streuten im Rohgas zwischen 10,6 und 14,1 % respektive im Reingas zwischen 12,1 und 15,5 %. Sie sind daher mit den an anderen Anlagen gemessenen Größenordnungen vergleichbar. Die Temperaturdifferenz zwischen Eintritt in die Abgasreinigung (ca. 128/130 °C) und der Emissionsmessstelle (ca. 105/110 °C) entspricht ebenfalls dem erwarteten Abkühlverhalten in den Komponenten der Abgasreinigung.

### Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

Abgesehen von Messung 9, lagen die auf 11 % normierten CO-Konzentrationen sowohl im Rohgas, wie im Reingas bei weniger als 25 % des zulässigen CO-Grenzwertes, der gemäß Genehmigungsbescheid 50 mg/Nm<sup>3</sup> nicht überschreiten darf. Ein noch günstigeres Emissionsniveau konnte für Gesamtkohlenstoff festgestellt werden, das im Rohgas zwischen 0,2 und 4,0 mg/Nm<sup>3</sup> variierte und mit Reingaskonzentrationen im Bereich von 0,7 bis 2,5 mg/Nm<sup>3</sup> signifikant unter dem im Genehmigungsbescheid festgelegten Grenzwert von 50 mg/Nm<sup>3</sup> liegt. Lediglich bei der Messung 9 wurden leicht erhöhte Halbstundenmittelwerte bei CO und z. T. bei Gesamt-C festgestellt, die jedoch keine Rückschlüsse auf eine Fehlfunktion der Anlage (z. B. Prozesssteuerung) zulassen. Die verbrennungstechnischen Eigenschaften des Kremationsofens mit nachgeschalteter Abgasnachverbrennung sind demnach für diesen Betriebsmodus als sehr gut zu bewerten und erfüllen den Stand der Technik mit deutlichem Sicherheitsabstand.

### Staubgehalt

Der Staubgehalt im Abgas vor der Abgasreinigung lag, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, in der Größenordnung von 30 bis 60 mg/Nm<sup>3</sup>. Nach der Abgasreinigung ergaben sich Staubgehalte von 2 bis 3 mg/Nm<sup>3</sup> die den im Genehmigungsbescheid festgelegten Grenzwert von 20 mg/Nm<sup>3</sup> mit deutlichem Sicherheitsabstand unterschreiten.

## Schwefeloxide

Die Konzentrationen der kontinuierlichen Schwefeloxidmessung im Rohgas zeigte bei den Halbstundenmittelwerten eine Bandbreite von 146 bis 379 mg/Nm<sup>3</sup>, wobei der Gerätemessbereich teilweise kurzzeitig überschritten wurde (Messung 9). Im Reingas lagen die detektierten Halbstundenmittelwerte, jeweils ebenfalls auf 11 % O<sub>2</sub> bezogen, im Bereich von 30 bis 215 mg/Nm<sup>3</sup>. Die Abscheideleistung lag etwa im Bereich von 40 bis 80 %. Bei nahezu allen parallel durchgeführten Probenahmen mit anschließender Analyse gemäß DIN EN 14791 wurden für SO<sub>x</sub> erhebliche Abweichungen festgestellt, für die es keine Erklärung gibt. Verglichen mit den Anforderungen des Genehmigungsbescheides, wonach die Reingasemission von SO<sub>x</sub>, angegeben als SO<sub>2</sub>, die Konzentration von 0,35 g/Nm<sup>3</sup> nicht überschreiten darf, sind durch die installierte Abgasreinigungstechnik die Grenzwerte in diesem Betriebsmodus mit ausreichendem Sicherheitsabstand eingehalten.

## Stickstoffoxide

Die gemessenen Stickstoffoxiddkonzentrationen als Halbstundenmittelwerte, angegeben als NO<sub>2</sub> und bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, liegen rohgasseitig im Bereich von 161 und 435 mg/Nm<sup>3</sup> und zeigen keine Auffälligkeiten. Im Reingas wurden Konzentrationen zwischen 146 und 409 mg/Nm<sup>3</sup> festgestellt. Der maximal über das Reingas emittierte NO<sub>x</sub>-Massenstrom lag bei 0,38 kg/h. Die Unterschiede zwischen den Roh- und Reingasmessungen liegen im Bereich der Messunsicherheit und sind damit vernachlässigbar. Gemäß Genehmigungsbescheid darf die Stickoxidemission 350 mg/Nm<sup>3</sup> oder als Massenstrom 1,8 kg/h nicht überschreiten. Der ermittelte, maximale Massenstrom von 0,38 kg/h unterschreitet den vorgegebenen Grenzwert deutlich. Im Übrigen entspricht das festgestellte NO<sub>x</sub>-Emissionspotential dem erwarteten Bereich ohne DeNO<sub>x</sub>-Anlagen.

## Chlor- und Fluorwasserstoff

Die gemessenen Chlorwasserstoffkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zwischen 15,9 und 67,1 mg/Nm<sup>3</sup> im Rohgas, respektive zwischen 3,8 und 7,5 mg/Nm<sup>3</sup> im Reingas. Die im Rohgas festgestellte Größenordnung entspricht anderen Tierkrematorien. Durch die Abgasreinigung werden die HCl-Emissionen deutlich verringert. Die gemessenen Fluorwasserstoffkonzentrationen lagen im Roh- und Reingas bei weniger als 3 % der gemessenen HCl-Konzentrationen und sind somit vernachlässigbar. Die im Genehmigungsbescheid festgelegten Emissionsgrenzwerte für HCl (30 mg/Nm<sup>3</sup>) und HF (3 mg/Nm<sup>3</sup>) werden mit deutlichem Sicherheitsabstand unterschritten.

## Quecksilber

Die gemessenen Quecksilberkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, im Roh- und Reingas im Bereich von 0,43 bis 2,9 µg/Nm<sup>3</sup> und korrespondieren mit den üblichen Werten für Heimtierkrematorien. Im Genehmigungsbescheid ist für Quecksilber kein Emissionsgrenzwert festgeschrieben.

### b) 2. Messtag – 27.5.2020

Am zweiten Messtag wurden Einzel- als auch Sammelkremationen durchgeführt und dabei die Kremationsleistung auf bis zu etwa 180 kg/h erhöht. Die Messergebnisse sind in den Tabellen 27 und 28 zusammengefasst.

**Tabelle 27: Krematorium D - 2. Messtag (27.5.2020) - Rohgas**

| Messung                                                                   | 1                  | 2                  | 3             | 4                   | 5             | 6             |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------------|---------------|---------------|
| Uhrzeit                                                                   | 08:30 - 09:00      | 09:45 - 10:15      | 10:46 - 11:16 | 11:59 - 12:29       | 13:38 - 14:08 | 14:37 - 15:07 |
| Einzelkremation Tierkörper (Anzahl/Gewicht [kg])                          | 2/86,4             | 2/45,2             | 2/28,2        | 5/62,5              | 5/41,4        | 5/81,3        |
| Sammelkremation Tierkörper (Anzahl/Gewicht [kg])                          | 13/142,0           | 4/92,1             | 4/79,0        | k.A./97,3           | -             | -             |
| Abgastemperatur [°C]                                                      | 128                | 128                | 128           | 128                 | 128           | 127           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 8,7                | 10,4               | 10,8          | 8,6                 | 12,4          | 14,3          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | 1600               | 1200               | 1100          | 1400                | 1200          | 1100          |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 69,1 <sup>3)</sup> | 58,7 <sup>3)</sup> | 3,0           | 122,8 <sup>3)</sup> | 14,5          | 2,6           |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 11,4 <sup>3)</sup> | 2,7 <sup>3)</sup>  | 0,9           | 4,1 <sup>3)</sup>   | 3,3           | 1,3           |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -                  | 169,5              | -             | 95, 5               | 93,0          | -             |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 743 <sup>3)</sup>  | 282                | 394           | 514                 | 214           | 222           |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -                  | 184,4              | -             | 247,1               | 125,4         | -             |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 91                 | 172                | 235           | 122                 | 285           | 296           |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | -                  | 40,6               | -             | 39,8                | 44,6          | -             |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -                  | 0,52               | -             | 0,35                | 0,38          | -             |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -                  | 0,47               |               | 0,50                | 0,36          | -             |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> Gerätemessbereich zeitweise überschritten.

**Tabelle 28: Krematorium D - 2. Messtag (27.5.2020) - Reingas**

| Messung                                          | 1             | 2             | 3             | 4                   | 5             | 6             |
|--------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|---------------|
| Uhrzeit                                          | 08:30 - 09:00 | 09:45 - 10:15 | 10:46 - 11:16 | 11:59 - 12:29       | 13:38 - 14:08 | 14:37 - 15:07 |
| Einzelkremation Tierkörper (Anzahl/Gewicht [kg]) | 2/86,4        | 2/45,2        | 2/28,2        | 5/62,5              | 5/41,4        | 5/81,3        |
| Sammelkremation Tierkörper (Anzahl/Gewicht [kg]) | 13/142        | 4/92,1        | 4/79,0        | -/97,3              | -             | -             |
| Abgastemperatur [°C]                             | 111           | 111           | 110           | 110                 | 109           | 110           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                   | 9,9           | 11,2          | 12,1          | 10,6                | 13,7          | 15,3          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                  | 1600          | 1200          | 1100          | 1400                | 1200          | 1100          |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]         | 84,4          | 62,4          | 4,1           | 157,3 <sup>3)</sup> | 25,7          | 6,0           |

| Messung                                                                   | 1                  | 2                 | 3   | 4                 | 5     | 6   |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|-----|-------------------|-------|-----|
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 16,4 <sup>3)</sup> | 3,6 <sup>3)</sup> | 1,4 | 7,2 <sup>3)</sup> | 3,4   | 1,9 |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -                  | 1,9               | -   | 1,4               | 2,3   | -   |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 677 <sup>3)</sup>  | 134               | 211 | 347               | 116   | 114 |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -                  | 161,5             | -   | 433,7             | 171,2 | -   |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 93                 | 170               | 228 | 123               | 272   | 293 |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | -                  | 3,8               | -   | 6,1               | 5,6   | -   |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -                  | <0,09             | -   | <0,08             | <0,12 | -   |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -                  | 1,7               |     | 0,33              | 0,74  | -   |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> Gerätemessbereich zeitweise überschritten.

Obwohl der Ofen in diesem Betriebsmodus mit bis zum dreifachen des Einsatzgewichtes betrieben wurde lag die gemessene Abgasmenge lediglich im Bereich von 1100 bis 1600 Nm<sup>3</sup>/h. Die zeitgleich als Halbstundenmittelwerte gemessenen Sauerstoffkonzentrationen lagen im Rohgas bei 10,9 % (8,6 bis 14,3 %) und im Reingas bei 12,1 % (9,9 bis 15,3 %). Im Vergleich zum Betriebsmodus am ersten und dritten Messtag ist im Rohgas (im Mittel: 10,9 gegenüber 13,3 %) eine deutlich niedrigere O<sub>2</sub>-Konzentration festzustellen. Dies ist insofern von Relevanz, als dass zumindest partiell und temporär Sauerstoffmangelbedingungen nicht auszuschließen sind. Trotz der erhöhten Kremationsleistung lag die Rohgastemperatur auf gleichem Niveau wie bei dem Betriebsmodus a); dies ist ein Indiz dafür, dass der Abgaskühler über ausreichende Leistungsreserven verfügt.

### Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

Insbesondere zeigen die Messungen 1,2 und 4 deutliche CO-Grenzwertüberschreitungen, die auf die signifikant erhöhten Kremationsleistungen einerseits und auf die bei diesen Messungen geringen Sauerstoffgehalte andererseits zurückzuführen sind. Bei erhöhter Kremationsleistung sollte dem Verbrennungsprozess zwingend mehr Verbrennungsluft zur Verfügung gestellt werden. Auch wenn die festgestellten Gesamt-C-Konzentrationen den Grenzwert nicht überschreiten, so zeigen auch diese Werte ein erhöhtes Potenzial, das auf unzureichende Ausbrandbedingungen schließen lässt. Dies gilt umso mehr, dass bei 3 von 6 Halbstundenmittelwerten im Rohgas wie im Reingas zeitweise der Gerätemessbereich überschritten wurde.

### Staubgehalt

Der Staubgehalt im Abgas vor der Abgasreinigung ist gegenüber dem Betriebsmodus am ersten und dritten Messtag mit 93 bis 169,5 mg/Nm<sup>3</sup> etwa um den Faktor 3 erhöht. Unter Berücksichtigung der nahezu gleichen Abgasvolumenströme ist dieser Umstand plausibel. Die nach der Abgasreinigung im Reingas detektierten Staubkonzentrationen von weniger als 3 mg/Nm<sup>3</sup> belegen einerseits die hohe Leistungsfähigkeit des Gewebefilters und weisen gegenüber dem im Genehmigungsbescheid festgelegten Grenzwert von 20 mg/Nm<sup>3</sup> auch unter diesen Betriebsbedingungen einen deutlichen Sicherheitsabstand auf.

## Schwefeloxide

Mit Rohgaskonzentrationen der kontinuierlichen Schwefeldioxidmessung von durchschnittlich nahezu 400 mg/Nm<sup>3</sup> (214 bis 743 mg/Nm<sup>3</sup>) zeigt sich, dass sich die über die Tierkörper eingebrachte Schwefelfracht auf eine sehr geringe Abgasmenge (s. o.) verteilt. Die dadurch bedingten hohen Schwefeldioxid-konzentrationen führten zu regelmäßigen Überschreitungen des eingestellten Messbereichs im Roh- und Reingas zu Beginn der Messung, weshalb der Gerätemessbereich während der laufenden Messung erhöht werden musste. Auch die Halbstundenmittelwerte nach der Abgasreinigung liefern mit durchschnittlich 267 mg/Nm<sup>3</sup> (114 bis 677 mg/Nm<sup>3</sup>) noch vergleichsweise hohe Reingaswerte. Die mittlere Abscheideleistung der Abgasreinigung beträgt hierbei rund 33 %. Bei derartigen Betriebsweisen sollte daher der Additivumsatz bei der Abgasreinigung entsprechend angepasst werden. Wie auch schon bei den beiden Messtagen dieser Messkampagne ergaben sich bei allen parallel durchgeführte Probenahmen mit anschließender Analyse gemäß DIN EN 14791 erhebliche SO<sub>x</sub> Abweichungen, für die es keine Erklärung gibt. Verglichen mit den Anforderungen des Genehmigungsbescheides ist zwar die Reingasemission von SO<sub>x</sub>, angegeben als SO<sub>2</sub>, von 0,35 g/Nm<sup>3</sup> bei einer Messung überschritten, jedoch nicht der zulässige maximale SO<sub>x</sub>-Massenstrom von 1,8 kg/h (maximal gemessen: 1,2 kg/h).

## Stickstoffoxide

Die gemessenen Stickstoffoxidkonzentrationen als Halbstundenmittelwerte, angegeben als NO<sub>2</sub> und bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, liegen rohgasseitig im Bereich von 91 und 296 mg/Nm<sup>3</sup> und zeigen keine Auffälligkeiten. Im Reingas wurden Konzentrationen zwischen 93 und 293 mg/Nm<sup>3</sup> festgestellt. Die Unterschiede zwischen den Roh- und Reingasmessungen liegen im Bereich der Messunsicherheit und sind damit vernachlässigbar. Die in diesem Betriebsmodus gemessenen NO<sub>x</sub>-Reingaskonzentrationen erfüllen ausnahmslos den im Genehmigungsbescheid festgelegten Grenzwert von 0,35 g/Nm<sup>3</sup>. Bemerkenswert ist der Umstand, dass die NO<sub>x</sub>-Konzentrationen an diesem Messtag, an dem Überlastbedingungen vorlagen, im Mittel niedriger lagen, als an den beiden anderen Messtagen. Daraus könnte gefolgert werden, dass der Einfluss der Brennstoff-NO<sub>x</sub>-Bildung gegenüber der thermischen NO<sub>x</sub>-Bildung von untergeordneter Bedeutung ist. Für eine abschließende Bewertung dieses Sachverhaltes ist jedoch die Datenlage nicht ausreichend.

## Chlor- und Fluorwasserstoff

Die bei diesem Betriebsmodus gemessenen Chlorwasserstoffkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zwischen 39,8 und 44,6 mg/Nm<sup>3</sup> im Rohgas, respektive zwischen 3,8 und 6,1 mg/Nm<sup>3</sup> im Reingas. Die im Rohgas festgestellte Größenordnung entspricht anderen Tierkrematorien. Durch die Abgasreinigung werden die HCl-Emissionen deutlich verringert. Die gemessenen Fluorwasserstoffkonzentrationen lagen im Roh- und Reingas bei weniger als 3 % der gemessenen HCl-Konzentrationen und sind somit vernachlässigbar. Die im Genehmigungsbescheid festgeschriebenen Emissionsgrenzwerte für HCl (30 mg/Nm<sup>3</sup>) und HF (3 mg/Nm<sup>3</sup>) werden mit deutlichem Sicherheitsabstand unterschritten.

## Quecksilber

Die gemessenen Quecksilberkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, im Roh- und Reingas im Bereich von 0,33 bis 1,7 µg/Nm<sup>3</sup> und korrespondieren mit den üblichen Werten für Heimtierkrematorien.

## Dioxine und Furane – 26./27.5.2020

Die ermittelte PCDD/F-Konzentration im Abgas lag am 26.5.2020 bei ausschließlich durchgeführten Einzelkremationen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, bei 0,0022 ng-TE/Nm<sup>3</sup> und somit mit deutlichem Sicherheitsabstand unterhalb des im Genehmigungsbescheid festgesetzten Grenzwertes von 0,1 ng-TE/Nm<sup>3</sup>. Obwohl am zweiten Messtag bei parallelem Betrieb der Anlage im Einzel- und Sammelkremationsmodus das Ofensystem überlastet war, lag die ermittelte PCDD/F-Konzentration im Abgas, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, bei 0,0014 ngTE/Nm<sup>3</sup> und somit ebenfalls deutlich unterhalb des im Genehmigungsbescheid festgesetzten Grenzwertes von 0,1 ng-TE/Nm<sup>3</sup>.

**Tabelle 29: Krematorium D – PCDD/F-Messungen (26./27.5.2020)**

| Messung                                             | 1             | 2             |
|-----------------------------------------------------|---------------|---------------|
| Datum                                               | 26.5.2020     | 27.5.2020     |
| Uhrzeit                                             | 09:55 - 15:55 | 08:30 - 14:30 |
| Einzelkremation Tierkörper<br>(Anzahl/Gewicht [kg]) | 17/313,4      | 16/263,7      |
| Sammelkremation Tierkörper<br>(Anzahl/Gewicht [kg]) | keine         | -/410,4       |
| Abgastemperatur [°C]                                | 110           | 111           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                      | 14,8          | 13,2          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                     | 1500          | 1400          |
| PCDD/F <sup>1)2)</sup> [ng TEQ/Nm <sup>3</sup> ]    | 0,0022        | 0,0014        |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> Angaben in Toxizitätsäquivalent gemäß Nato-CCMS.

### 5.3.5 Anlage E

Die Messkampagne an den Linien E1 und E2 der Anlage E fand am 10.03. und 11.03.2020 statt. Die Messöffnungen für die Abgasmessungen im Rohgas wurden nach der zweiten Kühlstufe der Abgaskühlung und vor Eintritt in die Abgasreinigung in einem Beruhigungskanal installiert, so dass von geeigneten Strömungsverhältnissen ausgegangen werden kann. Die Abgasmessungen im Reingas erfolgten an der vorhandenen behördlichen Emissionsmessstelle.

Um aus den Emissionsmessungen bei unterschiedlichen Betriebsweisen (Heimtier- und Pferdekremation) möglichst umfassende Informationen zu erhalten, wurde mit dem Betreiber der Anlage folgende Betriebsweise während der Messkampagne festgelegt:

1. Tag: Im ersten Teilbetrieb (1 Stunde Vorlauf, 3 Stunden Messbetrieb) wird nur der Heimtierofen mit einer stündlichen Last von etwa 50 kg betrieben. Im zweiten Teilbetrieb werden Heimtier- und Pferdeofen **gemeinsam** bei einer gesamten Verbrennungsleistung von 125 kg/h betrieben. Die Abgasmessungen werden im Roh- und Reingas den beiden Betriebsweisen zugeordnet. Um den Einfluss der Additivzuführung auf die Emissionskonzentrationen zu überprüfen, wurde am ersten Messtag vor dem Gewebefilter kein Additiv zugegeben.

2. Tag: Im ersten Teilbetrieb (1 Stunde Vorlauf, 3 Stunden Messbetrieb) wird der kleinere Heimtierofen mit einer stündlichen Last von 50 kg betrieben. Danach wird der Heimtierofen abgeschaltet und nur der Pferdeofen mit einer stündlichen Last von ca. 125 kg betrieben. Auch an diesem Tag erfolgen zeitgleich die Abgasmessungen im Roh- und Reingas, jedoch mit Additivzuführung.

Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb betrieben. Vor Beginn der jeweiligen täglichen Messkampagne wurden Kremationen im Heimtierkremationsofen durchgeführt, um ihn in den Betriebsmodus zu bringen. Da der Pferdekremationsofen als Herdofen mit beweglichem Unterofen ausgeführt ist, beinhaltet der Vorgang der Pferdekremation auch den Aufheizbetrieb. Sämtliche Kremationen wurden als Einzelkremationen durchgeführt.

#### a) 1. Messtag – 10.3.2020

In den Tabellen 30 und 31 sind die Ergebnisse der Messkampagne am ersten Tag im Roh- und Reingas zusammengefasst. Die im Reingas am 10.3.2020 gemessenen PCDD/F-Konzentrationen sind in Tabelle 34 zusammen mit denen vom 11.3.2020 angegeben. Wie die Aufzeichnungen zeigen, wurden die ersten 4 Messungen nur mit Heimtieren mit Einzelgewichten um ca. 50 kg durchgeführt. Ab Messung 5 erfolgte der Parallelbetrieb des Heimtier- und Pferdekremationsofens, deren Abgas auf eine gemeinsame Nachbrennkammer geführt wird. Parallel zum Beginn der Pferdekremation wurde der Heimtierkremationsofen nur mit geringem Tierkörpergewicht betrieben, später wurden auch dort wieder Einzelgewichte um ca. 50 kg aufgegeben.

**Tabelle 30: Krematorium E - 1. Messtag (10.3.2020) - Rohgas**

| Messung                                                                      | 1                      | 2                | 3                | 4                      | 5                 | 6                      | 7                  |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------------|-------------------|------------------------|--------------------|
| Uhrzeit                                                                      | 09:45 -<br>10:15       | 10:15 -<br>10:45 | 10:58 -<br>11:28 | 12:01 -<br>12:31       | 12:52 -<br>13:22  | 13:31 -<br>14:01       | 14:33 -<br>15:03   |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                         | 1/48<br>lange<br>Haare | 1/50             | 1/51             | 1/52<br>lange<br>Haare | 1/2,8             | 1/50<br>lange<br>Haare | 1/52               |
| Pferdegewicht [kg]                                                           | -                      | -                | -                | -                      | 1/680             | 1/ff <sup>4)</sup>     | 1/ff <sup>4)</sup> |
| Abgastemperatur [°C]                                                         | 180                    | 186              | 189              | 185                    | 184               | 186                    | 186                |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                               | 15,8                   | 16,7             | 16,2             | 16,5                   | 16,9              | 15,9                   | 15,1               |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                              | 2600                   | 1900             | 2700             | 2400                   | 3500              | 3700                   | 3100               |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                     | 3,6                    | 3,0              | 3,6              | 3,5                    | 18,0              | 9,8                    | 6,0                |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 3,3                    | 3,8              | 3,0              | 3,0                    | 5,9               | 3,1                    | 2,4                |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -                      | -                | 95,9             | -                      | -                 | 93,5                   | 106,7              |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 79                     | 28               | 80               | 74                     | 187 <sup>3)</sup> | 87                     | 179 <sup>3)</sup>  |

| Messung                                                                      | 1   | 2   | 3     | 4   | 5   | 6     | 7     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-------|
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -   | -   | 24,0  | -   | -   | 145,5 | 230,0 |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 292 | 298 | 336   | 313 | 232 | 376   | 198   |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                      | -   | -   | 28,1  | -   | -   | 33,2  | 53,7  |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                       | -   | -   | <0,16 | -   | -   | <0,17 | <0,14 |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                       | -   | -   | 0,75  | -   | -   | 1,3   | 0,49  |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> kurzzeitige Überschreitung des eingestellten Messbereichs; <sup>4)</sup> „ff“ zeigt an, dass ein Pferdekörper eine signifikant längere Kremierungszeit aufweist, die bis zu 8 Stunden betragen kann.

**Tabelle 31: Krematorium E - 1. Messtag (10.3.2020) - Reingas**

| Messung                                                                      | 1                      | 2                | 3                | 4                      | 5                 | 6                      | 7                   |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------------|-------------------|------------------------|---------------------|
| Uhrzeit                                                                      | 09:45 -<br>10:15       | 10:15 -<br>10:45 | 10:58 -<br>11:28 | 12:01 -<br>12:31       | 12:52 -<br>13:22  | 13:31 -<br>14:01       | 14:33 -<br>15:03    |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                         | 1/48<br>lange<br>Haare | 1/50             | 1/51             | 1/52<br>lange<br>Haare | 1/2,8             | 1/50<br>lange<br>Haare | 1/52                |
| Pferdegewicht [kg]                                                           | -                      | -                | -                | -                      | 1/680             | 1/ff <sup>5)</sup>     | 1/ff <sup>5)</sup>  |
| Abgastemperatur [°C]                                                         | 157                    | 158              | 158              | 157                    | 161               | 165                    | 161                 |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                               | 15,8                   | 16,7             | 16,2             | 16,5                   | 16,8              | 15,9                   | 15,1                |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                              | 2600                   | 1900             | 2700             | 2400                   | 3500              | 3700                   | 3100                |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                     | 4,0                    | 3,9              | 4,3              | 3,3                    | 19,0              | 13,1                   | 6,6                 |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 6,4                    | 6,2              | 4,6              | 4,3                    | 6,4               | 4,7                    | 3,7                 |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -                      | -                | 0,9              | -                      | -                 | 6,5                    | 1,0                 |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 117                    | 39               | 103              | 98                     | 176 <sup>3)</sup> | 116                    | 217 <sup>3)</sup>   |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -                      | -                | 68,7             | -                      | -                 | 83,1                   | 158,3               |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 282                    | 295              | 327              | 308                    | 236               | 373                    | 195                 |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                      | -                      | -                | 18,4             | -                      | -                 | 20,9                   | 30,1                |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                       | -                      | -                | <0,17            | -                      | -                 | <0,16                  | <0,46 <sup>4)</sup> |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                       | -                      | -                | 0,79             | -                      | -                 | 14                     | 0,34                |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> kurzzeitige Überschreitung des eingestellten Messbereichs; <sup>4)</sup> nicht repräsentativ, da geringes Probenvolumen; <sup>5)</sup> „ff“ zeigt an, dass ein Pferdekörper eine signifikant längere Kremierungszeit aufweist, die bis zu 8 Stunden betragen kann.

Die Kremationsvorgänge aus beiden Ofensystemen zeigen zunächst, dass ab Messung 5 (Beginn Pferdekremation) die Abgasmenge um etwa 1000 m<sup>3</sup>/h angestiegen ist. Dennoch stellte sich im Rohgas vor Eintritt in die Abgasreinigung eine nahezu gleichförmige Abgastemperatur um 180 bis 190 °C ein, die den Schluss zulässt, dass die Abgaskühlung ausreichend dimensioniert ist. Die zeitgleich ermittelten Abgastemperaturen im Reingas zeigten ebenfalls nur geringe Schwankungen um 160 °C. Auch bei den gemessenen Sauerstoffgehalten wurden mit Halbstundenmittelwerten zwischen 15,1 und 16,9 Vol. % keine extremen Betriebssituationen identifiziert.

### **Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff**

Die auf 11 % normierten CO-Konzentrationen lagen bei alleiniger Heimtierkremation im Bereich von 3 bis 4 mg/Nm<sup>3</sup> und zwar sowohl im Rohgas, wie im Reingas. Mit Beginn des parallelen Pferdekremationsbetriebes war ein deutlicher Anstieg um etwa 15 mg/Nm<sup>3</sup> an beiden Messtellen feststellbar, der im weiteren Betriebsverlauf wieder abnahm. Man kann annehmen, dass diese deutliche Zunahme der CO-Konzentration mit der Aufheizphase des Pferdekremationsofens im Zusammenhang steht. Ungeachtet dessen lagen die ermittelten Halbstundenmittelwerte im Kamin zum Teil deutlich unter dem Grenzwert von 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Ein ähnliches Bild ergab sich für Gesamtkohlenstoff, der mit festgestellten Reingaskonzentrationen von 3,7 bis 6,4 mg/Nm<sup>3</sup> ebenfalls deutlich unter dem im Genehmigungsbescheid festgelegten Grenzwert von 20 mg/Nm<sup>3</sup> liegt. Die verbrennungstechnischen Eigenschaften beider Kremationsofensysteme mit nachgeschalteter Abgasnachverbrennung sind demnach als sehr gut zu bewerten und erfüllen den Stand der Technik mit deutlichem Sicherheitsabstand.

### **Staubgehalt**

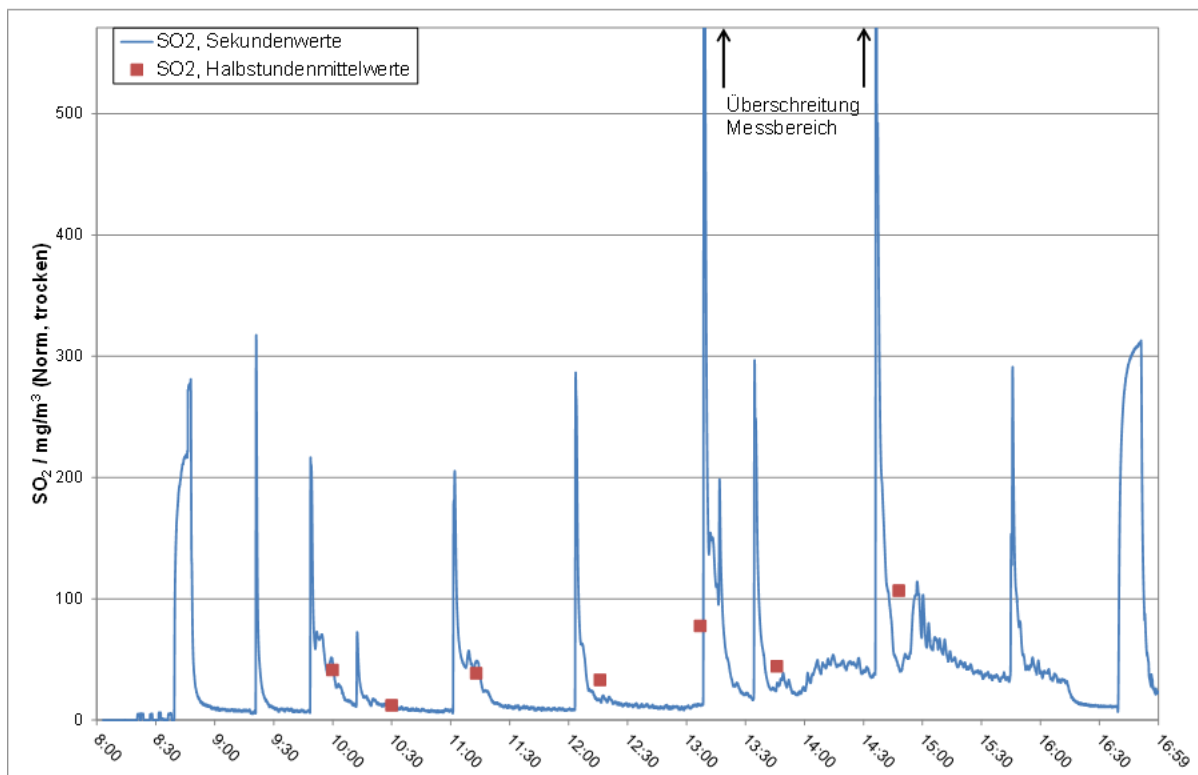
Der Staubgehalt im Abgas vor der Abgasreinigung lag, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, in der Größenordnung von 100 mg/Nm<sup>3</sup>. Nach der Abgasreinigung ergaben sich Staubgehalte von 0,9 bis 6,5 mg/Nm<sup>3</sup> und erfüllen somit den im Genehmigungsbescheid festgelegten Grenzwert von 10 mg/Nm<sup>3</sup>.

### **Schwefeloxide**

Der Verlauf der kontinuierlichen Schwefeldioxidmessung im Rohgas zeigt neben den üblichen kremationsbezogenen SO<sub>x</sub>-Konzentrationsspitzen, dass mit Beginn der Pferdekremation eine deutliche Zunahme der Grundbelastung an SO<sub>x</sub> feststellbar ist (Abbildung 20). Dies ist angesichts des in Abschnitt 3.5 beschriebenen Eintrags an Cystein, das in Haaren und Hufen besonders angereichert ist, plausibel. So lagen die Halbstundenmittelwerte im Rohgas für SO<sub>x</sub>, angegeben als SO<sub>2</sub> und bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, vor dem Beginn der Pferdekremation im Bereich von 28 bis 80 mg/Nm<sup>3</sup> und ab Beginn der Pferdekremation im Bereich von 87 bis über 187 mg/Nm<sup>3</sup>. Die parallel hierzu durchgeführte Probenahme mit anschließender Analyse gemäß DIN EN 14791 lieferte eine ähnliche Tendenz, wenngleich die Abweichungen zur kontinuierlichen Messung deutlich über 10 % lagen. Da das kontinuierliche Messverfahren kein Normverfahren darstellt, werden die Ergebnisse der nasschemischen Probenahme als maßgebend betrachtet. Bei der Reingassituation konnte tendenziell ein ähnliches Verhalten festgestellt werden, wobei sich vor Beginn der Pferdekremation für SO<sub>x</sub> ein Bereich von 39 bis 117 mg/Nm<sup>3</sup> einstellte; ab Beginn der Pferdekremation ergaben sich für SO<sub>x</sub> Abgaskonzentrationen zwischen 116 und 217

mg/Nm<sup>3</sup>. Auch im Reingas wurden deutliche Abweichungen zur parallel durchgeführten nasschemischen SO<sub>x</sub>-Bestimmung festgestellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass an diesem Messtag kein Additiv bei der Abgasreinigung zugegeben wurde. Verglichen mit den Anforderungen des Genehmigungsbescheides, wonach die Emission an SO<sub>x</sub>, als SO<sub>2</sub>, die Konzentration von 350 mg/Nm<sup>3</sup> nicht überschreiten darf, sind die Emissionsvorgaben dennoch mit ausreichendem Sicherheitsabstand eingehalten.

**Abbildung 20: Anlage E – Kontinuierliche Schwefeloxidmessung (10.3.2020) Rohgas**



Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG - Messung im Rahmen dieses Vorhabens

### Stickstoffoxide

Die gemessenen Stickstoffoxidkonzentrationen als Halbstundenmittelwerte, angegeben als NO<sub>2</sub> und bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, liegen im Bereich von 195 und 376 mg/Nm<sup>3</sup> und zeigen keine Auffälligkeiten, die auf die Pferdekremation zurückzuführen sind. Der emittierte NO<sub>x</sub>-Massenstrom lag demnach im Bereich von 0,23 bis 0,71 kg/h. Die Unterschiede zwischen den Roh- und Reingasmessungen liegen im Bereich der Messunsicherheit und sind damit vernachlässigbar. Gemäß Genehmigungsbescheid darf die Stickstoffoxidemission 350 mg/Nm<sup>3</sup> oder als Massenstrom 1,8 kg/h nicht überschreiten. Für den maximal festgestellten Halbstundenmittelwert von 376 mg/Nm<sup>3</sup>, der somit den Konzentrationsgrenzwert von 350 mg/Nm<sup>3</sup> überschritten hat, erfüllte der ermittelte Massenstrom von 0,71 kg/h den vorgegebenen Grenzwert, so dass auch bei Stickoxiden der Genehmigungsbescheid sicher eingehalten wird. Im Übrigen entspricht das festgestellte NO<sub>x</sub>-Emissionspotential dem erwarteten Bereich ohne DeNO<sub>x</sub>-Anlagen.

## Chlor- und Fluorwasserstoff

Die gemessenen Chlorwasserstoffkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zwischen 28,1 und 53,7 mg/Nm<sup>3</sup> im Rohgas, respektive zwischen 18,1 und 30,1 mg/Nm<sup>3</sup> im Reingas. Die detektierte Größenordnung entspricht anderen Tierkrematorien. Inwieweit die tendenziell etwas geringeren HCl-Reingaskonzentrationen durch die Abgasentstaubung begünstigt wurden, lässt sich aus den Messwerten nicht zweifelsfrei klären. Die gemessenen Fluorwasserstoffkonzentrationen lagen, mit Ausnahme eines Messwertes (nicht repräsentativ, da das Probenahmevolumen zu gering war), bei weniger als 1 % der gemessenen HCl-Konzentrationen und sind somit vernachlässigbar. Der Genehmigungsbescheid enthält keine Emissionsvorgaben für HCl und HF.

## Quecksilber

Die gemessenen Quecksilberkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, im Roh- und Reingas im Bereich von 0,34 bis 1,3 µg/Nm<sup>3</sup> und korrespondieren mit den üblichen Werten für Heimtierkrematorien. Der Messwert von 14 µg/Nm<sup>3</sup> im Reingas wird vom korrespondierenden Rohgasmesswert von 1,3 µg/Nm<sup>3</sup> nicht bestätigt. Da der Messwert trotz nochmaliger Überprüfung auch im Allgemeinen weder zum Datenkollektiv passt, noch prozesstechnisch begründet werden kann, ist von einem „Ausreißer“ auszugehen. Im Genehmigungsbescheid ist für Quecksilber kein Emissionsgrenzwert festgeschrieben.

### b) 2. Messtag – 11.3.2020

Am zweiten Tag der Messkampagne wurden ebenfalls die ersten 4 Messungen zunächst nur mit Heimtieren durchgeführt. Ab Messung 5 wurde ausschließlich der Pferdekremationsofen betrieben. Der Pferdekörper wies mit 320 kg ein deutlich geringeres Körpergewicht auf; er war jedoch durch auffallend langes Haar gekennzeichnet. Im Gegensatz zum ersten Messtag, wurde an diesem Tag 3 kg Additiv – eine Mischung aus Calciumhydroxid Ca(OH)<sub>2</sub> und Minsorb® – vor dem Gewebefilter zugegeben.

In den Tabellen 32 und 33 sind die Ergebnisse der Messkampagne am zweiten Tag im Roh- und Reingas zusammengefasst. Die im Reingas am 11.3.2020 gemessenen PCDD/F-Konzentrationen sind in Tabelle 34 angegeben.

**Tabelle 32: Krematorium E - 2. Messtag (11.3.2020) - Rohgas**

| Messung                                  | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                  |
|------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|
| Uhrzeit                                  | 09:02 -<br>09:32 | 10:04 -<br>10:34 | 11:10 -<br>11:40 | 11:51 -<br>12:21 | 13:07 -<br>13:37 | 14:30 -<br>15:00   |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])     | 1/51             | 1/53             | 1/10             | 1/55             | -                | -                  |
| Pferdegewicht [kg]                       | -                | -                | -                | -                | 1/320            | 1/ff <sup>3)</sup> |
| Abgastemperatur [°C]                     | 183              | 187              | 184              | 183              | 188              | 182                |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]           | 16,7             | 16,4             | 16,7             | 16,4             | 16,2             | 14,7               |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]          | 2600             | 4300             | 3800             | 3500             | 3000             | 1800               |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 4,0              | 4,4              | 6,1              | 6,0              | 5,1              | 3,3                |

| Messung                                                                   | 1   | 2     | 3   | 4   | 5     | 6     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-----|-----|-------|-------|
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 3,3 | 3,0   | 3,0 | 2,8 | 2,9   | 2,1   |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -   | 73,1  | -   | -   | 45,2  | 88,3  |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 91  | 77    | 45  | 72  | 236   | 126   |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -   | 97,6  | -   | -   | 327,6 | 148,2 |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 341 | 283   | 271 | 322 | 325   | 107   |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | -   | 22,0  | -   | -   | 28,8  | 52,4  |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -   | <0,18 | -   | -   | 0,41  | 1,41  |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -   | 0,72  | -   | -   | 0,49  | 0,31  |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> „ff“ zeigt an, dass ein Pferdekörper eine signifikant längere Kremierungszeit aufweist, die bis zu 8 Stunden betragen kann.

**Tabelle 33: Krematorium E - 2. Messtag (11.3.2020) - Reingas**

| Messung                                                                   | 1                | 2                | 3                | 4                | 5                | 6                   |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Uhrzeit                                                                   | 09:02 -<br>09:32 | 10:04 -<br>10:34 | 11:10 -<br>11:40 | 11:51 -<br>12:21 | 13:07 -<br>13:37 | 14:30 -<br>15:00    |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])                                      | 1/51             | 1/53             | 1/10             | 1/55             | -                | -                   |
| Pferdegewicht [kg]                                                        | -                | -                | -                | -                | 1/320            | 1/ff <sup>4)</sup>  |
| Abgastemperatur [°C]                                                      | 154              | 154              | 153              | 153              | 160              | 153                 |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                                            | 16,4             | 16,8             | 16,9             | 16,7             | 16,5             | 15,1                |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                                           | 2600             | 4300             | 3800             | 3500             | 3000             | 1800                |
| CO <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                  | 3,4              | 3,0              | 3,4              | 4,7              | 7,7              | 2,7                 |
| Gesamt-C <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                            | 5,2              | 3,8              | 3,6              | 3,4              | 3,7              | 2,9                 |
| Staub <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                 | -                | 2,4              | -                | -                | 3,1              | 3,9                 |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 45               | 48               | 16               | 44               | 230              | 131                 |
| SO <sub>x</sub> als SO <sub>2</sub> <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]   | -                | 75,9             | -                | -                | 240,8            | 113,1               |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> <sup>1)2)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ] | 341              | 289              | 275              | 324              | 338              | 111                 |
| HCl <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                   | -                | 13,3             | -                | -                | 25,8             | 30,1                |
| HF <sup>1)</sup> [mg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -                | <0,19            | -                | -                | <0,28            | <1,31 <sup>3)</sup> |
| Hg <sup>1)</sup> [µg/Nm <sup>3</sup> ]                                    | -                | 0,57             | -                | -                | 0,37             | 0,35                |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> nicht repräsentativ, da geringes Probenvolumen;

<sup>4)</sup> „ff“ zeigt an, dass ein Pferdekörper eine signifikant längere Kremierungszeit aufweist, die bis zu 8 Stunden betragen kann.

Bei dieser Messkampagne zeigte sich keine Zunahme der festgestellten Abgasvolumenströme bei der Pferde- gegenüber Heimtierkremation. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass der stündliche Massenstrom bei der Pferdekremation dem der Heimtierkremation entspricht. Auch die Halbstundenmittelwerte der Abgastemperaturen zeigten sowohl im Rohgas ( $\sim 185^\circ\text{C}$ ) als auch im Reingas ( $\sim 155^\circ\text{C}$ ) nur geringe Schwankungen. Auch ließen die gemessenen Sauerstoffgehalte mit Halbstundenmittelwerten zwischen 14,7 und 16,9 Vol. % keine extremen Betriebssituationen erkennen.

### **Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff**

Die auf 11 % normierten CO-Konzentrationen als Halbstundenmittelwerte zeigten keinen Unterschied zwischen der Heimtier- und Pferdekremation. Die ermittelten Konzentrationen bewegten sich zwischen 2,7 und 7,7 mg/Nm<sup>3</sup>, wobei zwischen Roh- und Reingas praktisch keine Unterschiede erkennbar waren. Gleiches gilt bei dieser Messkampagne für den Gesamtkohlenstoff, deren Halbstundenmittelwerte zwischen 2,1 bis 5,2 mg/Nm<sup>3</sup> keine Auffälligkeiten zeigten.

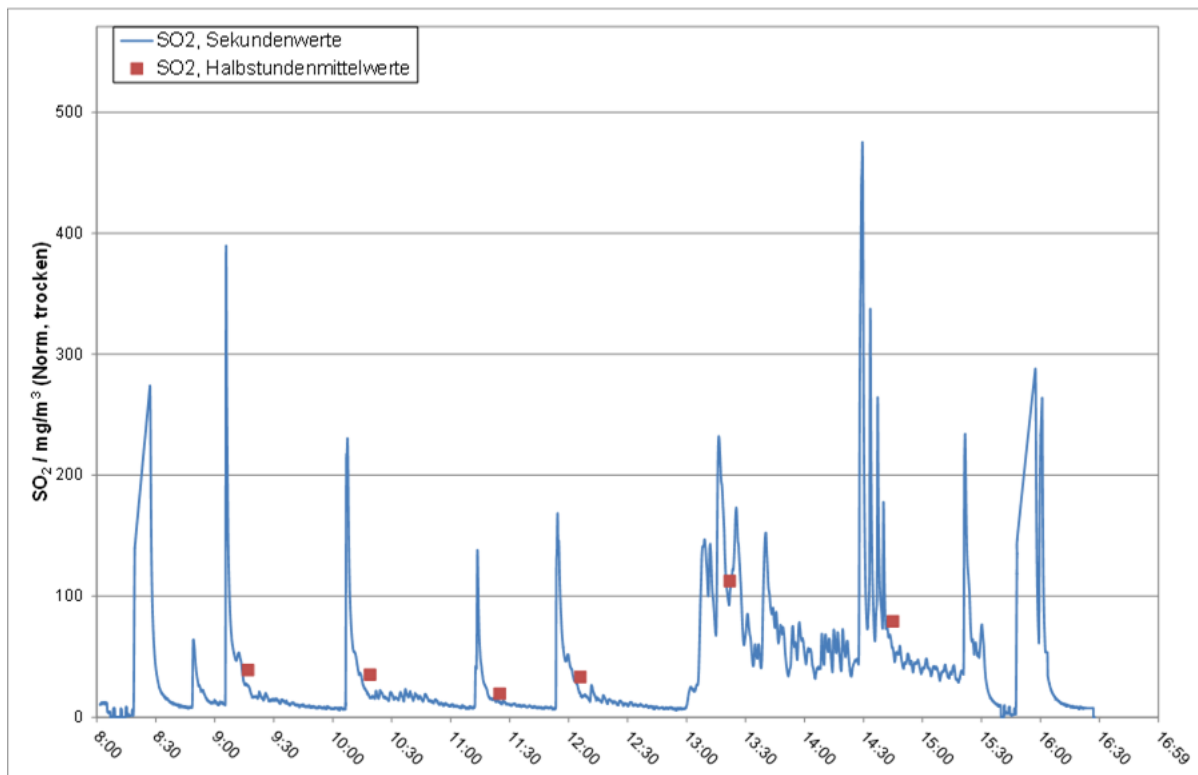
### **Staubgehalt**

Mit Halbstundenmittelwerten von 45,2 und 88,3 mg/Nm<sup>3</sup> für den Rohgasstaubgehalt sowie Reingaskonzentrationen von 2,4 bis 3,9 mg/Nm<sup>3</sup>, jeweils bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, waren keine außergewöhnlichen Effekte erkennbar.

### **Schwefeloxide**

Bemerkenswert ist der Verlauf der kontinuierlichen Schwefeloxiddmessung, die für das Rohgas in Abbildung 21 dargestellt ist. Sie zeigt auch bei dieser Messkampagne den deutlichen Einfluss der Pferdekremation, die neben den üblichen kremationsbezogenen SO<sub>x</sub>-Konzentrationspitzen, eine deutliche Zunahme der Grundbelastung zur Folge hat (vgl. hierzu auch Abbildung 20). Die ermittelten Halbstundenmittelwerte für SO<sub>x</sub>, angegeben als SO<sub>2</sub> und bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, lagen während der Heimtierkremation im Bereich von 45 bis 91 mg/Nm<sup>3</sup> und ab Beginn der Pferdekremation im Bereich von 126 bis über 236 mg/Nm<sup>3</sup>. Die parallel hierzu durchgeführte Probenahme mit anschließender Analyse gemäß DIN EN 14791 lieferte, trotz z. T. deutlichen Abweichungen zur kontinuierlichen Messung, eine ähnliche Tendenz. Bei der Reingassituation zeigte sich tendenziell ein ähnliches Verhalten. Während den Heimtierkremationen ergaben sich die Reingaskonzentrationen als Halbstundenmittelwerte, angegeben als SO<sub>2</sub> und bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zu 16 bis 48 mg/Nm<sup>3</sup>, wohingegen bei der Pferdekremation 230 und 131 mg/Nm<sup>3</sup> festgestellt wurden. Auch im Reingas wurden bei dieser Messkampagne deutliche Abweichungen zur parallel durchgeführten nasschemischen SO<sub>x</sub>-Bestimmung festgestellt. Die kontinuierliche Messung kann demnach zur Visualisierung des Konzentrationsverlaufs genutzt werden. Für den absoluten Vergleich sind die nasschemischen Probenahmen aussagekräftiger. Da an diesem zweiten Messtag die Additive auf Basis Ca(OH)<sub>2</sub> dem Prozess zugegeben wurden, stellte sich die Frage der SO<sub>x</sub>-Abscheidung. Aus den Messungen 1 bis 4 (Heimtierkremationen) konnten Abscheidegrade von 38 bis 64 % abgeleitet werden, wohingegen die Rein- und Rohgaskonzentrationen bei den Messungen 5 und 6 nahezu identisch waren. Als eine mögliche Ursache kommt in Betracht, dass das nur einmalig zu Betriebsbeginn aufgegebene Additiv nach der 4. Messung keine Sorptionseigenschaften für SO<sub>2</sub> mehr besitzt. Als Konsequenz müsste die Anlagenbetriebsweise dahingehend modifiziert werden, dass während der täglichen Betriebszeit mehrmals Additiv zugegeben wird.

**Abbildung 21: Anlage E – Kontinuierliche Schwefeloxidmessung (11.3.2020) Rohgas**



Quelle: eigene Darstellung Schetter GmbH & Co. KG-Messung im Rahmen dieses Vorhabens

### Stickstoffoxide

Die als Halbstundenmittelwerte ermittelten Stickstoffoxidkonzentrationen, angegeben als  $\text{NO}_2$  und bezogen auf 11 %  $\text{O}_2$ , variieren zwischen 107 und  $341 \text{ mg/Nm}^3$ , wobei die Unterschiede zwischen den Roh- und Reingaskonzentrationen marginal sind. Auch bei dieser Schadstoffkomponente waren am zweiten Messtag keine Unterschiede zwischen Heimtier- und Pferdekremation festzustellen.

### Chlor- und Fluorwasserstoff

Die gemessenen Chlorwasserstoffkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 %  $\text{O}_2$ , zwischen 22,0 und  $52,4 \text{ mg/Nm}^3$  im Rohgas, respektive zwischen 13,3 und  $30,1 \text{ mg/Nm}^3$  im Reingas. Inwieweit die tendenziell etwas geringeren HCl-Reingaskonzentrationen durch die Abgasreinigung begünstigt wurden, lässt sich aus den Messwerten nicht zweifelsfrei klären. Die gemessenen Fluorwasserstoffkonzentrationen lagen bei weniger als 2 % der gemessenen HCl-Konzentrationen und sind somit vernachlässigbar.

### Quecksilber

Die gemessenen Quecksilberkonzentrationen lagen, bezogen auf 11 %  $\text{O}_2$ , im Roh- und Reingas im Bereich von 0,31 bis  $0,72 \text{ µg/Nm}^3$  und korrespondieren mit den üblichen Werten für Heimtierkrematorien. Ein Reingasmesswert mit  $14 \text{ µg/Nm}^3$  wurde als nicht plausibel verworfen, da die zeitgleich gemessene Rohgaskonzentration keinen Hinweis auf eine um den Faktor 100 erhöhte Quecksilberemissionskonzentration gibt.

### Dioxine und Furane – 10./11.3.2020

Die am 10.3.2020 ermittelte Emissionskonzentration für Dioxine und Furane ergab sich, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, zu 0,69 ng-TE/Nm<sup>3</sup>. Der dazugehörige Massenstrom lag bei 0,98 µg-TE/h. Beide Werte überschreiten somit die Vorgaben des Genehmigungsbescheides. Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass an diesem Messtag versuchsweise **kein** Additiv zugegeben wurde, erscheint die gemessene Konzentration jedoch plausibel. Am zweiten Messtag wurde Additiv in den Abgasstrom zugegeben. Die an diesem Tag festgestellte PCDD/F-Emissionskonzentration lag, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, bei 0,11 ng-TE/Nm<sup>3</sup>. Der dazugehörige PCDD/F-Massenstrom ergab sich zu 0,15 µg-TE/h. Somit werden bei Zugabe der Additive entsprechend des bestimmungsgemäßen Betriebes die Vorgaben des Genehmigungsbescheides eingehalten.

**Tabelle 34: Krematorium E – PCDD/F-Messungen (10./11.3.2020)**

| Messung                                          | 1             | 2             |
|--------------------------------------------------|---------------|---------------|
| Datum                                            | 10.3.2020     | 11.3.2020     |
| Uhrzeit                                          | 09:45 - 15:45 | 09:02 - 15:02 |
| Tierkörper (Anzahl/<br>Gewicht [kg])             | 7/305,8       | 4/169         |
| Pferdegewicht [kg]                               | 1/680         | 1/320         |
| Abgastemperatur [°C]                             | 160           | 154           |
| O <sub>2</sub> -Gehalt [Vol-%]                   | 16,1          | 16,5          |
| Abgasmenge [Nm <sup>3</sup> /h]                  | 2900          | 3100          |
| PCDD/F <sup>1)2)</sup> [ng TEQ/Nm <sup>3</sup> ] | 0,69          | 0,11          |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> Angaben in Toxizitätsäquivalent gemäß Nato-CCMS.

### 5.3.6 Gesamtbewertung der Emissionssituation

Aus den Emissionsmessungen an den ausgewählten Tierkrematorien können Rückschlüsse für die zu erwartende Emissionssituation für derartige Anlagen gezogen werden, wenn man in Anlagen ohne und mit nachgeschalteter Abgasreinigung unterscheidet. Tabelle 35 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse der durchgeführten Messkampagnen als Mittelwerte aus den Halbstundenmittelwerten an den einzelnen Anlagen im Roh- und Reingas. Für PCDD/F sind die Mittelwerte der jeweiligen Probenahme über jeweils 6 Stunden dargestellt.

**Tabelle 35: Messergebnisse im Überblick**

| Anlage                                      | A       | B       | C       | D           | D           | E                                | E                             | E       |
|---------------------------------------------|---------|---------|---------|-------------|-------------|----------------------------------|-------------------------------|---------|
|                                             | Reingas | Reingas | Reingas | Rohgas      | Reingas     | Rohgas<br>Heimtier <sup>7)</sup> | Rohgas<br>Pferd <sup>8)</sup> | Reingas |
| CO <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 3,5     | 0,6     | 2,0     | 6,5<br>45,1 | 6,8<br>56,7 | 4,3                              | 8,4                           | 6,1     |

| Anlage                                                     | A     | B     | C     | D            | D                | E     | E     | E                           |
|------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------------|------------------|-------|-------|-----------------------------|
| C <sub>Ges</sub> <sup>1)2)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]  | 3,1   | 4,3   | 2,5   | 1,1<br>4,0   | 1,2<br>5,7       | 3,2   | 3,4   | 4,5                         |
| Staub <sup>1)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]               | 91    | 8,7   | 55    | 50<br>119    | 2,4<br>1,5       | 85    | 83    | 3,0                         |
| SO <sub>x</sub> <sup>1)2)3)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 222   | 256   | 88    | 245<br>395   | 148<br>266       | 68    | 148   | 106                         |
| NO <sub>x</sub> <sup>1)2)4)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ] | 302   | 163   | 257   | 278<br>200   | 279<br>197       | 307   | 259   | 284                         |
| HCl <sup>1)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]                 | 56,5  | 65,4  | 44,1  | 42,6<br>41,6 | 5,3<br>5,2       | 25,1  | 42,0  | 23,1                        |
| HF <sup>1)</sup><br>[mg/Nm <sup>3</sup> ]                  | 0,26  | 0,45  | 0,46  | 0,39<br>0,42 | <0,15<br><0,12   | <0,18 | 0,53  | 0,43                        |
| Hg <sup>1)</sup><br>[µg/Nm <sup>3</sup> ]                  | 0,71  | 0,67  | 0,47  | 0,82<br>0,44 | 1,27<br>0,92     | 0,74  | 0,65  | 0,48 <sup>9)</sup>          |
| PCDD/F <sup>1)5)</sup><br>[ng/Nm <sup>3</sup> ]            | 0,045 | 0,011 | 0,032 | k. M.        | 0,0022<br>0,0014 | k. M. | k. M. | 0,69 <sup>10)</sup><br>0,11 |

Hinweise: <sup>1)</sup> bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>; <sup>2)</sup> kontinuierlich gemessen; <sup>3)</sup> angegeben als SO<sub>2</sub>; <sup>4)</sup> angegeben als NO<sub>2</sub>; <sup>5)</sup> Angaben in Toxizitätsäquivalent gemäß Nato-CCMS; <sup>6)</sup> Anlage wurde in Überlast betrieben – Werte sind jeweils in Zeile 2 angegeben; <sup>7)</sup> ausschließlich Heimtierkremation; <sup>8)</sup> Pferdekremation teils parallel zu Heimtierkremation; <sup>9)</sup> Messwert mit 14 µg/Nm<sup>3</sup> wurde als „nicht plausibel“ verworfen (vgl. hierzu Ausführungen in 5.3.5.); <sup>10)</sup> keine Additivzugabe während der Messung.

Für sämtliche untersuchten Kleinanlagen **ohne** Abgasreinigung (Anlagen A bis C) kann festgehalten werden, dass mit der zum Einsatz kommenden Ofentechnik, bestehend aus einem Mehrkammerofensystem und meist mit einer sehr ausgeprägten Abgasnachbrennkammer ausgestattet, die verbrennungstechnischen Voraussetzungen zur Einhaltung der Emissionsparameter CO und Gesamt-C gegeben sind. Insgesamt lagen **alle** CO-Halbstundenmittelwerte unter 5,7 mg/Nm<sup>3</sup> und die für Gesamt-C unter 5,3 mg/Nm<sup>3</sup>. Die in den Genehmigungsbescheiden i. d. R. vorgegebenen Grenzwerte für CO mit 50 mg/Nm<sup>3</sup> und C<sub>Ges</sub> mit 20 bzw. 50 mg/Nm<sup>3</sup> werden mit deutlichem Sicherheitsabstand unterschritten. Die im vorliegenden Referentenentwurf zur Neufassung der TA Luft (Stand 16.07.2018) [36] vorgesehenen Grenzwerte für CO und C<sub>Ges</sub> werden somit auch gesichert eingehalten.

Die weiteren Emissionskonzentrationen sind weitgehend verbrennungsunabhängig. Die als Halbstundenmittelwerte gemessenen Staubemissionen der Anlagen A bis C liegen erwartungsgemäß im Bereich von 36,2 mg/Nm<sup>3</sup> und 134,3 mg/Nm<sup>3</sup>. Vergleicht man die Anlagen A und C, so könnten die unterschiedlichen Staubgehalte möglicherweise ein Indiz für unterschiedliche Betriebsweisen (z.B. Lastverhalten) sein, da während der Messkampagnen der Massendurchsatz in der Anlage A etwa um den Faktor 2 höher lag als bei Anlage C. Dieser Effekt lässt sich damit begründen, dass sich infolge höherer Beladung des Ofens höhere Gasgeschwindigkeiten einstellen, die den Mitriss von Staubpartikeln begünstigen. Inwieweit die Ofengeometrie sowie die Luft- und Gasführung im Ofen diese Effekte beeinflussen, lässt sich aus diesen Messkampagnen nicht bewerten. Die Schwefelemissionskonzentrationen werden

maßgeblich durch die Tierkörper (Gewicht und Fell) bestimmt. So wurden über alle Messungen Halbstundenmittelwerte für  $\text{SO}_x$  von  $30 \text{ mg/Nm}^3$  bis  $521 \text{ mg/Nm}^3$  festgestellt. Im Vergleich zur TA Luft bzw. dem Referentenentwurf können die Konzentrationsbegrenzungen auf  $350 \text{ mg/Nm}^3$  nicht in jedem Fall eingehalten werden; die alternativ festgeschriebenen  $\text{SO}_x$ -Massenstrombegrenzungen von  $1,8 \text{ kg/h}$  wurden jedoch bei jeder Messung unterschritten. Auch hier zeigt sich im Vergleich zwischen den Anlagen A und C, dass das unterschiedliche Lastverhalten die  $\text{SO}_x$ -Abgassituation beeinflusst. Nicht ganz so ausgeprägt war die festgestellte Bandbreite von  $86$  bis  $398 \text{ mg/Nm}^3$  für  $\text{NO}_x$  und  $27,2$  bis  $103 \text{ mg/Nm}^3$  für  $\text{HCl}$ . Für den Vergleich mit der TA-Luft gelten sinngemäß die gleichen Ausführungen wie bei  $\text{SO}_x$ . Die  $\text{HF}$ -Messungen lagen bei weniger als  $3 \%$  der festgestellten  $\text{HCl}$ -Konzentrationen und sind für weitere Betrachtungen vernachlässigbar. Gleiches gilt für Quecksilber, das im Gegensatz zur Humankremation, mit etwa  $1 \text{ µg/Nm}^3$  von untergeordneter Bedeutung ist. Die über einen Zeitraum von jeweils  $6 \text{ h}$  gemessenen Konzentrationen an PCDD und PCDF variierten zwischen  $0,010$  und  $0,065 \text{ ng TE/Nm}^3$ . Sie entsprechen somit der TA Luft und bestätigen die guten verbrennungstechnischen Eigenschaften der eingesetzten Ofentechnik.

Die untersuchten Anlagen **mit** Abgasreinigung zeigten bei den verbrennungsabhängigen Parametern ein vergleichbares Verhalten wie die zuvor beschriebenen Kleinanlagen. Mit Ausnahme des zweiten Messtages an Anlage D, an dem die Anlage in deutlicher Überlast betrieben wurde (vgl. hierzu Abschnitt 5.3.4), wurden bei den Anlagen D und E im Roh- wie im Reingas  $\text{CO}$ - und Gesamt-C-Konzentrationen festgestellt, die ebenfalls deutlich unter den für diese Anlagen festgelegten Grenzwerten von  $50 \text{ mg/Nm}^3$  für  $\text{CO}$ , respektive  $20 \text{ mg/Nm}^3$  für  $\text{C}_{\text{Ges}}$  lagen. Um den Einfluss der Überlastbedingungen an der Anlage D aufzuzeigen, wurden die Mittelwerte der gemessenen Halbstundenmittelwerte in Tabelle 32 separat ausgewiesen. Unter Überlastbedingungen lagen die  $\text{CO}$ -Konzentrationen im Mittel etwa um den Faktor  $7$  bis  $8$  höher als unter Normalbedingungen, wobei zudem in  $3$  von  $6$  Fällen die Grenzwerte im Reingas überschritten waren. Auch wenn bei  $\text{C}_{\text{Ges}}$  keine Grenzwertüberschreitung auftrat, so zeigte sich unter diesen Bedingungen ebenfalls eine deutliche Konzentrationserhöhung. Bei Anlage E zeigte sich lediglich kurz nach der Beschickung des Pferdekremationsofens ein erhöhter  $\text{CO}$ -Halbstundenmittelwert ( $19 \text{ mg/Nm}^3$ ) gegenüber dem sonstigen Betrieb, wobei es ansonsten nahezu unerheblich ist, ob parallel zum Heimtierkremationsofen auch der Pferdekremationsofen in Betrieb ist.

Die Rohgasstaubkonzentrationen lagen auch bei den Anlagen D und E in der Größenordnung der Reingaskonzentrationen in den Anlagen A bis C. Durch den Einsatz effektiver Gewebefilter, konnten in allen Betriebsphasen die Staubemissionen auf deutlich unter  $10 \text{ mg/Nm}^3$  gesenkt werden. Dies gilt auch für Messwerte der Anlage D unter Überlastbedingungen. Bei  $\text{SO}_x$  ergab sich, analog zu den Ergebnissen an den Anlagen A bis C, eine deutliche Abhängigkeit von der Tierkörperbeschickung (Gewicht und Fell). Besonders signifikant zeigen dies die Rohgasmessungen an Anlage D unter vorgenannten Überlastbedingungen. So wurde nicht nur ein erhöhter  $\text{SO}_x$ -Mittelwert von  $395 \text{ mg/Nm}^3$ , sondern eine Bandbreite der Halbstundenmittelwerte von  $214$  bis  $743 \text{ mg/Nm}^3$  festgestellt. Wie die Roh- und Reingasmessungen an den Anlagen D und E zeigen, kann durch den Einsatz bewährter Verfahren zur Trocken-sorption bei Verwendung geeigneter Additive die  $\text{SO}_x$ -Emission bis nahezu  $40 \%$  (Anlage D) reduziert werden. Die  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Roh- und Reingas der Anlagen D und E entsprechen den Emissionswerten der Anlagen A bis C. Der Umstand, dass auch unter Überlastbedingungen an der Anlage D kein nennenswerter Einfluss auf  $\text{NO}_x$  festzustellen war, könnte als Indiz gewertet werden, dass die Brennstoff- $\text{NO}_x$ -Bildung gegenüber der thermischen

NO<sub>x</sub>-Bildung von untergeordneter Bedeutung ist. Für eine abschließende Feststellung dieses Sachverhalts ist die Datenlage jedoch nicht zureichend. Auch bei HCl ergaben sich im Rohgas der Anlagen D und E etwa die Konzentrationen, wie sie im Reingas der Anlagen A bis C festgestellt wurden. Sehr deutlich fällt die HCl-Abscheideleistung bei Anlage D aus, wonach mit dem eingesetzten Trockensorptionsverfahren Abscheideleistungen von etwa 85 % erzielt werden können. Da bei Anlage E am ersten Messtag kein Additiv zum Einsatz kam, kann keine abschließende Bewertung der Leistungsfähigkeit dieser Abgasreinigungstechnik getroffen werden. Die Komponenten HF und Hg sind wie bei den Anlagen A bis C vernachlässigbar. Die Ergebnisse der PCDD/F-Messungen in Anlage D bestätigen die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Trockensorptionstechnik, die über ausreichend Abscheidungsreserven verfügt. Dass die PCDD/F-Emission am ersten Messtag an Anlage E deutlich über dem Grenzwert von 0,1 ng TE/Nm<sup>3</sup> liegt, ist auf das Fehlen des Additivs zurückzuführen. Es ist also zwingend, beim Einsatz der Trockensorptionstechnik eine ausreichende Dosierung mit geeignetem Additiv zu gewährleisten.

## 6 Handlungsempfehlungen

Die in diesem Vorhaben durchgeführte Datenerhebung und Messkampagnen haben gezeigt, dass aufgrund der uneinheitlichen Genehmigungspraxis in Deutschland Tierkrematorien unterschiedlichen Qualitätsstandards unterliegen. Auch ist davon auszugehen, dass der in der VDI 3890 formulierte Stand der Technik **nicht** von allen in Betrieb befindlichen Anlagen einzuhalten ist. Da unterschiedliche Qualitätsstandards in Bau und Betrieb der Tierkrematorien auch auf den Wettbewerb zwischen den Anlagenbetreibern Einfluss nehmen, wird dringend empfohlen, eine bundesweit einheitliche Regelung zu schaffen, die sich auf alle genehmigungsbedürftigen Anlagen gemäß Nrn. 7.12.1.2 und 7.12.1.3 des Anhangs 1 der 4. BImSchV erstreckt. Eine bundesweit einheitliche Regelung der Abgasemissionen könnte beispielsweise in einer eigenständigen BImSchV für Tierkrematorien verankert werden. Alternativ bietet sich an, die sich derzeit in der Neufassung befindliche TA Luft entsprechend anzupassen. Dies könnte im vorliegenden Referentenentwurf zur Neufassung der TA-Luft [36] in Abschnitt 5.4.7.8 -12 (Anlagen der Nummern 7.8 bis 7.12) ergänzend aufgenommen werden, zumal in diesem Abschnitt für folgende Schadstoffkomponenten ohnehin ausschließlich Emissionskonzentrationsgrenzwerte, bezogen auf 11 % O<sub>2</sub>, vorgesehen sind:

- Gesamtstaub: 20 mg/Nm<sup>3</sup>,
- Kohlenmonoxid: 50 mg/Nm<sup>3</sup>,
- Organische Stoffe: 20 mg/Nm<sup>3</sup>.

Die Massenstrombegrenzung für NO<sub>x</sub> mit 1,8 kg/h lässt sich nach Auswertung der in dieser Studie durchgeführten NO<sub>x</sub>-Messungen ohne Sekundärmaßnahmen einhalten, wobei der Referentenentwurf primärseitige Minderungsmaßnahmen (gestufte Verbrennung und Einsatz von stickstoffoxidadarmen Brennern) vorschreibt.

Ungeachtet ggf. für beide Anlagentypen unterschiedlich zu vollziehender Genehmigungsverfahren – großes Verfahren **mit** Öffentlichkeitsbeteiligung oder vereinfachtes Genehmigungsverfahren **ohne** Öffentlichkeitsbeteiligung gemäß § 19 des BImSchG – wird empfohlen, den technischen Qualitätsstandard für alle Tierkremationsanlagen dem Stand der Technik anzupassen. Vor diesem Hintergrund sind folgende Anforderungen an Tierkrematorien zu stellen:

1. **Ofentechnik:** Mehrkammerofensysteme haben sich insofern bewährt, als dass eine klare Trennung zwischen Kremationskammer (einschließlich Tierbeschickung und Aschenentnahme) und Abgasnachbrennkammer erreicht wird. Letztere sollte nicht nur zur Einhaltung der nach EU-Recht geforderten Temperatur-Verweilzeitbedingung (850 °C und 2 sec oder 1.100 °C und 0,2 sec), sondern auch mit ausreichend Turbulenzonen zur Sicherstellung der intensiven Verwirbelung der Reaktionspartner ausgestattet sein. Der Kremationsprozess ist entsprechend den Ausführungen in der VDI 3890 mit einer leistungsfähigen automatischen Prozesssteuerung zu regeln und zu überwachen. Auf Gewichtslimitierungen der zu kremierenden Tierkörper sollte im Zuge einer Neuregulierung verzichtet werden, da dies einer praxisorientierten Anwendung widerspricht. Mit der Ofenkonzeption als Mehrkammerofen sind durch die Trennung der Brennkammern Möglichkeiten zur gestuften Verbrennung (primärseitige Stickstoffoxidminderung) gegeben. Es wäre jedoch angezeigt, eine bundeseinheitliche Nachweisführung (Temperatur/Verweilzeit) für alle Krematorien, z. B. auf der Grundlage der VDI 3890, einzuführen.

2. **Abgasreinigungstechnik:** Jedes Tierkrematorium sollte mit einer leistungsfähigen Abgasreinigung ausgestattet sein. Die dafür erforderliche Technologie unter Einsatz von Gewebefiltern hat sich in der Humankremation seit mehreren Dekaden bewährt. Obwohl bei Kleinanlagen der Kategorie 7.12.1.3 der Abgasvolumenstrom mit etwa 1.000 Nm<sup>3</sup>/h um den Faktor 2 bis 3 geringer ausfällt als bei Humankrematorien, so haben die Staubmessungen bei derartigen Anlagen **ohne** Staubfilter Reingaskonzentrationen von durchschnittlich dem 10- bis 20-fachen im Vergleich zu den Reingaskonzentrationen der Humankremation ergeben. Dem kann mit leistungsfähigen Gewebefiltern abgeholfen werden. Da der Temperaturarbeitsbereich von Gewebefiltern nicht mit den Ableitbedingungen von Anlagen ohne Abgasreinigung in Einklang zu bringen ist, setzt der Einsatz von Gewebefiltern zwingend eine Abgaskonditionierung voraus.

Aus den in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen geht ferner hervor, dass insbesondere bei der Kremation von Tierkörpern mit langhaarigen Fellen, ein signifikanter Eintrag von Schwefel gegeben ist, der zur Bildung von Schwefeloxid bei der Verbrennung führt. Ebenso ist über den Tierkörper mit einem zusätzlichen Chloreintrag und damit mit HCl-Entstehung zu rechnen. Durch Zugabe geeigneter Additive, wie beispielsweise Calciumhydroxid, vor dem Gewebefilter, können, wie die Untersuchungen an Anlagen mit Abgasreinigung zeigten, derartige Schadstoffemissionen gesenkt werden. Der Einsatz dieser sogenannten Trockensorptionstechnik hat sich in der Humankremation vielfach bewährt und führt insbesondere unter Verwendung des Kugelrotorumlauverfahrens zu deutlichen Abscheideraten für SO<sub>x</sub> und HCl. Da der verfahrenstechnische Aufwand zwischen reiner Entstaubung mittels Gewebefilter und Anwendung der Trockensorptionstechnik vergleichsweise gering ist, bietet sich für derartige Kleinverbrennungsanlagen der Einsatz der Trockensorptionstechnik an.

Ein Tierkrematorium in Deutschland ist mit einer Abgasentstickung ausgestattet. Dabei kommt die SNCR-Technik zur Anwendung, wobei Harnstoff in der Nachverbrennung zugegeben wird. Obwohl diese Anlagentechnik grundsätzlich auch für Kleintierkrematorien einsetzbar ist, überwiegen die Nachteile, wie unvermeidbarer Ammoniakschlupf, aufwändige Prozesssteuerung zur Additiveindüsung in einem begrenzten Temperaturfenster der Nachbrennkammer und gesicherte Additivlagerung. Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, auf Sekundärmaßnahmen zur Abgasentstickung zu verzichten.

Dass durch den Einsatz des Trockensorptionsverfahrens zusätzliche Mehrkosten einhergehen, ist unbestritten. Die durchgeführte Kostenanalyse – unter Berücksichtigung von Bauwerkanteile – ergab, dass durch die Nachrüstung einer Kleinanlage mit einer Abgasreinigung die gesamten Betriebskosten für die Kremation um etwa 40 % im Einzelfall ansteigen; dies entspricht bezogen auf das Tierkörpergewicht Mehrkosten von etwa 1 Euro/kg. Aufgrund des hier vorgeschlagenen Verzichts der Mengenbeschränkung bei der Kremation lassen sich diese wirtschaftlichen Nachteile teilweise kompensieren.

3. **Emissionsgrenzwerte:** Unter Berücksichtigung der vorgenannten Handlungsempfehlungen zum Ofen und zur Abgasreinigung werden folgende einheitlichen Emissionsbegrenzungen (Bezug 11 % O<sub>2</sub>) für Heimtier- und Pferdekrematorien empfohlen:

- Kohlenmonoxid: 50 mg/Nm<sup>3</sup> (gemäß Referentenentwurf TA Luft [36])

- Gesamt-C: 20 mg/Nm<sup>3</sup> (gemäß [36])
- Staub: 20 mg/Nm<sup>3</sup> (gemäß [36])
- Stickstoffoxide (als NO<sub>2</sub>): 1,8 kg/h (gemäß [36])
- Schwefeloxide (als SO<sub>2</sub>): 200 mg/Nm<sup>3</sup>
- Chlorwasserstoff: 30 mg/Nm<sup>3</sup>
- PCDD/F: 0,1 ngTE/Nm<sup>3</sup>.

Analog zur Humankremation wird empfohlen eine kontinuierliche CO-Überwachung verpflichtend vorzusehen. Dies versetzt den Betreiber in die Lage, den Verbrennungsprozess optimal einzustellen und zu kontrollieren. Für die restlichen Emissionsparameter wird empfohlen, diese durch regelmäßig wiederkehrende Emissionsmessungen zu überprüfen. Der derzeitige Rhythmus der wiederkehrenden Emissionsmessungen hat sich als zweckmäßig erwiesen. Ergänzend hierzu könnte durch Nachweis der eingesetzten Additivmenge in Relation zur Kremationsmenge die Funktionalität der Trockensorptionstechnik überprüft werden.

## 7 Quellenverzeichnis

- [1] VDI-Richtlinie 3890: Emissionsminderung - Anlagen zur Heimtierkremation (Emission control - Pet cremation facilities), Berlin: Beuth-Verlag, März 2016.
- [2] Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Verordnung über tierische Nebenprodukte), ABl EU, 2009, Nr. L 300, S. 1–33.
- [3] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002, Beck-Texte, 15. Auflage, S. 775–942, 2018.
- [4] 17. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV): Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen, 2.05.2013, Beck-Texte, 15. Auflage, S. 352–386, 2018.
- [5] Verordnung (EU) Nr. 142/2011 der Kommission vom 25. Februar 2011 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte sowie zur Durchführung der Richtlinie 97/78/EG des Rates hinsichtlich bestimmter gemäß der genannten Richtlinie von Veterinärkontrollen an der Grenze befreiter Proben und Waren.
- [6] Petition 16/520 betr. Tierkrematorien, Genehmigungsverfahren. Landtag von Baden-Württemberg, Drucksache 16/2729.
- [7] 27. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV): Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung, 19.03.1997, Beck-Texte, 15. Auflage, S. 432–437, 2018.
- [8] Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG) vom 25. Januar 2004 (BGBl. I S. 82), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. August 2016 (BGBl. I S. 1966).
- [9] Moore, W. J., Hummel, D. O.: Physical Chemistry, 4th Edition, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1972.
- [10] Schetter, G.: Theorie und Praxis der Kremationstechnik, in: Krematorium - Aktualisierung der VDI-Richtlinie 3891, Fachverlag des deutschen Bestattungsgewerbes GmbH, 1. Auflage, 2011.
- [11] Bachmann, J., Kiecherer, J., Sommerer, J., Olzmann, M.: Einfluss der Temperatur in der Nachbrennkammer von Kremationsöfen auf die CO-Konzentration im Abgas, Gefahrstoffe – Reinhaltung Luft, Jahrg. 75, Nr. 4, S. 146 – 149, 2015.
- [12] Marutzky, R. U., Seeger, K.: Energie aus Holz und anderer Biomasse. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen, 1999.
- [13] <https://de.wikipedia.org/wiki/Keratine> und <https://de.wikipedia.org/wiki/Cystein>, abgerufen am 21.8.2018.
- [14] Schetter, G.: Thermische Behandlung edelmetallhaltiger Produktionsrückstände, in: K. J. Thomé-Kozmiensky, D. Goldmann, „Recycling und Rohstoffe - Band 4“, ISBN 978-3-935317-67-2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011.
- [15] Löschau, M.: Technik für den anlagenbezogenen Immissionsschutz am Beispiel von Abfallverbrennungsanlagen, in: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Löschau, „Immissionsschutz - Band 4“, S. 93–118, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014.
- [16] Zeldovic, J.: The oxidation of nitrogen in combustions and explosions, ACTA, Physiochemica, URSS, 21, 4, 1946.
- [17] Fenimore, C.P.: Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames. In 13th Symp. (Int'l.) on Combustion, page 373. The Combustion Institute, 1971.
- [18] Mangold, E.: Handbuch der Ernährung und des Stoffwechsels der landwirtschaftlichen Nutztiere als Grundlage der Fütterungslehre, insbes. Kap. XXI Chlor, S. 319 ff., Springer Verlag, 2013.

- [19] Schetter, G.: Anwendung physikalisch-chemischer Grundlagenkenntnisse zur Reduzierung des Austrages polychlorierter Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane aus Abfallverbrennungsanlagen. Dissertation, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 15, Nr. 95, 1992.
- [20] Schetter, G.: Möglichkeiten zur Verminderung des Austrages polychlorierter Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und -furane (PCDF) bei der Einäscherung, VDI-Seminar, Düsseldorf, 6./7.Dez. 2000.
- [21] Hagenmaier, H.: Katalytische Oxidation halogener Kohlenwasserstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Dioxinproblems, VDI-Berichte, Nr. 730, S. 239-254, 1989.
- [22] Düwel, U., Nottrodt, A., Ballschmiter, K.: Simultaneous sampling of PCDD/PCDF inside the combustion chamber and on four boiler levels of a waste incineration plant, International Dioxin Conference, Toronto, Canada, 1989.
- [23] Bachmann, J.: PCDD/F-Messwerte im Abgas von Tierkrematorien (anonymisiert), erhalten am 24.08.2018.
- [24] Petzoldt, O.: Erfahrungsbericht über den Einsatz katalytisch arbeitender Gewebefilter zum Abbau von Dioxinen und Furanen in Krematorien, in: Krematorium – Technische und betriebswirtschaftliche Tendenzen, Fachverlag des deutschen Bestattungsgewerbes GmbH, 1. Auflage 2009.
- [25] Bauer, T.: Verwendung von Natriumbicarbonat zur Neutralisation saurer Bestandteile in Abgasen, in: Karpf, R. (Hrsg.): Emissionsbezogene Energiekennzahlen von Abgasreinigungsverfahren bei der Abfallverbrennung, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 601-613, 2012.
- [26] Schetter, G., Djeradi, B.: Handbuch für bayerische Krematorien, FVB-Verlag, ISBN 978-3-936057-38-6, 2013.
- [27] Margraf, R.: Einfluss von Filterkonstruktion, Filterauslegung und Filtermaterialauswahl auf die Partikelabscheidung, in: Krematorium - Aktualisierung der VDI-Richtlinie 3891, Fachverlag des deutschen Bestattungsgewerbes GmbH, 1. Auflage, 2011.
- [28] von der Heide, B.: Möglichkeiten und Grenzen der SNCR-Verfahren; in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 601-627, 2012.
- [29] Schetter GmbH & Co. KG: Langzeituntersuchungen zu Emissions- und Schadstoffminderungen in Krematorien durch veränderte energieeffiziente Betriebsweisen, DBU-Schlussbericht AZ 31407/01, 2016.
- [30] VDI-Richtlinie 3891: Emissionsminderung - Anlagen zur Humankremation (Emission control - Human cremation facilities), Berlin: Beuth-Verlag, März 2013.
- [31] Schweiz: Luftreinhalte-Verordnung (LRV), vom 16. Dezember 1985 (Stand am 1. Juni 2018), <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19850321/201806010000/814.318.142.1.pdf>, abgerufen am 8.9.2018.
- [32] Niederlande: Activiteitenbesluit milieubeheer, geldend van 01-01-2018 t/m heden, <http://wetten.overheid.nl/BWBR0022762/2018-01-01>, abgerufen am 27.9.2018.
- [33] Frankreich: Arrêté du 06/06/18 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'autorisation au titre de la rubrique n° 2740 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (incinération de cadavres d'animaux) (applicable à compter du 1 er juillet 2018 pour les installations nouvelles), JORF n°139 du 19 juin 2018.
- [34] Schronen, H. : Mitteilung vom 13.9.2018.
- [35] Schetter, G., Bittig, M.: Umweltrelevanz und Stand der Technik bei Einäscherungsanlagen, Schlussbericht, Forschungskennzahl FKZ 3716 53 302 1, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2019.
- [36] Referentenentwurf zur Neufassung der TA Luft: <https://www.bmu.de/gesetz/entwurf-zur-neufassung-der-ersten-allgemeinen-verwaltungsvorschrift-zum-bundes-immissionsschutzgesetz/>, abgerufen am 5.10.2020.