

TEXTE

26/2020

Umweltrelevanz und Stand der Technik bei Einäscherungsanlagen

Abschlussbericht

TEXTE 26/2020

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 53 302 1
FB000195/1

Umweltrelevanz und Stand der Technik bei Einäscherungsanlagen

Abschlussbericht

von

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

Dr. Margot Bittig
Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V., Duisburg

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
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

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

Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.
Bliersheimer Straße 58-60
47229 Duisburg

Abschlussdatum:

August 2019

Redaktion:

Fachgebiet III 2.4 Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer
Sue Martina Starke

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2020

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

Kurzbeschreibung

Um einen Überblick über den Stand der Technik bundesdeutscher Krematorien zu bekommen, wurde eine Situationsanalyse durchgeführt. Sie basiert in einem ersten Schritt auf einer Datenerhebung der Krematorien in den einzelnen Bundesländern. Ergänzend hierzu wurde eine Klassifizierung der eingesetzten technologischen Baugruppen vorgenommen und hinsichtlich der 27. Bundes-Immissionschutz-Verordnung (27. BImSchV) sowie des Standes der Technik gemäß der VDI-Richtlinie 3891 bewertet.

Aufbauend auf der durchgeführten Datenerhebung wurden sechs Kremationslinien mit unterschiedlichen Ofen- und Abgasreinigungssystemen ausgewählt, um sie umfassenden Abgasmessungen zu unterziehen. Die Untersuchungen erstreckten sich auf die Abgasparameter der 27. BImSchV und Quecksilber. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden Handlungsempfehlungen für zukünftige Entscheidungen des Gesetzgebers abgeleitet, die sowohl auf bereits in der 27. BImSchV enthaltene Anforderungen zur Emissionsminderung als auch auf die Minderung der Quecksilberemissionen abstellen.

Abstract

In order to get an overview of the state of the art of German crematoria, a situation analysis was carried out. In a first step, it is based on a data collection of the crematoria sorted by the German federal states. In addition, a classification of the installed technologies was carried out and evaluated with regard to the 27th Federal Immission Control Ordinance (27th BImSchV) and the state of the art in accordance with VDI Guideline 3891.

Based on the results of the data collection of the crematoria in Germany in total six cremation lines with different oven and flue gas cleaning devices were selected for further emission measurements. These investigations dealt with the emission limitations according to the 27th BImSchV as well as with mercury. From these results policy recommendations were derived for further decisions which are focused on the existing emission values of the 27th BImSchV and on the reduction of mercury emissions.

Zusammenfassung

Mit dem durchgeführten Vorhaben sollte die Basis für einheitlich festzulegende Umweltstandards im Bereich der Krematorien gelegt und hinsichtlich Emissionen und Energieeffizienz optimierte Anlagenkonzepte erarbeitet werden. Damit dieses gelingen kann, müssen die für die Untersuchungen ausgewählten Anlagen einen möglichst repräsentativen Querschnitt der in Deutschland installierten Anlagentechniken widerspiegeln. In einem ersten Teil war daher eine Datenerhebung über alle in Deutschland in Betrieb befindlichen Krematorien erforderlich. In einem zweiten Teil sollten in einigen Krematorien die in der 27. BImSchV festgeschriebenen Schadstoffparameter – Kohlenmonoxid, Gesamtkohlenstoff, Staub sowie polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane (PCDD/F) – zuzüglich Quecksilber im Abgas vor und nach der jeweiligen Abgasreinigungstechnik gemessen werden.

Die bundesweite Datenerhebung hat ergeben, dass in den meisten Kremationsanlagen die technologischen Voraussetzungen zur Erfüllung des Standes der Technik, wie er in der VDI-Richtlinie 3891 beschrieben ist, gegeben sind. Berücksichtigt man jedoch, dass aufgrund des unterschiedlichen Verbrennungsverhaltens bei der Kremation in Einzelfällen Ereignisse auftreten können, die eine Überschreitung der vorgeschriebenen Kohlenmonoxidemissionsgrenzwerte als Stundenmittelwerte nach sich ziehen können, können trotz Umsetzung des Standes der Technik nach VDI 3891 die Vorgaben der 27. BImSchV (§4, Nr. 1) nicht immer eingehalten werden.

Offen ist hierbei die Frage, ob der in der VDI 3891 angegebene Erfahrungsbereich, wonach unter Berücksichtigung altersbedingter Abnutzung der Kremationsanlagen der Kohlenmonoxidgrenzwert in 97 bis 99 % der Fälle eingehalten werden kann, der tatsächlichen Situation in den Kremationsanlagen gerecht wird. Mit Blick auf eine mögliche zukünftige Novellierung der 27. BImSchV wäre es sinnvoll, die im Zuge der Datenerhebung erhaltenen Klassierungsprotokolle in entsprechender Weise auszuwerten und aufgrund dieser Auswertung Empfehlungen für einen Jahresperzentilwert für Kohlenmonoxid abzugeben.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen zur Temperaturabsenkung in der Nachverbrennung sollte vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele (Verminderung CO₂-Ausstoß) und Ressourcenschonung (Verminderung Sekundärenergieverbrauch) die derzeit in der 27. BImSchV verankerte Forderung zur Einhaltung der Nachverbrennungstemperatur von 850 °C angepasst werden, da durch geeignete Ofenkonstruktion und Betriebsweise die verbrennungsabhängigen Emissionsgrenzwerte auch bei niedrigeren Temperaturen mit ausreichendem Sicherheitsabstand eingehalten werden können. Die Erfahrungen, die in der Schweiz mit der Luftreinhaltung gemacht werden, bestätigen diesen Vorschlag. Auch mit Blick auf die bereits heute praktizierten Betriebsgenehmigungen von Elektroofensystemen, die abweichend von der Vorgabe der 27. BImSchV mit niedrigeren Nachverbrennungstemperaturen betrieben werden dürfen, könnte somit eine einheitliche Behandlung aller Kremationsofensysteme erreicht werden.

Die Untersuchungen zu den Quecksilberemissionen belegen, dass bei Anlagen, die ein Trockensorptionsverfahren oder ein Festbettfilter mit Sorbentien aus aktiviertem Kohlenstoff einsetzen, eine hohe Rückhaltung von Quecksilber von deutlich > 85 % erreicht werden kann. Darüber hinaus konnte jedoch festgestellt werden, dass es über Festbettfilter zur Desorption von Quecksilber kommt. Hier sollte diskutiert werden, inwieweit diese Technik für Neuanlagen weiterhin empfohlen werden sollte. Demgegenüber ist die Rückhaltung von Quecksilber an Anlagen ohne gezielte Hg-Minderungstechnik stark von den anlagenspezifischen Gegebenheiten abhängig. Die genannten und in der Studie untersuchten Techniken sind dabei repräsentativ für die hauptsächlich in der Praxis eingesetzten Verfahren.

Auf Basis der an diesen Anlagen erfassten Daten wird die Empfehlung ausgesprochen, dass jede Kremationsanlage mit einer leistungsstarken Quecksilberminderung ausgestattet sein sollte. Diese sollte vom Gesetzgeber gefordert werden.

Aufgrund des hohen Anteils an Anlagen mit Hg-Minderungstechnik (gemäß OSPAR-Bericht in 2014 144 von 159 Anlagen) und der damit erzielten hohen Hg-Abscheideleistung wird die derzeit in Deutschland aus Krematorien emittierte Hg-Fracht auf Basis der ermittelten Daten mit 25 kg/a abgeschätzt (in 2014 waren es 39 kg/a).

Weiterhin haben die Untersuchungsergebnisse gezeigt, dass eine kontinuierliche Erfassung der Quecksilberemissionen nur mit einem großen und für Kremationsanlagen unverhältnismäßigen Aufwand möglich ist. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse Minderbefunde im Vergleich zu den ermittelten Stundenmittelwerten nach DIN. Hier scheint ein systematischer Fehler vorzuliegen, der auf eine nicht vollständige Reduktion der zweiwertigen Quecksilberanteile zurückgeführt wird. Vom Einsatz kontinuierlich arbeitender Hg-Monitore hinter Kremationen wird abgeraten.

Das Ziel, Mensch und Umwelt vor Quecksilbereinträgen zu schützen, wird dann umfassend erreicht, wenn sichergestellt wird, dass die installierte Minderungsmaßnahme kontinuierlich arbeitet und hohe Quecksilbereinträge sicher abreinigt. Deshalb wird die Festlegung eines Mindestabscheidegrades in Abhängigkeit vom Quecksilbereintrag empfohlen, der unter definierten Bedingungen erreicht werden muss. Auf Basis der ermittelten Daten erscheint z. B. ein Abscheidegrad von 90 % bei einem Eintrag von 0,5 g Quecksilber denkbar. Die Kontrolle kann z. B. durch die Messung der Reingaskonzentration nach erfolgter Zugabe einer sog. Quecksilbertablette in einen Kremationszyklus realisiert werden. Die Überwachung des bestimmungsgemäßen, kontinuierlichen Betriebs der Abgasreinigungseinrichtung sollte in definierten Abständen und ggf. mit einer entsprechenden Nachweispflicht über den Adsorptionsverbrauch erfolgen.

Die Festlegung eines Bezugssauerstoffgehalts sollte sich an den für die Verbrennungsführung üblichen O₂-Gehalten orientieren. Auf Basis der innerhalb dieser Messkampagne ermittelten Daten erscheint ein Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol. % zu niedrig. Eine Umrechnung auf den Bezugs-O₂ sollte nur für Werte mit Betriebssauerstoffgehalten oberhalb des Bezugs-O₂ erfolgen. Als sinnvoll wird aus heutiger Sicht ein Bezugssauerstoffgehalt in der Größenordnung von 13 bis 15 Vol. % angesehen. Im Zuge einer Anpassung des Bezugssauerstoffgehalts wird zudem eine Harmonisierung mit dem Bezugssauerstoffgehalt für Elektroofensysteme, der derzeit bei 15 Vol. % liegt, empfohlen.

Summary

This research project was carried out in order to define uniform environmental standards for crematoria and optimized technical concepts regarding emission control as well as energy efficiency. In order to meet these objectives the crematoria chosen for investigation have to represent the majority of the installed cremation technology in Germany. Therefore, in a first step, a nationwide data collection was required of all crematoria in operation in Germany. In a second step emission measurements in the flue gas before and after flue gas treatment were examined in some of these crematoria regarding the emission parameters according to the 27th Ordinance on the Implementation of the Federal Air Pollution Control Act (27th BImSchV): carbon monoxide, total organic carbon, particulates and polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans as well as mercury.

The nationwide data collection has shown that most of the crematoria meet the technical requirements according to the state-of-the-art as defined in the VDI Guideline no. 3891. On the other hand, due to inhomogeneous combustion conditions in some cases unforeseen circumstances may have occurred during the process which lead to exceeded hourly mean values of carbon monoxide emission limits. Thus, the requirements of the 27th BImSchV (§4, no. 1) were not met in every case in spite of implementation of the state-of-the-art according to VDI 3891.

At this time it is uncertain whether the range for CO emissions given in VDI 3891 whereupon cremation plants supposedly meet CO limit values in 97 to 99 % of operation hours is matching the real operation situation in crematorium. Regarding a possible future amendment to the 27th BImSchV it

seems to be necessary to evaluate the collected CO classification protocols in order to provide a recommendation for a yearly percentile for carbon monoxide.

Results of recent investigations on the reduction of post combustion temperature lead to the conclusion that the requirement to meet at least 850 °C in the post combustion chamber, which actually is fixed in the 27th BImSchV, should be modified. Especially against the back-ground of efforts to reach climate protection goals (reduced CO₂ emission) and to reduce consumption of resources (reduced secondary energy use). Additionally, intelligent cremation design and operation conditions can ensure reaching emission limits with a sufficient safety margin at lower temperatures. The experiences from air pollution prevention in Switzerland confirm these observations. Additionally, a uniform treatment of all cremation furnace systems could be achieved: at the present operating permits for electrically heated furnace systems already allow for lower post combustion temperatures than specified in the 27th BImSchV.

On the results from mercury emission measurements show that plants using a dry sorption process or a fixed bed filter with sorbents containing activated carbon can achieve a high removal efficiency of mercury of > 85 %. However, in addition it was found that mercury may be desorbed across fixed-bed filters. This raises the question whether this technology should still be recommended for new plants. In contrast, the removal efficiency of mercury in plants without any Hg reduction technology is strongly dependent on the plant-specific conditions. The techniques mentioned and examined in the study are representative of the flue gas cleaning systems used in Germany.

Due to the results of the investigations it is recommended that every crematorium should be equipped with a powerful mercury reduction system. This should be required by legislation.

Thanks to the high proportion of plants with Hg reduction technology (144 of 159 plants according to the OSPAR report in 2014) and the resulting high Hg removal efficiency, the Hg load currently emitted from crematoria in Germany is estimated at 25 kg/a (39 kg/a in 2014).

Furthermore, the results of the investigations have shown that a continuous monitoring of mercury emissions is only possible with a large and for cremation plants disproportionate effort. In addition, the continuously measured values show lower results compared to the hourly mean values determined according to DIN. A systematic error seems to exist which is attributed to an incomplete reduction of the bivalent mercury. The use of continuously working Hg monitors behind cremation systems is therefore not recommended.

The objective of protecting people and the environment from mercury emissions is comprehensively achieved if it is ensured that the installed removal technology works continuously and safely reduces high mercury inputs. It is therefore recommended that a minimum removal efficiency should be determined in relation to the mercury input, which must be achieved under defined conditions. On the basis of the data obtained, a removal efficiency of e. g. 90 % with an input of 0.5 g mercury appears conceivable. This can be achieved, e. g. by measuring the clean gas concentration after the addition of a so-called mercury tablet to a cremation cycle. The monitoring of the intended continuous operation of the flue gas cleaning treatment should be carried out at defined intervals and, if necessary, with a corresponding obligation to provide evidence of adsorbent consumption.

The determination of an oxygen reference value should be geared to common oxygen content arising during combustion process. On the data base of the measurements carried out in this project the oxygen reference point of 11 Vol. % seems to be too low. An oxygen conversion referring to the oxygen reference point should be done only in that case if the measured oxygen content is higher than the oxygen reference point. From actual point of view an oxygen reference point in the order of 13 to 15 Vol. % seems to be reasonable. Within the context of modification of the oxygen reference point harmonisation can be achieved also with the oxygen reference point of electrically heated cremation systems which actually is fixed to 15 Vol. %.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Situationsanalyse zum Stand der Kremationstechnik	13
1.1 Datenerhebung	13
1.1.1 Methodik der Datenerhebung und Erfahrungen	13
1.1.2 Krematorien in Deutschland	13
1.1.3 Krematorien in Baden-Württemberg	13
1.1.4 Krematorien in Bayern	14
1.1.5 Krematorien in Brandenburg und in Berlin	15
1.1.6 Krematorien in Hessen	16
1.1.7 Krematorien in Niedersachsen und in der Freie Hansestadt Bremen	17
1.1.8 Krematorien in Nordrhein-Westfalen	17
1.1.9 Krematorien in Rheinland-Pfalz und im Saarland	18
1.1.10 Krematorien in Sachsen	19
1.1.11 Krematorien in Sachsen-Anhalt	20
1.1.12 Krematorien in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Mecklenburg- Vorpommern und in der Freie Hansestadt Hamburg	20
1.1.13 Krematorien in Thüringen	21
1.2 Installierte Kremationstechnik	22
1.2.1 Ofensysteme	22
1.2.2 Abgaskühlung	24
1.2.3 Abgasreinigung	25
1.3 Anforderungen an die Kremationstechnik	26
1.3.1 Kontinuierliche Messwerterfassung zur Überprüfung des CO-Grenzwertes	26
1.3.2 Wiederkehrende Einzelmessungen	28
1.3.3 Erweiterte Anforderungen zur CO ₂ -Reduzierung und Ressourcenschonung	28
2 Emissionsmessungen	29
2.1 Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen	29
2.2 Auswahl der zu untersuchenden Krematorien und Messprogramm	30
2.3 Anlage A	31
2.4 Anlage B	33
2.5 Anlage C	34
2.6 Anlage D	35

2.7	Anlage E	36
2.8	Anlage F	37
2.9	OSPAR Emissionsfaktoren.....	38
2.10	Bewertung der Quecksilbermessungen.....	39
3	Analyse der Emissionsminderungs- und Energieeinsparungspotenziale sowie Handlungsempfehlungen	43
3.1	Emissionsminderung – Schadstoffe nach 27. BImSchV	43
3.1.1	Verbrennungsabhängige Schadstoffe	43
3.1.2	Verbrennungsunabhängige Schadstoffe	45
3.1.3	Polychlorierte Dibenz-p-dioxine und -furane.....	46
3.2	Emissionsminderung – Quecksilber	47
3.3	Bezugssauerstoff zur Angabe der Emissionswerte	50
3.4	Gasverbrauch.....	51
3.5	Handlungsempfehlungen.....	52
4	Quellenverzeichnis.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Etagenofen und Flachbettöfen im Vergleich	22
Abbildung 2:	Elektroöfen – System Broggi ([1])	24
Abbildung 3:	Schema zur Abgaskühlung – Wasser-/Glykol-Kreislauf	25
Abbildung 4:	Einfluss von Anlagendefekten auf die CO-Klassenverteilung	27
Abbildung 5:	CO-Grenzwertüberschreitungen – Datenerhebung 2011 in Bayern ([1])	28
Abbildung 6:	Gemessene Quecksilberkonzentrationen im Rohgas einiger Krematorien ([2, 10])	29
Abbildung 7:	Kontinuierlicher Hg-Konzentrationsverlauf, aus Messbericht entnommen	42
Abbildung 8:	Verbrennungstechnische Zusammenhänge nach Schetter ([7]) und Bachmann et al. ([8])	43
Abbildung 9:	Schema einer sauerstoffgeregelten Verbrennungsluftführung ([1])..	44
Abbildung 10:	Typische PCDD/F-Homologenverteilung im Abgas bei unterschiedlicher Abkühlzeit ([7])	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Krematorien in Baden-Württemberg	14
Tabelle 2:	Krematorien in Bayern.....	15
Tabelle 3:	Krematorien in Brandenburg und in Berlin	16
Tabelle 4:	Krematorien in Hessen	16
Tabelle 5:	Krematorien in Niedersachsen und in der Freie Hansestadt Bremen	17
Tabelle 6:	Krematorien in Nordrhein-Westfalen.....	18
Tabelle 7:	Krematorien in Rheinland-Pfalz und Saarland.....	19
Tabelle 8:	Krematorien in Sachsen.....	19
Tabelle 9:	Krematorien in Sachsen-Anhalt	20
Tabelle 10:	Krematorien in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und der Freie Hansestadt Hamburg.....	21
Tabelle 11:	Krematorien in Thüringen.....	21
Tabelle 12:	Übliche Abgasreinigungsverfahren nach Krematorien.....	25
Tabelle 13:	Emissionsgrenzwerte für Krematorien und typische Bandbreite nach VDI 3891 [4]	26
Tabelle 14:	Krematorien für die Durchführung der Abgasmessungen	30
Tabelle 15:	Zeitliche Planung der Messkampagnen an den Kremationslinien.....	30
Tabelle 16:	Messkomponenten, Vorschriften und Normen	31
Tabelle 17:	Quecksilberemissionen aus Krematorien in Deutschland	38
Tabelle 18:	Hg-Emissionen aus den vermessenen Anlagen A bis F.....	39
Tabelle 19:	Quecksilberverteilung im Rohgas (Beispiel) in [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N.tr.}$], 9 Messungen.....	40
Tabelle 20:	Handelsüblich imprägnierte Aktivkohlen, Auszug aus VDI 3928 [18]	48
Tabelle 21:	Anforderungen an Aktivkohlen zur Imprägnierung für die Chemiesorption [19]	48
Tabelle 22:	Übersicht über die erreichte Hg-Minderung für unterschiedliche Techniken a) Rohgaswert > 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{n.tr}$ b) Rohgaswert < 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{n.tr}$	49
Tabelle 23:	Übersicht über die gemessenen O_2 -Gehalte, Angaben als Mittelwerte über Probenahmezeit in Vol.%.....	51
Tabelle 24:	Gasverbrauch einschließlich Aufheizbetrieb ([2,10]) und prozentuale Gaseinsparung im Vergleich zum Referenzpunkt 850 °C für vier Anlagen bei unterschiedlichen Mindesttemperaturen in der Nachbrennkammer.....	52

Abkürzungsverzeichnis

ETO	Etagenofen
FBO	Flachbettofen
FBA	Trockenadsorption mittels Festbettadsorber
FSA	Trockenadsorption nach dem Flugstromprinzip
GF	Gewebefilter
KRV	Kugelrotorumlaufverfahren
Nm³	Normkubikmeter

1 Situationsanalyse zum Stand der Kremationstechnik

Die Situationsanalyse basiert auf einer Datenerhebung bei allen Krematorien in Deutschland zum Stichtag 31.12.2015. Anhand dieser Datenerhebung wird eine Klassifizierung der eingesetzten technologischen Baugruppen vorgenommen und hinsichtlich der 27. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (27. BImSchV) sowie des Standes der Technik gemäß der VDI-Richtlinie 3891 bewertet. Des Weiteren werden die installierten Techniken auch mit Blick auf die Implementierung eines Emissionsgrenzwertes für Quecksilber analysiert.

1.1 Datenerhebung

1.1.1 Methodik der Datenerhebung und Erfahrungen

Um einen Überblick über den Stand der Technik in bundesdeutschen Krematorien zu bekommen, wurde ein Steckbrief entwickelt, der den Krematoriumsbetreibern übermittelt wurde. Der Rücklauf nach erfolgtem Versand brachte nicht das gewünschte Ergebnis. Daher wurde mit den einzelnen Betreibern und ggf. Eigentümern telefonisch Kontakt aufgenommen und die Notwendigkeit der Datenerhebung erläutert. In der Regel konnten die Krematoriumsbetreiber überzeugt werden, sich daran zu beteiligen.

Besonders schwierig war die Erhebung sensibler Daten, wie Anzahl der Kremationen und Bypassfälle in 2015. Bei der Anzahl der jährlichen Kremationen spielen Wettbewerbssituationen zwischen den einzelnen Krematorien eine entscheidende Rolle. Aufgrund der in vielen Telefonaten gewonnenen Eindrücke sind die Angaben der Einäscherungszahlen, wo vorhanden, als gesichert anzusehen.

Ein anderes Bild erhält man bei der Erfassung der Bypassfälle in 2015. Hierbei spielt die Sorge der Betreiber mit, dass durch Preisgabe dieser Daten möglicherweise Überprüfungen ihrer Kremationsanlage ausgelöst werden. Daher wurde nicht selten speziell die Angabe dieser Daten verweigert, bzw. es ist zu vermuten, dass diese Angaben eher „geschönt“ sind.

Vor diesem Hintergrund wurden die Daten in der Weise anonymisiert, dass sie nur, sofern überhaupt möglich, bundeslandbezogen angegeben werden.

1.1.2 Krematorien in Deutschland

Nach den vorliegenden Untersuchungen waren in Deutschland im Jahr 2015 insgesamt 154 Krematorien mit nahezu 300 Verfahrenslinien in Betrieb. Die exakte Anzahl der installierten Verfahrenslinien ließ sich nicht ermitteln, da einige, wenige Betreiber jegliche Unterstützung an der bundesweiten Datenerhebung ablehnten.

1.1.3 Krematorien in Baden-Württemberg

In 2015 waren in Baden-Württemberg 25 Krematorien mit insgesamt 37 Kremationslinien in Betrieb (Tabelle 1). Neuanlagen und Erweiterungen bestehender Kremationslinien sind in Planung bzw. seit dem Stichtag 31.12.2015 in Betrieb gegangen. Historisch bedingt sind in Baden-Württemberg derzeit 8 Kremationslinien mit Elektroofensystemen ausgerüstet; die restlichen Linien werden mit Gas befeuert. Von den 29 gasbefeuerten Ofensystemen sind 15 als sogenannte Etagenofen und 14 als Flachbettöfen ausgeführt. Bei der Abgasreinigung kommt überwiegend die Trockenadsorption nach dem Flugstromverfahren oder unter Verwendung von Festbettfiltern zum Einsatz. In den 37 Kremationslinien in Baden-Württemberg wurden im Jahr 2015 insgesamt 69.923 Kremationen durchgeführt. Von den Betreibern wurden im gleichen Zeitraum insgesamt 72 Bypassfälle angegeben.

Tabelle 1: Krematorien in Baden-Württemberg

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Aalen	2	ETO (Gas)	FSA + GF	2004	Privat
Albstadt	1	Elektroofen	FSA + GF	1979 / 2006	Kommunal
Baden-Baden	1	FBO (Gas)	FSA + GF	.../2015	Kommunal
Freiburg	2	FBO (Gas)	GF + FBA	1998 / 2014	Kommunal
Geislingen (Steige)	1	FBO (Gas)	GF + FBA	2000 / 2013	Kommunal
Heidelberg	2	Elektroofen	FSA + GF	2010 / 2015	Kommunal
Heilbronn	1	ETO (Gas)	MZ + GF (Kalk)	1905/.../ 2015	Kommunal
Karlsruhe ¹⁾	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1997/2009	Kommunal
Konstanz	1	FBO (Gas)	FSA + GF	.../2011/2016	Privat
Lahr	1	FBO (Gas)	FSA + GF	1998	Privat
LE-Leinfelden	1	Elektroofen	GF + FBA	1973/2000	Kommunal
Lörrach ²⁾	1	ETO (Gas)	Kat-GF	2001/2013	Kommunal
Ludwigsburg	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1991/2008	Kommunal
Mannheim	3	ETO (Gas)	GF + Kat	1984/2009/ Neuplanung	Kommunal
Osterburken	2	ETO (Gas)	Kat-GF	L1: 2010; L2: 2015	Privat
Pforzheim	1	FBO (Gas)	GF + FBA	1918/.../2014	Privat
Reutlingen	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2001/2010	Kommunal
Rutesheim	4	FBO (Gas)	GF + Kat + FBA	L1/2: 2003; L3/4:2013	Privat
Schwäbisch Gmünd	2	FBO (Gas)	GF+FBA (Patronen)	L1: 2004; L2: 2007	Privat
Schwäbisch Hall ³⁾	1	FBO (Gas)	GF + Kat + FBA	2009	Privat
Singen	1	Elektroofen	FSA + GF	1972/2003	Kommunal
Stuttgart ⁴⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1906/.../2005	Kommunal
Tuttlingen	1	Elektroofen	FSA + GF	1983 / 2004	Kommunal
Ulm	2	Elektroofen	GF + FBA	1994/2000 (AGR)	Kommunal
Villingen- Schwenningen ⁵⁾	1	ETO (Gas)	Kat-GF	1992/2000/2010	Kommunal

Hinweise: ¹⁾ Erweiterung um 3. Linie in 2017 vorgesehen; ²⁾ Erweiterung um baugleiche Linie 2 in 2016 erfolgt; ³⁾ Erweiterung um Linie 2 in 2016 erfolgt; ⁴⁾ Installation 3 Linien; nur 1 Linie in Betrieb; ⁵⁾ Erweiterungsbau mit 2 Linien in 2018 vorgesehen.

1.1.4 Krematorien in Bayern

In Bayern waren im Jahr 2015 insgesamt 21 Krematorien mit 39 Kremationslinien in Betrieb (Tabelle 2). Die 3. Verfahrenslinie im Krematorium Vilshofen ist zwischenzeitlich in Betrieb gegangen; weitere Krematorien haben nach dem Stichtag der Datenerhebung ebenfalls ihren Betrieb aufgenommen. Bis auf die beiden Elektroofenlinien in Bayreuth handelt es sich ausschließlich um gasbefeuerte Kremationsöfen, wovon 19 als Flachbettöfen und 18 als Etagenöfen ausgeführt sind. Auch in Bayern hat sich

die Trockenadsorption und hier meist nach dem Flugstromprinzip durchgesetzt. Lediglich in 4 Krematorien (5 Linien) kommt die katalytische Filtration zum Einsatz. Einige Kremationslinien sind mit einer Kombination aus Gewebefilter, Katalysatorbaugruppe und Festbettadsorber ausgestattet. In Bayern wurden im Jahr 2015 insgesamt ca. 77.000 Kremationen durchgeführt. Die Angaben eines Krematoriums liegen nicht vor. Von den Betreibern wurden im gleichen Zeitraum insgesamt knapp 100 Bypassfälle angegeben.

Tabelle 2: Krematorien in Bayern

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Aschaffenburg	1	ETO (Gas)	Kat-GF	1996 /2015	Privat
Augsburg	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2000 / 2008	Kommunal
Bayreuth	2	Elektroofen	FSA + GF	1984 / 2004	Kommunal
Coburg	1	ETO (Gas)	Kat-GF	1998 / 2007	Kommunal
Fürstenzell	2	FBO (Gas)	FSA + GF	2004	Privat
Giebelstadt	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2012	Privat
Hof	1	ETO (Gas)	FSA + GF	L1: 1999; L2: 2004	Kommunal
Hohenburg ¹⁾	2	ETO (Gas)	FSA + GF	2008	Privat
Kempten	4	FBO (Gas)	GF + Kat + FBA	L1-2: 1997 L3-4: 2004	Privat
Kissing	2	FBO (Gas)	GF + Kat + FBA	L1: 2011; L2: 2015	Privat
Lindau	1	ETO (Gas)	Kat-GF	2010	Kommunal
Mainburg	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2008	Privat
Memmingen	2	FBO (Gas)	FSA + GF	2006	Privat
München	5	FBO (Gas)	FSA + GF	1980 / 1996	Kommunal
Nürnberg	3	ETO (Gas)	FSA + GF	2012	Kommunal
Regensburg	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1980 / 2006	Kommunal
Schweinfurt	2	ETO (Gas)	Kat-GF	1996 / 2011	Kommunal
Selb	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2004	Kommunal
Traunstein	2	FBO (Gas)	FSA + GF	L1: 2000; L2: 2010	Privat
Vilshofen ²⁾	2	FBO (Gas)	GF + Kat + FBA	L1: 2003; L2: 2011	Privat
Weißenburg	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2014	Privat

Hinweise: ¹⁾ 2. Linie Ende 2015 in Betrieb gegangen; ²⁾ 3. Linie in 2016 fertiggestellt.

1.1.5 Krematorien in Brandenburg und in Berlin

In Brandenburg wurden im Jahr 2015 insgesamt 8 Krematorien betrieben. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung waren insgesamt 13 Kremationslinien in Betrieb. Die in Tabelle 3 angegebenen technischen Informationen entstammen aus den im Internet zugänglichen Hersteller-Referenzangaben. Der Betreiber der beiden Berliner Krematorien hat sich an der Datenanfrage beteiligt und Auskünfte über den installierten Stand der Technik erteilt. Angaben über die in 2015 durchgeführten Kremationen und dabei festgestellten Bypassfälle wurden nicht angegeben.

Tabelle 3: Krematorien in Brandenburg und in Berlin

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Brandenburg ¹⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2006	Privat
Cottbus ¹⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2005	Privat
Eberswalde ²⁾	2	FBO (Gas)	FSA + GF	2011/2013	Privat
Forst/Lausitz	2	k. A.			Privat
Hennigsdorf ¹⁾	2	ETO (Gas)	FSA + GF	2005/2011	Privat
Herzberg ³⁾	2	FBO (Gas)	GF + FB (Patronen)	2002	Privat
Perleberg ¹⁾	2	ETO (Gas)	FSA + GF	2003/2016	Privat
Potsdam	1	k. A.			Kommunal
Berlin - Baum- schulenweg	3	ETO (Gas)	FSA + GF	1999 / 2008-2014	Kommunal
Berlin - Ruhleben	4	ETO (Gas)	FSA + GF	1976/... / 2014- 2015	Kommunal

Hinweise: ¹⁾ Referenzliste IFZW; ²⁾ Referenzliste Heinicke (Lichterfelde); ³⁾ Referenzliste Metall-Technik.

1.1.6 Krematorien in Hessen

In Hessen waren im Jahr 2015 insgesamt 8 Krematorien mit 16 Kremationslinien in Betrieb (Tabelle 4). Von drei Betreibern waren keine Auskünfte über die Krematorien bzw. deren Kremationszahlen in 2015 zu erhalten. Soweit aus Hersteller-Referenzangaben verfügbar, wurde der Stand der installierten Systeme in Tabelle 4 komplettiert.

Tabelle 4: Krematorien in Hessen

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Darmstadt	2	ETO (Gas)	FSA + GF	2001	Kommunal
Diemelstadt ¹⁾	2	ETO (Gas)	FSA + GF	L1: 2002; L2: 2003	Privat
Friedberg ²⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1998/.../2008	Privat
Gießen	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1997/8 ...2014/5	Kommunal
Hanau	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2003/2015	Kommunal
Kassel	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2000/2011	Kirchlich
Obertshausen	2	FBO (Gas)	GF + Kat + FBA	L1: 2003; L2: 2004	Privat
Offenbach ³⁾	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1996/2015	Privat
Wetzlar ⁴⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1994/2009	Kommunal
Wiesbaden	2	ETO (Gas)	FSA + GF	L1: 2007 / L2: 2011	Privat

Hinweise: ¹⁾ ETO + FSA + GF der Fa. IFZW installiert; Referenzliste IFZW; ²⁾ ETO (RV/HSA) + FSA +GF (Lühr); keine weiteren Informationen erhältlich; ³⁾ ETO (HSA) + FSA +GF (Lühr); keine weiteren Informationen erhältlich; ⁴⁾ nur eine Linie in Betrieb; die zweite Linie müsste ggf. saniert werden.

Aufgrund der nicht erteilten Auskünfte einiger Betreiber können für Hessen keine Angaben über die in 2015 durchgeführten Kremationen gemacht werden. Unterstellt man für diese Krematorien etwa die gleiche Kremationsleistung wie für die anderen in Hessen betriebenen Krematorien, so kann man von einer Größenordnung von etwa 30.000 Kremationen in 2015 ausgehen.

1.1.7 Krematorien in Niedersachsen und in der Freien Hansestadt Bremen

In diesem Abschnitt werden die Krematorien in Niedersachsen sowie des Bundeslandes „Freie Hansestadt Bremen“, d. h. Bremen und Bremerhaven, zusammengefasst. In diesem Gebiet waren in 2015 insgesamt 17 Krematorien in Betrieb, wobei jeweils eines in Bremen und Bremerhaven steht (Tabelle 5). Über die Anzahl der insgesamt installierten Kremationslinien liegen mangels Betreiberinformationen derzeit keine gesicherten Informationen vor. Man kann für das Jahr 2015 von mindestens 27 in Betrieb befindlichen Verfahrenslinien ausgehen.

Für die Krematorien Celle, Cuxhaven, Hildesheim und Stade wurden, soweit verfügbar, die in der Referenzliste der Fa. IFZW GmbH zur Verfügung gestellten Informationen in Tabelle 5 aufgenommen. Für die Krematorien Hameln und Bremen waren ebenfalls keine Informationen erhältlich. In 3 Fällen liegen darüber hinaus keine Angaben zur Anzahl der Kremationslinien vor.

Angaben über die in 2015 durchgeführten Kremationen und aufgetretenen Bypassfälle liegen nicht vor.

Tabelle 5: Krematorien in Niedersachsen und in der Freien Hansestadt Bremen

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Aurich	1	FBO (Gas)	FSA + GF	2008/2016	Privat
Braunschweig ¹⁾	3	ETO (Gas)	FSA + GF	... / 2015	Privat
Celle ²⁾	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	Privat
Cuxhaven ³⁾	1	ETO (Gas)	k. A.	Ofen 1996	Privat
Emden	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2009	Privat
Göttingen	2	ETO (Gas)	FSA + GF		Kommunal
Hameln ⁴⁾	k. A.	k. A.	k. A.		Privat
Hannover ⁵⁾	4	FBO (Gas)	FSA + GF	...1960...2007	Privat
Hildesheim ³⁾	2	ETO (Gas)	FSA + GF	L1: 2006; L2: 2009	Privat
Lüneburg ⁴⁾	1	k. A.	k. A.		Privat
Oldenburg	1	FBO (Gas)		Sanierung 2000	Kommunal
Osnabrück	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1994-5 / 2008-9	Kommunal
Stade ³⁾	2	ETO (Gas)	FSA + GF	L1: 1999; Ofen2: 2002	Privat
Verden (Aller) ⁶⁾	2	FBO (Gas)	FSA + GF	2005 / 2012	Privat
Wilhelmshaven	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2000	Kommunal
Bremen ⁷⁾	k. A.	k. A.			Kommunal
Bremerhaven ⁸⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2003	Kommunal

Hinweise: ¹⁾ Informationen teilweise aus Referenzliste IFZW; ²⁾ keine Angaben erhältlich; keine Informationen im Internet verfügbar; ³⁾ Referenzliste IFZW; ⁴⁾ keine Angaben erhältlich; keine Informationen im Internet verfügbar; Anzahl der Linien unklar; ⁵⁾ meist sind nur 2 bis 3 Linien in Betrieb; ⁶⁾ Referenzliste H.R. Heinicke; ⁷⁾ Anzahl der Linien ist unklar; ⁸⁾ Referenzliste IFZW/KAH.

1.1.8 Krematorien in Nordrhein-Westfalen

In 2015 wurden in Nordrhein-Westfalen 19 Krematorien betrieben. Sie sind mit insgesamt 43 Kremationslinien ausgestattet. Im Krematorium Essen (3 Linien) befand sich nach Betreiberangaben eine Verfahrenslinie über das gesamte Jahr 2015 zur Komplettsanierung außer Betrieb und stand erst im

Januar 2016 wieder für Kremationen zur Verfügung. Für die Krematorien in Dortmund und in Mechernich liegen keine Informationen über Anlagentechnik und Betriebsdaten vor.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Datenerhebung für Nordrhein-Westfalen aufgeführt. Von einigen Betreibern wurden Angaben zu den in 2015 durchgeführten Kremationen sowie zu den aufgetretenen Bypassfällen gemacht. Die Datenlage lässt jedoch keine Rückschlüsse auf das gesamte Bundesland zu.

Tabelle 6: Krematorien in Nordrhein-Westfalen

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Aachen	2	ETO (Gas)	GF + FBA	1998/.../2015	Kommunal
Bielefeld	3	ETO (Gas)	FSA + GF		Kommunal
Bochum	2	FBO (Gas)	Kat-GF	1992 /.../ 2006	Kommunal
Dortmund ¹⁾	3	k. A.			Kommunal
Düsseldorf	3	ETO (Gas)	Kat-GF	1981 / 2004	Kommunal
Duisburg	2	ETO (Gas)	FSA + GF	2002/15	Kommunal
Dülmen	2	FBO (Gas)	GF + FBA	L1: 2007; L2: 2010	Privat
Essen ²⁾	3	ETO (Gas)	Kat-GF	L1/2: 1977/8; L3: 2005	Kommunal
Hagen	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2008	Kommunal
Hamm ³⁾	4	2FBO/2ETO	FSA + GF		Privat
Köln	3	ETO (Gas)	FSA + GF	1980/2014-16	Kommunal
Lüdenscheid	2	FBO (Gas)	FSA + GF	L1: 2005/11 L2: 2012/15	Privat
Mechernich ⁴⁾	2	k. A.			Privat
Minden	2	ETO (Gas)	FSA + GF	L1: 2004/16 L2: 2008/16	Privat
Siegen	2	ETO (Gas)	FSA + GF	L1: 2005; L2: 2009	Privat
Waltröp	2	FBO (Gas)	GF + FBA	2012	Privat
Werl	2	ETO (Gas)	FSA + GF	2007	Privat
Willich	2	FBO (Gas)	FSA + GF	L1: 2009/13; L2: 2012	Privat
Wuppertal ⁵⁾	2	FBO (Gas)	FSA + GF	2008	Privat

Hinweise: ¹⁾ keine Angaben erhältlich; keine Informationen im Internet verfügbar; ²⁾ Linie 1 wurde in 2015 (IBN 01/2016) komplett saniert; ³⁾ Referenzliste IFZW; ⁴⁾ keine Angaben erhältlich; keine Informationen im Internet verfügbar; ⁵⁾ Herstellerangaben.

1.1.9 Krematorien in Rheinland-Pfalz und im Saarland

In Rheinland-Pfalz waren in 2015 insgesamt 7 Krematorien mit 16 Kremationslinien in Betrieb. In 2016 wurde zwischenzeitlich in einem dieser Krematorien eine weitere Kremationslinie nachgerüstet. Im Saarland sind die beiden Krematorien Saarbrücken und Völklingen mit jeweils zwei Linien unter Führung einer Gesellschaft zusammengefasst. Um die Anonymität der sensiblen Daten (Kremationszahlen und Bypassfälle) in 2015 zu gewährleisten, beruhen diese Angaben auf allen in Tabelle 7 angegebenen Krematorien.

Da von dem Krematorium in Hermeskeil keine Angaben zu den in 2015 durchgeführten Kremationen vorliegen, kann die in den beiden Bundesländern in 2015 durchgeführten Kremationen nur unter Berücksichtigung der von den anderen Betreibern gemachten Angaben näherungsweise abgeschätzt werden. Man kann davon ausgehen, dass in beiden Bundesländern insgesamt etwa 60.000 Kremationen durchgeführt wurden. Für das Jahr 2015 wurden von den Betreibern insgesamt mindestens 16 Bypassfälle angegeben.

Tabelle 7: Krematorien in Rheinland-Pfalz und Saarland

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Braubach-Dachsenhausen ¹⁾	5	ETO (Gas)	L1-4: GF+FBA L5/6: FSA+GF	2001 /.../ 2016	Privat
Enkenbach	1	FBO (Gas)	GF + Kat + FBA	2013/2016	Privat
Hermeskeil	2	FBO (Gas)	GF + FBA	L1: 2005 /15 L2: 2009/16	Privat
Koblenz ²⁾	2	FBO (Gas)	FSA + GF	L1: 1998 /14; L2: 2000 /15	Kommunal
Landau	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1997 / 2001	Privat
Ludwigshafen	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1993 / 2016	Kommunal
Mainz	2	FBO (Gas)	FSA + GF	L1:2010/15; L2: 2013	Privat
Saarbrücken	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1995 / 2009	Kommunal
Völklingen	2	ETO (Gas)	FSA + GF	L1:2005; L2: 2013	Kommunal

Hinweise: ¹⁾ in 2016 ging die weitere Linie 6 in Betrieb; ²⁾ beide Ofenlinien werden auf eine gemeinsame Abgasreinigung und Emissionsmessstelle geführt.

1.1.10 Krematorien in Sachsen

Im Jahr 2015 waren in Sachsen 10 Krematorien mit insgesamt 19 Verfahrenslinien in Betrieb. Abgesehen vom Krematorium Leipzig, haben sich alle Betreiber an den Datenerhebungen beteiligt (Tabelle 8). Aufgrund der fehlenden Daten können die im Jahr 2015 durchgeführten Kremationen nur abgeschätzt werden. Man kann näherungsweise von etwa 40.000 bis 42.000 Kremationen in Sachsen ausgehen.

Tabelle 8: Krematorien in Sachsen

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Chemnitz	4	ETO (Gas)	FSA + GF	1992 / 2012	Kommunal
Döbeln ¹⁾	2	FBO (Gas)	Papier-F + Kat	1996 / 2015-16	Privat
Dresden	4	ETO (Gas)	Kat-GF	2004 / 2015	Kommunal
Görlitz	1	ETO (Gas)	GF+ FBA	1993 / 2012	Kommunal
Leipzig	2	k. A.			Kommunal
Meißen ¹⁾	2	ETO (Gas)	GF+MS-FBA+Kat	1931...1993/1999	Kommunal
Plauen ²⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	L1:1918/2016;L2:20 08	Kommunal

Reichenbach-Vogtland	1	ETO (Gas)	Kat-GF	1930/1996-1998	Kommunal
Zittau	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1996/2011	Kommunal
Zwickau ²⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1998/2012	Kommunal

Hinweise: ¹⁾ beide Ofenlinien werden auf eine gemeinsame Abgasreinigung und Emissionsmessstelle geführt; ²⁾ zwei Ofenanlagen, die alternierend auf eine AGR geführt werden.

Auf zwei technologische Besonderheiten sei bei den in Sachsen installierten Abgasreinigungsverfahren hingewiesen. Im Krematorium Döbeln war ein Filter installiert, das mit gefaltetem Papier bestückt war und mit einem Aerosol befeuchtet werden musste. Dies wurde zwischenzeitlich durch ein branchenübliches Gewebefilter ersetzt. Im Krematorium Meißen ist ein Mehrschicht-Festbettadsorber (MS-FBA) zwischen einem Gewebefilter und einem Katalysator installiert.

1.1.11 Krematorien in Sachsen-Anhalt

In Sachsen-Anhalt waren in 2015 insgesamt 8 Krematorien mit 17 Verfahrenslinien in Betrieb (Tabelle 9). Da nur etwa 50 % der Betreiber Angaben zu den Kremationszahlen in 2015 gemacht haben, kann die Gesamtzahl der Kremationen in Sachsen-Anhalt nicht abgeschätzt werden.

Tabelle 9: Krematorien in Sachsen-Anhalt

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Dessau	3	ETO (Gas)	Kat-GF	1993 / 2001	Kommunal
Eisleben	1	ETO (Gas)	GF + FB	1930/.../2014	Kommunal
Halle	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1992 / L1:2009; L2:2016	Privat
Kabelsketal	3	ETO (Gas)	L1-2: GF+FB L3: FSA+GF	L1: 2004; L2: 2004- 16 L3: 2014	Privat
Magdeburg ¹⁾	3	FBO (Gas)	FSA + GF	k. A.	Kommunal
Quedlinburg ²⁾	2	FBO (Gas)	FSA + GF	L1: 1999; L2: 2002	Privat
Schönebeck	2	FBO (Gas)	FSA + GF	2008 / 2014	Kommunal
Stendal	1	FBO (Gas)	Kat-GF	1993 / 2001	Privat

Hinweise: ¹⁾ Referenzliste Heinicke, sofern verfügbar ²⁾ Referenzliste IFZW

1.1.12 Krematorien in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und in der Freien Hansestadt Hamburg

Zur Wahrung der Anonymität bei den sensiblen Daten werden die Krematorien in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und der Freien Hansestadt Hamburg tabellarisch zusammengefasst (Tabelle 10). Nach den bislang vorliegenden Erkenntnissen waren im Jahr 2015 in diesen Bundesländern 11 Krematorien mit insgesamt 24 Verfahrenslinien in Betrieb. Die in Tabelle 10 angegebenen Informationen sind weitgehend den Referenzlisten der Firmen H. R. Heinicke GmbH sowie IFZW GmbH entnommen. Es liegen keine Angaben über die Anzahl der durchgeführten Kremationen und der aufgetretenen Bypassfälle in 2015 vor.

Tabelle 10: Krematorien in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und der Freie Hansestadt Hamburg

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Schleswig-Holstein					
Ahrensburg	2	FBO (Gas)	FSA + GF	2008/2014	Privat
Flensburg ¹⁾	2	FBO (Gas)	FSA + GF	1995/2006	Kommunal
Kiel	4	FBO (Gas)	FSA + GF	1994/2001	Privat
Lübeck	2	FBO (Gas)	FSA + GF	1998	Privat
Tornesch	1	FBO (Gas)	FSA + GF	2004	Privat
Mecklenburg-Vorpommern					
Greifswald	2	ETO (Gas)	FSA + GF	1997/...	Kommunal
Neubrandenburg	2	FBO (Gas)	FSA + GF	.../2007	Privat
Rostock ²⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1996/...	Kommunal
Schwerin	2	FBO (Gas)	FSA + GF	.../2000	Kommunal
Hamburg					
HH-Ohlsdorf	2	FBO (Gas)	FSA + GF	2011	Privat
HH-Öjendorf	4	FBO (Gas)	FSA + GF	2000/2010	Privat

Hinweise: ¹⁾ keine Angaben erhältlich; Informationen aus Internetrecherche; ²⁾ beide Ofenanlagen werden alternierend auf eine Abgasreinigung geführt.

1.1.13 Krematorien in Thüringen

Das älteste Krematorium in Deutschland wurde im Jahr 1878 in Gotha errichtet und in Betrieb genommen. Nach mehreren Umbauten und Modernisierungen gehört es zu den 14 Krematorien in Thüringen, die 2015 mit insgesamt 18 Verfahrenslinien in Betrieb waren (Tabelle 11). Die aufgeführten Angaben für das Krematorium Nohra-Kinderode sind der Referenzliste der Fa. H. R. Heinicke GmbH entnommen.

Da die Kremationszahlen für das Jahr 2015 nur zum Teil vorliegen, lässt sich die Gesamtzahl der in Thüringen in 2015 durchgeführten Kremationen nicht zuverlässig abschätzen. Die angegebenen By-passfälle lagen bei über 40.

Tabelle 11: Krematorien in Thüringen

Krematorium	Linien	Ofentechnik	Abgasreinigung	Baujahr/Sanierung	Betriebsform
Altenburg ¹⁾	2	ETO (Gas)	Kombiblock + Kat + GF	1993/L1: 2012; L2: 2016	Kommunal
Erfurt	2	ETO (Gas)	FSA+GF	1995	Kommunal
Gera	1	ETO (Gas)	GF + FBA	1999	Kommunal
Gotha	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1878 /... / 1999 / 2016	Privat
Jena ²⁾	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1898 /.../ 1996	Kommunal
Meiningen ³⁾	2	FBO (Gas)	FSA + GF	L1: 2012; L2: 2015	Privat
Nohra-Kinderode ⁴⁾	2	FBO (Gas)	FSA + GF	k. A.	Privat

Nordhausen ⁵⁾	1	ETO (Gas)	2 stufig FBA	1996/2001	Kommunal
Ronneburg	1	ETO (Gas)	FSA + GF	2009	Privat
Schmalkalden ⁶⁾	1	FBO (Gas)	FSA + GF	L1:1994/09; L2:1998/09	Kommunal
Sondershausen	1	ETO (Gas)	Kalkzugabe + GF	2010/2014	Kommunal
Sonneberg	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1994/2014	Kommunal
Suhl	1	ETO (Gas)	FSA + GF	1997/2008	Kommunal
Weimar	1	ETO (Gas)	FSA + GF	k. A.	Kommunal

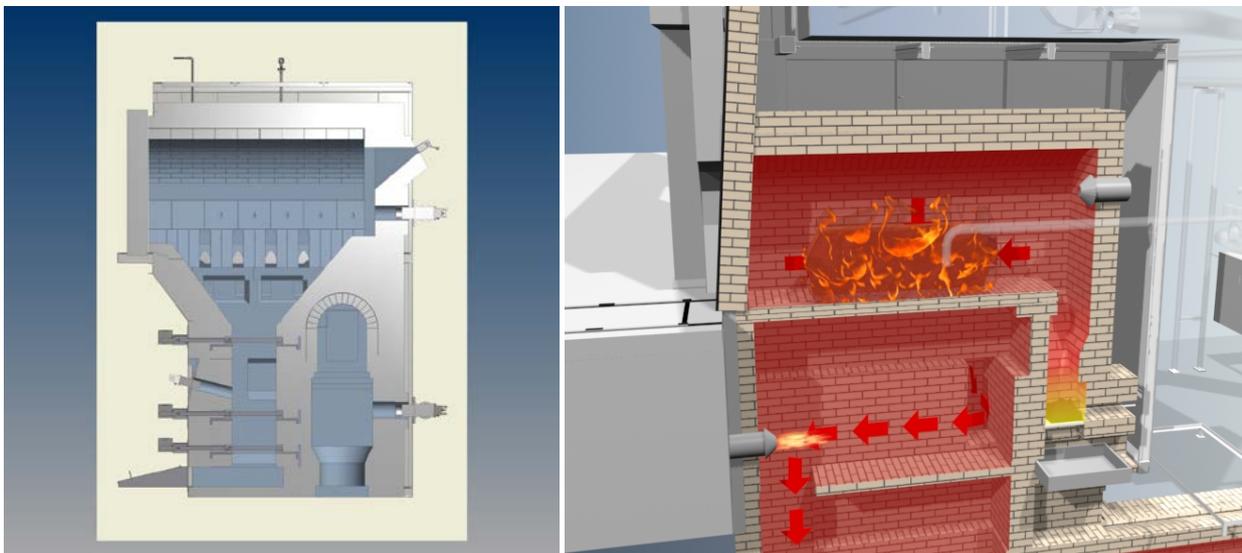
Hinweise: ¹⁾ beide Ofenanlagen werden alternierend auf eine Abgasreinigung geführt; ²⁾ das alte Krematorium wurde 2016 durch ein neues am gleichen Standort ersetzt; ³⁾ 2. Linie in 2015 in Betrieb gegangen; ⁴⁾ Referenzen Heinicke; ⁵⁾ vorübergehend stillgelegt; ⁶⁾ von zwei Linien ist nur eine in Betrieb.

1.2 Installierte Kremationstechnik

1.2.1 Ofensysteme

Alle Kremationsofensysteme sind als Mehrkammerofensysteme ausgeführt. Sie unterscheiden sich sowohl in der Art der Befeuerung – gasbefeuert oder elektrisch – sowie im konstruktiven Aufbau. Bei den gasbefeierten Kremationsofensystemen haben sich die beiden Systeme – Etagenofen und Flachbettofen – in Deutschland etabliert (Abbildung 1).

Abbildung 1: Etagenofen und Flachbettofen im Vergleich



Links: Etagenofen (Quelle: IFZW GmbH); rechts: Flachbettofen (Quelle: H.R. Heinicke GmbH)

Etagenofensysteme sind dadurch gekennzeichnet, dass der ofeninterne Aschetransport über übereinander angeordnete Kammern erfolgt, die durch Drehplatten gegeneinander verriegelt sind. Beim Etagenofen wird der Sarg in die feuerfest ausgekleidete Hauptbrennkammer eingefahren und auf dem Sargauflegerost positioniert. Dies geschieht, von Einzelfällen abgesehen, üblicherweise über eine vollautomatisch arbeitende Sargeinfahrmaschine, die meist im Boden vor dem Ofen untergebracht ist. Nach Schließen des Ofenschiebers beginnt der Kremationsvorgang durch die im Mauerwerk gespeicherte Strahlungswärme sowie unter Luftzugabe. Bei Bedarf wird der Prozessablauf durch den Hauptbrenner unterstützt. Das aus der Hauptbrennkammer abgeführte Rauchgas gelangt in die Abgasnachbrennkammer und wird dort unter weiterer Verbrennungsluftzugabe nahezu vollständig oxidiert. Die

Einhaltung der gewünschten Nachverbrennungstemperatur wird durch den Nachbrenner sichergestellt.

Beim Etagenofen wird nach Abschluss des Kremationsvorgangs die zurückbleibende Asche über die Drehplatte in die darunter befindliche Aschenachbrennkammer befördert, in der sie thermisch über die Dauer des nachfolgenden Kremationsvorgangs nachbehandelt wird. Dies erfolgt durch einen zusätzlichen Brenner. In einem letzten Bearbeitungsschritt wird die auf diese Weise thermisch behandelte Asche in der Ascheauskühlkammer über eine weitere Kremationsdauer abgekühlt bevor sie in den Aschebehälter gelangt und letztlich dem Ofen entnommen werden kann.

Im Gegensatz zum Etagenofen wird der Sarg beim Flachbettofen auf einer Herdplatte abgestellt. Dies erfolgt ebenfalls über eine darauf abgestimmte Sargeinfahrmaschine, die meist vollautomatisch ausgeführt ist. Nach Beendigung des Kremationsvorganges wird die verbleibende Humanasche manuell oder automatisch der Aschenachbrennkammer oder der Ascheentnahmebox zugeführt. Der aus der Hauptbrennkammer austretende Abgasstrom wird der Abgasnachbrennkammer zugeführt, die zweckmäßigerweise unterhalb der Hauptbrennkammer angeordnet ist. Damit wird die Wärmezufuhr in die Hauptbrennkammer unterstützt, so dass, wie beim Etagenofen, der Kremationsvorgang über die im Mauerwerk eingespeicherte Strahlungswärme und mit gezielter Luftzugabe zunächst ohne Stützfeuerung in der Hauptbrennkammer abläuft. Die Abgasnachverbrennung erfolgt mittels Nachbrenner bei der gewünschten Nachverbrennungstemperatur. In den meisten Fällen wird die Humanasche durch Einsatz eines weiteren Brenners thermisch nachbehandelt.

Je nach Bauform unterscheiden sich die Flachbettofensysteme auch hinsichtlich der Aufstellung. So erfordern „schwere“ Flachbettofensysteme (siehe Abbildung 1, rechts) 1-1/2- bis 2-Geschossebenen wohingegen „leichte“ und „mittelschwere“ Bauformen auf einer Ebene mit den Baugruppen der Abgasbehandlung montiert werden können.

Weitere Unterscheidungsmerkmale bei den vorgenannten Ofensystemen liegen in der Materialauswahl, der Auswahl der Brennertechnik – Gebläse- oder Industriebrenner –, der konstruktiven Gestaltung der Abgasnachbrennkammer und dem Drehplattenantrieb. Darüber hinaus gibt es Unterschiede in der Verbrennungsführung, z. B. in der örtlichen und zeitlichen Verbrennungsluftzugabe oder im Brennereinsatz. Weitere Details sind der Literatur zu entnehmen (u. a. [1]).

In Baden-Württemberg sowie in Bayern sind vereinzelt noch Elektroofensysteme im Einsatz. Sie haben ihren technologischen Ursprung in der Schweiz und werden durch elektrische Heizwendeln aufgewärmt, die im Ofenmauerwerk untergebracht sind (Abbildung 2). Verfahrensbedingt kann bei diesen Ofensystemen die Mindestverbrennungstemperatur in der Nachbrennkammer nicht auf 850 °C eingestellt werden, weshalb für diese Ofensysteme Ausnahmegenehmigungen für den Betrieb bei niedrigeren Mindesttemperaturen in der Nachbrennkammer erteilt wurden.

Abbildung 2: Elektroofen – System Broggi ([1])



Links: Schema; rechts: Ofen bei Sargeinfahrt

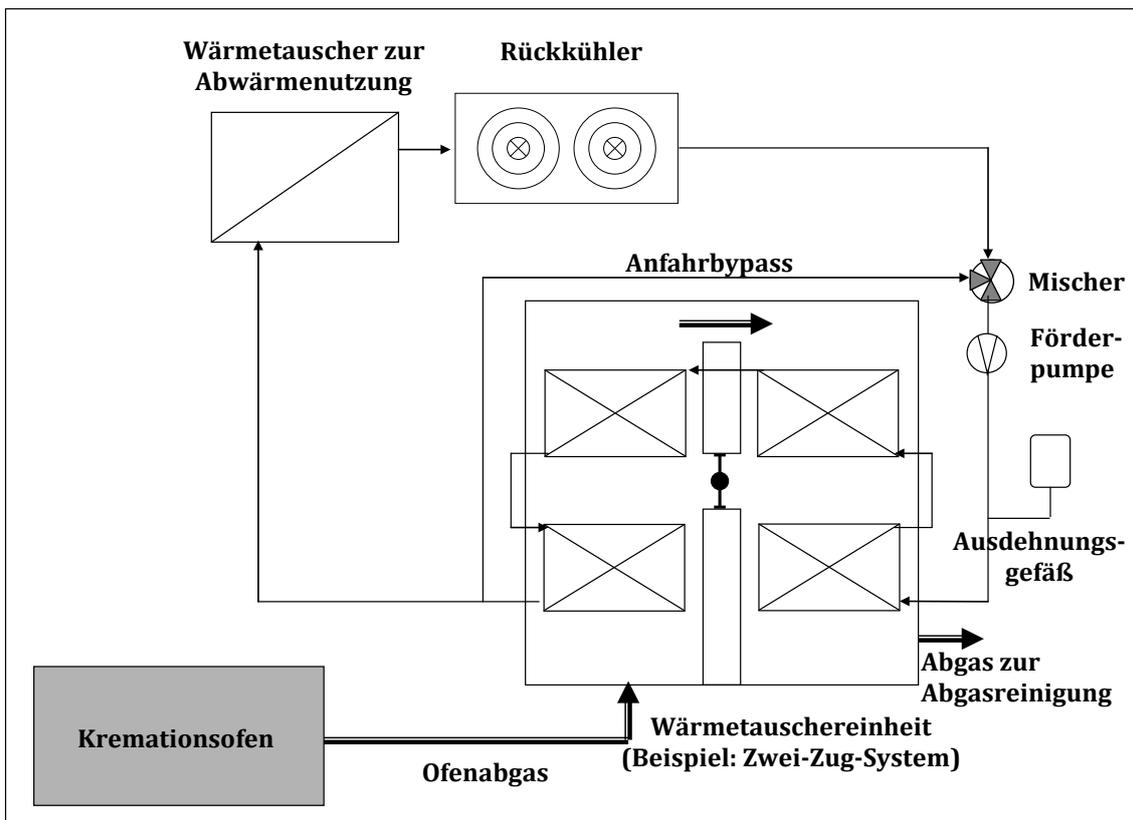
1.2.2 Abgaskühlung

Als Vorstufe zur Abgasreinigung sind die Abgase zu kühlen. Dies kann indirekt über Wärmetauschersysteme oder direkt durch Wassereindüsung erfolgen. Überwiegend kommen in Deutschland Wärmetauschersysteme zur Anwendung (gemäß der Datenerhebung: ca. 90 %), die mit Wasserwärmetauscherbündel („Eco“) oder Luftwärmetauscherbündel („Luvo“) bestückt sind. Im erstgenannten Fall werden diese Wärmetauscher in einen geschlossenen Wasser-/Glykolkreis integriert, der häufig mit einem Plattenwärmetauscher zur sekundärseitigen Wärmeauskopplung versehen ist (Abbildung 2). Beim Einsatz von Luvo-Bündel wird die vorgewärmte Luft meist als Nachverbrennungsluft wieder in den Ofen geführt und trägt insbesondere in der morgendlichen Anfahrphase zur Unterstützung des Energieeintrages in den Ofen bei.

Die konstruktive Gestaltung des Wärmetauschers hängt von den örtlichen Einbaubedingungen sowie von der wärmetechnischen Auslegung der Systeme durch den jeweiligen Hersteller ab. Mit Blick auf ein günstiges Dioxinniveau (Reduzierung der de-novo-Synthese) vor der Abgasreinigung hat sich eine „schnelle“ Abgaskühlung mit Aufenthaltszeiten von etwa 0,5 sec im Bereich des Wärmetauschers als zweckmäßig erwiesen. Dies wird dadurch erreicht, dass die Wärmetauscher sehr kompakt ausgeführt werden.

Mit der direkten Wassereindüsung erfolgt eine rapide Kühlung der Abgase durch Nutzung der Verdampfungsenthalpie des Wassers. Dem Vorteil der „schnellen“ Abgaskühlung steht eine Zunahme der Abgasmenge entgegen, die durch den zusätzlich mitgeführten Wasserdampf unter gewissen Wetterbedingungen am Schornstein als Wasserdampffahne sichtbar wird. Außerdem ist eine Wärmenutzung nicht mehr möglich.

Abbildung 3: Schema zur Abgaskühlung – Wasser-/Glykol-Kreislauf



Quelle: Schetter GmbH & Co. KG

1.2.3 Abgasreinigung

Bei der Abgasreinigung haben sich in Deutschland im Wesentlichen die in Tabelle 12 angegebenen Systeme etabliert. Mit diesen Abgasreinigungsverfahren lassen sich bei ordnungsgemäßem Betrieb die Emissionsvorgaben der 27. BImSchV gesichert einhalten.

Tabelle 12: Übliche Abgasreinigungsverfahren nach Krematorien

Bewertungskriterium	Flugstromverfahren	Festbettadsorber	katalytische Filtration
Verfahrensprinzip	Schadgasadsorption und Abscheidung im Gewebefilter	Gewebefilter mit Festbettadsorber zur Schadgasadsorption	Gewebefilter mit eingewobenen Katalysatoren
Umweltrelevanz¹⁾			
- Einfluss auf CO, C _{ges}	kein	CO-Anstieg in Schüttung ist möglich	kein
- Staubabscheidung	hoch	hoch	hoch
- Dioxine und Furane	hohe Adsorption; Anlagerung an Filterstäube	hohe Adsorption; Anlagerung in Schüttung	katalytische Zerstörung
- Quecksilber ²⁾	hohe Adsorption; Anlagerung an Filterstäube	hohe Adsorption; Anlagerung in Schüttung	sehr geringe Adsorption; Anlagerung an Staubpartikel

Hinweise: ¹⁾ Basis: Emissionsgrenzwerte gemäß 27. BImSchV; ²⁾ kein Emissionsgrenzwert in der 27. BImSchV.

1.3 Anforderungen an die Kremationstechnik

Mit der Einführung der 27. BImSchV, hat der Gesetzgeber 1997 den rechtlichen Rahmen für die Errichtung und den Betrieb von Krematorien geschaffen [3]. Die darin festgelegten Emissionsgrenzwerte sind in Tabelle 13 der typischen Bandbreite gemäß der VDI-Richtlinie 3891 [4] gegenüber gestellt.

Tabelle 13: Emissionsgrenzwerte für Krematorien und typische Bandbreite nach VDI 3891 [4]

Emissionsparameter ¹⁾		Emissionsgrenzwerte ²⁾	Typische Bandbreite ³⁾
Kohlenmonoxid	mg/Nm ³	50	5 ... 25
Gesamtkohlenstoff	mg/Nm ³	20	1 ... 10
Gesamtstaub	mg/Nm ³	10	1 ... 5
PCDD/PCDF ⁴⁾	ng I-TE/Nm ³	0,1	0,01 ... 0,1
Quecksilber	mg/Nm ³	kein Grenzwert	0,001 ... 0,05

Hinweise: ¹⁾ Normzustand trocken; Sauerstoffbezug 11 %; ²⁾ gemäß 27. BImSchV; ³⁾ Angabe in VDI 3891 [4]; ⁴⁾ Toxizitätsäquivalent nach NATO-CCMS

Zur Nachweisführung schreibt die 27. BImSchV (§ 7) kontinuierliche Messungen im Abgas (Sauerstoffvolumengehalt und Massenkonzentration von Kohlenmonoxid) sowie die Aufzeichnung der Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer vor.

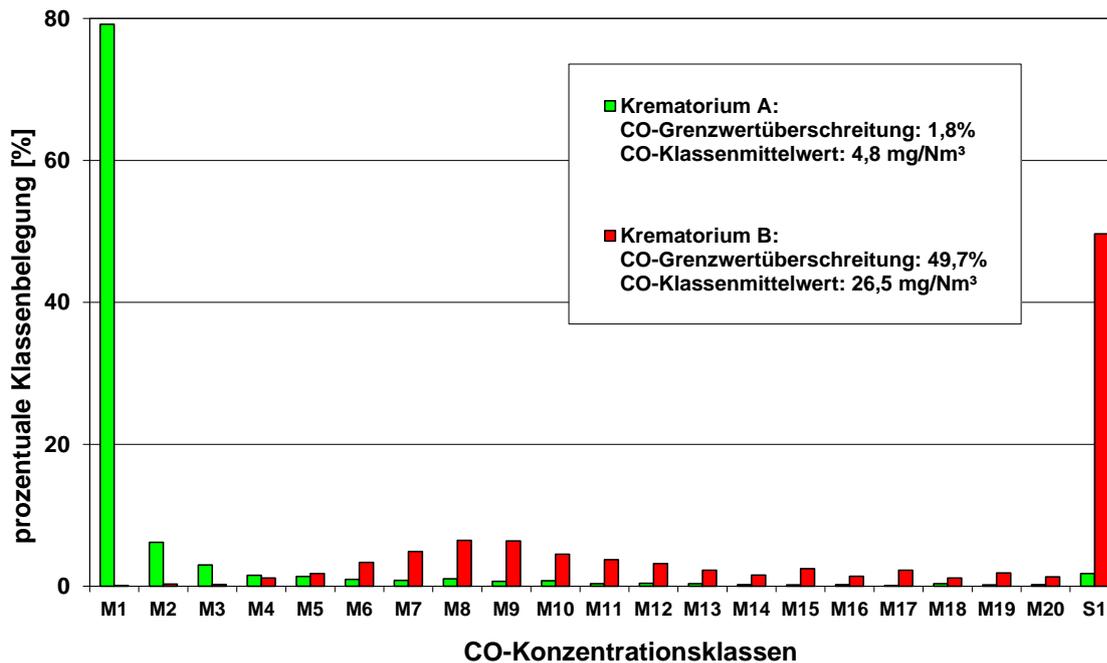
1.3.1 Kontinuierliche Messwerterfassung zur Überprüfung des CO-Grenzwertes

In einer umfassenden Studie in bayerischen Krematorien konnte gezeigt werden, dass die meisten vorhandenen Kremationsanlagen technologisch zum Zeitpunkt der Datenerhebung (2011) weitgehend dem Stand der Technik entsprechen; in Einzelfällen war jedoch ein Sanierungsbedarf festzustellen [1]. Außerdem konnte gezeigt werden, dass selbst bei guter technischer Installation, regelmäßiger Wartung und fachgerechter Betriebsführung nicht in jedem Betriebsfall die geforderten CO-Grenzwerte einzuhalten waren. Diesem Aspekt wurde in der VDI-Richtlinie 3891 – Abschnitt 7 – wie folgt Rechnung getragen:

„Auch bei zeitgemäßer Auslegung und Konstruktionen von Kremationsofenanlagen unter Würdigung sämtlicher prozesstechnischer Parameter sowie bei ordnungsgemäßigem Anlagenbetrieb, einschließlich regelmäßiger Wartung und Instandhaltung, kann es in Einzelfällen vorkommen, dass die in der 27. BImSchV vorgeschriebenen Kohlenmonoxidgrenzwerte als Stundenmittelwert überschritten werden. Kremationsanlagen nach dem Stand der Technik halten erfahrungsgemäß unter Berücksichtigung des Verschleißes der Anlage in 97 % bis 99 % der Fälle den CO-Grenzwert ein.“

Seit Inkrafttreten der aktualisierten Richtlinie VDI 3891 sind CO-Grenzwertüberschreitungen in besonderem Maße im Fokus der Aufsichtsbehörden und Anlagenbetreiber. Die Grundlage hierzu bildet die in der VDI 3891 - Abschnitt 9.4 beschriebene kontinuierliche Emissionsüberwachung und Klassenzuordnung gemäß Anhang C. Hierbei werden die CO-Stundenmittelwerte in 20 Klassen (M1: 0 bis 2,5 mg/m³; M2: 2,5 bis 5,0 mg/m³; usw.) untergliedert. Eine hohe Klassenbelegung der unteren Klassen repräsentiert demnach einen störungsfreien Kremationsbetrieb mit guten Verbrennungseigenschaften (Abbildung 3). Dennoch können auch unter derartigen Bedingungen CO-Stundenmittelwerte mit Grenzwertüberschreitungen (hier: ca. 1,8 %) auftreten.

Abbildung 4: Einfluss von Anlagendefekten auf die CO-Klassenverteilung



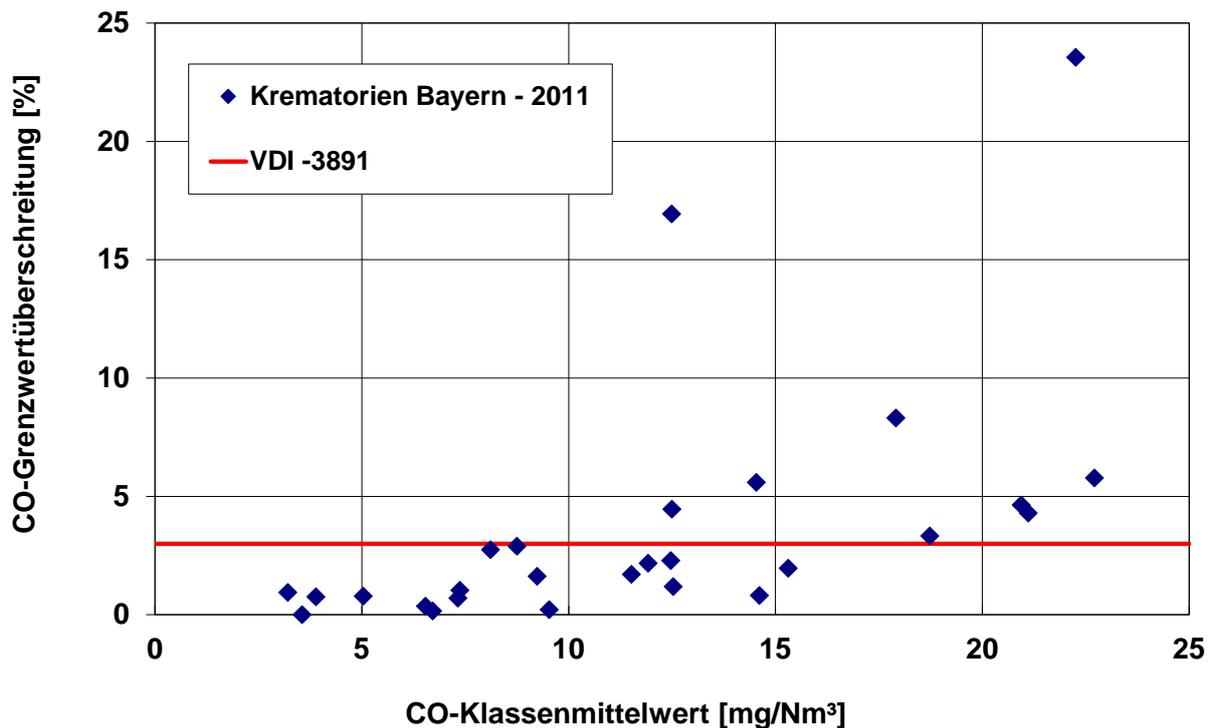
Quelle: Schetter GmbH & Co. KG

Die mit der Datenerhebung an den bayerischen Krematorien festgestellte CO-Überschreitungshäufigkeit im Jahr 2011 zeigt, dass seit Beginn der landesweiten Datenerhebung in 2008 durch das Bayerische Landesamt für Umwelt durch intensive fachtechnische Beratung der Anlagenbetreiber eine deutliche Reduzierung der Grenzwertüberschreitungen bei Kohlenmonoxid erreicht werden konnte. Dennoch konnten einige Kremationslinien den in der VDI-Richtlinie 3891 formulierten Stand der Technik nicht einhalten (Abbildung 4). Des Weiteren war ein qualitativer Zusammenhang zwischen den CO-Grenzwertüberschreitungen und dem CO-Klassenmittelwert für die einzelnen Kremationslinien beobachtet worden. Unter Klassenmittelwert werden hierbei die Klassenzuordnungen über die Klassen M1 bis M20 nach folgender Gleichung verstanden [1]:

$$MW_{CO} = \sum_{i=1}^{20} (n_i \cdot 2,5 \cdot i) / \sum_{i=1}^{20} n_i \quad \text{Gl. 1}$$

Beide Größen – prozentuale Grenzwertüberschreitungen und Klassenmittelwert – beschreiben sehr anschaulich den Emissionszustand einzelner Kremationslinien, wie die in Abbildung 4 dargestellte Datenerhebung für Bayern in 2011 belegt. Nicht überraschend ist dabei die Erkenntnis, dass hohe Klassenmittelwerte häufig mit erhöhten prozentualen CO-Grenzwertüberschreitungen einhergehen, da bei überwiegender Belegung hoher CO-Klassen (nahe M20) die verbrennungstechnischen Reserven für unvorhergesehene Effekte bei der Kremation deutlich eingeschränkt sind.

Abbildung 5: CO-Grenzwertüberschreitungen – Datenerhebung 2011 in Bayern ([1])



Laufende Überprüfungen der CO-Emissionen in bayerischen Krematorien, zuletzt in 2017 [6], belegen einerseits, dass zur Wahrung dieses technischen Standes kontinuierliche Anstrengungen unternommen werden müssen und zeigen andererseits den Sanierungsbedarf (z. B. Erneuerung der Feuerfestauskleidung des Ofens) einzelner Kremationslinien auf. Eine Übertragung auf die CO-Situation in Deutschland lässt sich nicht durchführen, da im Rahmen dieses Forschungsvorhaben eine Auswertung der bundesweit vorliegenden CO-Klassierungsprotokolle nicht vorgesehen ist.

1.3.2 Wiederkehrende Einzelmessungen

Gemäß § 9 der 27. BImSchV hat der Betreiber eines Krematoriums die Einhaltung der in Tabelle 13 aufgeführten Anforderungen für Gesamtstaub, Gesamtkohlenstoff sowie Dioxine und Furane in regelmäßigen Abständen (alle 3 Jahre) durch eine hierfür zugelassene Messstelle überprüfen zu lassen. Die Vorschriften zur Durchführung der wiederkehrenden Einzelmessungen sind in der VDI-Richtlinie 3891 präzisiert.

In Anlagen, die nach dem Stand der Technik konzipiert und betrieben werden, lassen sich die in Tabelle 13 angegebenen Bandbreiten erreichen.

1.3.3 Erweiterte Anforderungen zur CO₂-Reduzierung und Ressourcenschonung

Obwohl die 27. BImSchV derzeit keine besonderen Anforderungen enthält, den sekundärseitigen Energieeinsatz zu minimieren, rückt dieses Kriterium zunehmend in den Fokus der Kremationsanlagenbetreiber, zumal im Einzelfall erhebliche monetäre Aufwendungen damit verbunden sein können. Angesichts der damit verbundenen Aspekte zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes (Klimaschutzziele) als auch zur Verminderung des Gasverbrauchs (Ressourcenschonung) gilt es die Möglichkeiten und Grenzen hierzu aufzuzeigen und auszuloten.

2 Emissionsmessungen

Eine wesentliche Aufgabe des Vorhabens besteht darin, Emissionsmessungen im Roh- und Reingas von Krematorien mit unterschiedlichen Techniken zur Abgasreinigung durchzuführen, um deren Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Einhaltung der Emissionsbegrenzungen gemäß 27. BImSchV als auch der Quecksilberabscheidung zu untersuchen. Dabei kommt es darauf an, ein möglichst gutes Abbild des in Abschnitt 1 beschriebenen Standes der Technik zu erhalten. Gleichzeitig soll auch ein Vergleich mit früheren Ergebnissen aus anderen Untersuchungen ermöglicht werden.

2.1 Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen

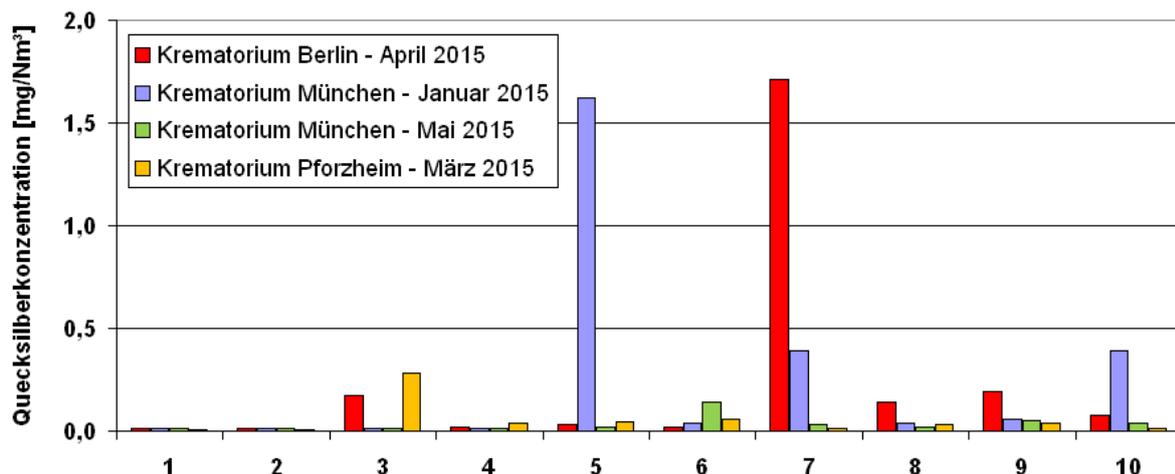
Im Rahmen einer von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt unterstützten Studie an drei Krematorien unterschiedlicher Bauart wurden Untersuchungen im Abgas vor und nach der Abgasreinigung durchgeführt [2]. Die Untersuchungen erstreckten sich auf gasbefeuerte Ofensysteme, folgender Bauart:

- ▶ Etagenofen (Krematorium Berlin-Baumschulenweg, Linie 3),
- ▶ Schwerer Flachbettofen (Krematorium München, Linie 5),
- ▶ Mittelschwerer Flachbettofen (Krematorium Pforzheim).

Die ausgewählten Mehrkammerofensysteme repräsentieren den Großteil der in Deutschland eingesetzten Ofensysteme, auch wenn altersbedingt, geringfügige konstruktive Ausführungsänderungen vorliegen.

Auf die Diskussion der in früheren Untersuchungen [2, 10] umfänglich gemessenen Emissionswerte, die in der 27. BImSchV festgeschrieben sind, wird an dieser Stelle verzichtet. Vielmehr interessiert der Eintrag und Verbleib des Quecksilbers bei der Kremation. So zeigte sich, dass die im Rohgas vor der Abgasreinigung ermittelten Quecksilberstundenmittelwerte meist unter $0,1 \text{ mg/Nm}^3$ lagen. In Einzelfällen wurden jedoch erhebliche Konzentrationen mit bis zu $1,71 \text{ mg/Nm}^3$ festgestellt (Abbildung 6), die sich nur über den Eintrag erklären lassen.

Abbildung 6: Gemessene Quecksilberkonzentrationen im Rohgas einiger Krematorien ([2, 10])



Dieses Ergebnis ist angesichts des Quecksilbereintrages über amalgambasierte Dentalfüllungen keineswegs überraschend. Unabhängig von der Ofenkonstruktion konnte durch Nachrechnungen gezeigt werden, dass in Einzelfällen die Quecksilberkonzentration im Rohgas von Krematorien bis zu $3,5 \text{ mg/Nm}^3$ betragen können.

Aus den zeitgleich im Reingas gemessenen Quecksilberemissionen in den beiden Krematorien Berlin-Baumschulenweg und München, die jeweils mit einem Flugstromverfahren zur Schadgasadsorption

(Kugelrotorumlaufverfahren der Firma Lühr) ausgerüstet sind, wurden Quecksilberabscheideleistungen in der Größenordnung von etwa 85 bis 95 % festgestellt.

2.2 Auswahl der zu untersuchenden Krematorien und Messprogramm

Mit der Anlagenauswahl werden die unterschiedlichen Ofenbauformen und Abgasreinigungstechniken berücksichtigt. In der umfangreichen Studie [2] wurden unterschiedliche adsorptive Verfahren der Abgasreinigung untersucht, darunter auch das Kugelrotorumlaufverfahren (KUV, Fa. Lühr). Zwischenzeitlich ist dieses Verfahren jedoch technologisch weiterentwickelt worden und wird in einer Vielzahl der Kremationslinien eingesetzt. Aus Sicht der Quecksilbermessungen ist eine Anlage mit KUV von besonderem Interesse, da die Technik zum einen zur Minderung von gasförmigen Quecksilberemissionen eingesetzt wird, sie zum anderen in Konkurrenz zur Festbettadsorption steht. Da über das Projekt eine möglichst umfassende Datenbasis zur Hg-Emissionssituation generiert werden soll, wurden in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt die in Tabelle 14 gelisteten Anlagen für die Messungen des Arbeitspaketes 2 „Emissionsmessungen“ ausgewählt.

Tabelle 14: Krematorien für die Durchführung der Abgasmessungen

Krematorium	Ofensystem	Lieferant	Abgasreinigung	Lieferant
Anlage A	ETO	Fölich	Gewebefilter und Festbett	ETS
Anlage B	FBO	Metall-Technik	Katalysator und Festbett	Metall-Technik
Anlage C	FBO	H.R. Heinicke	Kugelrotorumlaufverfahren	Lühr
Anlage D	ETO	Ruppmann	Trockensorption	Ruppmann/Lühr
Anlage E	ETO	Ruppmann	katalytische Filtration	Lühr/GORE
Anlage F	FBO	H.R. Heinicke	katalytische Filtration	Lühr/GORE

Anschließend wurde Kontakt mit den Betreibern aufgenommen. In einer Vor-Ort-Begehung konnten die Messplatzsituation begutachtet und die Position fehlender Messstutzen festgelegt werden. An allen Anlagen ist die räumliche Situation so, dass die Einrichtung der entsprechenden Messstellen im Roh- und Reingas grundsätzlich möglich ist. An allen Kremationslinien mussten Messstutzen in den Roh- und in den Reingaskanälen nachgerüstet werden. Leider ermöglichen nicht alle örtlichen Gegebenheiten die Einrichtung von in allen Anforderungen DIN-konformen Messstellen. Die folgende Tabelle 15 weist die Planung der Messkampagnen aus.

Tabelle 15: Zeitliche Planung der Messkampagnen an den Kremationslinien

Krematorium	Messkampagne
Anlage A	KW 32-2017 / 07.08.-11.08.2017
Anlage B	KW 37-2017 / 11.09.-15.09.2017
Anlage C	KW 38-2017 / 18.09.-22.09.2017
Anlage D	KW 39-2017 / 25.09.-29.09.2017
Anlage E	KW 03-2018 / 15.01.-19.01.2018
Anlage F	KW 33 2018 / 13.08.-17.08.2018

Die Messungen für die relevanten Schadstoffe Gesamtstaub, CO und Gesamtkohlenwasserstoffe erfolgen zeitgleich im Roh- und Reingas. Der Parameter PCDD/F wird nur im Reingas gemessen. Tabelle 16 gibt einen Überblick über die für die einzelnen Schadstoffe relevanten Probenahme- und Analyseverfahren.

Tabelle 16: Messkomponenten, Vorschriften und Normen

Messkomponenten	Probenahme- und Analyseverfahren	Probenahme [h]
Quecksilber und seine Verbindungen *)	Probenahme und Analytik gemäß DIN EN 13211, Hg Spezies: Endbestimmung: AAS	1
Polychlorierte Dibenzo-(p)-dioxine und -furane (PCDD/PCDF) *)	DIN 1948 Teile 1 – 3 Endbestimmung: HRGC/HRMS	6
Kohlenmonoxid (CO) *)	DIN EN 15058 NDIR	1
Gasförmige organische Stoffe (Gesamt-C) *)	DIN EN 12619 Flammenionisationsdetektor (FID)	1
Gesamtstaub (einschließlich Feinstaub) *)	DIN EN 13284-1 Endbestimmung mittels Gravimetrie	1
Begleitende Messungen der Abgasparameter zur Volumenstrombestimmung		
O ₂ * / CO ₂	Kontinuierliche Messung: Paramagnetischer Sensor / NDIR	

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.

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

Ein wesentliches Ziel des Vorhabens besteht darin, die Datenbasis bezüglich der Quecksilberemissionen an Krematorien so auszubauen, dass belastbare Aussagen zur Effektivität der installierten und dem Stand der Technik entsprechenden Abgasreinigungssysteme möglich sind. Deshalb wird parallel zur diskontinuierlichen Probenahme zur Ermittlung der Gesamt-Quecksilberkonzentrationen als Stundennittelwerte auch eine Probenahme zur Speziierung des gasförmigen Quecksilbers installiert. Zusätzlich werden die Konzentrationen im Roh- und Reingas über kontinuierlich arbeitende Hg-Analysatoren erfasst. Mit der Durchführung der Messungen wurde das Forschungsinstitut der Zementindustrie GmbH (FIZ) beauftragt. Die Messungen erfolgten jeweils an drei aufeinander folgenden Tagen.

Im Folgenden werden die Messkampagnen an den einzelnen Krematorien zusammenfassend beschrieben. Die Diskussion und Bewertung der Ergebnisse erfolgt innerhalb von Kapitel 3.

2.3 Anlage A

Die Messkampagne an der Anlage A fand in der KW 32-2017 statt. Die Messungen wurden vom 08.08. bis zum 10.08.2017 durchgeführt. Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb gefahren.

Das Krematorium arbeitet mit einem Etagenofen; für die Abgasreinigung werden ein Gewebefilter und ein Festbettfilter eingesetzt.

Während der Probenahmen lag das Abgasvolumen im Rohgas zwischen 3.600 und 3.900 m³/h und die Temperatur zwischen 125 und 127 °C bei Sauerstoffgehalten zwischen 11,6 und 17 Vol. % O₂. Am Kamin betrug das Abgasvolumen 3.900 bis 4.700 m³/h mit Temperaturen zwischen 109 und 116 °C und Sauerstoffgehalten zwischen 11,2 und 19,5 Vol. % O₂.

Der Staubgehalt im Reingas betrug bei 6 von 10 Messungen deutlich $< 1 \text{ mg/m}^3_{\text{n.tr.}}$ ¹. Maximal wurden $6,02 \text{ mg/m}^3_{\text{n.tr.}}$ Staub emittiert. Damit liegen die Ergebnisse mit deutlichem Abstand unterhalb des geforderten Grenzwertes von $10 \text{ mg/m}^3_{\text{n.tr.}}$.

Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

An allen drei Messtagen lagen die gemessenen und auf 11 % normierten CO-Konzentrationen mit 83 bis $1888 \text{ mg/m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Rohgas) respektive 43 bis $2486 \text{ mg/m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Reingas) signifikant hoch. Ähnliches war für Gesamtkohlenstoff mit 3,6 bis $237 \text{ mg/m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Rohgas) respektive 8,7 bis $111 \text{ mg/m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Reingas) festzustellen. Ungeachtet einer unzureichenden Verbrennungsluftführung macht sich hierbei auch die Umrechnung auf den Sauerstoffbezug von 11 % O₂ bemerkbar. Qualitative Bestätigung der CO-Grenzwertüberschreitungen lieferte die Auswertung des CO-Klassierungsprotokolls, wonach an allen drei Messtagen insgesamt 21 Grenzwertverletzungen der Stundenmittelwerte festgestellt wurden. Man kann also davon ausgehen, dass der Zustand des Kremationsofens zum Zeitpunkt der Messungen nicht dem Stand der Technik entsprach.

Quecksilber

An Anlage A stellt sich die Quecksilbersituation wie folgt dar:

Gemäß der kontinuierlichen Quecksilbermessung traten an den ersten beiden Messtagen im Rohgas Hg-Spitzen bis $450 \text{ } \mu\text{g/m}^3_{\text{n.tr.}}$ und am dritten Messtag sogar bis in den mg-Bereich hinein auf. Ein Vergleich der Auswertung mit den Aufzeichnungen ohne den Bezug auf einen Sauerstoffgehalt von 11 % zeigt jedoch, dass während der gesamten Messkampagne die Hg-Rohgaskonzentrationen unter ca. $75 \text{ } \mu\text{g/m}^3_{\text{n.tr./o.}}$ ² lagen ohne, dass es dabei zu ausgeprägten Konzentrationspitzen gekommen war.

Die Auswertung der Stundenmittelwerte liefert Hg-Konzentrationen im Rohgas bis maximal $26 \text{ } \mu\text{g/m}^3_{\text{n.tr.}}$. Im Reingas weisen die Analysen für 5 Messpunkte Werte $\leq 2 \text{ } \mu\text{g/m}^3_{\text{n.tr.}}$ aus und in 4 Messungen lagen die Hg-Reingaskonzentration unter $6,5 \text{ } \mu\text{g/m}^3_{\text{n.tr.}}$. Eine Messung wird aufgrund eines unplausiblen Ergebnisses ($16 \text{ } \mu\text{g/m}^3_{\text{n.tr./o.}}$ und eine negative Abscheidung von 58 %) verworfen.

Die Ergebnisse der Speziierungsmessung zeigen überwiegend deutliche Abweichungen von den Hg-Gesamtmessungen. Dabei gibt es sowohl Mehr- als auch Minderbefunde. Während im Rohgas der Anteil an elementarem Hg(0) 30 % und mehr beträgt, besteht das Quecksilber im Reingas überwiegend aus Hg(II)-Verbindungen. Die Messungen lassen den Schluss zu, dass Hg(0) sehr gut abgeschieden bzw. durch das eingesetzte Aktivkohle-Festbettfilter oxidiert wurde.

Auf Basis der Ergebnisse ergibt sich eine mittlere Minderung der Quecksilberemissionen mit der installierten Technik von ca. 90 %. Bei der Bewertung dieser Abscheideleistung muss berücksichtigt werden, dass die Rohgaskonzentrationen ausnahmslos niedrig waren. Eine Aussage zum Abscheideverhalten bei Quecksilberspitzen von mehreren $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ kann aus den vorliegenden Ergebnissen nicht belastbar abgeleitet werden.

Dioxine und Furane

Die an den drei Messtagen ermittelten Reingaskonzentrationen für die Dioxine und Furane liegen mit $0,0018 \text{ ng/m}^3_{\text{n.tr.}}$, $0,0031 \text{ ng/m}^3_{\text{n.tr.}}$ und $0,0025 \text{ ng/m}^3_{\text{n.tr.}}$ deutlich unterhalb des Grenzwertes von $0,1 \text{ ng/m}^3_{\text{n.tr.}}$. Damit ist die Minderung von gasförmigen PCDD/F an Anlage A sehr gut.

¹ n.tr. : Angaben bezogen auf Normzustand (1013 hPa, 273 K) nach Abzug des Gehaltes an Wasserdampf und 11 Vol.% O₂

² n.tr./o. : Angaben bezogen auf Normzustand (1013 hPa, 273 K) nach Abzug des Gehaltes an Wasserdampf, ohne O₂-Bezug

2.4 Anlage B

Die Messkampagne an der Anlage B wurde vom 18.09. bis zum 20.09.2017 durchgeführt. Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb gefahren. Am ersten Messtag gab es am Hg-Monitor auf der Reingasseite einen Fehler, so dass für den 18.09.2017 keine kontinuierliche Aufzeichnung der Hg-Konzentrationen im Reingas verfügbar ist.

Anlage B ist mit einem Flachbettofen, einer Katalysatoreinheit, einer Schlauchfilteranlage und einem Festbett ausgestattet.

Aufgrund der baulichen Gegebenheiten war es nicht möglich, im Rohgas eine Volumenstrommessung durchzuführen. Die Temperaturen lagen zwischen 161 und 165 °C mit Ausnahme von Messung 3. Während dieser Messung betrug die mittlere Temperatur 224 °C. Während der Messkampagne lag der Sauerstoffgehalt zwischen 14,4 und 16,4 Vol. %.

Im Reingas betrug das Abgasvolumen 4.100 bis 5.000 m³/h mit Temperaturen zwischen 100 und 122 °C und Sauerstoffgehalten zwischen 15,4 und 17 Vol. % O₂.

Der Staubgehalt im Reingas betrug bei 7 von 9 Messungen < 0,3 mg/m³_{n.tr.}. Maximal wurden 3,65 mg/m³_{n.tr.} Staub emittiert. Damit verfügt die Anlage über eine sehr gute Staubrückhaltung und unterschreitet den geforderten Grenzwert von 10 mg/m³_{n.tr.} mit deutlichem Abstand

Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

An allen drei Messtagen lagen die gemessenen und auf 11 % normierten CO-Konzentrationen mit 0 bis 109 mg/m³_{n.tr.} (Rohgas) respektive 4 bis 110 mg/m³_{n.tr.} (Reingas) in einem für Krematorien üblichen Bereich, wenn man bedenkt, dass lediglich 2 Stundenmittelwerte oberhalb des Grenzwertes nach 27. BImSchV lagen und es sich um einen Kremationsofen älterer Bauart handelt. Auch für Gesamtkohlenstoff mit 1,2 bis 9,8 mg/m³_{n.tr.} (Rohgas) respektive 2,9 bis 9,7 mg/m³_{n.tr.} (Reingas) wurden keine Werte festgestellt, die auf außergewöhnliche Ereignisse schließen lassen. Der Zustand und die Betriebsweise des Kremationsofens entsprachen zum Zeitpunkt der Messungen dem Stand der Technik.

Quecksilber

An der Anlage B stellt sich die Quecksilbersituation wie folgt dar:

Aus den kontinuierlichen Quecksilbermessungen wird ersichtlich, dass es mehrfach zu deutlichen Quecksilberfreisetzungen ins Rohgas gekommen ist. Die dabei aufgetretenen Hg-Konzentrationen lagen außerhalb des Messbereichs von 500 µg/m³_{n.tr.}. Die Konzentrationsspitzen hatten eine Dauer von wenigen Minuten bis zu einer halben Stunde. Die kontinuierliche Analyse des Reingases ergab durchweg Hg-Konzentrationen deutlich < 15 µg/m³_{n.tr.}.

Die Auswertung der Stundenmittelwerte bestätigt das Auftreten von Quecksilberspitzen im Rohgas. Über die Mittelung ergeben sich die dazugehörigen Stundenmittel zu 143, 179, 811 und 893 µg/m³_{n.tr.}. Demgegenüber liegen die Rohgaskonzentrationen in den Stunden, in denen keine Hg-Spitze aufgetreten ist, zwischen 3,1 und 10,4 µg/m³_{n.tr.}.

Die Stundenmittelwerte im Reingas ergaben für 8 Messpunkte Werte < 15 µg/m³_{n.tr.}. Lediglich in einer Messung betrug die Hg-Reingaskonzentration 22,2 µg/m³_{n.tr.}.

Die Ergebnisse der Speziierungsmessung an Anlage B stimmen gut mit denen der Hg-Gesamtmessung überein. Im Rohgas liegen die Ergebnisse der Speziierungsmessungen überwiegend oberhalb der Hg-Gesamtmessung. Die Abweichungen betragen bis zu 20 %. Lediglich die Rohgasmessung der Probe 1 hat in der Speziierungsmessung einen Minderbefund von über 60 %. Im Reingas ergaben die Speziierungsmessungen überwiegend Minderbefunde bis zu einer Abweichung von maximal 32 %. An der Anlage B besteht das Quecksilber im Rohgas insbesondere während gravierender Quecksilberereignissen überwiegend aus Hg(0). Demgegenüber liegt das Quecksilber im Reingas überwiegend als Hg(II)-Verbindungen vor.

Auf Basis der Ergebnisse kann die Aussage getroffen werden, dass mit der installierten Anlagentechnik eine sehr gute Quecksilberminderung und eine sichere Rückhaltung von Quecksilberspitzen erreicht wird, auch für Hg(0). Der maximale Abscheidegrad wurde für den höchsten Stundenmittelwert von $893 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ erreicht und betrug 98,63 %. Dieser Wert wurde auf Basis der Konzentrationen errechnet, weil im Rohgas eine Volumenstrommessung nicht möglich war.

Dioxine und Furane

An Anlage B wurden PCDD/F-Reingaswerte von $0,0033 \text{ ng}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$, $0,0037 \text{ ng}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ und $0,0035 \text{ ng}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ gemessen. Anlage B verfügt damit über eine sehr gute Technik zur Minderung von Dioxinen und Furanen.

2.5 Anlage C

Die Messungen an der Anlage C wurden vom 12.09. bis zum 14.09.2017 durchgeführt. Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb gefahren.

Die Anlage C arbeitet mit einem Flachbettofen. Die Abgasreinigung verfügt über einen Schlauchfilter mit vorgeschalteter Sorbensdosierung nach dem Kugelrotorumlaufverfahren.

Während den Probenahmen lag das Abgasvolumen im Rohgas zwischen 1.300 und $1.500 \text{ m}^3/\text{h}$ und die Temperatur zwischen 108 und 129 °C bei Sauerstoffgehalten zwischen $9,4$ und $11,9 \text{ Vol. \% O}_2$. Am Kamin betrug das Abgasvolumen 1.500 bis $2.000 \text{ m}^3/\text{h}$ mit Temperaturen zwischen 96 und 129 °C und Sauerstoffgehalten zwischen $11,7$ und $13,9 \text{ Vol. \% O}_2$.

In 9 von 11 Messungen wurden Staubgehalte im Stundenmittel von $\leq 0,1 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ gemessen. Die anderen beiden Werte ergeben Staubgehalte von $0,3$ bzw. $2,79 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Diese Werte dokumentieren eine hervorragende Rückhaltung von Staub mit der installierten Technik.

Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

An allen drei Messtagen lagen die gemessenen und auf 11 \% normierten CO-Konzentrationen mit 0 bis $10 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Rohgas) respektive 0 bis $10 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Reingas) in einem für Krematorien sehr niedrigen Bereich; sie weisen einen deutlichen Sicherheitsabstand zum Grenzwert auf. Gleiches gilt für Gesamtkohlenstoff mit $0,7$ bis $1,8 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Rohgas) respektive $0,8$ bis $3,5$ ($11,2$) $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Reingas); lediglich zwei Reingaswerte lagen mit $8,5$ und $11,2 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ im Bereich des Grenzwertes bzw. geringfügig darüber. Die Konzeption und Betriebsweise des Kremationsofens Linie 2 erfüllen die Vorgaben des Standes der Technik somit mit deutlichem Sicherheitsabstand.

Quecksilber

Auch an der Anlage C ist es während der Messkampagne zu deutlichen Quecksilberfreisetzungen ins Rohgas gekommen. Der durch die kontinuierlichen Aufzeichnungen dokumentierte Konzentrationsverlauf weist für den 12.09.2017 zwei und für den 14.09.2017 eine Konzentrationspitze mit Werten außerhalb des Messbereichs aus. Die Dauer betrug nur wenige Minuten. Aufgrund eines Gerätefehlers beginnt die Aufzeichnung am 12.09.2017 erst um kurz nach 13:00 Uhr, startet jedoch mit einer Hg-Konzentration $> 350 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Die Hg-Konzentration im Rohgas verharrt über eine Stunde zwischen 100 und $> 500 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Anschließend ist ein weiterer Hg-Konzentrationsanstieg bis auf $> 500 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ zu verzeichnen, gefolgt von einer Hg-Konzentration von im Mittel $100 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ über einen Zeitraum von mehr als 90 Minuten.

Die kontinuierliche Analyse des Reingases ergab trotz des erheblichen Eintrages von Quecksilber in das Abgas am 12.09.2017 Hg-Konzentrationen deutlich $< 20 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Am 13. und 14.09.2017 lagen die Werte der Hg-Onlineerfassung deutlich unter $10 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$, meistens $< 5 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$.

An Anlage C konnte bei moderaten Hg-Konzentrationen eine gute Übereinstimmung zwischen den Hg-Gesamt- und den Speziierungsmessungen erreicht werden. Deutliche Abweichungen zwischen den

beiden Messungen traten für die Proben mit hohen Hg-Konzentrationen auf. Auch an Anlage C bestätigt sich der Befund, dass im Reingas überwiegend Hg(II)-Verbindungen zu finden sind.

Die Auswertung der Stundenmittelwerte ergab für 5 Proben Hg-Rohgaskonzentrationen von $< 50 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ aber auch erhebliche Hg-Rohgaskonzentrationen von 1540, 189 und $103 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ am 12.09.2017 und einen weiteren hohen Eintrag ins Rohgas am 14.09.2017 von $221 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$.

Der erhebliche und über mehrere Stunden anhaltende Eintrag von Quecksilber in das Rohgas am 12.09.2017 führte zu korrespondierenden Reingaskonzentrationen im Stundenmittel von 5,2, 64 und $10 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Die Analyse der Stundenmittelwerte ergab für den 13. und 14.09.2017 Hg-Reingaskonzentrationen $\leq 2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Damit wird mit der installierten Abgasreinigung auf allen Rohgaskonzentrationsniveaus eine Quecksilberminderung von im Mittel 97 % erreicht.

Dioxine und Furane

An der Anlage C wurden mit der installierten Technik extrem niedrige Konzentrationen an Dioxinen und Furanen im Reingas erreicht. Die Werte betragen $0,00069 \text{ ng}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$, $0,00086 \text{ ng}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ und $0,00078 \text{ ng}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$.

2.6 Anlage D

Die Messungen an der Anlage D wurden vom 26.09. bis zum 28.09.2017 durchgeführt. Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb betrieben. In der Anlage D wird ein Etagenofen verwendet. Die Abgasreinigung ist mit einem Trockensorptionsverfahren ausgerüstet.

Während den Probenahmen lag das Abgasvolumen im Rohgas zwischen 3.600 und $4.600 \text{ m}^3/\text{h}$ und die Temperatur zwischen 102 und $130 \text{ }^\circ\text{C}$ bei Sauerstoffgehalten zwischen $11,7$ und $14,3 \text{ Vol. } \%$ O_2 . Am Kamin betrug das Abgasvolumen 3.600 bis $4.300 \text{ m}^3/\text{h}$ mit Temperaturen um $102 \text{ }^\circ\text{C}$ und Sauerstoffgehalten zwischen $12,8$ und $15,1 \text{ Vol. } \%$ O_2 .

Der Staubgehalt im Reingas lag im Mittel unter $< 0,1 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Damit liegen die Ergebnisse mit deutlichem Abstand unterhalb des geforderten Grenzwertes von $10 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$.

Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

An allen drei Messtagen lagen die gemessenen und auf 11% normierten CO-Konzentrationen mit 0 bis $22 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Rohgas) respektive 0 bis $22 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Reingas) in einem für Krematorien sehr niedrigen Bereich; sie weisen einen deutlichen Sicherheitsabstand zum Grenzwert auf. Gleiches gilt für Gesamtkohlenstoff mit $0,6$ bis $1,7 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Rohgas) respektive $1,3$ bis $2,8 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ (Reingas). Der zuletzt in 2016 mit Feuerfestmaterial neu ausgekleidete Kremationsofen weist verbrennungstechnisch einen deutlichen Sicherheitsabstand zum Stand der Technik auf.

Quecksilber

An der Anlage D stellt sich die Quecksilbersituation wie folgt dar:

Gemäß der kontinuierlichen Quecksilbermessung kam es während der Messkampagne immer wieder zu kurzzeitigen Hg-Rohgaskonzentrationspitzen ebenso wie zu längeren Phasen ohne oder mit nur geringem Quecksilbereintrag im Bereich $< 50 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Auf der Reingasseite wurde überwiegend kein Quecksilber analysiert. Über wenige Stunden werden Werte $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ angezeigt.

Die Auswertung der Stundenmittelwerte liefert Hg-Konzentrationen im Rohgas zwischen 7 und $818 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr./o.}}$. Im Reingas weisen die Analysen Werte zwischen 4 und $107 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ aus.

An Anlage D konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den Hg-Gesamt- und den Spezierungsmessungen erzielt werden. Die Mehrzahl der Abweichungen lagen unterhalb $\pm 20 \%$. Bei hohen Hg-Rohgaskonzentrationen lag der Anteil an Hg(0) bei 50% . Trotzdem bestand auch an Anlage D das Quecksilber im Reingas überwiegend aus Hg(II)-Verbindungen.

Auf Basis der Ergebnisse ergibt sich eine mittlere Minderung der Quecksilberemissionen mit der installierten Technik von ca. 85 %. Bei Betrachtung der Einzelproben schwankt der erzielte Abscheidegrad jedoch stark zwischen 55 und 98 %.

Dioxine und Furane

Auch mit der in Anlage D installierten Technik können die Grenzwerte für Dioxine und Furane sicher eingehalten werden. Für die Reingaskonzentrationen wurden Werte von 0,0010 und 0,0011 ng/m³_{n.tr.} gemessen.

2.7 Anlage E

Die Messungen an der Anlage E wurden vom 16.01. bis zum 18.01.2018 durchgeführt. Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb gefahren. In Anlage E wird ein Etagenofen verwendet. Die Abgasreinigung ist mit einer katalytischen Filtration ausgerüstet.

Während den Probenahmen lag das Abgasvolumen im Rohgas zwischen 6.100 und 8.400 m³/h und die Temperatur um 230 °C bei Sauerstoffgehalten zwischen 13 und 15 Vol. % O₂. Am Kamin betrug das Abgasvolumen 5.100 bis 6.100 m³/h mit Temperaturen zwischen 200 und 210 °C und Sauerstoffgehalten zwischen 13,5 und 15,5 Vol. % O₂.

Der Staubgehalt im Reingas betrug < 1 mg/m³_{n.tr.}, außer in zwei Proben mit 1,05 und 1,74 mg/m³_{n.tr.}. Damit liegen die Ergebnisse mit deutlichem Abstand unterhalb des geforderten Grenzwertes von 10 mg/m³_{n.tr.}.

Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

An allen drei Messtagen lagen die gemessenen und auf 11 % normierten CO-Konzentrationen mit 8 bis 38 mg/m³_{n.tr.} (Rohgas) respektive 4 bis 31 mg/m³_{n.tr.} (Reingas) in einem für Krematorien sehr niedrigen Bereich. Gleiches gilt für Gesamtkohlenstoff mit 1,1 bis 2,5 mg/m³_{n.tr.} (Rohgas) respektive 1,3 bis 2,7 mg/m³_{n.tr.} (Reingas). Dies ist umso bemerkenswerter, da der Kremationsofen seit seiner Inbetriebnahme in 2010 nicht mit Feuerfestmaterial neu ausgekleidet wurde aber trotzdem verbrennungstechnisch einen deutlichen Sicherheitsabstand zum Stand der Technik zeigt.

Quecksilber

An der Anlage E konnten mit den kontinuierlich arbeitenden Hg-Analysatoren sowohl im Roh- als auch im Reingas nur sehr geringe Konzentrationen an Quecksilber nachgewiesen werden. Alle Werte liegen deutlich < 10 µg/m³_{n.tr.} mit kurzzeitigen Spitzen bis 25 µg/m³_{n.tr.}.

Während sich dieser Befund durch die Analyse der Rohgasproben am 16.01.2018 auch für die Stundenmittelwerte mit 6,2, 13,4 und 3,6 µg/m³_{n.tr.} bestätigt, weisen die Ergebnisse der Analysen für den 17.01.2018 einen Stundenmittelwert von 499 µg/m³_{n.tr.} und einen von 96,5 µg/m³_{n.tr.} und für den 18.01.2018 einen Stundenmittelwert von 400 µg/m³_{n.tr.} aus. Die zu den genannten Werten korrespondierenden Reingaswerte ergeben Quecksilberkonzentrationen von 278 bzw. 50,4 µg/m³_{n.tr.} und 271 µg/m³_{n.tr.}.

Die Speziierungsmessungen an Anlage E zeigen insbesondere für Hg-Konzentrationen > 100 µg/m³_{n.tr.} keine gute Übereinstimmung zu den Hg-Gesamtmessungen. Während es für die Rohgaswerte zu Mehrbefunden kam, weisen die Reingaswerte überwiegend Minderbefunde auf. Die Abweichungen schwanken stark zwischen -46 und +94 %. In Übereinstimmung mit den bereits an den anderen Anlagen gefundenen Ergebnissen, liegen auch in Anlage E im Reingas überwiegend Hg(II)-Verbindungen vor.

Für die hohen Hg-Rohgaswerte liegt die Minderungsleistung des katalytischen Filters zwischen 56 und 67 %. Für die geringen Hg-Konzentrationen ergibt sich eine uneinheitliche Datenlage mit Minderungen zwischen 22 und 74 % aber auch Hg-Freisetzen um 10 %.

Dioxine und Furane

Mit der in Anlage E installierten katalytischen Filtration kann der Grenzwert für Dioxine und Furane sicher eingehalten werden. Die Analysen ergaben Reingaskonzentrationen von 0,019 und 0,02 ng/m³_{n.tr.}.

2.8 Anlage F

Die Messungen an der Anlage F wurden vom 14.08. bis zum 16.08.2018 durchgeführt. Während der Messkampagne wurde die Anlage im Regelbetrieb gefahren. In der Anlage F wird ein Flachbettofen verwendet. Die Abgasreinigung ist mit einer katalytischen Filtration ausgerüstet.

Aufgrund der Umlenkung des Abgases im Messquerschnitt war eine Volumenstrombestimmung im Rohgas nicht möglich. Die Temperatur lag zwischen 200 und 212 °C bei Sauerstoffgehalten zwischen 12,4 und 15,2 Vol. % O₂. Am Kamin betrug das Abgasvolumen 2.300 bis 3.300 m³/h mit Temperaturen zwischen 153 und 160 °C und Sauerstoffgehalten zwischen 12,3 und 15,5 Vol. % O₂.

Der Staubgehalt im Reingas betrug < 0,2 mg/m³_{n.tr.}. Damit liegen auch an der Anlage F die Ergebnisse mit deutlichem Abstand unterhalb des geforderten Grenzwertes von 10 mg/m³_{n.tr.}.

Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

An allen drei Messtagen lagen die gemessenen und auf 11 % normierten CO-Konzentrationen mit 0 bis 31 mg/m³_{n.tr.} (Rohgas) respektive 0 bis 26 mg/m³_{n.tr.} (Reingas) in einem für Krematorien sehr niedrigen Bereich. Gleiches gilt für Gesamtkohlenstoff mit 0,7 bis 3,4 mg/m³_{n.tr.} (Rohgas) respektive 0,7 bis 3,4 mg/m³_{n.tr.} (Reingas). Der Kremationsofen erfüllt somit verbrennungstechnisch die Vorgaben des Stands der Technik mit deutlichem Sicherheitsabstand.

Quecksilber

Laut der kontinuierlichen Quecksilbermessungen gab es am 14.08.2018 keine Einträge von Quecksilber in das Rohgas hinter Kremation. Demgegenüber kam es am 15. und 16.08. mehrfach zu deutlichen Quecksilberfreisetzungen ins Rohgas. Die dabei aufgetretenen Hg-Konzentrationen erreichten mehrere hundert µg/m³_{n.tr.} mit Spitzen bis in den mg/m³-Bereich hinein. Die Konzentrationsspitzen hatten eine Dauer von wenigen Minuten, bis zu einer halben Stunde. Je nach Rohgassituation zeigen sich Quecksilberspitzen auch im Reingas.

Die Auswertung der Stundenmittelwerte bestätigt das Auftreten von Quecksilberspitzen. Im Gegensatz zur kontinuierlichen Messwerterfassung wird auch am 14.08.2018 ein Stundenmittelwert von 499 µg/m³_{n.tr.} ermittelt. Weitere Stundenmittelwerte erreichen ca. 855 und 1.563 µg/m³_{n.tr.}. Die anderen 6 Stundenmittelwerte ergeben Hg-Rohgaskonzentrationen zwischen 10,7 und 138 µg/m³_{n.tr.}.

Auf der Reingasseite bleiben die Hg-Spitzen sichtbar. Korrespondierend zu den o. g. Werten ergeben sich die Stundenmittelwerte im Reingas zu 438, 806 und 1154 µg/m³_{n.tr.}.

Die Ergebnisse der Speziierungsmessungen waren überwiegend in guter Übereinstimmung zu den Hg-Gesamt-Messungen. Drei Messungen wiesen deutliche Abweichungen zwischen 40 und 57 % auf. Auch an Anlage F bestand trotz erheblicher Hg(0)-Anteile im Rohgas das Quecksilber im Reingas überwiegend aus Hg(II)-Verbindungen.

Ein Abscheidegrad konnte aufgrund der fehlenden Volumenstrommessung im Rohgas nicht berechnet werden. Auf Basis der Quecksilberkonzentrationen erscheint mit der installierten Technik eine Quecksilberminderung nicht ausreichend gegeben.

Dioxine und Furane

Für die Reingaskonzentrationen an Dioxinen und Furanen wurden Werte von 0,0023, 0,0026 und 0,0025 ng/m³_{n.tr.} ermittelt. Damit wird mit der installierten katalytischen Filtration der Grenzwert für Dioxine und Furane sicher unterschritten.

2.9 OSPAR Emissionsfaktoren

Die OSPAR Kommission führt zur Überprüfung des Fortschritts der zum Schutz und zum Erhalt des Nord-Ost-Atlantiks und seiner Ressourcen umgesetzten Maßnahmen Befragungen der Mitgliedsstaaten durch. In [20] wurden für die Bundesrepublik Deutschland die in Tabelle 17 genannten Zahlen veröffentlicht. Auf der Grundlage dieser Daten wurde für das Jahr 2014 die gesamte Quecksilberemission aus Krematorien für die Bundesrepublik Deutschland mit 39 kg abgeschätzt.

Tabelle 17: Quecksilberemissionen aus Krematorien in Deutschland

Jahr	Anlagen [-]	Kremationen [-]	Hg-Emission [kg]	Bemerkung
Mit installierter Quecksilberminderungstechnik				
2004	105	337.845	17,7	-
2014	144	485.714	26,5	Ausgerüstet mit Anlagen gemäß BAT wie Flugstromverfahren und Festbettfilter und Einsatz von Aktivkohlen oder Aktivkoxen
Ohne Quecksilberminderungstechnik				
2004	21	87.155	18,3	Ausgerüstet mit BAT zur Minderung anderer Schadstoffe (wie Staub, Dioxine) aber nicht mit BAT zur Quecksilberminderung
2014	15	50.595	12,7	-

Im Rahmen der in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Messungen ergeben sich die in Tabelle 18 angegebenen Hg-Frachten für die untersuchten Krematorien. Die Kremationsanlagen A bis D sind mit Quecksilberminderungstechniken ausgestattet und zeigen eine Hg-Emissionsbandbreite von 0,0071 g/h bis 0,0607 g/h. Im Mittel ergibt sich daraus eine Hg-Fracht von 0,0225 g/h für derartige Anlagen. Da die Kremationsdauer im Zuge der Messkampagnen jeweils bei rund einer Stunde lag, korrespondieren die angegebenen Hg-Frachten mit den Frachten pro Kremation. Über die Anzahl der durchgeführten Kremationen in Deutschland, unterteilt nach Anlagen mit und ohne Hg-Minderungstechniken, liegen keine Informationen vor. Um die Vergleichbarkeit zu früheren Abschätzungen herzustellen, wird im Folgenden von den gleichen jährlichen Kremationszahlen ausgegangen, d. h. 485.714 Kremationen in Anlagen mit Hg-Minderungstechniken. Für diese Anlagen kann die gesamte Hg-Emission in der Bundesrepublik Deutschland somit mit 10,9 kg/a abgeschätzt werden.

Die Anlagen E und F (Tabelle 18) repräsentieren Anlagen ohne Hg-Minderungsmaßnahmen. Im Durchschnitt muss bei diesen Anlagen mit einer Hg-Emissionsfracht von 0,2468 g/h gerechnet werden, die im Mittel um den Faktor 10 höher liegt als bei Anlagen mit installierter Hg-Minderungstechnik. Auf analoge Weise lässt sich somit unter Zugrundelegung von 50.595 Kremationen auch für diese Anlagen die gesamte Hg-Emission in der Bundesrepublik Deutschland mit 12,5 kg/a abschätzen.

Tabelle 18: Hg-Emissionen aus den vermessenen Anlagen A bis F

Krematorium	Quecksilberemission ¹⁾ [g Hg/h]
Anlagen mit installierter Quecksilberminderungstechnik	
Anlage A	0,0071
Anlage B	0,0137
Anlage C	0,0084
Anlage D	0,0607
Anlagen ohne Quecksilberminderungstechnik	
Anlage E	0,1155
Anlage F	0,3781

Hinweis: ¹⁾ Emissionsangaben als Mittelwert über alle Probenahmen der jeweiligen Anlage

Aus den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen lassen sich unter Berücksichtigung der mit derartigen Abschätzungen verbundenen Unsicherheiten folgende Erkenntnisse für die Bundesrepublik Deutschland ableiten:

- 1) Die Quecksilberemissionen aus Anlagen mit installierten Hg-Emissionsminderungstechniken sind aus heutiger Sicht deutlich niedriger als in 2014 abgeschätzt; man kann davon ausgehen, dass bei diesen Anlagen die tatsächliche Quecksilberemission um 50 bis 60 % geringer ist.
- 2) Die Quecksilberemissionen aus Anlagen ohne Hg-Emissionsminderungstechniken haben sich auf dem Niveau von 2014 bestätigt.
- 3) Die gesamte Quecksilberemission aus Krematorien lässt sich für die Bundesrepublik Deutschland demnach mit 25 kg/a abschätzen, wenn man bedenkt, dass mögliche Steigerungen der Kremationszahlen durch eine Verschiebung des Anteils von Anlagen mit installierter Hg-Minderungstechnik im gleichen Zeitraum z. T. kompensiert werden konnten.

2.10 Bewertung der Quecksilbermessungen

Die an den Kremationsanlagen bezüglich Quecksilber durchgeführten Messkampagnen sind mit der parallelen Bestimmung

- ▶ von Stundenmittelwerten nach DIN EN 13211
- ▶ einer Zweitbestimmung der Stundenmittelwerte mit zusätzlicher Speziierung des Quecksilbers
- ▶ einem kontinuierlichen Hg-Monitoring

im Roh- und Reingas aufwändig konzipiert. Wie die durchgeführten Messungen zeigen, war der Aufwand vollumfänglich gerechtfertigt.

Zunächst lässt sich ein umfassendes Bild des Verlaufs der Quecksilberemissionen aufzeigen. Dieses ist für die Wahl der geeigneten Abgasreinigungstechnik mindestens so wesentlich wie die Konzentrationshöhe. Es hat sich bestätigt, dass der Quecksilbereintrag in das Rohgas hinter Kremationen extremen Schwankungen unterliegt und aus technischer Sicht unvorhersehbar ist. Während die Mehrzahl der Kremationen nur zu moderaten Quecksilbereinträgen führte (aus 54 Messungen waren 26 Hg-Konzentrationen $< 20 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ und weitere 15 Hg-Konzentrationen $< 100 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$), wiesen 13 von 54 Stundenmittelwerte Hg-Konzentrationen von z. T. deutlich $> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ aus. Dabei kommt es immer zu einem sehr steilen Anstieg der Konzentration und in den meisten Fällen ebenso steilem Abfall. Die Breite einer Hg-Konzentrationspitze korrespondiert mit der Dauer einer einzelnen Kremation.

Nur vereinzelt sind die Quecksilberfreisetzungen so massiv, dass die Hg-Konzentrationen über einen längeren Zeitraum auf entsprechend hohem Niveau ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$) verbleiben.

Auf Basis der Daten wird deutlich, dass Kremationsanlagen zwingend mit einer leistungsstarken Technik zur Minderung von Quecksilber ausgestattet sein müssen.

Darüber hinaus lassen sich aufgrund der Dreifachbestimmung der Quecksilberkonzentrationen die Daten auf Konsistenz überprüfen. Dieses ist besonders vor dem Hintergrund sinnvoll, dass die Messstellen aufgrund der baulichen Gegebenheiten selten optimal eingerichtet werden können (besonders im Rohgas) und damit im Bereich der Probenahme Schwankungen im Strömungsprofil nicht ausgeschlossen werden können. Auf Basis der aus den unterschiedlichen Messungen gewonnenen Daten lassen sich in Bezug auf die Messtechnik die folgenden Kernaussagen ableiten:

- ▶ Vom Einsatz kontinuierlicher Messgeräte hinter Kremationsanlagen ist abzuraten. Der Einsatz dieser Messtechnik zur Überwachung der Hg-Emission für eine Anlage, die im Einschichtbetrieb gefahren wird, ist unverhältnismäßig. Darüber hinaus ist ein hoher Kalibrier- und Wartungsaufwand erforderlich, der nur von Fachpersonal durchgeführt werden sollte.
Der Vergleich zwischen den kontinuierlichen Messungen und den Analysen der diskontinuierlichen Probenahme weist deutliche Unterschiede in den Ergebnissen auf. Bei den kontinuierlichen Messungen kommt es zu Minderbefunden. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass es sich bei den Hg-Verbindungen hinter Kremationen nicht (nur) um HgCl_2 handelt und die Reduktion des zweiwertigen Quecksilbers, die innerhalb der Messgeräte stattfindet und auf HgCl_2 ausgelegt wurde, deshalb nicht vollständig erreicht wird. Hinter Kremationsprozessen ist nicht geklärt, mit welchen Verbindungspartnern das zweiwertige Quecksilber vorliegt.
- ▶ Die parallel zu den Hg-Gesamt-Messungen durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Anteile an elementarem $\text{Hg}(0)$ und an $\text{Hg}(\text{II})$ -Verbindungen belegt, dass elementares Quecksilber im Rohgas in wechselnden Anteilen enthalten ist. Im Reingas liegen ausnahmslos überwiegend $\text{Hg}(\text{II})$ -Verbindungen vor. Dieser Befund ist unabhängig vom $\text{Hg}(0)$ -Niveau im Rohgas und von der eingesetzten Abgasreinigungstechnik.
Tabelle 19 zeigt beispielhaft Daten aus einer der vermessenen Anlagen. Angegeben sind die Ergebnisse der Hg-Gesamt-, $\text{Hg}(0)$ und der $\text{Hg}(\text{II})$ -Messungen sowie die prozentualen Anteile der beiden Hg-Spezies. Die prozentualen Anteile beziehen sich auf das korrespondierende Ergebnis der Hg-Gesamt-Messung. Aus den Abweichungen zu 100 % wird die Differenz zwischen den beiden Messungen (Hg -Gesamt und Summe aus $\text{Hg}(0)$ + $\text{Hg}(\text{II})$) ersichtlich.

Tabelle 19: Quecksilberverteilung im Rohgas (Beispiel) in $[\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N.tr.}}]$, 9 Messungen

Spezies	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gesamt-Hg*	1539,9	188,8	103,2	37,3	10,9	5,8	29,3	35,7	47,5
Hg(II)*	768,3	132	97,5	18,1	10,9	4,6	20,4	17,1	33,9
	50%	70%	94%	49%	100%	79%	70%	48%	71%
Hg(0)*	458,6	7,9	6,3	25,3	2,3	1,4	8,2	21,5	6,6
	30%	4%	6%	68%	21%	24%	28%	60%	14%

- ▶ Der Bezug der Quecksilberkonzentrationen auf den Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol. % sollte kritisch diskutiert werden, siehe hierzu auch Kapitel 3.3. Wie an folgendem Beispiel gezeigt wird, können durch den O_2 -Bezug extrem überhöhte Konzentrationsangaben entstehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es zwischen den Kremationen zu Frischlufteinträgen kommt und damit der Abgassauerstoffgehalt nahe 21 Vol. % liegt. Der über den Sauerstoffgehalt gemäß Gl. 2 ermittelte Korrekturfaktor wird dann sehr groß.

$$c_{\text{Bezug}} = c_{\text{Betrieb}} \frac{21 - O_{2 \text{ Bezug}}}{21 - O_{2 \text{ Betrieb}}}$$

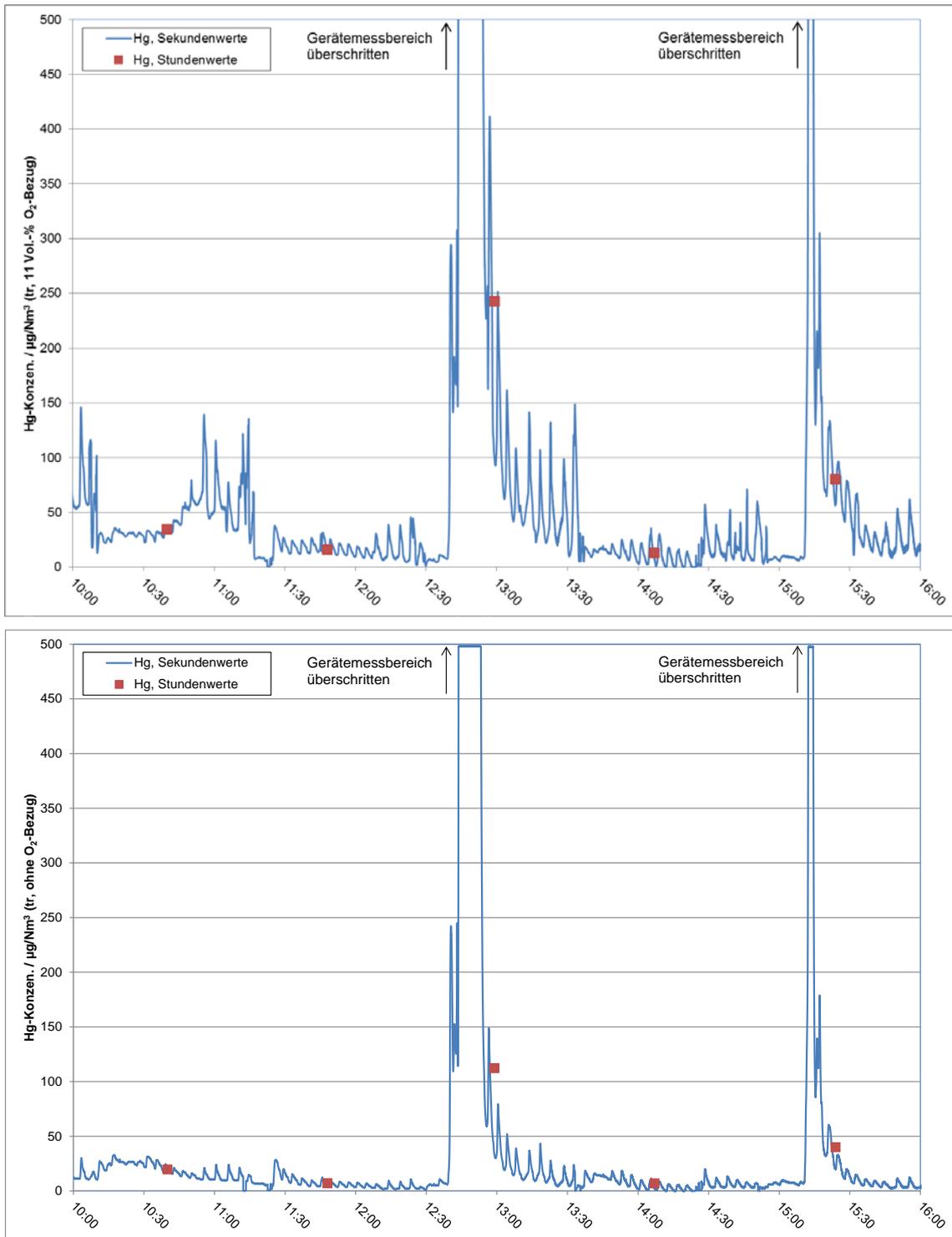
Gl. 2

Gerade bei Betrachtung eines kontinuierlich erfassten Konzentrationsverlaufs kann die Darstellung der auf einen O_2 -Gehalt von 11 Vol. % umgerechneten Werte eine drastische Überhöhung der real aufgetretenen Quecksilbereinträge erzeugen. Zur Verdeutlichung des Sachverhaltes zeigt Abbildung 6 den Hg-Konzentrationsverlauf in $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ über der Zeit sowohl mit einem Bezugs- O_2 -Gehalt von 11 Vol.% als auch ohne Umrechnung der erfassten Werte. Zusätzlich sind als rote Punkte die berechneten Stundenmittelwerte angegeben. Dargestellt ist der Zeitraum zwischen 10:00 und 16:00 Uhr. Die wesentlichen Aussagen sind im Folgenden beschrieben: Die Darstellung mit Sauerstoffbezug zeigt zwischen 10:00 und 10:10 Uhr und zwischen 10:45 und 11:15 Uhr kurze Hg-Emissionsspitzen bis $150 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Außerdem ist ab 12:30 Uhr für ca. 30 Minuten ein deutlicher Konzentrationspeak mit Werten außerhalb des Gerätemessbereichs zu sehen. Nach Abfall des Peaks in den Bereich um $50 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ treten mehrere kleine Konzentrationsspitzen bis $150 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ auf. Eine weitere Überschreitung des Gerätemessbereichs erfolgte gegen 15:00 Uhr für wenige Minuten. Bis zum Abfall des Peaks unter $50 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ vergehen ca. 30 Minuten. Die dargestellten Stundenmittelwerte liegen bei ca. 40, 15, 245, 10 und $75 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$.

In der Darstellung des Quecksilberkonzentrationsverlaufs ohne Umrechnung der Werte auf einen Bezugs- O_2 -Gehalt liegen die Hg-Konzentrationswerte deutlich unterhalb $50 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ bis 12:30 Uhr. Der dann auftretende Hg-Konzentrationspeak mit Werten außerhalb des Gerätemessbereichs dauert ca. 30 Minuten und fällt dann abrupt auf Werte deutlich unterhalb $50 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ mit kleinen Spitzen bis $50 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Auch in dieser Darstellung ist ab 15:00 Uhr für wenige Minuten ein weiterer Hg-Konzentrationsanstieg mit Werten außerhalb des Gerätemessbereichs zu sehen. Innerhalb von 30 Minuten fällt die Hg-Konzentration auf Werte von wenigen $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$. Die dargestellten Stundenmittelwerte liegen bei ca. 20, 5, 105, 5 und $45 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$.

Wie das Beispiel zeigt, werden im Bereich hoher Sauerstoffkonzentrationen, wie sie zwischen den Kremationen betriebsbedingt immer auftreten, deutlich zu hohe Hg-Konzentrationen (bis Faktor 5) angezeigt. Während die durch die Kremation verursachten Quecksilbereinträge unverändert dargestellt werden (hier herrschen betriebsbedingt niedrigere O_2 -Gehalte zwischen 10 und 15 Vol.%), werden durch die Umrechnung auch während der Nachverbrennung höhere Hg-Konzentrationen über einen längeren Zeitraum angezeigt. Dies führt dazu, dass auch die Stundenmittelwerte um Faktoren zwischen 1,5 und 2,3 auseinander liegen.

Abbildung 7: Kontinuierlicher Hg-Konzentrationsverlauf, aus Messbericht entnommen



oben: mit Bezug auf 11 Vol.% O₂; unten: ohne Umrechnung der erfassten Werte

3 Analyse der Emissionsminderungs- und Energieeinsparungspotenziale sowie Handlungsempfehlungen

3.1 Emissionsminderung – Schadstoffe nach 27. BImSchV

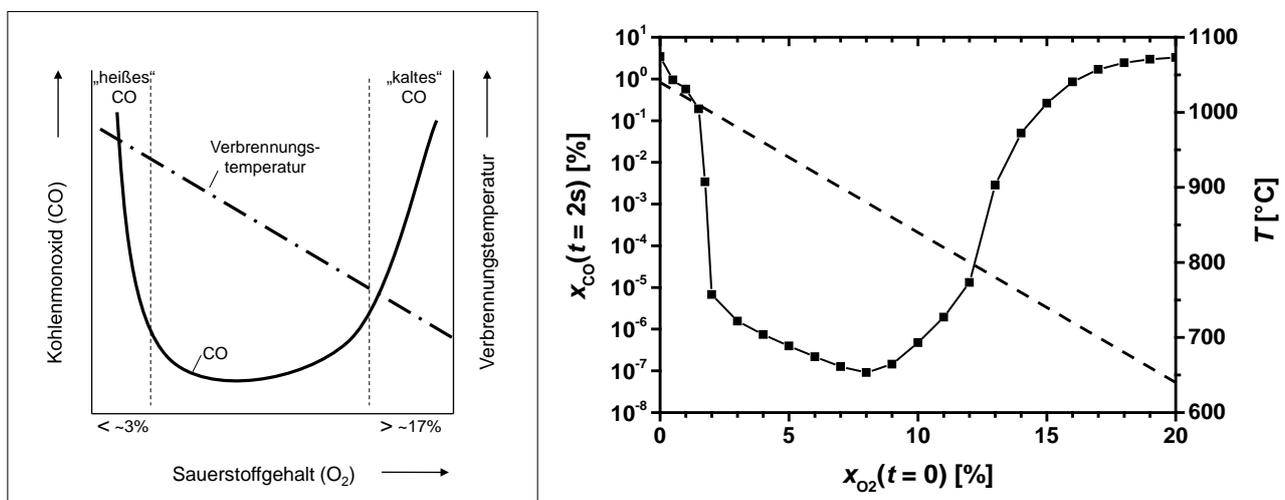
Die Bewertung des status quo der emissionsmindernden Maßnahmen erstreckt sich auf die über die 27. BImSchV erfassten Schadstoffe – Kohlenmonoxid, Gesamtkohlenstoff, Staub und PCDD/F. Die Minderungsmaßnahmen werden entsprechend der Untergliederung in verbrennungsabhängige und verbrennungsunabhängige Schadstoffe bewertet.

3.1.1 Verbrennungsabhängige Schadstoffe

Aus der Gruppe der verbrennungsabhängigen Parameter nimmt Kohlenmonoxid (CO) eine herausragende Stellung ein, dem auch der Gesetzgeber in der 27. BImSchV mit seiner Grenzwertforderung von 50 mg/Nm^3 (vgl. Tab. 13) Rechnung getragen hat. In der VDI-Richtlinie 3891 wurde der Stand der Technik für Kremationsofensysteme beschrieben. Ofensysteme, die dem Stand der Technik genügen und die Voraussetzungen für die Einhaltung des CO Grenzwertes bieten, sind als Mehrkammerofensysteme zu konzipieren, wodurch eine klare räumliche Trennung zwischen dem eigentlichen Kremationsvorgang in der Hauptbrennkammer bzw. dem Ascheausbrand in der Aschenachbrennkammer und dem Abgasausbrand in der Nachbrennkammer erfolgt. Diese räumliche Trennung der Vorgänge ist insofern von Relevanz, da man in der Haupt- und Aschenachbrennkammer bestrebt ist, die Gasgeschwindigkeiten und damit den Ascheaustrag über den Abgaspfad gering zu halten. Demgegenüber werden turbulente Strömungsbedingungen in der Nachbrennkammer angestrebt um unter gezielter Verbrennungsluftzufuhr den Gasausbrand abzuschließen.

Mit Blick auf einen möglichst vollständigen Gasausbrand (Umsatz von CO zu CO_2), wurde von Schetter [7] ein qualitativer verbrennungstechnischer Zusammenhang entwickelt, der von Bachmann et al. [7] durch reaktionskinetische Betrachtungen bestätigt wurde (Abbildung 7). Um den Verbrennungsprozess durch vollständigen Umsatz von CO zu CO_2 abzuschließen, wird Verbrennungsluft benötigt. Da es sich um eine exotherme Reaktion handelt, wird dabei Energie freigesetzt, die sich in der Verbrennungstemperatur widerspiegelt. Hohe Verbrennungstemperaturen ihrerseits unterstützen den Prozess durch Bereitstellung der für Verbrennungsreaktionen notwendigen Aktivierungsenergie.

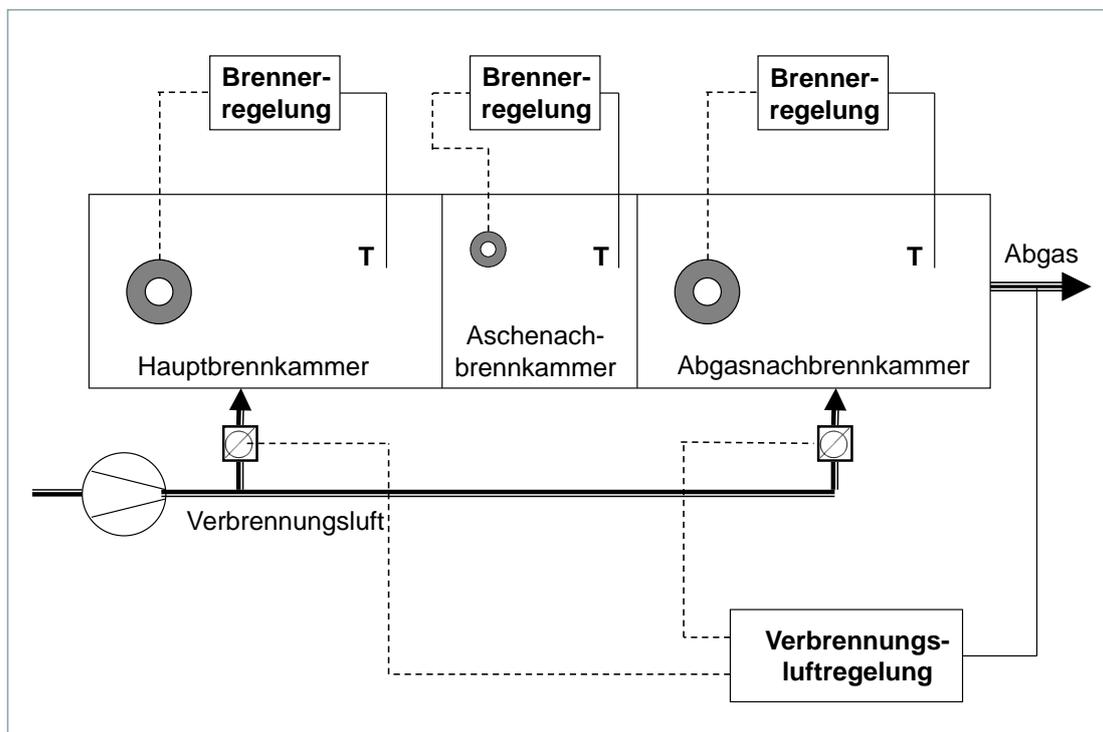
Abbildung 8: Verbrennungstechnische Zusammenhänge nach Schetter ([7]) und Bachmann et al. ([8])



Insbesondere bei instationären Prozessverläufen, wie sie bei der Kremation vorliegen, wird durch Verbrennungsluftüberschussbedingungen dem Prozess mehr Sauerstoff zur Verfügung gestellt, als dies für den Umsatz von CO zu CO₂ erforderlich wäre. Diese überschüssige Verbrennungsluft, die an der Reaktion nicht teilnimmt, wird von der freiwerdenden Verbrennungsenergie mit erwärmt, wodurch sich die resultierende Gastemperatur vermindert. Je mehr also Verbrennungsluft zugegeben wird (hoher Sauerstoffgehalt), desto geringer ist die resultierende Gastemperatur, wodurch die Aktivierungsenergie für Folgereaktionen abnimmt. Dies führt zu einem verminderten CO-Umsatz, charakterisiert als „kaltes“-CO in Abbildung 7, der nur durch einen Mehraufwand an Stützfeuerung kompensiert werden kann. Reduziert man dagegen die Verbrennungsluftzuführung so vermindert sich die zusätzlich zu erwärmende Gasmenge, wodurch sich höhere Verbrennungstemperaturen einstellen. Andererseits besteht das Risiko, dass vor allem bei mangelnder Turbulenz in der Nachbrennkammer nicht alle Kohlenmonoxid-Verbindungen mit Sauerstoff versorgt werden, so dass selbst bei ausreichend hohen Verbrennungstemperaturen ein verminderter CO-Umsatz, in Abbildung 7 als „heißes“-CO dargestellt, auftritt. Es kommt also darauf an, dass die Nachverbrennung bei optimalem O₂-Gehalt im Abgas betrieben wird, wobei sich in der Praxis eine Richtgröße von etwa 11 Vol.-% in der Nachbrennkammer von Krematorien als zweckmäßig erwiesen hat.

Um bei den unterschiedlichen Phasen des Kremationsverlaufs den Prozess mit ausreichend Sauerstoff zu versorgen, enthalten die meisten Prozesssteuerungen eine sauerstoffgeregelt Verbrennungsluftführung, über die die Nachbrennkammer versorgt wird (Abbildung 8).

Abbildung 9: Schema einer sauerstoffgeregelt Verbrennungsluftführung ([1])



In den meisten Fällen lassen sich die Ursachen für zu hohe CO-Emissionskonzentrationen auf eine ungenügende Verbrennungsluftzuführung zurückführen. In vielen Fällen handelt es sich dabei um folgende Defekte:

- **Defektes Mauerwerk:** aufgrund des Ofenunterdrucks gelangen Luftströme in den Ofen ein, die einerseits unkontrolliert an der Verbrennung teilnehmen und andererseits die sauerstoffgeregelt Prozessführung behindern.

- ▶ **Defekte Messgeräte:** u.a. O₂-Sonde oder Thermoelementbruch; insbesondere können defekte O₂-Sonden zu einer fehlerhaften Interpretation der tatsächlich vorherrschenden Verbrennungszustände führen, die die sauerstoffgeregelt Prozessführung ebenfalls behindern.
- ▶ **Defekte Verbrennungsversorgung:** u.a. defektes Gebläse, verstopfte Leitungen.
- ▶ **Defekte in der Feuerungsanlage:** z. B. Unterbrechung Gasversorgung, Druckschwankungen in der Gaszuleitung, Ausfall der Heizwendeln bei Elektroofensystemen.
- ▶ **Partielles Zusetzen des Abgasweges:** z. B. durch Verschmutzung, Verblockungen.
- ▶ **Defekte in der Prozesssteuerung:** u.a. Ausfall und fehlerhafte Justierung von Reglerbaugruppen sowie Stellgliedern.
- ▶ **Störungen bei der Emissionsmessung und Emissionsmesswerterfassung.**

Diesen Störungseinflüssen kann wirkungsvoll durch regelmäßige Wartungen und Anlageninspektionen entgegengewirkt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die entsprechenden Organisationsstrukturen mit klar geregelten Verantwortlichkeiten und Arbeitsanweisungen vorliegen und eigens hierfür ausgebildete und geschulte Mitarbeiter eingesetzt werden.

Zusammenfassend kann für den Schadstoffparameter „CO“ festgehalten werden, dass die Umsetzung der in der VDI Richtlinie 3891 formulierten Vorgaben zum Stand der Technik ausreichen, um der 27. BImSchV zu genügen. In jedem Einzelfall ist der aktuelle Zustand der Anlage, insbesondere der Feuerfestauskleidung und der O₂-Messung, regelmäßig zu prüfen und ggf. Reparaturmaßnahmen einzuleiten.

Wie aus einer Vielzahl von Untersuchungen in Krematorien und anderen Verbrennungsprozessen [2, 9] hervorgeht, zeigen CO und C_{Ges} ein analoges Emissionsverhalten. Niedrige CO-Konzentrationen im Abgas gehen mit niedrigen C_{Ges}-Gehalten einher und umgekehrt. Für Krematorien hat sich gezeigt, dass üblicherweise bei Einhaltung des CO-Emissionsgrenzwertes von 50 mg/Nm³ die Abgasemissionskonzentrationen an C_{Ges} unter 20 mg/Nm³ liegen [2, 10]. Man kann also zusammenfassen, dass bei Umsetzung vorgenannter primärseitiger Minderungsmaßnahmen im Kremationsofen auch die Konzentration von Gesamtkohlenstoff im Abgas minimiert wird und die Vorgaben der 27. BImSchV eingehalten werden.

Auch das Niveau der polychlorierten Dibenzo-p-dioxine und -furane wird maßgeblich durch die verbrennungstechnischen Bedingungen bestimmt. Als wesentliche Einflussgrößen gelten für die Nachbrennkammer [11, 12, 13, 14]:

- ▶ ausreichend hohe Verbrennungstemperatur
- ▶ ausreichende Verweilzeit der Abgase
- ▶ hohe Turbulenz zur intensiven Vermischung der Reaktionspartner.

Diese in der Literatur unter „**3 T's**“ (**t**emperature, **t**ime, **t**urbulence) bezeichneten Bedingungen zur Erzielung eines günstigen PCDD/F-Niveaus bei der Verbrennung reichen jedoch nicht aus, um die in Tabelle 13 angegebenen PCDD/F-Emissionen im Abgas in jedem Betriebszustand gesichert einzuhalten (vgl. hierzu Abschnitt 3.1.3).

3.1.2 Verbrennungsunabhängige Schadstoffe

Mit Blick auf die 27. BImSchV ist der Fokus auf die Stäube gerichtet, die ihrerseits in begrenztem Umfang auch Träger adsorbierter gasförmiger Schadstoffe sind. Der Ascheaustrag aus dem Kremationsofen wird durch geringe Gasgeschwindigkeiten in der Hauptbrennkammer soweit wie möglich minimiert. Die üblicherweise im ungereinigten Abgas festgestellten Staubgehalte liegen meist unter

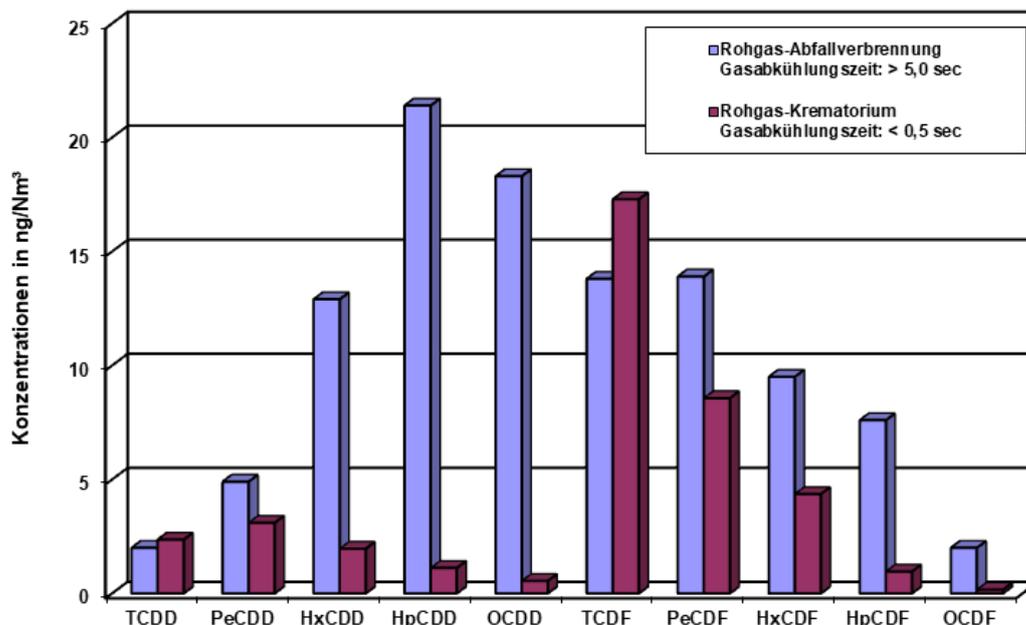
1 g/Nm³. Mit den in Krematorien üblicherweise eingesetzten Gewebeatstaubern lassen sich im bestimmungsgemäßen Betrieb Stäube gesichert unter 10 mg/Nm³ abscheiden (vgl. hierzu Abschnitt 1.2.3.). Dies gilt auch für Trockensorptionsverfahren, bei denen zuvor Sorbentien zur Schadgasadsorption in den Abgasstrom vor dem Gewebeatstauber zugegeben wurden.

Von der aktuellen 27. BImSchV noch nicht erfasst sind Quecksilber und seine Verbindungen. Hierzu wird auf Abschnitt 3.2. verwiesen.

3.1.3 Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane

Eine Sonderstellung bei der Bewertung der Emissionsminderung nimmt die Gruppe der polychlorierten Dibenzo-p-dioxine und -furane (PCDD/F) ein, da sie nach der sogenannten „**de-novo-Synthese**“ während der Abgaskühlung entstehen können. Hagenmaier [15] beschreibt die Vorgänge an den Oberflächen von Filterstäuben als ein dualistisches Prinzip der Bildung und Zerstörung. Es kann angenommen werden, dass die PCDD- und PCDF- Bildung nach der de-novo-Synthese eine Sättigung erreicht, die im Wesentlichen von den Faktoren des Deacon-Gleichgewichtes - Chlor, Kohlenstoff, Schwermetalle, Schwefel, Sauerstoff - abhängt. Die Bildungsgeschwindigkeit unter Sauerstoffmangelbedingungen ist demzufolge erheblich geringer und kann sogar gegen Null gehen. In umfangreichen Untersuchungen an einer Abfallverbrennungsanlage wurde von Düwel et al. nachgewiesen [16], dass sich im Verlauf der Abkühlung zunächst PCDF-Kongenere bilden bevor PCDD-Kongenere entstehen. Vor diesem Hintergrund kommt der Abkühlungszeit eine zentrale Bedeutung zu. Vergleicht man typische PCDD/F-Homologenverteilungen im Abgas nach der Abkühlung von Krematorien und Abfallverbrennungsanlagen (Abbildung 9), so bestätigt sich der Einfluss der Abkühlzeit offensichtlich in der Form, dass eine schnelle Abgaskühlung zur Behinderung der de novo Synthese von Vorteil ist. Für Krematorien ist also festzuhalten, dass durch eine kompakte Bauweise der Abgaskühler der PCDD/F-Rückbildung entgegen gewirkt werden kann [7].

Abbildung 10: Typische PCDD/F-Homologenverteilung im Abgas bei unterschiedlicher Abkühlzeit ([7])



Seit den Untersuchungen von Hagenmaier [15] ist ferner bekannt, dass chlor-organische Verbindungen wirkungsvoll durch katalytische Oxidation zerstört werden können. Dabei überlagern sich an den Katalysatoroberflächen (Wabenkatalysatoren oder katalysierende Filterschläuche) zwei Mechanismen, Adsorption der Schadgase und Oxidation zu CO₂, H₂O und HCl. Dabei konnte gezeigt werden, dass

vor allem bei hohen Eintrittskonzentrationen eine sehr wirkungsvolle Zerstörungsrate von PCDD/F erzielt werden kann. Zur sicheren Einhaltung der in der 27. BImSchV festgeschriebenen PCDD/F-Emissionsgrenzwerte kommen daher sowohl adsorptive Verfahren als auch Verfahren der katalytischen Oxidation zur Anwendung (vgl. hierzu Abschnitt 1.2.3).

Aufgrund möglicher PCDD/F-Rückbildungseffekte nach der de-novo-Synthese ist zur Emissionsminderung bei PCDD/F eine ganzheitliche Strategie anzuwenden, die die Baugruppen – Kremationsofen, Abgaskühlung und Abgasreinigung – gleichermaßen betrifft. Wie die Emissionsmessungen im Rahmen dieses Vorhabens sowie die Langzeituntersuchungen in anderen Krematorien [2, 10] zeigen, können durch konsequente Umsetzung ganzheitlicher PCDD/F-Minderungsstrategien der Grenzwert der 27. BImSchV von $0,1 \text{ ngTE/Nm}^3$ gesichert eingehalten und in vielen Fällen auch deutlich unterschritten werden. Dies gilt auch für den Einsatz von katalysierenden Gewebefiltern und bei reduzierten Temperaturen in der Nachbrennkammer.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Kremationslinien die gemäß der VDI Richtlinie 3891 nach dem Stand der Technik konzipiert und betrieben werden, den PCDD/F-Anforderung der 27. BImSchV mit den erforderlichen Sicherheitsabständen genügen. Gelegentlich in der Literatur zu findende Berichte über vereinzelte PCDD/F-Grenzwertverletzungen sind in aller Regel technischen Defekten und/oder mangelhafter Anlagenbetreuung zuzuordnen.

3.2 Emissionsminderung – Quecksilber

Die Abscheidung von Quecksilber aus dem Abgas unterscheidet sich grundlegend von der der übrigen Schwermetalle. Während Schwermetalle im Allgemeinen am Flugstaub adsorbieren und deshalb quantitativ durch die Abscheidung der Stäube aus dem Abgas entfernt werden können, ist Quecksilber bei den für die Entstaubung üblichen Betriebstemperaturen ($> 140 \text{ °C}$) nur zu einem geringen Teil an Partikel gebunden. Deshalb ist eine reine Staubabscheidung als Quecksilberminderungsmaßnahme unzureichend, es sind zusätzliche und gezielt auf die Abscheidung von Quecksilber abgestimmte Maßnahmen erforderlich. Darüber hinaus muss der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die für die Lösung der Reinigungsaufgabe technisch relevanten Eigenschaften wie Dampfdruck, Aggregatzustand, Adsorptionsverhalten etc. essentiell mit der chemischen Bindungsform verkoppelt sind. Für die Abgasreinigung hinter Kremationen eignen sich dazu adsorptive (trockene) Verfahren, vor allem weil diese Verfahren in einer Vielzahl von Anlagen bereits zur Abgasreinigung eingesetzt werden.

Eine umfassende Beschreibung der adsorptiven Verfahren findet sich in [17]:

Bei der Adsorption handelt es sich um eine durch Oberflächenkräfte bedingte Anlagerung von Molekülen aus einer Fluidphase an einer Oberfläche. Die Desorption ist der umgekehrte Vorgang. Stoffeigenschaften und Oberflächenstruktur entscheiden über die Stärke der Bindungskräfte und damit über die Stabilität der Anlagerung.

Aus einer Vielzahl unterschiedlicher Adsorbensmaterialien wie Zeolithen, Aluminiumoxiden, Silicagelen usw. haben sich kohlenstoffhaltige Adsorbentien (Aktivkohle oder Koks) für die Abscheidung von Quecksilber und seinen Verbindungen durchgesetzt. Durch eine geeignete Aktivierung kann das innere Porenvolumen (Makroporen, Mesoporen und Mikroporen) gezielt auf die Adsorption von Quecksilber abgestimmt werden.

Während die rein physikalische Adsorption von Hg(II) zu befriedigenden Abscheidegraden führen kann, ist sie in Bezug auf elementares Quecksilber sehr gering, d. h. elementares Quecksilber adsorbiert und desorbiert ungefähr gleich gut. Zur adsorptiven Abscheidung von Hg(0) werden die Adsorbentien deshalb mit einer reaktiven Komponente imprägniert. Die Imprägnierung erfolgt z. B. mit Schwefel (elementar oder in Verbindungen wie Schwefelsäure), mit Brom oder mit Kaliumjodid. Dadurch kann nach der zunächst physikalischen Adsorption eine chemische Reaktion zwischen Quecksilber und den jeweiligen reaktiven Komponente stattfinden; die Desorption wird unterbunden und

damit auch elementares Quecksilber dauerhaft auf der inneren Oberfläche bzw. im inneren Porenvolumen des Adsorbens gehalten. Dieses Prinzip wird als Chemiesorption bezeichnet. In der VDI-Richtlinie 3928 finden sich die in Tabelle 20 zusammengestellten Imprägnierungen; in Tabelle 21 sind die Anforderungen an Aktivkohlen zur Imprägnierung zusammengestellt.

Tabelle 20: Handelsüblich imprägnierte Aktivkohlen, Auszug aus VDI 3928 [18]

Imprägnierung mit	Menge [Gew. %]	Anwendungsbeispiele
Schwefelsäure	2 – 25	Ammoniak, Amine, Quecksilber
Kaliumjodid	1 – 5	H ₂ S, PH ₃ , Hg, AsH ₃ , radioaktives Methyljodid
Schwefel	5 – 20	Quecksilber
Brom	3 – 10	Quecksilber

Tabelle 21: Anforderungen an Aktivkohlen zur Imprägnierung für die Chemiesorption [19]

Parameter	Anforderung	Bemerkung
BET	300 m ² /g	Einfache Basisanwendungen Hg < 300 µg/m ³
	750 m ² /g	Höhere Anforderungen und hohe Schwankungen Hg > 300 µg/m ³
Körnung	d ₅₀ < 25 µm	Optimaler äußerer Stoffübergang
Schüttdichte	350 – 550 kg/m ³	Handling und gute Masse- Raumverteilung im Abgas
Temperaturbeständigkeit	Selbstentzündungstemperaturen möglichst hoch, > 280 °C (VDI 2263 bei 400 mL)	Brandschutz
	Brennzahl mit max. BZ 2	Maß zur Entzündbarkeit und Reaktionsfreudigkeit
	Hohe Mindestzündenergie 2,5 J	Grundlage für Explosionsschutz ohne baulich konstruktiven Explosionsschutz
Imprägnierung	H ₂ SO ₄ , S, KI, Br	Siehe VDI 3928

Inzwischen gibt es eine Vielzahl von gezielt für die Hg-Abscheidung entwickelten Adsorbentien mit angepasster Porenstruktur und einem hohen imprägnierten Porenvolumen. Die auf die Hg-Adsorption angepasste Porenstruktur fördert eine schnelle Adsorptionskinetik. Ein hohes imprägniertes Porenvolumen wird für hohe Adsorptionskapazitäten benötigt.

Entscheidend für den Erfolg der Abscheidung ist neben der Wahl des „richtigen“ Adsorbens eine ausreichende Kontaktzeit zwischen Schadstoff und Oberfläche. Voraussetzung dafür sind ein guter Stofftransport und Stoffübergang. Je nach Verfahren können dafür unterschiedliche Parameter herangezogen werden [19].

Wird ein Festbettadsorber als Reinigungsstufe eingesetzt, so durchströmt das Abgas ein Haufwerk aus körnigem Adsorbensmaterial. Als Parameter bieten dabei die Durchströmgeschwindigkeit und damit die Kontaktzeit und die Körnung des Adsorbens das für eine optimale Auslegung benötigte Anpassungspotenzial.

Beim sogenannten Flugstromverfahren wird das Adsorbens in den Abgasstrom dosiert und anschließend an einen Schlauchfilter wieder aus dem Gas abgetrennt. Je nachdem, wie die Einbringung des

Aufgabegutes in den Abgasstrom realisiert wird, können zunächst Adsorbenswolken entstehen, die es gilt, möglichst homogen sowohl örtlich als auch zeitlich über den Querschnitt zu verteilen. Zur besseren Ausnutzung des Sorbens wird ein großer Teil der abgeschiedenen Staubmenge wieder in den Flugstrom gegeben. Nur ein geringer Teil (üblich 1:10) wird aus dem System ausgeschleust und durch Frischadsorbens ersetzt. Beim Kugelrotorumlaufverfahren KRV wird das Sorbens mit dem rezirkulierten Staub auf einen, im Abgaskanal vor Schlauchfilter installierten Kugelrotor gegeben. Die Gasführung zwingt das Abgas ebenfalls durch den Kugelrotor, so dass es hier zu einer intensiven Mischung von Gas und Sorbens kommen kann.

Die Kremationsanlagen wurden so ausgewählt, dass der Stand der Technik innerhalb der Branche abgedeckt wird. Gleichzeitig wird ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Minderungstechniken und deren Wirksamkeit bei Anwendung unter stark diskontinuierlicher Betriebsfahrweise möglich. Aufgrund der Probenahme im Roh- und im Reingas kann eine belastbare Bewertung der Abscheideleistung der eingesetzten Minderungstechniken auch bei Konzentrationsspitzen erfolgen.

Erwartungsgemäß ist der Konzentrationsverlauf des Quecksilbers durch das Auftreten von Peaks gekennzeichnet. Zum Teil liegen diese im dreistelligen $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ -Bereich bis hin zu wenigen $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$.

Im Rohgas liegt das Quecksilber sowohl als elementares Quecksilber als auch in der Oxidationsstufe +2 vor, wobei überwiegend Hg(II) vorkommt, bei Konzentrationsspitzen konnten Hg(0)-Anteile auch etwas über 50 % liegen. Ein weiterer Befund, der sich anhand der durchgeführten Messungen verdichtet, ist, dass auch das im Reingas enthaltene Quecksilber überwiegend zweiwertig und nicht elementar vorliegt. Offensichtlich katalysiert Aktivkohle unter den gegebenen Randbedingungen die Oxidation von elementarem zu zweiwertigem Quecksilber.

Nachfolgende Tabelle 22 gibt einen Überblick über die erreichten Minderungsgrade in den untersuchten Anlagen. Dabei wurde zwischen Rohgaswerten < und > $20 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ unterschieden.

Tabelle 22: Übersicht über die erreichte Hg-Minderung für unterschiedliche Techniken
 a) Rohgaswert > $20 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ b) Rohgaswert < $20 \mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$

System	a)	min	max	Mittel	n	b)	min	max	n
Gewebefilter und Festbett					0		-98,3%	96,4%	9
Katalysator und Festbett		87,6%	98,8%	94,7%	4		-190%	11,5%	5
Kugelrotorumlaufverfahren KRV		89,7%	99,6%	94,5%	7		76,5%	84,8%	2
Trockensorption		77,6%	98,0%	85,2%	4		55,5%	81,0%	4
katalytische Filtration		56,8%	66,6%	61,7%	4		-13,3%	73,5%	5
katalytische Filtration		-177%	34,7%	-	7		-51,4%	10,2%	2

Zwei der untersuchten Anlagen (Anlage A und Anlage B) setzen ein Festbett ein. Während der Messkampagne sind in Anlage A nur geringe Quecksilbereinträge aufgetreten, so dass die Aussagen zum Minderungspotenzial bei Quecksilberspitzen sich lediglich auf die Ergebnisse aus Anlage B stützen. Hier zeigte sich, dass das Festbett auch bei stark schwankenden und hohen Hg-Einträgen mit einer mittleren Abscheideleistung von 95 % eine sehr gute Hg-Rückhaltung bietet. Aus der Auswertung der Betriebsphasen mit niedrigen Hg-Rohgaskonzentrationen zeigt sich aber auch, dass es zu einer Desorption von Quecksilber kommen kann. Rechnerisch kann diese sehr hoch ausfallen, weil es sich um niedrige Konzentrationen von wenigen $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n.tr.}}$ handelt.

Das Verfahren der Trockensorption wurde an einer Anlage mit Kugelrotorumlaufverfahren KRV (Anlage C) und einer Anlage mit klassischer Eindüsung vor Gewebefilter (Anlage D) untersucht. Das KRV zeigte sehr gute Minderungsleistungen über den gesamten Rohgaskonzentrationsbereich. Mit einer

Minderung von im Mittel 95 % im Bereich hoher Quecksilberkonzentrationen ist die Quecksilberrückhaltung mit dem von Festbetten vergleichbar. Mit der Trockensorption wurde ebenfalls eine gute Quecksilberminderung erreicht. Diese lag im Bereich hoher Quecksilberkonzentrationen im Mittel bei 85 % und damit deutlich unter der des KRV und des Festbetts. Im Gegensatz zum Festbett konnte bei beiden Trockensorptionsverfahren keine Desorption von Quecksilber (negativer Abscheidegrad) festgestellt werden.

Zwei der untersuchten Anlagen (Anlage E und Anlage F) sind mit katalytischer Filtration ausgestattet und verfügen damit nicht über eine zur Minderung von Quecksilber geeigneten Technik. Erwartungsgemäß zeigten sich starke Schwankungen in den erzielten Hg-Minderungen. Diese sind in erster Linie von anderen Randbedingungen abhängig, wie z. B. einer Adsorption an unverbranntem Kohlenstoff in der Flugasche, und damit nicht auslegungssicher. Ein Indiz dafür sind die deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Anlagen, die über unterschiedliche Öfen verfügen. Während in Anlage E vergleichsweise hohe Hg-Minderungen von im Mittel 62 % erreicht wurden, schwankten in Anlage F die berechneten Abscheidegrade zwischen einer deutlichen Desorption und einer Minderung von maximal 35 %. Bei niedrigen Hg-Rohgaskonzentrationen kam es in beiden Anlagen mit katalytischen Filtern zur Desorption von Quecksilber.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten:

- ▶ Es ist erforderlich, dass die Kremationsanlagen mit einer zur Minderung von Quecksilber ausgelegten Technik ausgestattet sind.
- ▶ Die gemäß Stand der Technik zur Verfügung stehenden Maßnahmen sind auch für den in Krematorien üblichen stark diskontinuierlichen Betrieb geeignet.
- ▶ Elementares Quecksilber wird genauso gut gemindert wie zweiwertiges und stellt somit keine gesondert zu betrachtende Minderungsaufgabe dar.

3.3 Bezugssauerstoff zur Angabe der Emissionswerte

Der Bezug der Quecksilberkonzentrationen auf den Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol. % sollte kritisch diskutiert werden. Tabelle 23 gibt eine Übersicht über alle während der Messkampagnen ermittelten O₂-Gehalte. Die Daten zeigen, dass die Verbrennung überwiegend mit höheren O₂-Gehalten gefahren wird.

Ein Bezugssauerstoffgehalt sollte sich an den Realbedingungen orientieren. Der derzeit in der 27. BImSchV festgeschriebene Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol. % liegt jedoch deutlich unter den gemessenen Werten von im Mittel um 14 Vol. %.

Obwohl in diesem Kapitel die Auswirkungen eines zu niedrig gewählten O₂-Bezugs lediglich am Beispiel der Hg-Emissionen diskutiert wurden, ergibt sich dieselbe Problematik auch für die anderen Emissionswerte der 27. BImSchV.

Während bei den gas- oder ölbefeuerten Kremationsanlagen 11 Vol. % als Bezugssauerstoffgehalt heranzuziehen ist, sind bei Elektroofensystemen die Emissionswerte auf 15 Vol. % zu beziehen. Vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit aller Kremationstechniken wird daher empfohlen, den Bezugssauerstoffgehalt für alle Kremationsanlagen einheitlich festzulegen.

Tabelle 23: Übersicht über die gemessenen O₂-Gehalte, Angaben als Mittelwerte über Probenahmezeit in Vol.%

		Messtag 1	Messtag 2	Messtag 3
Anlage A	Rohgas	14,6	14,2	15,1
	Reingas	14,6	18,3	16,4
Anlage B	Rohgas	14,8	14,9	16,0
	Reingas	15,8	16,0	16,8
Anlage C	Rohgas	11,1	10,9	11,2
	Reingas	13,1	12,6	13,5
Anlage D	Rohgas	13,2	13,6	13,1
	Reingas	14,2	14,4	14,1
Anlage E	Rohgas	13,8	14,3	14,7
	Reingas	14,3	14,8	14,9
Anlage F	Rohgas	14,1	14,1	14,0
	Reingas	14,1	14,1	13,6
Mittelwert über alle Messwerte				14,3

3.4 Gasverbrauch

Der Gesetzgeber fordert in der 27. BImSchV (§ 3) die Einhaltung einer Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer von 850 °C [3]. Zur Erfüllung dieser Anforderung ist, abhängig von der Ofenkonzeption und Betriebsweise, zusätzlicher Energieeinsatz erforderlich, wodurch nicht nur ein zusätzlicher CO₂-Eintrag in die Umwelt entsteht sondern auch Energieressourcen verbraucht werden. Mit möglichen Maßnahmen zur Minderung des Primärenergieeinsatzes setzt sich die VDI-Richtlinie 3891 in Abschnitt 6.1.3. auseinander [4]. Im Einzelnen werden folgende Maßnahmen diskutiert:

- ▶ Minderung der Wärmeverluste im Ofen durch geeignete Isolierung,
- ▶ Prozessführung bei niedrigem Luftüberschuss,
- ▶ Reduzierung von Wärmeverlusten während Stillstandsphasen, z. B. an Wochenenden und in der Nacht.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die vom Gesetzgeber geforderte Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer abzusenken. Dies war Gegenstand von zwei Langzeituntersuchungen an insgesamt vier Kremationslinien, die von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt finanziell unterstützt wurden [2, 10]. Wie die in Tabelle 24 zusammengestellten Ergebnisse zeigen, kann der zusätzliche Primärenergieeinsatz, in Form des Gasverbrauchs, durch die Absenkung der Mindesttemperatur bei sonst unveränderter Betriebsweise zum Teil deutlich reduziert werden. Auch wenn an jedem der untersuchten Kremationsofensystemen ein Gaseinsparpotenzial festzustellen war, lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen ableiten. Vielmehr kommt es darauf an, durch Einzelfallprüfungen die Grenzen der Mindesttemperaturabsenkung auszuloten. Als Bewertungsmaßstab empfiehlt es sich die CO-Klassierungsprotokolle heranzuziehen, denn, so konnte gezeigt werden, die Grenzen der Mindesttemperaturabsenkung werden in erster Linie bei der CO-Klassierung erkennbar. Ein Einfluss der Mindesttemperaturabsenkung von bis zu 650 °C auf die PCDD/F-Emissionskonzentrationen war nicht feststellbar. Dies ist nicht verwunderlich, da wie in Abschnitt 3.1.3 gezeigt, eine ganzheitliche PCDD/F-Minderungsstrategie, bei der der Kremationsofen nur einer von mehreren Baugruppen darstellt, für die Emissionswerte verantwortlich ist.

Tabelle 24: Gasverbrauch einschließlich Aufheizbetrieb ([2,10]) und prozentuale Gaseinsparung im Vergleich zum Referenzpunkt 850 °C für vier Anlagen bei unterschiedlichen Mindesttemperaturen in der Nachbrennkammer

Kremationslinie	Berlin ¹⁾	München ²⁾	Pforzheim	Düsseldorf ³⁾
Betriebsweise	2 (3) – Schichtbetrieb; ca. 16 Krem./Tag	1 (2) – Schichtbetrieb; ca. 9 Krem./Tag	2 (3) – Schichtbetrieb; 24 bis 32 Krem./Tag	1 (2) – Schichtbetrieb; ca. 9 Krem./Tag
850 °C (Referenz)	40,2 m ³ /Krem.	26,0 m ³ /Krem.	7,6 m ³ / Krem.	59,2 m ³ / Krem.
750 °C	28,8 m ³ /Krem. (\triangleq -28,4 %)	22,6 m ³ /Krem. (\triangleq -13,1 %)	1,7 m ³ / Krem. (\triangleq -77,6 %)	43,7 m ³ / Krem. (\triangleq -26,2 %)
700 °C	-	13,4 m ³ /Krem. (\triangleq -48,5 %)	-	-
650 °C	24,2 m ³ /Krem. (\triangleq -39,2 %)	17,4 m ³ /Krem. (\triangleq -33,1 %)	-	42,7 m ³ Krem. (\triangleq -27,9 %)

Hinweise: ¹⁾ Berlin-Baumschulenweg Linie 3; ²⁾ München Linie 5; ³⁾ Düsseldorf Linie 3; Farbkennung „rot“: Betriebsweise mit CO-Grenzwertüberschreitung von mehr als 3 %.

3.5 Handlungsempfehlungen

Die bundesweite Datenerhebung hat gezeigt, dass in den meisten Kremationsanlagen die technologischen Voraussetzungen zur Erfüllung des Stands der Technik, wie er in der VDI-Richtlinie 3891 beschrieben ist, gegeben sind. Berücksichtigt man jedoch, dass aufgrund des unterschiedlichen Verbrennungsverhaltens bei der Kremation in Einzelfällen Ereignisse auftreten können, die eine Überschreitung der vorgeschriebenen Kohlenmonoxidemissionsgrenzwerte als Stundenmittelwerte nach sich ziehen können, können trotz Umsetzung des Standes der Technik nach VDI 3891 (Abschnitt 7) die Vorgaben der 27. BImSchV (§4, 1) **nicht** immer eingehalten werden. Es wird daher empfohlen, die 27. BImSchV entsprechend anzupassen und im Sinne der VDI 3891 die Einhaltung des Kohlenmonoxidgrenzwertes mit einer Jahressummenhäufigkeit (Jahresperzentilwert), die nicht unterschritten werden soll, zu verknüpfen.

Offen ist hierbei die Frage, ob der in der VDI 3891 angegebene Erfahrungsbereich, wonach unter Berücksichtigung altersbedingter Abnutzung der Kremationsanlagen der Kohlenmonoxidgrenzwert in 97 bis 99 % der Fälle eingehalten werden kann, der tatsächlichen Situation in den Kremationsanlagen gerecht wird. Da lediglich aus Bayern über Jahre umfassendes Datenmaterial über die Auswertung der CO-Klassierungsprotokolle vorliegt, wäre es mit Blick auf eine mögliche zukünftige Novellierung der 27. BImSchV sinnvoll, die im Zuge der Datenerhebung erhaltenen Klassierungsprotokolle in entsprechender Weise auszuwerten.

Die Möglichkeit, die Nachverbrennungstemperatur bei Krematorien abzusenken, war Gegenstand diverser Langzeituntersuchungen. Es konnte festgestellt werden, dass je nach Anlagenkonfiguration und Betriebsweise die Temperaturabsenkung keine negativen Auswirkungen auf die Emissionen von Kohlenmonoxid, Gesamtkohlenstoff und PCDD/F nach sich ziehen, sofern man eine gewisse Grenze der Temperaturabsenkung nicht überschreitet. Diese Grenze hängt maßgeblich von der Detailkonstruktion des Ofens und dessen Betriebsweise ab und bedarf der Einzelfallprüfung. Üblicherweise liegt diese Grenze im Bereich von etwa 750 °C. Da damit nicht nur der Kohlendioxidausstoß (Klimaschutzziel) sondern auch der Energieeinsatz (Ressourcenschonung) gemindert wird, wird vorgeschlagen auf die allgemeine Forderung zur Einhaltung der Nachverbrennungstemperatur bei einer Novellierung der 27. BImSchV zu verzichten. Die Erfahrungen, die in der Schweiz mit der Luftreinhaltung gemacht

werden, bestätigen diesen Vorschlag. Auch mit Blick auf die bereits heute praktizierten Betriebsgenehmigungen von Elektroofensystemen, die abweichend von der in der 27. BImSchV geforderten Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer mit niedrigeren Temperaturen betrieben werden dürfen, könnte somit eine einheitliche Behandlung aller Kremationsofensysteme erreicht werden.

Auf Basis der erfassten Daten zeigt sich, dass jede Kremationsanlage mit einer leistungsstarken Quecksilberminderung ausgestattet sein sollte. Diese sollte vom Gesetzgeber gefordert werden. Bereits eingesetzt werden Trockensorptionsverfahren und Festbetten mit Sorbentien aus aktiviertem Kohlenstoff. Es hat sich gezeigt, dass es über Festbetten zur Desorption von Quecksilber kommen kann. Hier sollte diskutiert werden, inwieweit diese Technik für Neuanlagen weiterhin empfohlen werden kann.

Weiterhin haben die Untersuchungsergebnisse gezeigt, dass eine kontinuierliche Erfassung der Hg-Emissionen nur mit einem großen und für Kremationsanlagen unverhältnismäßigen Aufwand möglich ist. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse Minderbefunde im Vergleich zu den ermittelten Stundenmittelwerten nach DIN EN 13211. Hier scheint ein systematischer Fehler vorzuliegen, der auf eine nicht vollständige Reduktion der zweiwertigen Quecksilberanteile zurückgeführt wird. Vom Einsatz kontinuierlich arbeitender Hg-Monitore hinter Kremationen wird abgeraten.

Das Ziel, Mensch und Umwelt vor Quecksilbereinträgen zu schützen, wird dann umfassend erreicht, wenn sichergestellt wird, dass die zur Abreinigung von Quecksilber installierte Abgasreinigungsstufe kontinuierlich arbeitet und hohe Quecksilbereinträge sicher abreinigt. Deshalb wird die Festlegung eines Mindestabscheidegrades in Abhängigkeit vom Quecksilbereintrag empfohlen, der unter definierten Bedingungen erreicht werden muss. Auf Basis der ermittelten Daten erscheint z. B. ein Abscheidegrad von 90 % bei einem Eintrag von 0,5g Quecksilber denkbar. Dieses kann z. B. durch die Messung der Reingaskonzentration nach erfolgter Zugabe einer sog. Quecksilbertablette in einen Kremationszyklus realisiert werden. Die Überwachung des bestimmungsgemäßen, kontinuierlichen Betriebs der Abgasreinigungseinrichtung sollte in definierten Abständen und ggf. mit einer entsprechenden Nachweispflicht über den Adsorbensverbrauch erfolgen.

Die Festlegung eines Bezugssauerstoffgehalts sollte sich an den für die Verbrennungsführung üblichen O₂-Gehalten orientieren. Auf Basis der innerhalb dieser Messkampagne ermittelten Daten erscheint ein Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol. % zu niedrig. Eine Umrechnung auf Bezugssauerstoffgehalte sollte nur für Werte mit Betriebssauerstoffgehalten oberhalb des Bezugssauerstoffgehaltes erfolgen. Als sinnvoll wird aus heutiger Sicht ein Bezugssauerstoffgehalt in der Größenordnung von 13 bis 15 Vol. % angesehen. Im Zuge einer Anpassung des Bezugssauerstoffgehalts wird eine Harmonisierung mit dem Bezugssauerstoffgehalt für Elektroofensysteme, der derzeit bei 15 Vol. % liegt, empfohlen.

4 Quellenverzeichnis

- [1] Schetter, G., Djeradi, B. (2013): Handbuch für bayerische Krematorien, FVB-Verlag, ISBN 978-3-936057-38-6.
- [2] Schetter, G. (2016): Langzeituntersuchungen zu Emissions- und Schadstoffminderungen in Krematorien durch veränderte energieeffiziente Betriebsweisen, DBU Schlussbericht (AZ 31407/01).
- [3] 27. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV): Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung, 19.03.1997, Beck-Texte, 9. Auflage, Nov. 2007.
- [4] VDI-Richtlinie 3891 (2015): Emissionsminderung - Anlagen zur Humankremation (Emission control - Human cremation facilities), Berlin: Beuth-Verlag, Juli 2015.
- [5] Schetter, G. (2009): Der Etagenofen – ein zentraler Baustein zur Erfüllung heutiger und zukünftiger Anforderungen an Einäscherungsanlagen; in „Krematorium – Technische und betriebswirtschaftliche Tendenzen“, FVB-Verlag, ISBN 978-3-936057-26-3.
- [6] Djeradi, B. (2018): Langzeiterfahrungen mit der Bewertung der Emissionsklassierungsprotokolle in Bayern; in „Krematorium – Quecksilber und andere Umwelteinflüsse“, FVB-Verlag, ISBN 978-3-936057-62-1.
- [7] Schetter, G. (2001): Einäscherung bei niedrigem Luftüberschuss im Etagenofen. VDI Seminar „Stand der Umsetzung der LRV in Krematorien (43-51-02)“, Basel, 18. /19.06.2001.
- [8] Bachmann, J., Kiecherer, J., Sommerer, J., Olzmann, M. (2015): Einfluss der Temperatur in der Nachbrennkammer von Kremationsöfen auf die CO-Konzentration im Abgas, Gefahrstoffe – Reinhaltung Luft, Jahrg. 75, Nr. 4, S. 146 – 149.
- [9] Leitmeir, E., Schetter, G. (1985): Maßnahmen zur Reduzierung der Schadstoffemissionen aus Müllverbrennungsanlagen, VDI-Berichte 554.
- [10] Schetter, G. (2010): Untersuchung der Möglichkeiten und Auswirkungen der Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer der der Einäscherung in Krematorien, DBU Schlussbericht (AZ 26847).
- [11] Duvall, D. S., Rubey, W. A. (1977): Laboratory evaluations of high temperature destruction of polychlorinated biphenyls and related compounds, EPA-Report, No. 600/2-77-228.
- [12] Cenerini, R. , Ghezzi, U. (1987): Die Dioxinfrage bei italienischen Verbrennungsöfen, Phoenix International, Jahrg. 5, Nr. 3, S. 25 -29.
- [13] Dransfeld, P. (1991): Mechanismen der Dioxinbildung und -zerstörung, VDI-Tagung „Dioxin- und NOx-Minderungstechniken“, Düsseldorf, 3./4. Juni.
- [14] Schetter, G. (1990): Hohe Turbulenz im Feuerraum, Energie, Nr. 42, Heft 7.
- [15] Düwel, U., Nottrodt, A., Ballschmiter, K. (1989): Simultaneous sampling of PCDD/PCDF inside the combustion chamber and on four boiler levels of a waste incineration plant, presented at Dioxin Conference, Toronto, Canada.
- [16] Hagenmaier, H.-P. (1989): Katalytische Oxidation halogenierter Kohlenwasserstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Dioxinproblems, VDI-Berichte, Nr. 730, S. 239-254.
- [17] Müllhandbuch 2016, Bittig et al., Quecksilberabscheidung aus Abgasen, 7402 Thermische Verfahren
- [18] VDI 3928 Abgasreinigung durch Chemiesorption, Beuth, Berlin 2015
- [19] Esser-Schmittmann, W., Schmitz, S.: Quecksilberentfernung aus Feuerungsabgasen durch Chemiesorption, VDI Wissensforum „Messung und Minderung von Quecksilber-Emissionen, Düsseldorf, 13.-14. April 2016
- [20] OSPAR Commission: Implementation of OSPAR Recommendation 2003/4 on Controlling the Dispersal of Mercury from Crematoria, Second Overview assessment, www.ospar.org/documents?d=35427.
- [21] Bericht und Vollzugsempfehlung zur Emissionsminderung bei Krematorien CERCL Air, Schweizerische Gesellschaft der Lufthygiene-Fachleute