



Abschlussbericht

**Emissionsmessung und
Optimierungspotenzial an bayerischen
Krematorien**

An abstract pattern of leaves and flowers in shades of blue and white, resembling a microscopic view of a plant or a stylized floral design.

luft



Abschlussbericht

Emissionsmessung und Optimierungspotenzial an bayerischen Krematorien

Impressum

Emissionsmessung und Optimierungspotenzial an bayerischen Krematorien

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de/

Konzept/Text/Redaktion:

Röck B., Modern Testing Services (Germany) GmbH, Provinstraße 52, 86153 Augsburg

Bogs D., Modern Testing Services (Germany) GmbH, Provinstraße 52, 86153 Augsburg

Gronau V., Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg

Stand:

Juli 2024

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation und Aufgabenstellung	5
2	Allgemeine Beschreibung der Kremationstechnik	5
2.1	Kremationsofensysteme	5
2.2	Emissionsminderung bei Krematorien	6
2.3	Einrichtungen zur Kühlung des Abgases	6
3	Auswahl der zu untersuchenden Krematorien und Messprogramm	8
3.1	Untersuchte Anlagen	8
3.2	Messumfang	9
3.3	Zeitlicher Ablauf	10
4	Mess- und Analyseverfahren	11
4.1	Messverfahren: Gesamtkohlenstoff	11
4.2	Messverfahren: Stickstoffoxide (NO _x)	11
4.3	Messverfahren: Kohlenmonoxid (CO)	11
4.4	Messverfahren: Sauerstoff (O ₂)	11
4.5	Messverfahren: Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl	11
4.6	Messverfahren: Formaldehyd	11
4.7	Messverfahren: Gesamtstaub	11
4.8	Messverfahren: Quecksilber und seine Verbindungen	11
4.9	Messverfahren: PCDD/PCDF und PCB	12
5	Ergebnisse der Emissionsmessungen	13
5.1	Krematorium E	13
5.2	Krematorium F	14
5.3	Krematorium B	15
5.4	Krematorium C	17
5.5	Krematorium A	19
5.6	Krematorium D	21
5.7	Ergebnisübersicht	22
6	Zusammenfassung und Diskussion	26
6.1	Abgasrandparameter	26

6.2	Kohlenmonoxid	26
6.3	Gesamt-C und Formaldehyd	29
6.4	Gesamtstaub	30
6.5	Stickstoffoxide	30
6.6	Quecksilber	30
6.7	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane sowie polychlorierte Biphenyle	32
6.8	Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl	32
6.9	Zusammenfassung	33
7	Literatur	35

1 Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Derzeit werden in Bayern 23 Krematorien mit insgesamt 43 Linien betrieben. 1997 hat der Gesetzgeber mit der Einführung der 27. BImSchV den rechtlichen Rahmen für die Errichtung und den Betrieb von Krematorien geschaffen. Die 27. BImSchV legt Grenzwerte für die Emissionskomponenten Kohlenmonoxid (CO), Gesamtkohlenstoff, Gesamtstaub (jeweils als Stundenmittelwert) sowie polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane (PCDD/PCDF) fest. Ferner schreibt die Verordnung die kontinuierliche Erfassung der Kohlenmonoxid- und Sauerstoffkonzentration und der Rauchgasdichte im Abgas sowie die Überwachung und Aufzeichnung der Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer vor. Derzeit wird noch bei einem Teil der Anlagen der CO-Grenzwert der 27. BImSchV von 50 mg/m³ überschritten. Nicht in der 27. BImSchV berücksichtigt sind derzeit die Emissionen an Quecksilber, Stickstoffoxiden, Chlorwasserstoff und Formaldehyd, die bei der Humankremation entstehen beziehungsweise entstehen können.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte deshalb erörtert werden, ob der aktuell zu bestimmende Messumfang gemäß 27. BImSchV ausreichend ist, um die Gesamtemissionssituation von Krematorien genügend abzubilden. Hierfür sollten Messdaten zu den Emissionen von den nicht in der 27. BImSchV aufgeführten Parametern Quecksilber, Formaldehyd, Chlorwasserstoff sowie Stickstoffdioxid erhoben werden. Damit sollte eine Datengrundlage geschaffen werden, um mögliche Neuerichtungen von Kremationsanlagen besser beurteilen zu können. Im Hinblick auf die CO-Grenzwertüberschreitungen sollten Primärmaßnahmen (z. B. Feuerungsmanagement, Optimierung der Betriebsweise) aufgezeigt werden, die kurzfristig getroffen werden können, um Überschreitungshäufigkeiten zu senken.

Die Untersuchungen fanden an drei Anlagen statt, die bereits mehrere Jahre CO-Überschreitungshäufigkeiten größer 3 % aufweisen, sowie an drei Anlagen, deren CO-Überschreitungshäufigkeiten bei kleiner 3 % liegen. Insgesamt wurden die Messungen an zehn Kremationslinien durchgeführt.

2 Allgemeine Beschreibung der Kremationstechnik

2.1 Kremationsofensysteme

In Deutschland haben sich vor allem Mehrkammerofensysteme, Etagenöfen (ETO) und Flachbettöfen (FBO), durchgesetzt. Mehrkammerofensysteme zeichnen sich durch eine klare räumliche Trennung zwischen der Kremation in der Hauptbrennkammer beziehungsweise dem Ascheausbrand in der Aschenachbrennkammer und dem Abgasausbrand in der Nachbrennkammer aus. Die Befeuerung erfolgt mittels Erdgas oder elektrisch. In Bayern verwendet jedoch nur eines von insgesamt 23 Krematorien Elektroöfen, in den restlichen Krematorien erfolgt die Befeuerung mittels Erdgas.

Im Flachbettofen erfolgt der ofeninterne Aschetransport über hintereinander angeordnete Kammern. Der Sarg mit dem Verstorbenen wird mit Hilfe einer in der Regel automatischen Einfuhrmaschine in die Hauptbrennkammer eingefahren. Nach Beendigung der Kremation wird die verbleibende Humanasche der Aschenachbrennkammer sowie der Ascheentnahmebox zugeführt.

Im Falle der Etagenöfen erfolgt der ofeninterne Aschetransport über übereinander angeordnete Kammern, welche durch Drehplatten gegeneinander verschlossen sind. Der Sarg wird über eine Sargeinfuhrmaschine in die Hauptbrennkammer eingefahren und auf dem Sargauflegerost positioniert. Nach Abschluss des Kremationsvorgangs wird die zurückbleibende Asche über die Drehplatte in die darunter befindliche Aschenachbrennkammer fallen gelassen. Dort wird die Asche über die Dauer des

nachfolgenden Kremationsvorgangs thermisch behandelt. In der nachfolgenden Ascheauskühlkammer erfolgt das Erkalten der Asche über den Zeitraum einer weiteren Kremation, ehe sie dem Ofen entnommen wird.

Sowohl beim Flachbett- als auch beim Etagenofen startet der Kremationsvorgang zunächst durch die im Mauerwerk gespeicherte Wärme und die gezielte Zugabe von Verbrennungsluft. Eine Stützfeuerung in der Hauptbrennkammer ist daher zunächst nicht nötig. Erst bei Bedarf (z. B. reduzierter Anteil organischen Materials) wird der Prozessablauf durch den Hauptbrenner unterstützt. In den Aschenachbrennkammern wird die Humanasche durch Einsatz eines weiteren Brenners thermisch nachbehandelt. Das aus der Hauptbrennkammer abgeführte Rauchgas gelangt in die Abgasnachbrennkammer. Dort wird es mittels Nachbrenner und weiterer Verbrennungsluftzugabe bei mindestens 850 °C nahezu vollständig oxidiert.

2.2 Emissionsminderung bei Krematorien

Zur Minderung der PCDD/PCDF-Emissionen sowie der Quecksilberemissionen kommen überwiegend Adsorptionsverfahren wie das Flugstromverfahren (FSV), Kugelrotorumlaufverfahren (KRV) oder Festbettadsorber (FBA) zum Einsatz. Als Sorptionsmittel werden unter anderem Aktivkohle, Herdofenkoks und Mischungen aus Koks/Kohle und Kalk verwendet.

Beim Flugstromverfahren wird das feinpulverige Sorptionsmittel direkt in das Rauchgas eingedüst und im Anschluss gemeinsam mit der Flugasche in der nachfolgenden Staubabscheidung, beispielsweise durch Vorzyklon und Gewebefilter, ausgetragen. Das Sorptionsmittel kann entsprechend der erwarteten Quecksilberfracht dosiert und zur optimalen Ausnutzung ein Großteil des abgeschiedenen Staub-Sorbens-Gemisches wieder in den Flugstrom eingetragen werden.

Beim Kugelrotorverfahren ist im Abgaskanal vor dem Schlauchfilter ein Kugelrotor installiert. Das Sorbens wird mit dem zirkulierenden Staub auf den Kugelrotor gegeben. Bedingt durch die Gasführung wird das Abgas ebenfalls durch den Kugelrotor gezwungen und es kommt zu einer intensiven Mischung von Gas und Sorbens.

Beim Festbettadsorber durchströmt das Rauchgas einen räumlich starren Adsorber, beispielsweise einen Aktivkohlefilter.

Neben den Adsorptionsverfahren kommen auch Katalysatortechniken wie z. B. katalytisch wirksame Filterschläuche zur Minderung der PCDD/PCDF-Emissionen zum Einsatz. Die Quecksilberemissionen werden durch dieses Verfahren jedoch nur geringfügig gemindert.

Zur Staubabscheidung werden in Krematorien in der Regel Gewebefilter installiert. Diesen ist, insbesondere beim Einsatz des Flugstromverfahrens oder Kugelrotorverfahrens, ein Zyklon als Vorabscheider vorgeschaltet. Neben der Verlängerung der Standzeit des Hauptfilters stellt der Zyklon auch einen sicherheitstechnischen Aspekt dar. Er soll glühende Partikel und Funken abscheiden und so ein Entzünden der textilen Filtermedien verhindern.

2.3 Einrichtungen zur Kühlung des Abgases

Eine schnelle Abkühlung des Abgases ist im Falle der Humankremation notwendig, um die sogenannte „de-novo-Synthese“ polychlorierter Dibenzo-p-dioxine und -furane zu behindern. So liegt der kritische Temperaturbereich für die Bildung von PCDD/PCDF zwischen 200 °C und 400 °C.

Zur Abkühlung kommen Luft-Luft- oder Luft-Wasser-Wärmetauscher zum Einsatz. Bei diesen kann durch eine kompakte Bauweise eine rasche Abkühlung mit einer Aufenthaltszeit von etwa 0,5 sec erreicht und damit einer PCDD/PCDF-Rückbildung entgegengewirkt werden (Schetter 2001).

Eine weitere Methode zur Abkühlung ist die direkte Eindüsung von Wasser im sogenannten Verdampfungskühler (Quenche). Unter Ausnutzung der Verdampfungsenthalpie des Wassers wird das Rauchgas schlagartig auf eine Temperatur von kleiner 200 °C abgekühlt. Nachteilig bei dieser Methode ist jedoch die Zunahme der Abgasfeuchte und damit der Abgasmenge. Eine Wärmenutzung ist mit diesem System nicht mehr möglich.

Kombinationen der oben genannten Systeme sind in der Praxis ebenfalls anzutreffen. So erfolgt in manchen Krematorien zunächst eine Abkühlung des Rauchgases auf rund 550 °C über einen Luft-Luft-Wärmetauscher und anschließend die Abkühlung des Gases auf kleiner 200 °C in der Quenche. Auf diese Weise kann die Abwärme zumindest teilweise genutzt werden.

3 Auswahl der zu untersuchenden Krematorien und Messprogramm

3.1 Untersuchte Anlagen

Für das Projekt wurden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt drei Anlagen, die bereits mehrere Jahre CO-Überschreitungshäufigkeiten bezogen auf die Tagesmittelwerte eines Kalenderjahres größer 3 % aufweisen, sowie drei Anlagen, deren CO-Überschreitungshäufigkeiten bei kleiner 3 % liegen, ausgewählt. Die Auswahl berücksichtigt zudem unterschiedliche Ofenbauformen, unterschiedliches Alter der Anlagen, unterschiedliche Abgasreinigungstechniken sowie Techniken zur Kühlung des Abgases. Tab. 1 und Tab. 2 geben einen Überblick über die ausgewählten Anlagen und die dort vorgefundene Ofentechnik, Abgasreinigung sowie Kühltechnik.

Tab. 1: Für Emissionsmessung ausgewählte Krematorien

Krematorium	Ofensystem	Hersteller	Baujahr
Anlage E	ETO	Ruppmann/Metalltechnik*	1996/2015*
Anlage F	ETO	Ruppmann	2000/2008
Anlage B – L1	FBO	Metall- & Ofentechnik	2019
Anlage B – L2	FBO	Metall- & Ofentechnik	2019
Anlage C – L1	FBO	Metall- & Ofentechnik	2011
Anlage C – L2	FBO	Metall- & Ofentechnik	2015
Anlage A – L1	ETO	Ruppmann	1981
Anlage A – L2	ETO	Ruppmann	1981
Anlage D – L1	FBO	H. R. Heinicke	2000
Anlage D – L2	FBO	H. R. Heinicke	2010

* Umbau/Sanierung

ETO = Etagenofen, FBO = Flachbettöfen

Tab. 2: Arten der Abgasreinigung und Kühlung an den untersuchten Anlagen

Krematorium	Wärmetauscher	Abreinigung (PCDD/PCDF / Hg)	Staubabscheidung
Anlage E	LW	katalytischer Gewebefilter	Vorzyklon + Gewebefilter
Anlage F	LW	KRV	Vorzyklon + Gewebefilter
Anlage B – L1	LL + Quench	FBA	Gewebefilter
Anlage B – L2	LL + Quench	FBA	Gewebefilter
Anlage C – L1	LL + Quench	FBA	Gewebefilter
Anlage C – L2	LL + Quench	FBA	Gewebefilter
Anlage A – L1	LW	KRV	Vorzyklon + Gewebefilter
Anlage A – L2	LW	KRV	Vorzyklon + Gewebefilter
Anlage D – L1	LW	FSV	Vorzyklon + Gewebefilter
Anlage D – L2	LW	FSV	Vorzyklon + Gewebefilter

FBA = Festbettadsorber mit Aktivkohle, FSV = Flugstromverfahren, KRV = Kugelrotorverfahren
LL = Luft-Luft-Wärmetauscher, LW = Luft-Wasser-Wärmetauscher

Als Sorptionsmittel im Falle des Flugstromverfahrens und des Kugelrotorverfahrens wurde bei allen hier untersuchten Krematorien das Produkt Sorbalit® 30, ein Calciumhydroxid-Kohle-Gemisch, verwendet.

Zum Zeitpunkt der Messung war in Krematorium B die später im Bescheid festgelegte Standzeit der Aktivkohlefilter bereits überschritten.

Zur Ermittlung der Standzeit der beiden mit jeweils 750 kg Aktivkohle bestückten Festbettadsorber wurde von der zuständigen Behörde die stufenweise Bestimmung der Quecksilber- und Dioxinemissionskonzentrationen gefordert. Nach Abschluss der in einem Abstand von 500 Einäscherungen durchzuführenden Analysen wurde mit baurechtlichem Ergänzungsbescheid Folgendes festgelegt:

Die Aktivkohleschüttung einer Ofenanlage ist spätestens dann gegen unverbrauchtes Material auszu-tauschen, wenn die Einäscherungszahl (EÄZ) an der entsprechenden Linie 1.700 erreicht.

Bei ordnungsgemäßigem Betrieb der Anlage (Tausch der Aktivkohle nach 1.700 Einäscherungen) lagen nach Aussage der zuständigen Behörde alle Messergebnisse unterhalb des im Bescheid festgesetzten Emissionsgrenzwerts für Quecksilber von 0,050 mg/Nm³.

Im Krematorium C wurde der Adsorber an Linie 1 im Oktober 2019 und an Linie 2 im Dezember 2018 gewechselt. Ein weiterer Sorbenswechsel erfolgte im Juli 2021. Ein festes Wechselintervall ist nicht vorhanden. Laut Betreiberangaben soll nun ein jährlicher Wechsel erfolgen.

Im Krematorium C wird täglich rund 1 kg Kalk vor den Staubfiltern eindosiert, damit dieser sich als Filterkuchen auf die Filterschläuche legt. Der Kalk soll die sauren Bestandteile des Abgases (HCl, SO₂) reduzieren und die Filterschläuche schützen.

3.2 Messumfang

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Messumfang auf folgende Parameter festgelegt:

- je fünf repräsentative Einzelmessungen für die Parameter Gesamtstaub und Gesamt-C
- je drei repräsentative Messungen der Parameter Quecksilber, Chlorwasserstoff sowie Formaldehyd
- je drei repräsentative Einzelmessungen für PCDD/PCDF, im späteren Projektverlauf wurde der Umfang auf die zusätzliche Erfassung von PCB gemäß WHO-TEF erweitert
- kontinuierliche Messung der Parameter CO und NO_x
- Erfassung der Abgasrandbedingungen (Feuchte, Sauerstoffgehalt, Druck, Temperatur, Abgasvolumenstrom)

Die Messungen wurden gemäß der 27. BImSchV als Stundenmittelwerte ab Beginn einer Einäscherung ausgeführt. Für PCDD/PCDF und PCB betrug die Probenahmezeit sechs Stunden ab Beginn einer Einäscherung.

Damit die Messungen gleichzeitig als wiederkehrende Emissionsmessung anerkannt werden konnten, wurde die Einhaltung folgender, in § 4 der 27. BImSchV festgelegten Emissionsgrenzwerte durch Einzelmessungen geprüft:

- Kohlenmonoxid 50 mg/m³
- Gesamtstaub 10 mg/m³
- organische Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoff 20 mg/m³
jeweils als Stundenmittelwert, gebildet ab Beginn einer Einäscherung während fünf Einäscherungsvorgängen
- polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane 0,1 ng/m³
als Mittelwert über die jeweilige Probenahmezeit.

Zur Vergleichbarkeit und Zuordenbarkeit der Messwerte entsprechend den Vorgaben der 27. BImSchV erfolgte die Auswertung als Stundenmittelwerte (ausgenommen PCDD/F) ab Beginn Kremation.

Die festgelegten Emissionsbegrenzungen für die Massenkonzentration beziehen sich auf den Normzustand (273 K, 1.013 hPa) nach Abzug des Wasserdampfgehaltes und einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%.

3.3 Zeitlicher Ablauf

Vor den jeweiligen Messungen wurde Kontakt mit den Betreibern aufgenommen, um eine Vor-Ort-Begehung zu terminieren. In der Vor-Ort-Begehung wurden die Messplätze begutachtet sowie Messumfang und Ablauf mit dem Betreiber und, falls anwesend, mit der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde abgestimmt. Alle Linien verfügten über geeignete Messquerschnitte, auch wenn die Anforderungen der DIN EN 13284-1 und DIN EN 15259 an die Ein- und Auslaufstrecke nicht immer erfüllt waren.

Die Messungen an Krematorien mit zwei Linien wurden zeitgleich ausgeführt. Tab. 3 zeigt den zeitlichen Ablauf der Emissionsmessungen sowie den jeweils zugehörigen Messbericht.

Tab. 3: Zeitlicher Ablauf der Emissionsmessungen

Krematorium	Messzeitraum	Berichtsnummer
Anlage E	02.02. – 04.02.2021	L1266-21011
Anlage F	09.03. – 11.03.2021	L1266-21089
Anlage B	18.05. - 20.05.2021	L1266-21205
Anlage C	20.10. – 22.10.2020	L1266-20342
Anlage C Nachmessung Hg + HCl	07.09. – 08.09.2021	L1266-21413
Anlage A	13.04. – 15.04.2021	L1266-21126
Anlage D	17.11. – 19.11.2020	L1266-20356

4 Mess- und Analyseverfahren

4.1 Messverfahren: Gesamtkohlenstoff

DIN EN 12619 (04/2013): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Massenkonzentration des gesamten gasförmigen organisch gebundenen Kohlenstoffs – Kontinuierliches Verfahren mit dem Flammenionisationsdetektor

Messgerät: Flammenionisationsdetektor RS 53 T der Firma Ratfisch

4.2 Messverfahren: Stickstoffoxide (NO_x)

DIN EN 14792 (05/2017): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Massenkonzentration von Stickstoffoxiden – Standardreferenzverfahren: Chemilumineszenz

Messgerät: PG 350 Mehrkomponenten-Messgerät der Firma Horiba

4.3 Messverfahren: Kohlenmonoxid (CO)

DIN EN 15058 (05/2017): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Massenkonzentration von Kohlenmonoxid – Standardreferenzverfahren: Nicht-dispersive Infrarotspektrometrie

Messgerät: PG 350 Mehrkomponenten-Messgerät der Firma Horiba

4.4 Messverfahren: Sauerstoff (O₂)

DIN EN 14789 (05/2017): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Volumenkonzentration von Sauerstoff – Standardreferenzverfahren: Paramagnetismus

Messgerät: PG 350 Mehrkomponenten-Messgerät der Firma Horiba

4.5 Messverfahren: Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl

DIN EN 1911 (12/2010): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Massenkonzentration von gasförmigen Chloriden, angegeben als HCl – Standardreferenzverfahren

4.6 Messverfahren: Formaldehyd

VDI 3862 Bl. 2 (12/2000): Messen gasförmiger Emissionen – Messen aliphatischer und aromatischer Aldehyde und Ketone nach dem DNPH-Verfahren – Gaswaschflaschen-Methode

4.7 Messverfahren: Gesamtstaub

DIN EN 13284-1 (02/2018): Emissionen aus stationären Quellen – Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei geringen Staubkonzentrationen – Teil 1: Manuelles gravimetrisches Verfahren

4.8 Messverfahren: Quecksilber und seine Verbindungen

DIN EN 13211 (06/2001): Emissionen aus stationären Quellen – Manuelles Verfahren zur Bestimmung der Gesamtquecksilber-Konzentration

4.9 Messverfahren: PCDD/PCDF und PCB

DIN EN 1948-1 (06/2006): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Massenkonzentration von PCDD/PCDF und dioxin-ähnlichen PCB – Teil 1: Probenahme von PCDD/PCDF

hier: Gekühlte-Absaugrohr-Methode

DIN EN 1948-2 (06/2006): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Massenkonzentration von PCDD/PCDF und dioxin-ähnlichen PCB – Teil 2: Extraktion und Reinigung von PCDD/PCDF

DIN EN 1948-3 (06/2006): Emissionen aus stationären Quellen – Bestimmung der Massenkonzentration von PCDD/PCDF und dioxin-ähnlichen PCB – Teil 3: Identifizierung und Quantifizierung von PCDD/PCDF

5 Ergebnisse der Emissionsmessungen

5.1 Krematorium E

Die Messungen am Krematorium E fanden vom 02.02. bis zum 04.02.2021 statt. Das Krematorium besitzt einen Etagenofen. Die Abgasreinigungsanlage besteht aus einem Polyzyklon zur Vorabscheidung und einem Gewebefilter mit katalytischen Filterschläuchen.

Während der Messungen wurden keine Auffälligkeiten im Betriebsablauf festgestellt. Die Dauer der jeweiligen Einäscherung richtete sich nach dem Ausbrand. Anlagenstörungen traten im Messzeitraum nicht auf, die Verriegelungsbedingungen waren an der Anlage eingehalten.

In Tab. 4 sind die über den Messzeitraum gemittelten Abgasrandparameter (Volumenstrom, Feuchte, Temperatur und Sauerstoffgehalt) zusammengefasst dargestellt.

Abgasrandparameter	Mittelwert
Sauerstoffgehalt	15,8 Vol.-%
Volumenstrom (normiert, trocken)	1.700 Nm ³ /h
Abgastemperatur	154 °C
Abgasfeuchte	0,058 kg/m ³

Tab. 4:
Abgasrandparameter – Krematorium E

Die nachfolgend angegebenen Massenkonzentrationen beziehen sich auf den Normzustand (273 K, 1.013 hPa) nach Abzug der Feuchte sowie auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%. Da der Sauerstoffgehalt insgesamt über dem Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% lag, fallen die normierten Werte höher aus als die tatsächlich ermittelten Konzentrationen.

Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide

Für die kontinuierlich erfassten Parameter Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff und NO_x entsprechen Höhe und Verlauf den Erwartungswerten für den Anlagenbetrieb.

Bei CO wurde die typische Messwertspitze beim Zerfall des Sarges beobachtet. Außerhalb dieser Zeiten lag die Konzentration im Bereich der Bestimmungsgrenze, was ordnungsgemäße Verbrennungsbedingungen anzeigt. Die mittlere Konzentration lag bei 16,8 mg/m³. Im Messzeitraum kam es nur einmal zu einer Überschreitung des Grenzwertes von 50 mg/m³. Der gemessene Stundenmittelwert lag bei 159 mg/m³. Ein feuerungstechnischer Fehler lag jedoch nicht vor. In diesem Fall blieben nach Abschluss des Kremationsvorgangs Teile des Verstorbenen auf dem Sargauflegerost zurück und mussten manuell bei geöffneter Ofentür in die Aschenachbrennkammer geschoben werden. Ein Zusammenhang zwischen Sargmasse und Höhe der CO-Emissionen konnte nicht festgestellt werden.

Die Emissionen an Stickstoffoxiden lagen im Mittel bei 261 mg/m³ und die Stundenmittelwerte (mit einer Ausnahme) unter 300 mg/m³ NO₂.

Gesamtstaub

Die Konzentration an Gesamtstaub lag zwischen 1,1 mg/m³ und maximal 2,1 mg/m³ und damit deutlich unterhalb des geforderten Grenzwertes von 10 mg/m³. Die Werte werden als erwartungsgemäß für den ordnungsgemäßen Betrieb der nachgeschalteten Abgasreinigung angesehen.

Quecksilber

Die ermittelten Quecksilberemissionen unterschieden sich bei den drei Messungen deutlich und lagen zwischen kleiner $0,002 \text{ mg/m}^3$ und $0,077 \text{ mg/m}^3$. Bei der hier vorhandenen Abgasreinigungstechnologie ist im Grunde keine Minderung der Quecksilberemission zu erwarten. Die Quecksilberemissionen hängen damit unmittelbar vom Eintrag durch den Verstorbenen ab und kann daher schwanken. Zahnfüllungen aus Amalgam und im Gewebe eingelagertes Quecksilber, welches z. B. über die gesamte Lebenszeit über die Nahrung (insbesondere Fisch) oder eine Exposition am Arbeitsplatz aufgenommen wird, kommen als Quelle in Frage.

Formaldehyd und Gesamt-C

Emissionen an Gesamt-C sowie Formaldehyd war nicht nachweisbar. Da Formaldehyd Ergebnis unvollständiger Verbrennung ist, passt dieses Ergebnis zu den ermittelten Konzentrationen an CO und Gesamt-C.

PCDD/PCDF

Dioxine lagen bei den beiden ausgewerteten Proben mit $0,022 \text{ ng/m}^3$ und $0,017 \text{ ng/m}^3$ auf einem geringen Niveau. Für Probe 3 konnte kein valides Messergebnis ausgewiesen werden, da bei der Extraktion die Probe geschädigt wurde. Grenzwertkonflikte treten somit keine auf.

Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl

Für gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl, wurden im Vergleich zu den anderen Anlagen sehr hohe Konzentrationen bis $45,7 \text{ mg/m}^3$ ermittelt. Eine Minderung durch die katalytischen Filterschläuche ist nicht gegeben.

5.2 Krematorium F

Die Messungen am Krematorium F fanden vom 09.03. bis zum 11.03.2021 statt. Das Krematorium besitzt einen Etagenofen. Die Abgasreinigungsanlage besteht aus einem Zyklon zur Vorabscheidung und einer Trockenadsorption nach dem Kugelrotorverfahren sowie einem Vorzyklon und nachgeschalteten Gewebefilter.

Während der Messungen wurden keine Auffälligkeiten im Betriebsablauf festgestellt. Die Dauer der jeweiligen Einäscherung richtete sich nach dem Ausbrand. Anlagenstörungen traten im Messzeitraum nicht auf, die Verriegelungsbedingungen waren an der Anlage eingehalten.

In Tab. 5 sind die über den Messzeitraum gemittelten Abgasrandparameter (Volumenstrom, Feuchte, Temperatur und Sauerstoffgehalt) zusammengefasst dargestellt.

Abgasrandparameter	Mittelwert
Sauerstoffgehalt	15,0 Vol.-%
Volumenstrom (normiert, trocken)	4.000 Nm^3/h
Abgastemperatur	124 °C
Abgasfeuchte	0,050 kg/m^3

Tab. 5:
Abgasrandparameter – Krematorium F

Die nachfolgend angegebenen Massenkonzentrationen beziehen sich auf den Normzustand (273 K, 1.013 hPa) nach Abzug der Feuchte sowie auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%. Da der Sauerstoffgehalt insgesamt über dem Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% lag, fallen die normierten Werte höher aus als die tatsächlich ermittelten Konzentrationen. Der Volumenstrom liegt mit $4.000 \text{ m}^3/\text{h}$

deutlich über denen der anderen gemessenen Krematorien. Weshalb der Volumenstrom an dieser Anlage so hoch ausfällt, konnte nicht ermittelt werden. Ähnliche Werte für den Volumenstrom wurden auch bei vorhergehenden Messungen durch andere Messstellen festgestellt.

Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide

Für die kontinuierlich erfassten Parameter Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff und NO_x entsprechen Höhe und Verlauf den Erwartungswerten für den Anlagenbetrieb.

Bei CO wurde die typische Messwertspitze beim Zerfall des Sarges beobachtet. Außerhalb dieser Zeiten lag die Konzentration im Bereich der Bestimmungsgrenze, was ordnungsgemäße Verbrennungsbedingungen anzeigt. Die mittlere Konzentration lag bei 6,9 mg/m³. Der maximale Stundenmittelwert betrug 18,6 mg/m³, Grenzwertkonflikte traten somit im Messzeitraum nicht auf. Ein Zusammenhang zwischen Sargmasse beziehungsweise Holzart und Höhe der CO-Emissionen konnte nicht festgestellt werden.

Die Emissionen an Stickstoffoxiden lagen im Mittel bei 296 mg/m³. Der maximale Stundenmittelwert betrug 363 mg/m³.

Gesamtstaub

Staub war im Abgas der Linie nicht nachweisbar, was für die sehr gute und ordnungsgemäße Funktion der nachgeschalteten Abgasreinigung spricht.

Quecksilber

Die Quecksilberemissionen lagen durchgängig unterhalb der Erfassungsgrenze des Messverfahrens. Unter Berücksichtigung des potenziellen Quecksilbereintrages und des Abgasreinigungsverfahrens (Trockenadsorption nach dem Kugelrotorverfahren) werden diese Werte als erwartungsgemäß für das verwendete Abgasreinigungsverfahren betrachtet.

Formaldehyd und Gesamt-C

Die mittlere Konzentration an Gesamt-C im Abgas lag unterhalb der Erfassungsgrenze des Messverfahrens, was einer ordnungsgemäßen und vollständigen Verbrennung entspricht. Formaldehyd war nur in Spuren mit 0,26 mg/m³ bis maximal 0,48 mg/m³ nachweisbar. Da Formaldehyd das Ergebnis unvollständiger Verbrennung ist, passt dieses Ergebnis zu den ermittelten Konzentrationen an CO und Gesamt-C.

PCDD/PCDF und PCB

PCDD/PCDF und PCB waren in keiner der Messungen nachweisbar.

Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl

Für gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl, wurden an dieser Anlage im Vergleich zu den anderen Anlagen geringe Konzentrationen zwischen 3 mg/m³ und 7 mg/m³ ermittelt. Das Kugelrotorverfahren hat in diesem Fall den zu erwartenden emissionsreduzierenden Einfluss.

5.3 Krematorium B

Die Messungen am Krematorium B fanden vom 18.05. bis zum 20.05.2021 statt. Das Krematorium besitzt zwei Flachbettöfen. Die Abgasreinigungsanlage besteht aus einem Gewebefilter und nachgeschaltetem Festbettadsorber mit Aktivkohle.

Während der Messungen wurden bei Kremationen gelegentlich die Ofentüren geöffnet, um Asche und Ausbrand gleichmäßig auf dem Ofenbett zu verteilen. Nach Angabe des Personals sollte dies eine schnellere und gleichmäßigere Kremation fördern. Die Kremationszeiten lagen teilweise bei nur 40 bis 45 Minuten. Andere Krematorien haben üblicherweise Kremationszeiten von rund 55 Minuten bis 70 Minuten. Bei der Messstelle entstand der Eindruck, dass beim Personal Schulungsbedarf bezüglich Anlagentechnik und Fahrweise besteht.

An Linie 2 wurde am 19.05.2021 durch den Betreiber ein Bruch in der Schamotte festgestellt. An beiden Linien waren die Frischluftklappen am Gewebefilter geöffnet. Das zeigte sich auch an dem vergleichsweise hohen Sauerstoffgehalt im Abgas.

In Tab. 6 sind die über den Messzeitraum gemittelten Abgasrandparameter (Volumenstrom, Feuchte, Temperatur und Sauerstoffgehalt) zusammengefasst dargestellt.

Tab. 6: Abgasrandparameter – Krematorium B

Abgasrandparameter	Mittelwert Linie 1	Mittelwert Linie 2
Sauerstoffgehalt	16,7 Vol.-%	17,5 Vol.-%
Volumenstrom (normiert, trocken)	2.660 Nm ³ /h	2.535 Nm ³ /h
Abgastemperatur	126 °C	124 °C
Abgasfeuchte	0,186 kg/m ³	0,149 kg/m ³

Die nachfolgend angegebenen Massenkonzentrationen beziehen sich auf den Normzustand (273 K, 1.013 hPa) nach Abzug der Feuchte sowie auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%. Da der Sauerstoffgehalt insgesamt über dem Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% lag, fallen die normierten Werte höher aus als die tatsächlich ermittelten Konzentrationen.

Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide

Für die kontinuierlich erfassten Parameter Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff und NO_x entsprechen Höhe und Verlauf den Erwartungswerten für den Anlagenbetrieb.

An beiden Linien wurde für CO die typische Messwertspitze beim Zerfall des Sarges beobachtet. Da während einer Kremation gelegentlich die Ofentüren geöffnet wurden, um Asche und Ausbrand gleichmäßig auf dem Ofenbett zu verteilen, entstanden hierbei zusätzlich höhere CO-Konzentrationen und -Spitzen. Außerhalb dieser Zeiten lag die Konzentration im Bereich der Bestimmungsgrenze, was ordnungsgemäße Verbrennungsbedingungen anzeigt. An beiden Linien wurde im Messzeitraum der Grenzwert für den Stundenmittelwert nicht überschritten.

An Ofenlinie 2 sind Höhe und Verlauf dieser CO-Spitzen stärker ausgeprägt als an Ofenlinie 1. Die mittlere CO-Konzentration fällt daher an Linie 2 mit 20 mg/m³ knapp doppelt so hoch aus wie an Linie 1 mit 11 mg/m³. Ursache hierfür ist der Bruch in der Schamotte. Durch den Falschlufteintrag kommt es zu kühleren Zonen mit unvollständiger Oxidation. Ein Zusammenhang zwischen Sargmasse beziehungsweise Holzart und Höhe der CO-Emissionen konnte nicht festgestellt werden.

Erwartungsgemäß zeigen die Stickstoffoxidemissionen einen zu CO gegenläufigen Verlauf. Die mittleren Stickstoffoxidkonzentration an Linie 1 lagen bei 300 mg/m³ und an Linie 2 bei 239 mg/m³. Der maximale Stundenmittelwert lag an Linie 1 bei 358 mg/m³ und an Linie 2 bei 301 mg/m³.

Gesamtstaub

Staub war in den Abgasen der beiden Linien nicht nachweisbar, was für die sehr gute und ordnungsgemäße Funktion der nachgeschalteten Abgasreinigung spricht.

Quecksilber

An beiden Linien wurden im Vergleich zu den anderen Anlagen erhöhte Quecksilberkonzentrationen zwischen 0,08 mg/m³ und 0,12 mg/m³ ermittelt, was darauf hindeutet, dass das Adsorptionsvermögen der Schüttung erschöpft ist. Nach Angaben des Betreibers wurden die Quecksilberkonzentrationen bereits im März 2021 durch eine andere Messstelle ermittelt. Die Konzentrationen lagen damals im Bereich von 0,04 mg/m³, ein Austausch des Sorbens erfolgte seither nicht. Die Adsorptionskapazität der Schüttung verringerte sich demnach innerhalb eines Monats erheblich.

Formaldehyd und Gesamt-C

Die mittlere Konzentration an Gesamt-C in den Abgasen der beiden Linien lag unterhalb der Erfassungsgrenze des Messverfahrens, was einer ordnungsgemäßen und vollständigen Verbrennung entspricht. Die Konzentration an Formaldehyd in den Abgasen der Linie 1 und Linie 2 lag in der Regel unterhalb der Bestimmungsgrenze des Messverfahrens. Nur in Messreihe 1 der Linie 1 konnte Formaldehyd mit 0,10 mg/m³ und in Messreihe 2 der Linie 2 mit 0,09 mg/m³ nachgewiesen werden.

PCDD/PCDF und PCB

PCDD/PCDF und PCB waren an beiden Linien in keiner der Messungen nachweisbar.

Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl

Für gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl, wurden an beiden Linien Konzentrationen zwischen 16 mg/m³ und maximal 21 mg/m³ ermittelt. Beide Linien besitzen diesbezüglich ein ähnliches Emissionsverhalten.

5.4 Krematorium C

Die Messungen am Krematorium C fanden vom 20.10. bis zum 22.10.2020 statt. Am 07.09. und 08.09.2021 fanden Nachmessungen bei Quecksilber und HCl statt. Das Krematorium besitzt zwei Flachbettöfen. Die Abgasreinigungsanlage besteht aus einem Gewebefilter mit nachgeschaltetem Festbettadsorber.

Während der Messungen wurden keine Auffälligkeiten im Betriebsablauf festgestellt. Die Dauer der jeweiligen Einäscherung richtete sich nach dem Ausbrand. Anlagenstörungen traten im Messzeitraum nicht auf, die Verriegelungsbedingungen waren an der Anlage eingehalten.

In Tab. 7 und Tab. 8 sind die über den jeweiligen Messzeitraum gemittelten Abgasrandparameter (Volumenstrom, Feuchte, Temperatur und Sauerstoffgehalt) zusammengefasst dargestellt.

Tab. 7: Abgasrandparameter – Krematorium C 20.10. bis 22.10.2020

Abgasrandparameter 20.10. bis 22.10.2020	Mittelwert Linie 1	Mittelwert Linie 2
Sauerstoffgehalt	14,1 Vol.-%	15,6 Vol.-%
Volumenstrom (normiert, trocken)	1.400 Nm ³ /h	1.750 Nm ³ /h
Abgastemperatur	125 °C	142 °C
Abgasfeuchte	0,282 kg/m ³	0,230 kg/m ³

Tab. 8: Abgasrandparameter – Krematorium C 07.09. und 08.09.2021

Abgasrandparameter 07.09. und 08.09.2021	Mittelwert Linie 1	Mittelwert Linie 2
Sauerstoffgehalt	14,8 Vol.-%	15,9 Vol.-%
Volumenstrom (normiert, trocken)	1.920 Nm³/h	1.630 Nm³/h
Abgastemperatur	129 °C	137 °C
Abgasfeuchte	0,275 kg/m³	0,224 kg/m³

Die nachfolgend angegebenen Massenkonzentrationen beziehen sich auf den Normzustand (273 K, 1.013 hPa) nach Abzug der Feuchte sowie auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%. Da der Sauerstoffgehalt insgesamt über dem Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% lag, fallen die normierten Werte höher aus als die tatsächlich ermittelten Konzentrationen.

Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide

Für die kontinuierlich erfassten Parameter Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff und NO_x entsprechen Höhe und Verlauf den Erwartungswerten für den Anlagenbetrieb.

An beiden Linien wurde für CO die typische Messwertspitze beim Zerfall des Sarges beobachtet. Außerhalb dieser Zeiten lag die Konzentration im Bereich der Bestimmungsgrenze, was ordnungsgemäße Verbrennungsbedingungen anzeigt.

An Ofenlinie 2 sind Höhe und Verlauf dieser CO-Spitzen stärker ausgeprägt als an Ofenlinie 1. Die mittlere CO-Konzentration fällt daher an Linie 2 mit 17,5 mg/m³ doppelt so hoch aus wie an Linie 1 mit 8,3 mg/m³. Die Ursache für den Unterschied im Emissionsverhalten konnte nicht ermittelt werden. Ein Zusammenhang zwischen Sarggewicht beziehungsweise Holzart und Höhe der CO-Emissionen konnte nicht festgestellt werden.

Erwartungsgemäß zeigen die Stickstoffoxidemissionen einen zum CO gegenläufigen Verlauf, so lag die mittlere Stickstoffoxidkonzentration an Linie 1 bei 412 mg/m³ und an Linie 2 bei 350 mg/m³. Der maximale Stundenmittelwert lag an Linie 1 bei 518 mg/m³ und an Linie 2 bei 455 mg/m³.

Gesamtstaub

Die Konzentration an Gesamtstaub lag an Linie 1 maximal bei 2,1 mg/m³ und an Linie 2 maximal bei 1,5 mg/m³ und damit an beiden Linien deutlich unterhalb des Emissionsgrenzwertes von 10 mg/m³. Einzelne Werte waren jedoch erhöht (Linie 1 Messreihe 2 und Messreihe 5 mit 8,7 mg/m³ beziehungsweise 7,2 mg/m³ sowie Linie 2 Messreihe 2 mit 5,0 mg/m³). Die Filter waren durchgängig frei von sichtbaren Ablagerungen. Die automatische Messeinrichtung zur kontinuierlichen Überwachung von Staub zeigte im Messzeitraum keine Auffälligkeiten. Es wird vermutet, dass aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit und des hohen Wasserdampfanteils im Abgas eventuell Kondensat von der Kanalwandung angesaugt wurde und dies zu einer zusätzlichen Aussalzung auf den Filtern führte. Diese Messwerte wurden daher als unplausibel bewertet.

Insgesamt können die Werte dennoch als erwartungsgemäß für den ordnungsgemäßen Betrieb der nachgeschalteten Abgasreinigung angesehen werden.

Quecksilber

Bei den Messungen im Oktober 2020 wurden in den Abgasen der beiden Linien sehr hohe Quecksilberkonzentrationen gemessen. So lag an Linie 1 die Konzentration zwischen 0,45 mg/m³ und

0,59 mg/m³ und an Linie 2 zwischen 0,17 mg/m³ und 0,36 mg/m³. Die Standzeiten der Adsorber betragen rund 1 Jahr im Falle der Linie 1 und rund 2 Jahre im Falle der Linie 2.

Bei den Messungen Anfang September 2021, nach Austausch des Sorbens, lagen die Quecksilberemissionen an Linie 1 unter der Erfassungsgrenze des Messverfahrens (kleiner 0,002 mg/m³). An Linie 2 lag der erste und dritte Stundenmittelwert mit 0,004 mg/m³ beziehungsweise 0,006 mg/m³ ebenfalls auf einem geringen Niveau. Für die zweite Messreihe wurde mit 0,027 mg/m³ aber eine deutlich höhere Konzentration ermittelt. Die Unterschiede in der Rückhaltung zwischen den Messungen konnten nicht geklärt werden. Eine mögliche Begründung könnte die hohe Masse des Sargs von 260 kg sein, der während der zweiten Messreihe eingäschert wurde.

Die Standzeit der Adsorber betrug zum Zeitpunkt der Nachmessung rund zwei Monate.

Formaldehyd und Gesamt-C

Die mittlere Konzentration an Gesamt-C im Abgas der Linie 1 lag im Bereich der Erfassungsgrenze des Messverfahrens. Linie 2 wies Konzentrationen zwischen 1,6 mg/m³ und 2,5 mg/m³ auf, die Konzentrationen liegen somit knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze.

Entsprechend gering fielen die Formaldehydkonzentrationen aus. An Linie 1 lag der maximale Stundenmittelwert bei 0,08 mg/m³, an Linie 2 bei 0,12 mg/m³. Auch hier kann von einer ordnungsgemäßen und vollständigen Verbrennung ausgegangen werden.

PCDD/PCDF

PCDD/PCDF und PCB waren an beiden Linien in keiner der Messungen nachweisbar.

Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl

Für gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl, wurden an beiden Linien dieser Anlage vergleichsweise hohe Konzentrationen zwischen 25 mg/m³ und 30 mg/m³ ermittelt. Beide Linien besitzen diesbezüglich ein ähnliches Emissionsverhalten.

Auf die Höhe der Emissionen hatte die Erneuerung des Adsorbers im Juli 2021 keinen mindernden Einfluss. Im Vergleich zu den ermittelten Werten im Oktober 2020 nahm die gemessene mittlere Konzentration bei den Nachmessungen im September 2021 sogar zu. So lagen bei Linie 1 die Konzentrationen zwischen 33 mg/m³ und 37 mg/m³, bei Linie 2 zwischen 35 mg/m³ und 47 mg/m³.

Um festzustellen, ob es sich bei den gemessenen Konzentrationen an gasförmigen Chlorverbindungen, angegeben als HCl, nur um sublimierte und/oder filtergängige Chloride (z.B. NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂) handelt, wurden die Proben auf die (Erd-)Alkalimetalle Na, K, Ca und Mg untersucht. Die vom Bayerischen Landesamt für Umwelt mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma ermittelten Konzentrationen der genannten Elemente lagen jedoch in allen Proben unterhalb der Nachweisgrenze des Messverfahrens. Der Eintrag von sublimierten beziehungsweise filtergängigen Chloriden in die Proben kann somit ausgeschlossen werden. Bei den gemessenen anorganischen Chlorverbindungen handelt es sich demnach um Chlorwasserstoff.

5.5 Krematorium A

Die Messungen am Krematorium A fanden vom 13.04. bis 15.04.2021 statt. Das Krematorium besitzt zwei Etagenöfen. Die Abgasreinigungsanlage besteht aus einer Trockenadsorption mittels Kugelrotorverfahren und Umlenkreaktor zur Vergrößerung der Kontaktzeit sowie einem Vorzyklon und nachgeschalteten Gewebefilter.

Während der Messungen wurden keine Auffälligkeiten im Betriebsablauf festgestellt. Die Dauer der jeweiligen Einäscherung richtete sich nach dem Ausbrand. Anlagenstörungen traten im Messzeitraum nicht auf, die Verriegelungsbedingungen waren an der Anlage eingehalten.

In Tab. 9 sind die über den jeweiligen Messzeitraum gemittelten Abgasrandparameter (Volumenstrom, Feuchte, Temperatur und Sauerstoffgehalt) zusammengefasst dargestellt.

Tab. 9: Abgasrandparameter – Krematorium A

Abgasrandparameter	Mittelwert Linie 1	Mittelwert Linie 2
Sauerstoffgehalt	14,8 Vol.-%	13,9 Vol.-%
Volumenstrom (normiert, trocken)	1.850 Nm ³ /h	2.080 Nm ³ /h
Abgastemperatur	114 °C	116 °C
Abgasfeuchte	0,052 kg/m ³	0,047 kg/m ³

Die nachfolgend angegebenen Massenkonzentrationen beziehen sich auf den Normzustand (273 K, 1.013 hPa) nach Abzug der Feuchte sowie auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%. Da der Sauerstoffgehalt insgesamt über dem Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% lag, fallen die normierten Werte höher aus als die tatsächlich ermittelten Konzentrationen.

Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide

Für die kontinuierlich erfassten Parameter Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff und NO_x entsprechen Höhe und Verlauf den Erwartungswerten für den Anlagenbetrieb.

An beiden Linien wurde für CO die typische Messwertspitze beim Zerfall des Sarges beobachtet. Außerhalb dieser Zeiten lag die Konzentration im Bereich der Bestimmungsgrenze, was ordnungsgemäße Verbrennungsbedingungen anzeigt.

Der maximale Stundenmittelwert an Linie 1 betrug 44,1 mg/m³ und an Linie 2 9,2 mg/m³. Betrachtet man den gesamten Messzeitraum, so sind zwischen den beiden Linien jedoch kaum Unterschiede im Emissionsverhalten zu erkennen. An Linie 1 betrug die über den Messzeitraum gemittelte Konzentration 7,7 mg/m³ und an Linie 2 4,5 mg/m³. Ein Zusammenhang zwischen Sarggewicht beziehungsweise Holzart und Höhe der CO-Emissionen konnte nicht festgestellt werden.

Im Mittel lag die Stickstoffoxidkonzentration an Linie 1 bei 208 mg/m³ und maximal bei 262,3 mg/m³ (Stundenmittelwert). An Linie 2 lag die mittlere Konzentration bei 241 mg/m³ und der maximale Stundenmittelwert bei 400,8 mg/m³. Letzterer ist auf eine kurzzeitige Übersteuerung des Brenners zurückzuführen.

Gesamtstaub

Staub war in den Abgasen der beiden Linien nicht nachweisbar, was für die sehr gute und ordnungsgemäße Funktion der nachgeschalteten Abgasreinigung spricht.

Quecksilber

Die Quecksilberemissionen lagen durchgängig unterhalb der Erfassungsgrenze des Messverfahrens. Unter Berücksichtigung des potenziellen Quecksilbereintrages und des Abgasreinigungsverfahrens (Trockenadsorption nach dem Kugelrotorverfahren) zeigt sich, dass die Abgasreinigung offensichtlich auch so betrieben werden kann, dass keine relevanten Quecksilberemissionen auftreten.

Formaldehyd und Gesamt-C

Die mittlere Konzentration an Gesamt-C in den Abgasen der Linie 1 und Linie 2 lag im Bereich der Erfassungsgrenze des Messverfahrens.

Entsprechend gering fielen die Formaldehydkonzentrationen aus. An Linie 1 lag hier der maximale Stundenmittelwert bei 0,10 mg/m³, an Linie 2 bei maximal 0,09 mg/m³. Auch hier kann man von einer ordnungsgemäßen und vollständigen Verbrennung sprechen.

PCDD/PCDF und PCB

PCDD/PCDF und PCB waren an beiden Linien in keiner der Messungen nachweisbar.

Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl

Für gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl, wurden an Linie 1 sehr niedrige Konzentrationen zwischen 1,2 mg/m³ und 4 mg/m³ ermittelt. Linie 2 wies mit 2,5 mg/m³ bis 6,1 mg/m³ Konzentrationen in ähnlicher niedriger Größenordnung auf. Es ist davon auszugehen, dass durch das Kugelrotorverfahren die Emissionen grundsätzlich niedrig gehalten werden können.

5.6 Krematorium D

Die Messungen am Krematorium D fanden vom 17.11. bis 19.11.2020 statt. Das Krematorium besitzt zwei Flachbettöfen. Die Abgasreinigungsanlage besteht aus einer Trockenadsorption mittels Flugstromverfahren sowie einem nachgeschalteten Zyklon und einem Gewebefilter.

Während der Messungen wurden keine Auffälligkeiten im Betriebsablauf festgestellt. Die Dauer der jeweiligen Einäscherung richtete sich nach dem Ausbrand. Anlagenstörungen traten im Messzeitraum nicht auf, die Verriegelungsbedingungen waren an der Anlage eingehalten.

In Tab. 10 sind die über den jeweiligen Messzeitraum gemittelten Abgasrandparameter (Volumenstrom, Feuchte, Temperatur und Sauerstoffgehalt) zusammengefasst dargestellt.

Tab. 10: Abgasrandparameter – Krematorium D

Abgasrandparameter	Mittelwert Linie 1	Mittelwert Linie 2
Sauerstoffgehalt	13,3 Vol.-%	13,8 Vol.-%
Volumenstrom (normiert, trocken)	1.370 Nm ³ /h	1.290 Nm ³ /h
Abgastemperatur	113 °C	113 °C
Abgasfeuchte	0,052 kg/m ³	0,059 kg/m ³

Die nachfolgend angegebenen Massenkonzentrationen beziehen sich auf den Normzustand (273 K, 1.013 hPa) nach Abzug der Feuchte sowie auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%. Da der Sauerstoffgehalt insgesamt über dem Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% lag, fallen die normierten Werte höher aus als die tatsächlich ermittelten Konzentrationen.

Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide

Für die kontinuierlich erfassten Parameter Kohlenmonoxid (CO), Sauerstoff und NO_x entsprechen Höhe und Verlauf den Erwartungswerten für den Anlagenbetrieb.

An beiden Linien wurde für CO die typische Messwertspitze beim Zerfall des Sarges beobachtet. Außerhalb dieser Zeiten lag die Konzentration im Bereich der Bestimmungsgrenze, was ordnungsgemäße Verbrennungsbedingungen anzeigt.

Der maximale Stundenmittelwert an Linie 1 betrug 12,3 mg/m³. An Linie 2 lag selbst der maximale Stundenmittelwert mit 5,9 mg/m³ im Bereich der Bestimmungsgrenze. Linie 1 weist generell höhere Emissionswerte an Kohlenmonoxid auf als Linie 2. Dies wahrscheinlich liegt am Alter der Linie und der damit durch Abnutzung verbundenen veränderten Gaszirkulation in Haupt- und Nachbrennkammer. Ein Zusammenhang zwischen Sargmasse beziehungsweise Holzart und Höhe der CO-Emissionen konnte nicht festgestellt werden.

Im Mittel lagen die Stickstoffoxidkonzentrationen an Linie 1 bei 375 mg/m³ und maximal bei 457 mg/m³ (Stundenmittelwert). An Linie 2 lag die mittlere Konzentration bei 325 mg/m³ und der maximale Stundenmittelwert bei 405 mg/m³.

Gesamtstaub

Staub war in den Abgasen der beiden Linien nicht nachweisbar, was für die sehr gute und ordnungsgemäße Funktion der nachgeschalteten Abgasreinigung spricht.

Quecksilber

Die Quecksilberemissionen lagen an beiden Linien vergleichbar auf geringem Niveau im Bereich von kleiner gleich 0,004 mg/m³.

Formaldehyd und Gesamt-C

Die mittlere Konzentration an Gesamt-C im Abgas der Linie 1 lag mit 1,6 mg/m³ knapp über der Erfassungsgrenze des Messverfahrens, maximal wurden 2,6 mg/m³ als Stundenmittelwert erfasst. An Linie 2 lag die mittlere Konzentration durchgängig unter der Erfassungsgrenze des Messverfahrens.

Die Formaldehydkonzentrationen fielen entsprechend gering aus, an beiden Linien lagen die Konzentrationen unterhalb der Erfassungsgrenze des Messverfahrens.

PCDD/PCDF

PCDD/PCDF waren an beiden Linien in keiner der Messungen nachweisbar.

Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl

Für gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl, wurden vergleichsweise hohe Konzentrationen bis maximal 18,9 mg/m³ an Linie 1 und 43,9 mg/m³ an Linie 2 ermittelt. Obwohl beide Linien deutliche Konzentrationsunterschiede aufweisen, verlaufen die Konzentrationen innerhalb einer Linie konstant. Die Ursachen hierfür konnten nicht geklärt werden.

5.7 Ergebnisübersicht

Nachfolgend sind die maximalen Stundenmittelwerte sowie die über den gesamten Messzeitraum gemittelten Konzentrationen zusammengefasst dargestellt.

Die angegebenen Massenkonzentrationen beziehen sich auf den Normzustand (273 K, 1.013 hPa) nach Abzug der Feuchte sowie auf einen Sauerstoffgehalt von 11 Vol.-%.

Die Einzel-, Roh- und Zwischenwerte, die zugehörigen Probenahmezeiten sowie die Analysenprotokolle zur Bestimmung von PCDD/PCDF können den jeweiligen Berichten (siehe Tab. 3) entnommen werden.

Tab. 11: Übersicht Messergebnisse Anlage E, Anlage F und Anlage B

Parameter		Einheit	Anlage E		Anlage F		Anlage B			
			Messwert	MU	Messwert	MU	Linie 1		Linie 2	
							Messwert	MU	Messwert	MU
Sauerstoff		[Vol. %]	15,80	0,08	15,00	0,08	16,69	0,08	17,54	0,08
Volumenstrom		[m³/h]	1.700	107	4.000	252	2.660	168	2.535	160
Kohlenmonoxid	MW	[mg/m³]	16,8	12,0	6,9	9,3	11,0	14,1	20,4	16,8
	MAX	[mg/m³]	158,9	11,8	18,6	9,3	22,5	13,8	47,0	19,4
Stickstoffoxide	MW	[mg/m³]	261,5	20,1	296,2	17,6	300,3	24,5	239,3	30,2
	MAX	[mg/m³]	337,2	19,7	362,6	20,3	358,4	25,7	301,1	30,7
Gesamt-C	MW	[mg/m³]	« 1,1	-	« 1,0	-	« 1,4	-	« 1,6	-
	MAX	[mg/m³]	« 1,2	-	« 1,0	-	« 1,4	-	« 1,7	-
Quecksilber	MW	[mg/m³]	0,028	0,003	« 0,001	-	0,077	0,007	0,111	0,010
	MAX	[mg/m³]	0,077	0,006	< 0,001	-	0,085	0,007	0,118	0,010
HCl	MW	[mg/m³]	38,8	3,3	5,1	0,4	18,4	1,6	18,0	1,5
	MAX	[mg/m³]	45,7	3,8	6,7	0,6	19,0	1,6	20,9	1,8
Formaldehyd	MW	[mg/m³]	0,33	0,02	0,34	0,02	« 0,06	-	0,33	0,03
	MAX	[mg/m³]	0,46	0,02	0,48	0,02	« 0,08	-	0,40	0,03
Staub	MW	[mg/m³]	1,3	1,0	< 0,4	-	« 0,2	-	« 0,2	-
	MAX	[mg/m³]	1,8	1,1	< 0,5	-	« 0,2	-	« 0,2	-
Konzentration PCDD/PCDF i. TEQ (n.n. = 0)	MAX	[ng/m³]	0,022	0,006	0	-	0,001	-	0	-
Konzentration PCDD/PCDF i. TEQ (n.n. = n.n.)	MAX	[ng/m³]	0,023	0,006	0,006	0,001	0,006	0,002	0,007	0,002
Konzentration PCB i. TEQ (n.n. = 0)	MAX	[ng/m³]	n.B.	-	0	-	0	-	0	-
Konzentration PCB i. TEQ (n.n. = n.n.)	MAX	[ng/m³]	n.B.	-	0,001	0,0001	0,0012	0,0003	0,0014	0,0004

Emissionswerte angegeben im Normzustand, trocken (1013 mbar und 273,15 K) bezogen auf 11 Vol. % Sauerstoff

< Bestimmungsgrenze des Messverfahrens « Erfassungsuntergrenze des Messverfahrens n.B. = nicht bestimmt

Tab. 12: Übersicht Messergebnisse Anlage C

Parameter		Einheit	Oktober 2020				September 2021			
			Linie 1		Linie 2		Linie 1		Linie 2	
			Messwert	MU	Messwert	MU	Messwert	MU	Messwert	MU
Sauerstoff		[Vol.%]	14,11	0,08	15,59	0,08	14,80	0,08	15,95	0,08
Volumenstrom		[m³/h]	1.400	88	1.750	110	1.920	121	1.630	103
Kohlenmonoxid	MW	[mg/m³]	8,3	8,2	17,5	10,9	n.B.	-	n.B.	-
	MAX	[mg/m³]	28,7	8,9	26,1	14,2	n.B.	-	n.B.	-
Stickstoffoxide	MW	[mg/m³]	412,3	15,6	350,1	19,2	n.B.	-	n.B.	-
	MAX	[mg/m³]	518,1	18,0	455,6	24,7	n.B.	-	n.B.	-
Gesamt-C	MW	[mg/m³]	« 1,1	-	2,0	1,5	n.B.	-	n.B.	-
	MAX	[mg/m³]	« 1,1	-	2,5	1,7	n.B.	-	n.B.	-
Quecksilber	MW	[mg/m³]	0,52	0,04	0,28	0,03	« 0,001	-	0,013	0,001
	MAX	[mg/m³]	0,59	0,04	0,36	0,04	« 0,002	-	0,027	0,002
HCl	MW	[mg/m³]	22,4	1,2	20,8	1,2	35,0	3,0	39,4	3,3
	MAX	[mg/m³]	29,6	1,6	29,0	1,9	37,1	3,1	46,7	3,9
Formaldehyd	MW	[mg/m³]	0,06	0,02	0,16	0,02	n.B.	-	n.B.	-
	MAX	[mg/m³]	0,08	0,02	0,18	0,02	n.B.	-	n.B.	-
Staub	MW	[mg/m³]	1,2	0,8	1,2	1,1	n.B.	-	n.B.	-
	MAX	[mg/m³]	2,1	0,9	1,5	1,1	n.B.	-	n.B.	-
Konzentration PCDD/PCDF i. TEQ (n.n. = 0)	MAX	[ng/m³]	0	-	0,000	0,000	n.B.	-	n.B.	-
Konzentration PCDD/PCDF i. TEQ (n.n. = n.n.)	MAX	[ng/m³]	0,007	0,002	0,008	0,002	n.B.	-	n.B.	-
Konzentration PCB i. TEQ (n.n. = 0)	MAX	[ng/m³]	n.B.	-	n.B.	-	n.B.	-	n.B.	-
Konzentration PCB i. TEQ (n.n. = n.n.)	MAX	[ng/m³]	n.B.	-	n.B.	-	n.B.	-	n.B.	-

Emissionswerte angegeben im Normzustand, trocken (1013 mbar und 273,15 K) bezogen auf 11 Vol. % Sauerstoff

< Bestimmungsgrenze des Messverfahrens « Erfassungsuntergrenze des Messverfahrens n.B. = nicht bestimmt

Tab. 13: Übersicht Messergebnisse Anlage A und Anlage D

Parameter		Einheit	Anlage A				Anlage D			
			Linie 1		Linie 2		Linie 1		Linie 2	
			Messwert	MU	Messwert	MU	Messwert	MU	Messwert	MU
Sauerstoff		[Vol. %]	14,83	0,08	13,89	0,08	13,27	0,08	13,82	0,08
Volumenstrom		[m³/h]	1.850	117	2.080	131	1.370	86	1.290	81
Kohlenmonoxid	MW	[mg/m³]	7,7	8,6	4,5	7,4	6,4	7,5	< 3,7	-
	MAX	[mg/m³]	44,1	8,7	9,2	7,8	12,3	7,5	< 5,9	-
Stickstoffoxide	MW	[mg/m³]	208,3	16,9	240,7	14,8	374,6	13,5	324,9	15,1
	MAX	[mg/m³]	262,3	19,4	400,8	16,8	457,6	16,5	405,2	20,0
Gesamt-C	MW	[mg/m³]	< 0,9	-	< 0,8	-	1,6	1,0	« 0,9	-
	MAX	[mg/m³]	< 1,4	-	< 1,0	-	2,6	1,1	« 1,1	-
Quecksilber	MW	[mg/m³]	« 0,001	-	« 0,001	-	0,0038	0,0003	0,0022	0,0002
	MAX	[mg/m³]	« 0,001	-	« 0,001	-	0,0040	0,0003	0,0039	0,0003
HCl	MW	[mg/m³]	2,5	0,2	4,0	0,3	18,9	1,6	36,5	3,0
	MAX	[mg/m³]	4,0	0,3	6,1	0,5	19,7	1,6	43,9	3,7
Formaldehyd	MW	[mg/m³]	0,08	0,02	0,06	0,02	« 0,03	-	« 0,02	-
	MAX	[mg/m³]	0,10	0,02	0,09	0,02	« 0,03	-	« 0,03	-
Staub	MW	[mg/m³]	< 0,3	-	0,5	0,9	« 0,2	-	« 0,2	-
	MAX	[mg/m³]	< 0,3	-	1,7	0,9	« 0,2	-	« 0,3	-
Konzentration PCDD/PCDF i. TEQ (n.n. = 0)	MAX	[ng/m³]	0	-	0	-	0	-	0	-
Konzentration PCDD/PCDF i. TEQ (n.n. = n.n.)	MAX	[ng/m³]	0,005	0,001	0,0045	0,0012	0,0042	0,0011	0,005	-
Konzentration PCB i. TEQ (n.n. = 0)	MAX	[ng/m³]	0	-	0	-	n.B.	-	n.B.	-
Konzentration PCB i. TEQ (n.n. = n.n.)	MAX	[ng/m³]	0,0005	0,0001	0,0009	0,0002	n.B.	-	n.B.	-

Emissionswerte angegeben im Normzustand, trocken (1013 mbar und 273,15 K) bezogen auf 11 Vol. % Sauerstoff

< Bestimmungsgrenze des Messverfahrens « Erfassungsuntergrenze des Messverfahrens n.B. = nicht bestimmt

6 Zusammenfassung und Diskussion

6.1 Abgasrandparameter

Bei den untersuchten Anlagen lag der Volumenstrom im Allgemeinen zwischen 1.200 m³/h und 2.000 m³/h. Ausnahmen bildeten das Krematorium B und das Krematorium F. In Anlage B waren an beiden Linien die Frischluftklappen am Gewebefilter spaltweise geöffnet, wodurch der Volumenstrom mit rund 2.600 m³/h gegenüber den anderen Krematorien etwas höher waren. An Anlage F wurde ein Volumenstrom von 4.000 m³/h gemessen. Weshalb hier der Volumenstrom deutlich höher ausfällt als bei anderen Krematorien, konnte nicht geklärt werden.

Die Abgastemperatur lag bei allen untersuchten Krematorien zwischen 110 °C und 160 °C.

Der Sauerstoffgehalt im Abgas lag bei allen Krematorien deutlich über dem Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-%. Dementsprechend fallen die normierten Werte um den Faktor 1,3 bis 2,9 höher aus als die tatsächlich ermittelten Konzentrationen. Im Mittel lag der Sauerstoffgehalt bei 15,0 Vol.-%. Den höchsten Sauerstoffgehalt wies das Krematorium B mit 17,5 Vol.-% und 16,7 Vol.-% auf. Grund waren, wie bereits erwähnt, die spaltweise geöffneten Frischluftklappen am Gewebefilter. Schetter et al. (2020) ermittelte einen mittleren Sauerstoffgehalt von 14,3 Vol.-%. Im Allgemeinen wird der Sauerstoffgehalt im Abgas nicht durch das kurzzeitige Öffnen der Ofentüren während Räumung und Beschickung verursacht, sondern durch die sauerstoffgeregelte Verbrennungsluftführung.

Trotz der teilweise hoch erscheinenden normierten Massenkonzentrationen ist die Schadstofffracht der Krematorien durch die geringen Volumenströme vergleichsweise niedrig.

6.2 Kohlenmonoxid

In der Regel liegen die Konzentrationen an CO während des Kremationsvorganges auf einem niedrigen Niveau. Während der Bestückung des Ofens und des Zusammenfalls des Sarges sind typische Spitzen zu beobachten. Flachbettöfen besitzen eine ausgeprägte Spitze beim Einfahren und eine kleinere Spitze beim Zusammenfall des Sarges. Etagenöfen zeigen ein entgegengesetztes Verhalten. Hier ist die Kohlenmonoxidspitze beim Zerfall des Sarges wesentlich ausgeprägter als die Einfahrspitze.

In Abb. 1 ist beispielhaft der typische Konzentrationsverlauf eines Flachbettofens für Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide und Sauerstoff dargestellt. Die Momentanwertverläufe sind bei allen Einäscherungen im Allgemeinen ähnlich. Deutlich können hier die Einfahrspitzen um 10:02 Uhr und 10:04 Uhr bei Kohlenmonoxid erkannt werden, die durch das Öffnen und Schließen der Ofentüren entstehen. Um 10:08 Uhr kommt es erneut zu einem Peak, dieser ist jedoch kleiner und flacher ausgeprägt und wird durch den Zusammenfall des Sarges verursacht.

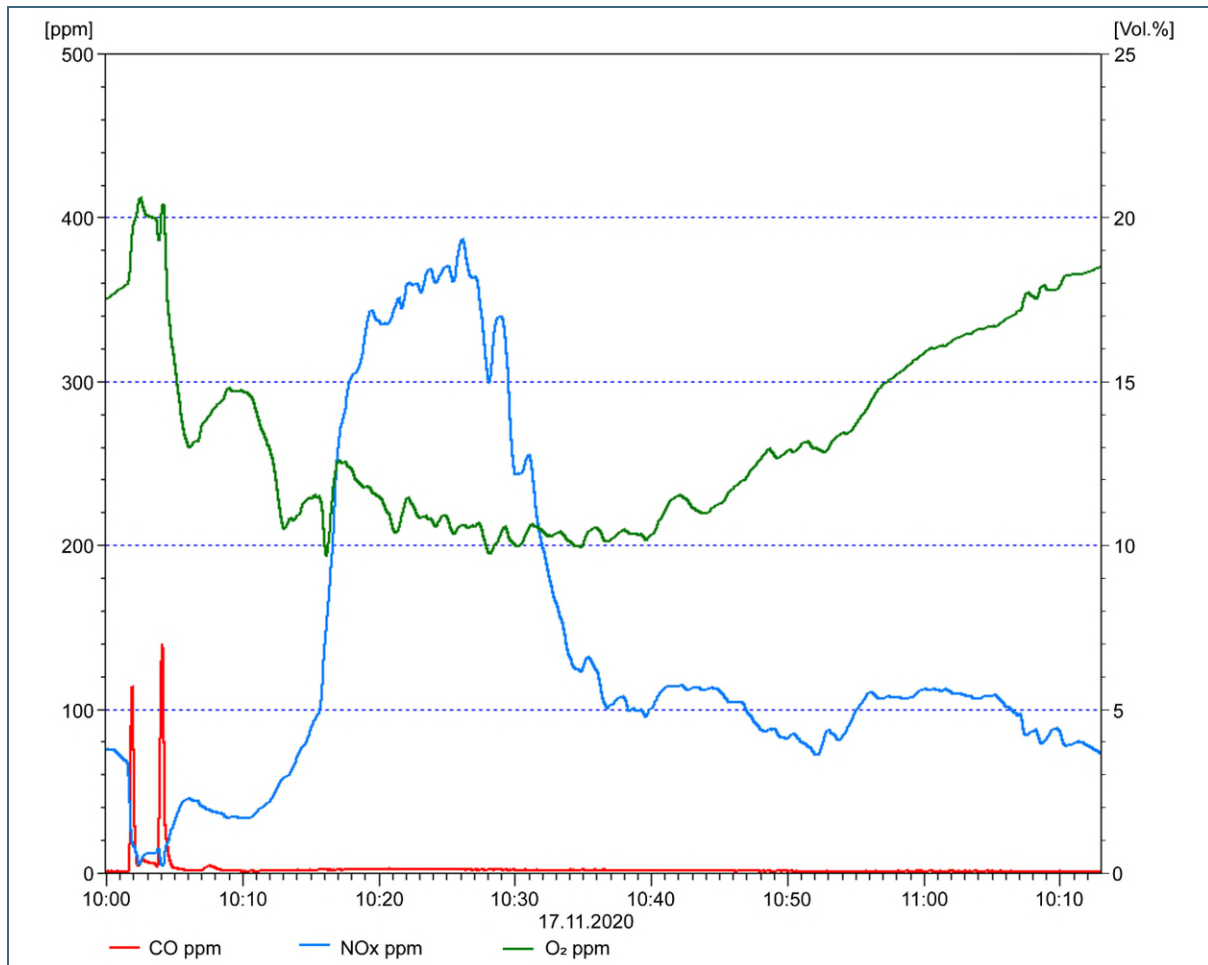


Abb. 1: Typischer Verlauf der Parameter CO, NO_x und O₂ während einer Kremation (Flachbettöfen)

Grenzwertüberschreitungen wurden für den Parameter Kohlenmonoxid im Untersuchungszeitraum nur einmal bei einer Anlage festgestellt. Ein feuerungstechnischer Fehler lag jedoch nicht vor. In diesem Fall blieben nach Abschluss des Kremationsvorgangs Teile des Verstorbenen und des Sarges auf dem Sargauflegerost zurück und mussten manuell bei geöffneter Ofentür in die Aschenachbrennkammer geschoben werden. Ein direkter Zusammenhang zwischen Eigenschaften des Sarges (Masse, Holzart, Behandlung des Holzes) und der Höhe der Kohlenmonoxidemissionen konnte nicht festgestellt werden. Zur Veranschaulichung ist Abb. 2 die gemessene normierte Kohlenmonoxidkonzentration gegenüber der jeweiligen Sargmasse aufgetragen.

Sonderformen von Särgen aus Pappe oder Holzwerkstoffen können nach Aussage einiger Betreiber durch ein ungünstiges Brandverhalten die CO-Emissionen negativ beeinflussen. Ebenso können Sonderkremationen wie die Einäscherung von Pathologieleichen und Unfallopfern zu höheren Kohlenmonoxidemissionen führen, da nicht nur organisches Material, sondern unter Umständen auch Kunststoffe oder Fixiermittel (z. B. Formaldehyd, Paraformaldehyd, Glycerin) mitverbrannt werden. Solche Sonderformen der Kremation wurden im Untersuchungszeitraum jedoch nicht durchgeführt und konnten daher auch nicht messtechnisch erfasst werden.

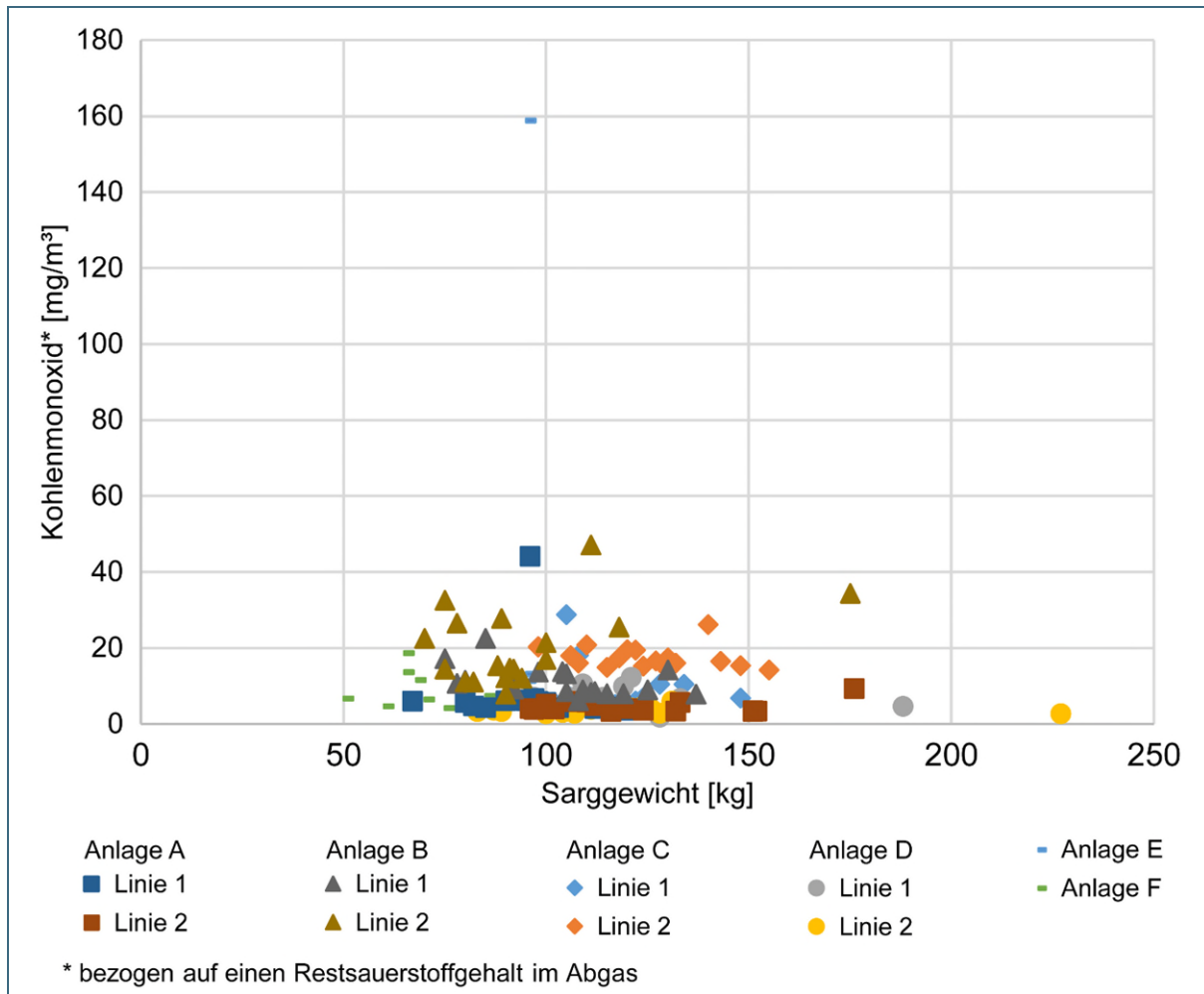


Abb. 2: Zusammenhang zwischen normierter CO-Konzentration und Sarggewicht

Erhöhte Emissionen an Kohlenmonoxid haben in der Regel folgende Ursachen:

- defektes Mauerwerk
- Behinderung des Abgasweges durch Verschmutzung, Verschleiß, Verblockung
- Bedienfehler (z. B. Überhitzung des Ofens)
- unsachgemäße Fahrweise (z. B. Öffnung der Ofentür zum Umschichten des Ausbrandes)
- falsches Feuerungsmanagement

Schetter et al. (2020) nennt darüber hinaus noch:

- defekte Messgeräte (unter anderem O₂-Sonde oder Thermoelementbruch; insbesondere können defekte O₂-Sonden zu einer fehlerhaften Interpretation der tatsächlich vorherrschenden Verbrennungszustände führen, die die sauerstoffgeregelter Prozessführung ebenfalls behindert)
- defekte Verbrennungsversorgung (unter anderem defektes Gebläse, verstopfte Leitungen)
- Defekte in der Feuerungsanlage (z. B. Unterbrechung der Gasversorgung, Druckschwankungen in der Gaszuleitung, Ausfall der Heizwendeln bei Elektroofensystemen)
- Defekte in der Prozesssteuerung (unter anderem Ausfall und fehlerhafte Justierung von Reglerbaugruppen sowie Stellgliedern)

- Störungen bei der Emissionsmessung und Emissionsmesswerterfassung
- Regelmäßige Inspektionen und Wartungen der Öfen sowie der automatischen Messeinrichtungen tragen dazu bei, den mess- und ofentechnischen Ursachen entgegenzuwirken. Auch die individuelle Justierung der Zuluftklappen während der Inbetriebnahme, wie im Falle des Krematoriums C, kann die CO-Emissionen und damit die Überschreitungshäufigkeit senken. Das erfordert jedoch detaillierte Kenntnisse sowie Verständnis für die Anlage.

Eine umfassende Ausbildung und Schulung der Kremationstechniker ist nötig, um Überschreitungen durch Bedienfehler auszuschließen. Entsprechend geschultes Personal kann bei rechtzeitigem Erkennen einen Anstieg der Kohlenmonoxidemissionen, beispielsweise durch Variation der Verbrennungsluftzufuhr, entgegensteuern. Geschultes und erfahrenes Personal ist ebenfalls in der Lage, Kremationen entsprechend zu planen und zu steuern, um auf diese Weise ungünstige Ofenzustände zu vermeiden. So wurden in den meisten der untersuchten Krematorien hohe Sarggewichte am Anfang der Woche bei einem verhältnismäßig kühlen Ofen eingeäschert. Außerdem folgte auf einem hohen Sarggewicht in der Regel ein Sarg mit geringerem Gewicht. Auf diese Weise kann eine Überhitzung des Ofens verhindert werden.

Generell kann davon ausgegangen werden, dass die als Mehrkammersystem konzipierten Öfen in Verbindung mit der in der Praxis etablierten Richtgröße von etwa 11 Vol.-% Sauerstoff in der Nachbrennkammer ausreichen, um einen nahezu vollständigen Abgasausbrand zu gewährleisten. Die Umsetzung der Richtlinie VDI 3891 ist im Falle der Komponente Kohlenmonoxid ausreichend, um den Anforderungen der 27. BImSchV zu genügen. Erheblichen Einfluss auf die Höhe der Emissionen an Kohlenmonoxid haben der Anlagenzustand und eine gute Betriebsführung.

Einzelne Überschreitungen im Regelbetrieb können dennoch auftreten, sind aber auf zufällige Ursachen zurückzuführen. Pathologieleichen und Unfallopfer werden nicht von allen Krematorien eingeäschert. Einige der untersuchten Krematorien nehmen keine Pappsärge an.

Ein Wert von 3 % Überschreitungshäufigkeit für den CO-Grenzwert scheint neben dem Jahresmittelwert eine Größe, die mindestens zu erreichen ist. Bei entsprechender Anlagenführung können die Überschreitungshäufigkeiten deutlich unter diesen Wert gesenkt werden.

6.3 Gesamt-C und Formaldehyd

An allen untersuchten Anlagen bewegten sich die Konzentrationen an Gesamt-C und Formaldehyd auf geringem Niveau, häufig im Bereich der Erfassungs- beziehungsweise Bestimmungsgrenze der Messverfahren.

Sowohl Gesamt-C als auch Formaldehyd sind wie Kohlenmonoxid das Resultat unvollständiger Verbrennung. Kohlenmonoxid kann daher als Leitkomponente betrachtet werden. Erfahrungsgemäß steigt bei Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen zunächst die Kohlenmonoxidkonzentration an. Erst bei weiterer Verschlechterung steigt auch die Emission an Gesamtkohlenstoff. So ist bei Einhaltung des CO-Grenzwertes ebenso von einer Einhaltung des in der 27. BImSchV festgelegten Grenzwertes von 20 mg/m³ für Gesamt-C auszugehen. Im Falle von Formaldehyd kann ebenfalls davon ausgegangen werden, dass bei Einhaltung des CO-Grenzwertes der in der TA Luft 2021 allgemein geforderte Grenzwert von 5 mg/m³ beziehungsweise 2,5 g/h nicht erreicht wird.

6.4 Gesamtstaub

An allen untersuchten Anlagen bewegen sich die Konzentrationen an Gesamtstaub auf sehr geringem Niveau, meist im Bereich der Erfassungs- beziehungsweise Bestimmungsgrenze des Messverfahrens. Die maximale im Untersuchungszeitraum gemessene normierte Konzentration betrug $2,1 \text{ mg/m}^3$. Die an den Anlagen installierten und dem Stand der Technik entsprechenden Abgasreinigungseinrichtungen, wie Staubabscheidung, Gewebefilter gegebenenfalls in Verbindung mit einem Zyklon zur Vorabscheidung, sind ausreichend, um den Anforderungen der 27. BImSchV zu genügen. Eine triboelektrische Sonde als Filterwächter, wie an den meisten Anlagen bereits installiert, in Verbindung mit den wiederkehrenden Emissionsmessungen ist als Überwachungsmaßnahme ausreichend.

6.5 Stickstoffoxide

Bedingt durch die hohen Temperaturen, welche in den einzelnen Kammern herrschen, und den Sauerstoffüberschuss fallen die bei der Kremation entstehenden Stickstoffoxidkonzentrationen im Vergleich zu anderen Feuerungen eher hoch aus. Die höchsten Momentanwertkonzentrationen treten bei Stützfeuerung mit Erdgas auf, wenn durch das Holz des Sarges selbst nicht mehr genügend Brennstoff bereitsteht (siehe Abb. 1).

Im Vergleich zu Etagenöfen liegt die Brennkammertemperatur der Flachbettöfen im Allgemeinen höher, dementsprechend weisen diese Öfen auch höhere NO_x -Konzentrationen als die Etagenöfen auf. So lagen bei Flachbettöfen die Stundenmittelwerte zwischen 105 mg/m^3 und 520 mg/m^3 und gemittelt über den gesamten Messzeitraum bei 340 mg/m^3 . Etagenöfen wiesen Stundenmittelwerte zwischen 200 mg/m^3 und 400 mg/m^3 und im Mittel 270 mg/m^3 auf.

Die angegebenen Konzentrationen beziehen sich jeweils auf 11 Vol.-% Sauerstoff. Da der Sauerstoffgehalt insgesamt deutlich über dem Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% lag, fallen die normierten Werte um den Faktor 1,3 bis 2,9 höher aus als die tatsächlich ermittelten Konzentrationen.

Der Massenstrom liegt in der Regel unter $0,5 \text{ kg/h}$. Eine Ausnahme bildet das Krematorium F, durch den vergleichsweise hohen Volumenstrom liegt der NO_x -Massenstrom zwischen $0,5 \text{ kg/h}$ und $0,9 \text{ kg/h}$. In der TA Luft liegt die Massenströmschwelle für Stoffe nach Nr. 5.2.4 Klasse IV bei $1,8 \text{ kg/h}$. Von den untersuchten Krematorien wird diese demnach nicht erreicht.

Eine primärseitige Minderung der Stickstoffoxidbildung ist ohne deutliche Absenkung der Temperaturen in Haupt- und Nachbrennkammer wohl nicht möglich. Durch geeignete Verbrennungsführung können jedoch primärseitige Optimierungen erfolgen. Dabei sind jedoch die Vorgaben der Richtlinie VDI 3891 hinsichtlich der erforderlichen Mindesttemperaturen als auch der gegenläufige Effekt auf die CO -Konzentration zu beachten.

Als Sekundärmaßnahmen zur NO_x -Minderung stehen Verfahren wie die selektive katalytische Reduktion (SCR) oder selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR) zur Verfügung. Hier ist eine genaue Abwägung zwischen Aufwand und Nutzen notwendig.

6.6 Quecksilber

Hinsichtlich der Quecksilberemissionen zeigten die Anlagen abhängig von den Abgasreinigungsverfahren deutliche Unterschiede. Tab. 14 gibt einen Überblick über das Minderungspotenzial der jeweiligen Abgasreinigungsverfahren bezüglich Quecksilber und Chlorwasserstoff. Da im Rahmen des Projektes keine Rohgasmessungen durchgeführt wurden, konnte die Rohgasfracht und damit der genaue Abscheidungsgrad der jeweiligen Abgasreinigungsart nicht ermittelt werden.

Tab. 14: Minderungspotenzial von Abgasreinigungsverfahren bezüglich Hg und HCl

Abgasreinigungsverfahren	Hg-Minderung	HCl-Minderung
Festbettadsorber	+	–
Flugstromverfahren	++	–
Kugelrotorverfahren	++	++
Katalytische Filterschläuche	–	–

* Starke Abhängigkeit gegenüber dem Wartungsintervall bzw. rechtzeitigem Wechsel

Bei Anlagen, welche Adsorptionsverfahren wie das Flugstromverfahren oder das Kugelrotorumlaufverfahren unter Einsatz von Aktivkohle nutzen, konnte Quecksilber, wenn überhaupt, nur in Spuren nachgewiesen werden. Die hohe Abscheiderate im Falle des Flugstromverfahrens und Kugelrotorumlaufverfahrens beruht vermutlich darauf, dass das mit Quecksilber beladene Sorptionsmittel im nachfolgenden Zyklon beziehungsweise Gewebefilter sofort aus dem Abgasstrom entfernt wird. Der Wiedereintrag des Quecksilbers in den Abgaspfad durch Desorption ist somit nicht mehr möglich.

Das Krematorium E ist nur mit einer katalytischen Filtration ausgestattet, was keiner ausreichenden Technik zur Quecksilberminderung entspricht. Die Quecksilberemission hängt damit unmittelbar vom Eintrag durch den Verstorbenen ab und kann daher schwanken. Dementsprechend unterschieden sich bei den drei Messungen die ermittelten Quecksilberkonzentrationen deutlich. Zumindest eine regelmäßige Überwachung der Quecksilberemissionen scheint daher bei Anlagen ohne Einrichtungen zur Quecksilberminderung sinnvoll.

Anlagen, welche zur Minderung einen Festbettadsorber verwendeten, wiesen, sofern der Adsorber neu und unverbraucht war, geringe Quecksilberkonzentrationen auf. Es zeigte sich aber auch, dass die Adsorptionskapazität der Aktivkohle innerhalb eines Monats erlöschen kann und ggf. bereits adsorbiertes Quecksilber wieder desorbiert wird. Während einer solchen Desorptionsphase wurden Quecksilberkonzentrationen von bis zu $0,59 \text{ mg/m}^3$ (bezogen auf 11 Vol.-% Sauerstoff) bei einem Massenstrom von $0,5 \text{ g/h}$ ermittelt. Eine Erhöhung der Standzeit und eine Verhinderung der Desorption könnten durch die Verwendung von imprägnierter Aktivkohle erfolgen. Für die Quecksilberabscheidung mit Chemisorption an Aktivkohle empfiehlt die Richtlinie VDI 3928 „Abgasreinigung durch Chemisorption“ beispielsweise eine Imprägnierung mit Schwefelsäure, Kaliumjodid, Schwefel oder Brom.

Schetter et al. (2020) zeigte, dass der Quecksilbereintrag ins Rohgas extremen Schwankungen unterliegt und aus technischer Sicht unvorhersehbar ist. Gemäß dessen Messergebnissen weist die Mehrzahl der Kremationen Quecksilbereinträge kleiner $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (Stundenmittelwert) auf. Bei 25 % der Kremationen liegen Einträge größer $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ vor. Schetter et al. (2020) beschreibt einen Konzentrationsverlauf, der zunächst steil ansteigt und in den meisten Fällen ebenso steil abfällt. Die Breite der Konzentrationspitze korrespondiert dabei mit der Dauer der Kremation. Nur vereinzelt kommt es zu Quecksilberfreisetzungen, bei denen die Konzentrationen über einen längeren Zeitraum auf entsprechend hohem Niveau (größer $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) verbleiben.

Findet bei Festbettadsorbern kein regelmäßiger Sorbensaustausch statt, kann es zu Quecksilberdurchbrüchen kommen. Dies zeigten auch die Messungen im Rahmen dieses Projektes. Eine regelmäßige Überwachung der Quecksilberemissionen zur Kontrolle der Adsorptionskapazität ist daher für diese Abgasreinigungstechnik notwendig.

Beim Neubau von Krematorien sollte, insbesondere darauf geachtet werden, zuverlässige Abgasreinigungstechniken einzusetzen, mit denen Quecksilberemissionen weitestgehend vermieden werden können.

6.7 Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane sowie polychlorierte Biphenyle

Dioxine und Furane konnten im Untersuchungszeitraum nur an einer Anlage in einem Bereich zwischen $0,017 \text{ ng/m}^3$ und $0,022 \text{ ng/m}^3$ nachgewiesen werden. An allen anderen Anlagen waren die PCDD/PCDF nicht nachweisbar. PCB konnten an keiner der Anlagen nachgewiesen werden, was im Hinblick auf die nicht vorgefundenen PCDD/PCDF-Konzentrationen plausibel erscheint.

Wie in Punkt 2.3 erläutert, entstehen PCDD/PCDF nach der sogenannten „de-novo-Synthese“ in einem engen Temperaturbereich, sodass der Bildung/Rückbildung durch eine schnelle Abgaskühlung entgegengewirkt werden kann. Zur weiteren Minimierung kommen zusätzlich sowohl adsorptive als auch katalytische Verfahren zur Anwendung. Die Ergebnisse zeigen, dass mit den hier verwendeten Kühltechniken (Quenche + Luft-Luft-Wärmetauscher beziehungsweise Luft-Wasser-Wärmetauscher) sowohl in Verbindung mit adsorptiven Verfahren (KRV, FSV, FBA) als auch mit dem katalytischen Filterschlauch eine sichere Einhaltung des Grenzwertes sichergestellt war.

6.8 Gasförmige Chlorverbindungen, angegeben als HCl

Gasförmige Chlorverbindungen konnten im Abgas aller Linien nachgewiesen werden. Es konnte gezeigt werden, dass es sich dabei um Chlorwasserstoff und nicht um sublimierte beziehungsweise filtergängige Chloride handelte. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Höhe der Emission nicht von der Ofenbauart abhängig ist, da Flachbett- und Etagenöfen ein ähnlich Emissionsniveau aufwiesen. Auffällig war, dass Konzentrationen innerhalb einer Linie eher konstant waren, sich aber zwischen den Linien desselben Krematoriums teilweise deutliche Konzentrationsunterschiede ergaben. Die Ursache konnte nicht geklärt werden. Ein Zusammenhang zwischen Höhe der Emissionen und den verschiedenen Adsorptionsverfahren wurde jedoch festgestellt. Tab. 14 gibt einen Überblick über das Reinigungspotenzial der jeweiligen Abgasreinigungsverfahren bezüglich Quecksilber und Chlorwasserstoff.

Im Wesentlichen konnten die Anlagenemissionen in zwei Konzentrationsbereiche eingeteilt werden. Bei vier Anlagen lagen die Konzentrationen zwischen 19 mg/m^3 und 47 mg/m^3 und an zwei Anlagen zwischen 4 mg/m^3 und 7 mg/m^3 auf deutlich geringerem Niveau.

Konzentrationen zwischen 19 mg/m^3 und 47 mg/m^3 wurden bei Anlagen mit Festbettadsorber oder mit Flugstromverfahren ermittelt. Die Schüttung der Festbettadsorber bestand bei den untersuchten Anlagen ausschließlich aus unbehandelter Aktivkohle, welche nur eine sehr niedrige Aufnahmefähigkeit bezüglich Chlorwasserstoff aufweist. Erhöhte Chlorwasserstoffkonzentrationen nach den Adsorbentien sind daher plausibel. Die geringe Aufnahmefähigkeit konventioneller Aktivkohle gegenüber Chlorwasserstoff erklärt ebenso, weshalb im Fall des Krematoriums C keine Minimierung der HCl-Konzentration nach Erneuerung des Adsorbens festgestellt wurde. Die tägliche Dosierung von Kalk zum Schutz der Filterschläuche, wie vom Krematorium C praktiziert, trägt ebenfalls nicht zu einer ersichtlichen zusätzlichen Reduzierung des Chlorwasserstoffs bei. Kontaktzeit und Sorbensmenge beziehungsweise -dichte sind hierfür zu gering.

Bei den Anlagen mit Flugstromverfahren wurde ein Calciumhydroxid-Kohle-Gemisch als Sorbens verwendet. Ca-basierte Additive sind prinzipiell gut zur Abscheidung von sauren Abgasbestandteilen geeignet, da das Reaktionsprodukt das korrespondierende partikelförmige Salz ist, welches im nachfolgenden Partikelfilter aus dem Gasstrom abgetrennt wird. Im Falle des Flugstromverfahrens aber ist

scheinbar die Kontaktzeit oder die Partikeldichte des Additivs zu gering, um eine ausreichende Abgasreinigung zu erzielen.

Bei Anlagen, die das Kugelrotorverfahren verwendeten, lagen die HCl Konzentrationen auf sehr niedrigem Niveau zwischen 4 mg/m^3 und 7 mg/m^3 . Wie bei Anlagen mit Flugstromverfahren wurde auch hier ein Calciumhydroxid-Kohle-Gemisch als Sorbens verwendet. Das Kugelrotorumlaufverfahren zeichnet sich im Allgemeinen durch eine höhere Kontaktzeit als auch durch eine höhere Partikeldichte aus. Die Kontaktchancen werden durch Rezirkulation der im Filter abgeschiedenen Partikel und durch eine turbulente Strömung im Kugelrotor weiter erhöht. Die geringeren Chlorwasserstoffkonzentrationen im Vergleich zum Flugstromverfahren scheinen damit plausibel.

Trotz der teilweise hohen Konzentrationen von bis zu 47 mg/m^3 lagen die Massenströme der Anlagen unterhalb von $0,06 \text{ kg/h}$ und somit unter der Massenstromschwelle der TA Luft 2021 von $0,15 \text{ kg/h}$.

6.9 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Umsetzung der Richtlinie VDI 3891 zielführend ist, um die Anforderungen der 27. BImSchV hinsichtlich der Emissionsgrenzwerte Kohlenmonoxid, Gesamtstaub, Gesamt-C sowie Dibenzo-p-dioxine und -furane einzuhalten. Bei der Einhaltung des Kohlenmonoxid- beziehungsweise des Gesamt-C-Grenzwertes als Leitkomponenten für die Sicherstellung eines vollständigen Ausbrandes, kann auch von einer Einhaltung des in der TA Luft 2021 geforderten Emissionswertes für Formaldehyd von 5 mg/m^3 beziehungsweise $2,5 \text{ g/h}$ ausgegangen werden.

Bedingt durch die hohen Temperaturen, welche in den einzelnen Kammern herrschen, und den Sauerstoffüberschuss fallen die bei der Kremation anfallenden Stickstoffdioxidkonzentrationen vergleichsweise hoch aus. Technische Sekundärmaßnahmen zur Reduktion wie SCR oder SNCR stehen zwar prinzipiell zur Verfügung, unter Berücksichtigung der geringen Massenströme, welche in der Regel unterhalb von $0,5 \text{ kg/h}$ liegen, ist jedoch eine Abwägung zwischen Aufwand und Nutzen erforderlich.

Je nach Art und Zustand der Abgasreinigung kann es zu relevanten Konzentrationen an Quecksilber kommen. Bei Anlagen, welche das Flugstrom- oder Kugelrotorverfahren anwenden, liegen die gemessenen Konzentrationen in der Regel im Bereich der Bestimmungsgrenze des Verfahrens. Die Gefahr von Adsorberdurchbrüchen oder Desorption besteht hier nicht. Festbettadsorber mit neu ausgestatteten Adsorberbetten weisen zunächst ähnlich geringe Konzentrationen auf. Das Adsorptionsvermögen kann aber innerhalb weniger Monate stark abnehmen und es kann zum Durchbruch bzw. ggf. zur Desorption des Quecksilbers kommen. Wie auch die Messungen im Rahmen dieses Messprogramms zeigten, ist dann eine Überschreitung des Emissionswertes der TA Luft für die Massenkonzentration beziehungsweise den Massenstrom möglich. Bei Krematorien, die keine Abgasreinigungsverfahren bezüglich Quecksilber einsetzen, hängt die Emission unmittelbar vom Eintrag durch den Verstorbenen ab und kann daher stark schwanken. Eine regelmäßige Überwachung der Quecksilberemissionen, beispielsweise in Form jährlicher Emissionsmessungen und die Festlegung eines Quecksilberemissionsgrenzwertes, wird zumindest bei Anlagen, welche keine Abgasreinigungsverfahren für Quecksilber besitzen oder Festbettadsorber verwenden, als sinnvoll erachtet. In eine Novelle der 27. BImSchV sollte ein Emissionsgrenzwert für Quecksilber mit jährlicher Überwachung durch Einzelmessungen aufgenommen werden.

Polychlorierte Biphenyle sind bekanntermaßen Vorläufersubstanzen von Dibenzo-p-dioxinen und -furanen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass bei Anlagen, die den Anforderungen der 27. BImSchV hinsichtlich PCDD/PCDF genügen, auch PCBs im Abgas nicht nachweisbar sind. Dies zeigte sich bei den Messungen im Rahmen des Untersuchungsprogrammes.

Gasförmige Chlorverbindungen konnten im Abgas aller Linien nachgewiesen werden. Nachweislich handelte es sich dabei um Chlorwasserstoff und nicht um sublimierte beziehungsweise filtergängige Chloride. Konzentrationen zwischen 19 mg/m^3 und 47 mg/m^3 wurden an Anlagen mit Festbettadsorber, Flugstromverfahren und einer Anlage mit katalytischen Filterschläuchen erfasst. Wesentlich niedrigere Konzentrationen zwischen 4 mg/m^3 und 7 mg/m^3 wurden dagegen bei Anlagen mit Kugelrotorverfahren gemessen. Auffällig war zudem, dass Konzentrationen innerhalb einer Linie eher konstant verliefen, sich aber zwischen den beiden Linien desselben Krematoriums deutliche Konzentrationsunterschiede ergaben. Die Ursache hierfür konnte nicht geklärt werden. Trotz der teilweise hohen Massenkonzentrationen lagen die Massenströme der Anlagen unterhalb der Massenstromschwelle der TA Luft 2021 von $0,15 \text{ kg/h}$.

7 Literatur

Siebenundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Artikel 1 der Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung und zur Änderung der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) (Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung – 27. BImSchV) vom 19. März 1997 (BGBl. I S. 545), die durch Artikel 10 der Verordnung vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973) geändert worden ist

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

Schetter, G., Bittig, M. (2020): Umweltrelevanz und Stand der Technik bei Einäscherungsanlagen. Abschlussbericht, TEXTE 26/2020 Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021 (GMBI. 2021, Nr. 48–54, S. 1050–1192)

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3891: Emissionsminderung – Anlagen zur Humankremation. Beuth-Verlag, Berlin, Juli 2015

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3928: Abgasreinigung durch Chemisorption. Beuth-Verlag, Berlin, Januar 2017



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

