

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Langzeituntersuchungen zu Emissions- und Schadstoffminderungen in Krematorien durch veränderte energieeffiziente Betriebsweisen



Schlussbericht von

Schetter GmbH & Co. KG, Köngen

Aktenzeichen:
Referat:
Projektlaufzeit:

31407/01
24/2
September 2014 / Dezember 2015

INHALTSVERZEICHNIS

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung	4
2. Stand der Erkenntnisse	6
2.1. Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff	7
2.2. Polychlorierte Dibenz-p-dioxine und -furane (PCDD/F)	12
2.3. Quecksilber und seine Verbindungen.....	16
3. Beschreibung der untersuchten Krematorien	18
3.1. Auswahlverfahren.....	18
3.2. Krematorium Berlin - Baumschulenweg	19
3.3. Krematorium München	22
3.4. Krematorium Pforzheim	24
4. Durchführung der Untersuchungen	27
4.1. Projektverlauf im Krematorium Berlin-Baumschulenweg.....	27
4.2. Projektverlauf im Krematorium München	28
4.3. Projektverlauf im Krematorium Pforzheim.....	29
4.4. Projektüberblick.....	32
4.5. Methodik zur Auswertung der kontinuierlichen Emissionsmessungen	33
4.5.1. Emissionsmesswerterfassung nach VDI 3891.....	33
4.5.2. CO – Grenzwertüberschreitungen	34
4.5.3. CO – Klassenmittelwert.....	34
4.6. Diskontinuierlichen Emissionsmessungen im Roh- und Reingas	35
5. Ergebnisse im Krematorium Berlin-Baumschulenweg	36
5.1. Betriebliche Datenerfassung	36
5.2. Kontinuierliche Messdatenerfassung.....	36
5.3. Betriebsverhalten und technische Besonderheiten	37
5.4. Kohlenmonoxid-Emissionen.....	38
5.5. Emissionskonzentrationsmessungen im Roh- und Reingas.....	41
5.6. Gasverbrauch.....	45
5.7. Zusammenfassende Bewertung mit Bezug auf das Gesamtprojekt	48

6. Ergebnisse im Krematorium München.....	50
6.1. Betriebliche Datenerfassung	50
6.2. Kontinuierliche Messdatenerfassung.....	50
6.3. Betriebsverhalten und betriebstechnische Besonderheiten	51
6.4. Kohlenmonoxid-Emissionen.....	53
6.5. Emissionskonzentrationsmessungen im Roh- und Reingas.....	57
6.6. Gasverbrauch.....	60
6.7. Zusammenfassende Bewertung in Bezug auf das Gesamtprojekt	64
7. Ergebnisse im Krematorium Pforzheim	66
7.1. Betriebliche Datenerfassung	66
7.2. Kontinuierliche Messdatenerfassung.....	66
7.3. Betriebsverhalten und betriebstechnische Besonderheiten	67
7.4. Auswirkungen des Betriebsverhaltens auf die CO-Emissionen.....	69
7.5. Emissionskonzentrationsmessungen im Roh- und Reingas.....	71
7.6. Bewertung der installierten Abgasreinigung	76
7.7. Gasverbrauch.....	79
7.8. Zusammenfassende Bewertung in Bezug auf das Gesamtprojekt	80
8. Untersuchungen an Feststoffproben	82
9. Zusammenfassung und Empfehlungen	84
10. Literaturquellen.....	88
11. Danksagung	91
12. Geistiges Eigentum	92

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die im Rahmen des DBU Forschungsvorhabens (AZ 26847) im Krematorium Düsseldorf durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt /1/, dass trotz Reduzierung der Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer die Emissionsvorgaben der 27. BImSchV /2/ in Verbindung mit dem in der VDI-Richtlinie 3891 /3/ formulierten Stand der Technik eingehalten werden können. Unterstützt wurden die im Krematorium Düsseldorf an einem Etagenofen – System Ruppman – gewonnenen Erkenntnisse durch die im Auftrag des Bayerischen Landesamt für Umwelt durchgeführte Datenerhebung an den bayerischen Krematorien (AZ 21-8721.21), wonach kein Zusammenhang zwischen CO-Grenzwertüberschreitungen und der Nichteinhaltung der in der 27. BImSchV geforderten Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer festgestellt werden konnte /4/.

Der Einhaltung der Nachverbrennungstemperatur von 850 °C steht ein zusätzlicher Energieverbrauch durch Stützfeuerung gegenüber. Unter den im Krematorium Düsseldorf genannten Rahmenbedingungen (installierte Technik und Anordnung im Baukörper) stellte sich bei ansonsten unveränderten betrieblichen Abläufen eine Reduzierung des Gasverbrauchs in der Größenordnung von ca. 30 % ein. Ungeachtet des monetären Vorteils geht damit auch eine Minderung des CO₂-Ausstoßes einher verbunden mit der Schonung der Ressource „Gas“.

Andererseits warf die in Fachkreisen kontrovers geführte Diskussion über die Temperaturabsenkung die Frage der Übertragbarkeit auf andere technologische Konstellationen und Betriebsweisen von Krematorien auf. Daher besteht das Ziel dieses erweiterten Untersuchungsprogramms darin, die gewonnenen Erkenntnisse an Krematorien mit anderen verfahrenstechnischen Baugruppen zu verifizieren und über Langzeituntersuchungen mögliche Risiken in der Betriebsweise der Kremationsanlagen zu identifizieren und zu bewerten. Hinzu kommen erweiterte Fragestellungen, wie die zu erwartende Größenordnung des Quecksilbereintrages sowie die Möglichkeiten und Grenzen deren Abscheidung mittels erprobter Abgasreinigungstechnologien vor dem Hintergrund einer möglichen Einführung eines Quecksilberemissionsgrenzwertes durch den Gesetzgeber.

An drei **unterschiedlich konzipierten Krematorien** wurden daher folgende Fragenstellungen untersucht:

- Lassen sich die positiven Erkenntnisse, die im Krematorium Düsseldorf mit der der Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer erzielt wurden, auch bei anderen Anlagenkonfigurationen verifizieren und wenn ja,

mit welchen Konsequenzen für die Festlegung der Nachverbrennungstemperatur?

- Welchen Einfluss haben die Anlagenauslastung und andere betriebliche Einflussfaktoren?
- Welche Auswirkungen haben die einzelnen Betriebsweisen auf den Energieverbrauch?
- Mit welchen Quecksilberkonzentrationen ist im Rohgas zu rechnen und welche Konsequenzen ergeben sich für die Konzeption und Dimensionierung unterschiedlicher Abgasreinigungsverfahren?

2. Stand der Erkenntnisse

Mit der Einführung der 27. BImSchV /2/, hat der Gesetzgeber 1997 den rechtlichen Rahmen für die Errichtung und den Betrieb von Krematorien geschaffen. Die darin festgelegten Emissionsgrenzwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Insbesondere wurde mit der Einführung eines Emissionsgrenzwertes für polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF) eine neue Qualität von Abgasreinigungsanlagen erforderlich, die sich bis heute weiterentwickelt hat. Gleichzeitig formulierte der Gesetzgeber in Analogie zu Abfallverbrennungsanlagen auch eine einzuhaltende Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer.

Komponenten ¹⁾		Emissionsgrenzwerte gemäß 27.BImSchV	Typische Bandbreite nach VDI 3891
Kohlenmonoxid	mg/Nm ³	50	5 ... 25
Gesamtkohlenstoff	mg/Nm ³	20	1 ... 10
Gesamtstaub	mg/Nm ³	10	1 ... 5
PCDD/PCDF ²⁾	ng I-TEQ/Nm ³	0,1	0,01 ... 0,1
Quecksilber	mg/Nm ³	kein Grenzwert	0,001 ... 0,05

Anmerkung: ¹⁾ Normzustand trocken; Sauerstoffbezug 11 %

²⁾ Toxizitätsäquivalent nach NATO-CCMS

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte für Krematorien und erwartete Bandbreite

Die seit der Einführung der 27. BImSchV im praktischen Betrieb von Krematorien gewonnenen Erkenntnisse machten eine Aktualisierung der VDI-Richtlinie 3891, die den Stand der Technik widerspiegelt, erforderlich /3/. Im Zuge dieser Überarbeitung wurden exemplarisch Emissionswerte abgefragt, die ebenfalls in Tabelle 1 angefügt sind.

In einer umfassenden Studie in bayerischen Krematorien konnte gezeigt werden, dass selbst bei guter technischer Installation, regelmäßiger Wartung und fachgerechter Betriebsführung nicht in jedem Betriebsfall die geforderten CO-Grenzwerte einzuhalten waren /4/. Diesem Aspekt wurde in der VDI 3891 – Abschnitt 7 – wie folgt Rechnung getragen:

„Auch bei zeitgemäßer Auslegung und Konstruktion von Kremationsofenanlagen unter Würdigung sämtlicher prozesstechnischer Parameter sowie bei ordnungsgemäßem 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.“

Auch aufgrund des Quecksilbereintrags über den Leichnam (amalgamierte Zähne) muss in Einzelfällen damit gerechnet werden, dass die Quecksilberemissionswerte außerhalb der in Tabelle 1 angegebenen Bandbreite liegen.

Weitere wesentliche Aspekte, die im Zuge der Aktualisierung der VDI 3891 berücksichtigt wurden, sind beispielsweise:

- Ansätze für neue technische Erkenntnisse vor dem Hintergrund der Primärenergieeinsparung,
- Neuerungen bei der kontinuierlichen Emissionsmesswerterfassung.

2.1. Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

Die bei der Kremation vorherrschende Reaktion ist die exotherme Umsetzung von Kohlenstoff (C) mittels Sauerstoff (O₂) über Kohlenmonoxid (CO) zu Kohlendioxid (CO₂), wobei das Umsetzungsverhältnis zwischen CO und CO₂ durch das Boudouard Gleichgewicht bestimmt wird. Die Verbrennung ist dann vollständig abgeschlossen, wenn der gesamte Kohlenstoff in Kohlendioxid übergeführt ist /5/. Chemisch lassen sich die Vorgänge vereinfacht durch folgendes Schema beschreiben:



wobei die bei der Oxidation von CO zu CO₂ freigesetzte Energie mehr als das 2,5-fache wie bei der Umsetzung von festem Kohlenstoff zu CO beträgt. In der Summe ergibt sich die Gesamtreaktion zu:



Obwohl es sich um exotherme Reaktionen handelt, wird zum Start (Zündung) Aktivierungsenergie benötigt (Bild 1). Diese ist entweder durch zusätzliche Stützfeuerung und/oder aus der freigesetzten Reaktionswärme bereitzustellen.

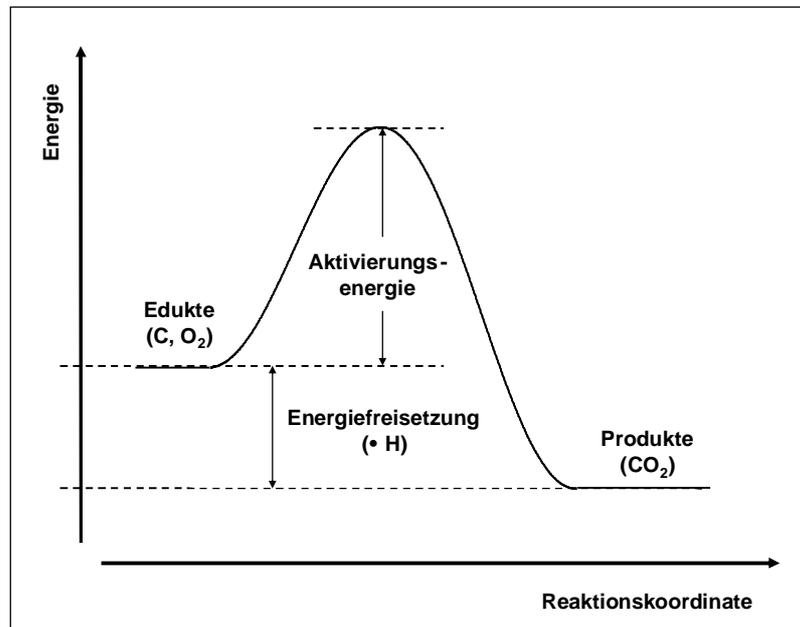


Bild 1: Reaktionsschema der Verbrennung (nach Moore und Hummel /6/)

Bei unvollständiger Verbrennung, d. h. nicht jeder Kohlenstoff oxidiert zu Kohlendioxid, verbleibt das Zwischenprodukt Kohlenmonoxid. Die Effektivität der Verbrennung wird somit durch die CO-Konzentration im Abgas charakterisiert. Im Idealfall wird zur vollständigen Umsetzung des Kohlenstoffs eine exakt definierte Sauerstoffmenge (Mindestsauerstoffmenge) benötigt, so dass jeder Kohlenstoff mit Sauerstoff reagiert.

Dies lässt sich bei der Kremation aufgrund stark schwankender Verbrennungsreaktionen nicht erreichen, so dass die Verbrennung bei Sauerstoffüberschuss erfolgen muss. Mit steigendem Sauerstoffgehalt sinkt allerdings sowohl die Verbrennungstemperatur als auch die Aktivierungsenergie. Damit wird die zweite Teilreaktion, von CO zu CO₂, behindert in deren Folge „kaltes“ CO entstehen kann. Um dies zu kompensieren muss der Prozess über einen zusätzlichen Brenneinsatz gestützt werden. Andererseits können bei der Kremation infolge stark variierender Prozessabläufe kurzfristige und lokal begrenzte Sauerstoffmangelbedingungen auftreten, die trotz hoher Verbrennungstemperaturen nur eine unvollständige (Teil-)Verbrennung zulassen. Dieser Effekt lässt sich auch als die Entstehung von „heißem“ CO beschreiben (Bild 2).

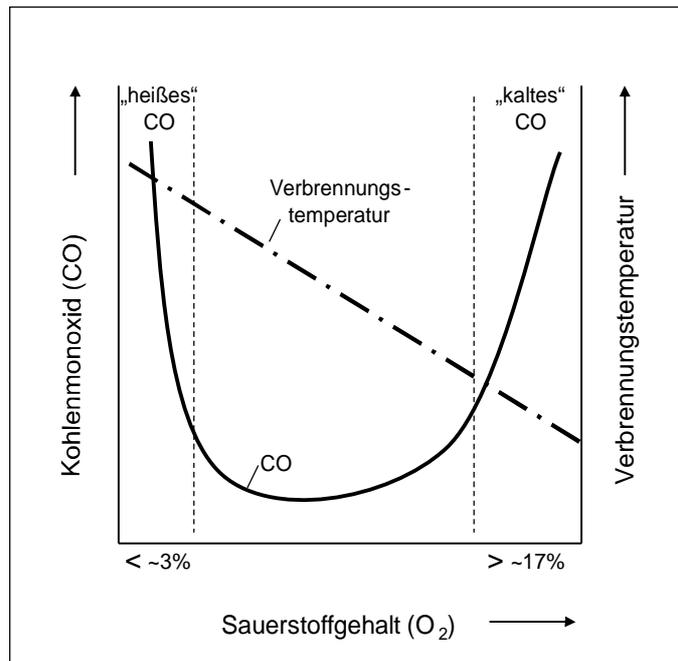


Bild 2: Qualitative verbrennungstechnische Zusammenhänge (nach /5/)

Von Bachmann et al /7/ wurde ein reaktionskinetisches Modell für die „Nachbrennkammer“ vorgestellt, das insgesamt 31 reversible Reaktionen unter Beteiligung der reaktiven chemischen Spezies – CO, CO₂, O₂, H₂O, H₂O₂, H₂, H, O, OH, HO₂ und HCO – sowie der inerten Komponente Stickstoff (N₂) berücksichtigte. In ihren Modellbetrachtungen gehen die Autoren davon aus, dass der Umsatz (Oxydation) von CO zu CO₂ im Wesentlichen in der Nachbrennkammer stattfindet, wenngleich über die wirkliche Verteilung zwischen Haupt- und Nachbrennkammer keine Informationen vorliegen. Durch die Modellierung der Bruttoreaktion „CO zu CO₂“ konnte der in Bild 2 angegebene qualitative Zusammenhang verifiziert werden, wobei die durchgeführte Modellrechnung einen optimalen Arbeitsbereich des Sauerstoffgehalts von ca. 2 bis 12 % aufzeigte (Bild 3).

Zu Recht weisen die Autoren darauf hin, dass der Umsatz von CO zu CO₂ nicht nur von der Temperatur sondern auch von der Verweilzeit in der Nachbrennkammer abhängt. Die Modellrechnungen führten zu dem Ergebnis, dass bei einer Verweilzeit von 2 sec mindestens 780 °C erforderlich sind, um den CO-Grenzwert von 50 mg/Nm³ in jedem Betriebspunkt zu erreichen. Für geringere Verweilzeiten wird gefolgert, dass Temperaturreserven vorzusehen sind, weshalb aus Sicht der Autoren eine Mindesttemperatur von 850 °C angezeigt wäre.

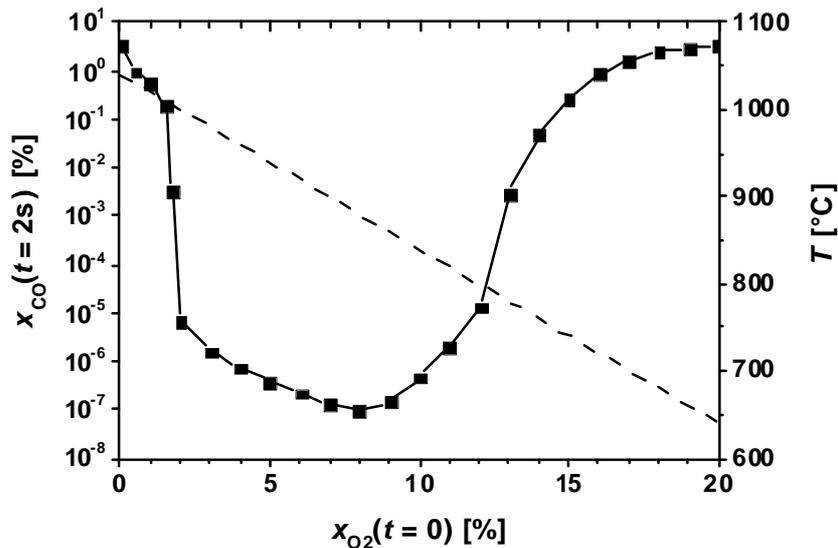


Bild 3: Modellrechnung zur Quantifizierung des CO-Umsatzes (aus /7/)

Die dem Modellansatz zugrunde gelegte vollständige Umsetzung von CO zu CO₂ setzt voraus, dass die Reaktionspartner miteinander reagieren können, was üblicherweise durch geeignete Turbulenzzonen sicherzustellen ist /8/. Um einen übermäßigen Flugpartikelaustrag aus der Hauptbrennkammer zu vermeiden, werden die turbulenzbildenden Maßnahmen zweckmäßigerweise in der Nachbrennkammer umgesetzt. Dies kann durch die geometrische Form ebenso geschehen, wie durch die Anordnung der Verbrennungsluftzuführung sowie der Brenner, als auch durch eine Kombination mehrerer Maßnahmen. Für den CO-Umsatz zu CO₂ sind die sogenannten 3 t's:

- temperature (Verbrennungstemperatur)
- time (Verweilzeit bei entsprechenden Temperaturen)
- turbulence (Durchmischung der Reaktionspartner)

von entscheidender Bedeutung. Es gilt nach wie vor der von Gumz postulierte Grundsatz der Verbrennung:

Gemischt = Verbrannt!

Mit dem in /7/ vorgestellten reaktionskinetischen Modell ist es gelungen, die reaktiven Abläufe zu modellieren und wichtige Zusammenhänge zwischen CO, O₂ und der Verbrennungstemperatur auch zu quantifizieren. Dennoch werden einige weitere Vorgänge, die für die Bewertung der CO-Emissionen in Krematorien entscheidend sind, von diesem Modell nicht erfasst. So weisen auch die Autoren auf folgende Punkte hin:

- Öffnen der Ofentüre zur Sargeinfahrt,
- Sargaufbruch nach 10 bis 20 Minuten,
- Transfer der Verbrennungsrückstände in Mineralisierungs- und/oder Aschenachkühlkammer (z. B. Drehen der Drehplatten)
- Beräumen des Herdbodens bei Flachbettofensystemen mit geöffneter Ofentüre.

Neben vorgenannten Einflussgrößen auf die CO-Emission bei der Kremation spielen der Anlagenzustand, die Platzierung der Messstellen (insbesondere Temperaturmessfühler und Sauerstoffbetriebsmesssonde) sowie deren Betriebszustand mitunter die entscheidende Rolle. Die Auswertungen der Ereignisprotokolle bei CO-Grenzwertüberschreitungen in bayerischen Krematorien haben gezeigt /4/, dass insbesondere Defekte in Verbindung mit der Sauerstoffregelung gravierende Auswirkungen auf die CO-Emission haben können, wie das nachfolgende Beispiel belegt (Bild 4). Die Bewertungsgrundlage 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 (Bild 4 – grün markiert). Dennoch können auch unter derartigen Bedingungen CO-Stundenmittelwerte mit Grenzwertüberschreitungen (hier: ca. 2,5 %) auftreten.

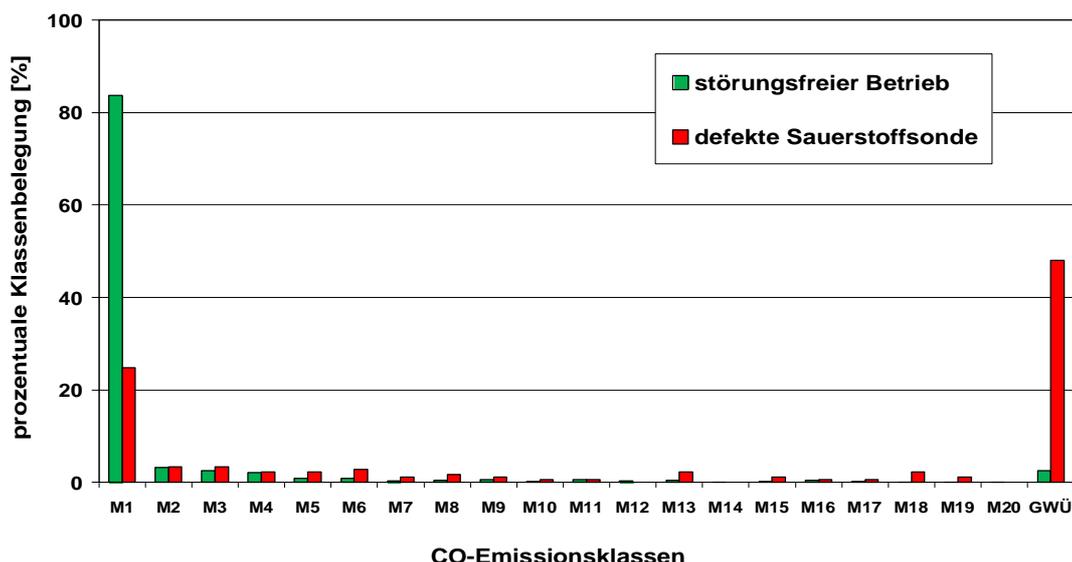


Bild 4: Einfluss einer betrieblichen Störung auf die CO-Emissionsklassenverteilung

Dagegen sind markante Verschiebungen der Klassenverteilung mit deutlichen Grenzwertüberschreitungen ein Indiz für vorliegende Anlagendefekte. Am Beispiel von Bild 4 (rot markiert) handelt es sich um einen aufgetretenen Ausfall der für die Prozesssteuerung notwendigen Sauerstoffmesssonde.

2.2. Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane (PCDD/F)

In der Literatur sind die Mechanismen der Bildung und Zerstörung von PCDD und PCDF ausführlich beschrieben (z. B. in /9, 10, 11/). Detaillierte Ausführungen mit besonderem Bezug zur Kremationstechnik findet man beispielhaft in /12, 13/. In der Summe kann man die Mechanismen als dualistisches Prinzip der Bildung und Zerstörung von PCDD und PCDF interpretieren (Bild 5). Demnach sind beim Kremationsprozess, wie bei anderen Verbrennungsprozessen auch, die Kondensations- und Radikalreaktionen, die maßgebenden PCDD/F-Bildungsmechanismen, die bevorzugt im Temperaturbereich unterhalb von 600 °C ablaufen. Andererseits werden im Nachverbrennungsraum eines Kremationsofens PCDD und PCDF sehr wirkungsvoll durch Zerfallsreaktionen zerstört. Bei Vorhandensein von Staubpartikel sind bei den Verbrennungsvorgängen in der Nachbrennkammer neben den Gasphasenreaktionen vor allem heterogene Zerstörungsreaktionen in Betracht zu ziehen.

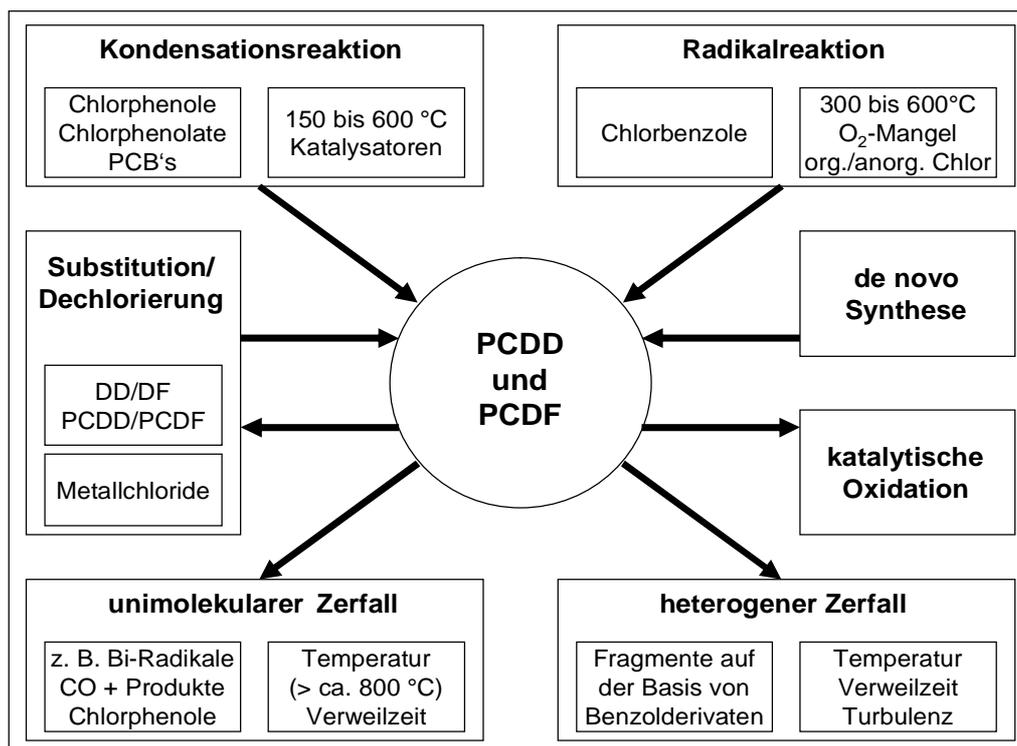


Bild 5: Dualistisches Prinzip der Bildung und Zerstörung von PCDD/F (/13/)

Im Zuge umfangreicher Untersuchungen in anderen Verbrennungsprozessen, vornehmlich in Abfallverbrennungsanlagen, wurden folgende wesentliche Einflussgrößen identifiziert:

- **Temperatur** (hier: Nachverbrennungstemperatur),
- **Verweilzeit** der Gase bei entsprechenden Temperaturen zur Sicherstellung der Zerfallsreaktionen,
- **Turbulente Strömungsbedingungen** in der Nachverbrennung, die insbesondere bei heterogenen Reaktionen von entscheidender Bedeutung sind.

Diese Bedingungen für einen wirkungsvollen Abbau von PCDD/F korrespondieren mit den Anforderungen, die an eine möglichst vollständige Verbrennung, charakterisiert durch niedrige CO- und Gesamtkohlenstoffkonzentrationen, gestellt werden. Vor diesem Hintergrund wäre es also naheliegend, die kontinuierlich gemessene CO-Konzentration als Leitgröße für ein günstiges PCDD/F-Potenzial nach der Nachverbrennung zu wählen. Die wenigen vorliegenden PCDD/F-Konzentrationen im Rohgas von Krematorien zeigen bezogen auf die jeweiligen Messintervalle (CO: Stundenmittelwerte / PCDD/F: Beprobung 6 Stunden) keine Korrelation zwischen Kohlenmonoxid und PCDD/F (Tabelle 2).

Krematorium Düsseldorf (Linie 1 und 2)		Linie 1	Linie 2
Etagenofen: Inbetriebnahme 1980 Messungen: 1992			
Nachverbrennungstemperatur	[°C]	800	800
Kohlenmonoxid	[mg/Nm ³]	16,4	46,1
Gesamtkohlenstoff	[mg/Nm ³]	< 2	2,7
PCDD/F	[ngTE/Nm ³]	2,501	0,755
Krematorium Düsseldorf (Linie 3)			
Etagenofen: Inbetriebnahme 2000 Messungen: 2008/9			
Nachverbrennungstemperatur	[°C]	850	650
Kohlenmonoxid	[mg/Nm ³]	6,4	16,9
Gesamtkohlenstoff	[mg/Nm ³]	3,0	0,8
PCDD/F	[ngTE/Nm ³]	2,1601	0,4683
	[ngTE/Nm ³]	1,6429	0,9124
	[ngTE/Nm ³]	1,8188	0,9064

Tabelle 2: Rohgasmessungen im Krematorium Düsseldorf /1/

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Untersuchungen an einer Kleinverbrennungsanlage für Biomasse /14/, wonach bei CO-Konzentrationen unterhalb von etwa 600 mg/Nm³ keine Korrelation zwischen CO und PCDD/F festgestellt werden konnte. Andererseits sind hohe CO-Konzentrationen ein Indikator für eine unvollständige Verbrennung, weshalb extreme CO-Gehalte (Peaks) zu erhöhten PCDD/F-Konzentrationen führen können /15, 16/. Obwohl von Eguchi et al /12/ der Kremationsprozess in 20 Minuten-Intervallen beprobt wurde, konnte auch dort kein Zusammenhang zwischen CO und PCDD/F in den unterschiedlichen Prozessphasen festgestellt werden. Sie führten die Einflüsse auf die PCDD/F-Konzentrationen vielmehr auf die zum damaligen Zeitpunkt (1996) in Japan weitverbreitete Oberflächenbehandlung der Särge sowie Sargbeigaben aus Plastik zurück.

Insofern sind geeignete Verbrennungsbedingungen, wie sie für CO und Gesamtkohlenstoff gelten, eine Voraussetzung für ein niedriges PCDD/F-Potenzial, wenngleich „CO als Leitgröße“ für das zu erwartende PCDD/F-Emissionspotenzial nicht geeignet ist.

Für die in dieser Arbeit zu untersuchenden Fragestellungen sind nicht nur die Vorgänge in der Nachverbrennung sondern auch die Einflussmöglichkeiten über die Abgasreinigung von Belang. Im ersten Verfahrensschritt kommt der „schnellen“ Abgaskühlung eine zentrale Rolle bei der Rückbildung von PCDD/F nach „de-novo Synthese“ zu. Für Krematorien hat sich als Richtgröße für die Abgasabkühlung eine Aufenthaltszeit in den Wärmeübertragungssystemen von 0,5 sec und weniger als zweckmäßig erwiesen. Dies setzt eine kompakte Bauweise des Wärmetauschers voraus.

Zur weiteren Abscheidung bzw. Zerstörung der nach der Abgaskühlung noch vorhandenen PCDD/F haben sich in Krematorien die in Tabelle 3 zusammengestellten Abgasreinigungsverfahren etabliert. Die in den Jahren 2008 bis 2009 durchgeführten Untersuchungen im Krematorium Düsseldorf erfolgten an einer Anlage, die mit einem katalytisch arbeitenden Gewebefilter – System Gore – ausgerüstet ist. Die Wirkungsweise dieser Filtersysteme auf die Zerlegung von PCDD/F in seine Bestandteile – H₂O, CO₂ und HCl – ist in /1, 4/ ausführlich beschrieben.

Bei den adsorptiv arbeitenden Verfahren kommt in Deutschland überwiegend das Flugstromprinzip zur Anwendung. Hierbei werden Additive, meist ein Kalk-/Aktivkohlegemisch, vor dem Gewebefilter in den Abgasstrom zugegeben. Diese Additive bilden zusammen mit den im Gasstrom mitgeführten Stäuben auf der Gewebefilterschlauchoberfläche eine Partikelschicht. Beim Gasdurchtritt durch diese Partikelschicht werden Schadgase an die Additive adsorbiert und können zusammen mit den Stäuben als „Filterstaub“ ausgetragen werden.

Bewertungskriterium	Schadgasadsorption Flugstromverfahren	Schadgasadsorption Festbettadsorber	katalytische Filtration
Verfahrensprinzip	Schadgasadsorption und Abscheidung im Gewebefilter	Gewebefilter mit Festbett adsorber zur Schadgas- adsorption	Gewebefilter mit eingewobenen Katalysatoren
Umweltrelevanz ¹⁾ - Einfluss auf CO / C _{ges} - Staubabscheidung - Dioxine / Furane - Quecksilber ²⁾	kein hoch hohe Adsorption / Anlagerung in Filterstäube hohe Adsorption / Anlagerung in Filterstäube	leichter CO-Anstieg in Schüttung hoch hohe Adsorption / Anlagerung in Schüttung hohe Adsorption / Anlagerung in Schüttung	kein hoch katalytische Zerstörung sehr geringe Adsorption / Anlagerung an Staubpartikel
Betriebsaufwand - Wartung / Instandhaltung - Additivmanagement - Reststoffentsorgung	mittel (Additivdosierung) hoch hoch	gering (Temperaturüberwachung der Schüttung) mittel hoch	sehr gering entfällt mittel

Hinweise:

¹⁾ Basis: Emissionsgrenzwerte gemäß 27. BImSchV

²⁾ kein Emissionsgrenzwert in der 27. BImSchV

Tabelle 3: Abgasreinigungsverfahren nach dem Stand der Technik

Zur Verbesserung der Schadgasadsorption werden häufig Mischungsreaktoren, z. B. Multizyklon- oder Kugelrotorreaktoren, vor den Gewebefiltern eingesetzt /4/. Die in Krematorien vielfach bei der Anwendung des Flugstromverfahrens eingesetzten Sorbentien bestehen aus Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) und Aktivkohle oder Herdofenkoks (HOK), deren Mischungsverhältnis meist entweder 90 zu 10 oder 70 zu 30 beträgt. Die Korngrößen dieser Additive liegen in der Größenordnung von etwa 0,2 mm und sind gekennzeichnet von einer hohen spezifischen Oberfläche zur Schadgasadsorption von ca. 300 m²/g (BET: spez. innere Oberfläche).

Alternativ zum Flugstromverfahren kann die Schadgasadsorption in einem Festbettadsorber erfolgen, der verfahrenstechnisch dem Gewebefilter nachgeschaltet wird. Diese Schaltungsvariante ist erforderlich, da bei einer Festbettschüttung grobkörniges Adsorbermaterial (Korngröße etwa 2,5 bis 8 mm) eingesetzt wird. So lässt sich verhindern, dass im Gasstrom mitgeführte Feinstaubpartikel die Festbettschüttung zusetzen. Bei den eingesetzten Sorbentien kommen ebenfalls Kalk-/Kohlemischungen, vergleichbar zum Flugstromverfahren zum Einsatz. Da im bestimmungsgemäßen Betrieb immer eine ausreichende Adsorbensmenge zur Schadstoffaufnahme zur Verfügung steht, eignet sich der Festbettadsorber vor allem zur Adsorption von Schadstoffspitzen, wie sie insbesondere bei Quecksilber auftreten können. Nachteilig sind die besonderen sicherheitstechnischen Vorkehrungen, die im Umgang mit Festbettadsorbentien zu berücksichtigen sind (vgl. hierzu /17/).

Mit allen vorgenannten Verfahren lassen sich im bestimmungsgemäßen Betrieb die aktuellen Vorgaben der 27. BImSchV gesichert einhalten.

2.3. Quecksilber und seine Verbindungen

Infolge möglicher Amalgambelastung der Verstorbenen wurden Krematorien als eine signifikante Quecksilberemissionsquelle identifiziert. Daher wurden auch Krematorien in das OSPAR-Berichtswesen des Umweltbundesamtes (UBA) aufgenommen /18/. Diesen Recherchen zufolge wurde in 2005 durch die Krematorien in Deutschland rund 36 kg Quecksilber emittiert. Im Zeitraum bis 2010 wurde eine Zunahme um 8 % auf 39 kg festgestellt, die ursächlich mit der gestiegenen Anzahl der Kremationen zusammenhängt. Da derzeit jedoch keine gesetzliche Verpflichtung zur Quecksilberemissionsmessung besteht und insbesondere kaum Messwerte im Rohgas vorliegen, ist die Datenbasis über den zu erwartenden Eintrag unzureichend und nur bedingt für eine zuverlässige Auslegung von Abgasreinigungstechniken tauglich.

Wie in /4/ ausführlich beschrieben, wird der Quecksilbereintrag nahezu ausschließlich über amalgambasierte Dentalfüllungen bestimmt. Andere Pfade über Anreicherungen im Blut sind für die Kremation vernachlässigbar. Einer älteren Studie der Universität Zürich zufolge /19/ betrug die durchschnittliche Amalgamenge pro Verstorbenem 7,939 g (Minimum: 1,195 g; Maximum: 14,979 g). Berücksichtigt man ferner, dass die Amalgamprodukte üblicherweise einen Quecksilberanteil von nahezu 50 % aufweisen, so muss von einem durchschnittlichen Quecksilbereintrag von 4 g pro Kremation ausgegangen werden; in Einzelfällen können nach dieser Studie Werte bis zu 8 g auftreten. Selbst wenn man unterstellt, dass der Einsatz amalgambasierter Zahnfüllungen langfristig zurückgehen wird, so muss auch in der Zukunft mit extremen Quecksilberspitzen gerechnet werden.

Aufgrund der niedrigen Siedepunkte von Quecksilber und seinen relevanten Verbindungen (Hg: 357 °C; HgCl₂: 302°C; HgO: 400 °C und Hg₂Cl₂: 383 °C) kann bei der Kremation davon ausgegangen werden, dass nahezu die gesamte eingetragene Quecksilberfracht über den Gaspfad aus dem Ofen mitgeführt wird (Bild 6).

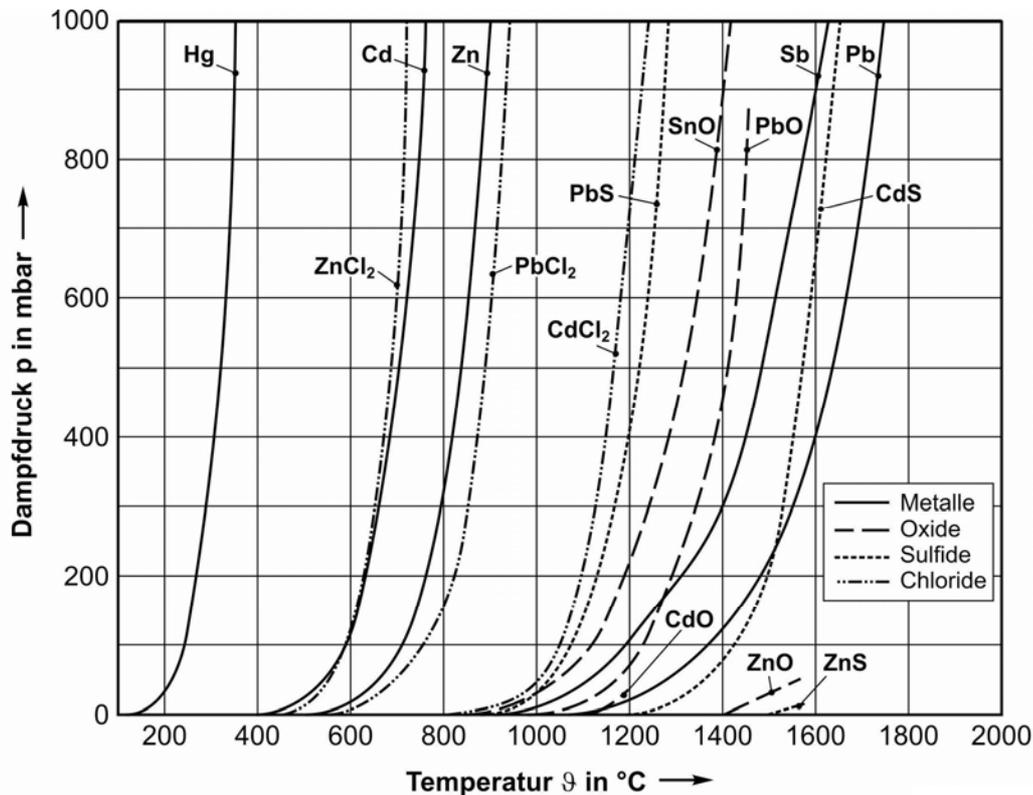


Bild 6: Dampfdruckkurven einiger Metalle, Oxide, Chloride und Sulfide (entnommen aus /20/)

Um die ubiquitäre Ausbreitung von Quecksilber über den Abgaspfad zu minimieren sind Abgasreinigungsmaßnahmen, insbesondere Sorptionsverfahren, erforderlich. Nach /21/ wird die Abscheideleistung bei der Schadgasadsorption von der Oxidationsstufe des Quecksilbers in der Gasphase, d. h. elementares Quecksilber Hg(0) oder zweiwertiges Quecksilber Hg(II), bestimmt. Die Oxidationsstufe hängt ihrerseits von den Gaskonzentrationen an Halogeniden – im Abgas von Krematorien nahezu ausschließlich HCl – und Schwefeloxiden ab. Je größer das Verhältnis SO_x/HCl ist, desto höher ist der Anteil von Hg(0), wohingegen große HCl/SO_x-Verhältniszahlen mehr Hg(II), z. B. als HgCl₂, erwarten lassen. Die derzeit üblicherweise verwendeten Kalk-Aktivkohlemischungen eignen sich in besonderem Maße für die Adsorption von PCDD/F und zweiwertigem Quecksilber. Zur Abscheidung (Chemisorption) von elementarem Quecksilber, bietet sich imprägnierte Kohle, z. B. mittels Schwefelsäure, an. Für die Dimensionierung und Optimierung der Schadgasadsorption und insbesondere für die Auswahl des einzusetzenden Additivs sind weiterführende Untersuchungen zu den SO_x- und HCl-Konzentrationen im Abgas erforderlich.

3. Beschreibung der untersuchten Krematorien

Die Untersuchungen in bayerischen Krematorien zeigten ein breites Spektrum unterschiedlicher Kremationstechniken, die dort zum Einsatz kommen /4/ (Tabelle 4). Ähnlich dürfte es sich bundesweit verhalten, auch wenn hierfür bis heute keine detaillierte Erhebung vorliegt.

Krematorium		Anlagenbeschreibung				Betriebsform
Standort	Linien	Ofentechnik		Rauchgasreinigung		Standort
		System	Lieferant	System	Lieferant	
Aschaffenburg	1	ETO (Öl)	Ruppmann	FSA + GF	Ruppmann	kommunal
Augsburg	1	ETO (Gas)	Ruppmann	FSA + GF	HS	kommunal
Bayreuth	2	ELO	Kremo Tech	FSA + GF	DISA	kommunal
Coburg	1	ETO (Gas)	Ruppmann	Kat-GF	Ruppmann	kommunal
Fürstenzell	1	FBO (Gas)	H.R. Heinicke	FSA + GF	H.R. Heinicke	privat
Hof	1	ETO (Gas)	IFZW	FSA + GF	IFZW	kommunal
Hohenburg	1	ETO (Gas)	IFZW	FSA + GF	IFZW	privat
Kempten	4	FBO (Gas)	Metalltechnik	GF + Kat + FBA	Metalltechnik	privat
Kissing	1	FBO (Gas)	Metalltechnik	GF + Kat + FBA	Metalltechnik	privat
Lindau	1	ETO (Gas)	Ruppmann	Kat-GF	Ruppmann	kommunal
Memmingen	1	FBO (Gas)	Facultatieve	k. A.	Facultatieve	privat
Mainburg	1	ETO (Gas)	IFZW	FSA + GF	IFZW	privat
München	5	FBO (Gas)	H.R. Heinicke	FSA + GF	H.R. Heinicke	kommunal
Nürnberg	3	ETO (Gas)	IFZW	FSA + GF	KA Hamburg	kommunal
Regensburg	2	ETO (Gas)	Ruppmann	FSA + GF	HS Anlagenbau	kommunal
Schweinfurt	2	ETO (Gas)	Ruppmann	Kat-GF	Ruppmann	kommunal
Selb	1	ETO (Gas)	IFZW	FSA + GF	IFZW	kommunal
Traunstein	2	FBO (Gas)	H.R. Heinicke	FSA + GF	H.R. Heinicke	privat
Vilshofen	2	FBO (Gas)	Metalltechnik	GF + Kat + FBA	Metalltechnik	privat

Hinweise: ETO: Etagenofen
 FBO: Flachbettofen
 ELO: Elektroofen
 FSA: Flugstromadsorption
 GF: Gewebefilter
 Kat-GF: katalytisches Gewebefilter
 Kat: Katalysator
 FBA: Festbettadsorption

Tabelle 4: Kremationsanlagen in Bayern (Stand 2011)

3.1. Auswahlverfahren

Um ein möglichst repräsentatives Spektrum der in Deutschland installierten Krematorien zu betrachten, gilt es sowohl kommunal betriebene als auch privatwirtschaftlich organisierte Krematorien mit unterschiedlichen technischen Ausführungen einzubeziehen. Da die Absenkung der Nachverbrennungstemperatur auf 750°C respektive 650°C, wenn überhaupt, vornehmlich einen Einfluss auf die verbrennungsabhängigen Schadstoffe Kohlenmonoxid und Ge-

samtkohlenstoff erwarten lassen, kommt der Auswahl des Ofensystems eine zentrale Bedeutung bei. Des Weiteren ist ein Bezug zu den früheren Untersuchungen im Krematorium Düsseldorf, die mit Etagenofen und katalytischer Filtration zur Abgasreinigung ausgerüstet ist /1/, herzustellen.

Vor diesem Hintergrund wurden folgende Krematorien in die Betrachtung einbezogen:

- **Krematorium Berlin-Baumschulenweg:** kommunal betriebenes Krematorium mit 3 Linien; Technik: Etagenofen mit adsorptiver Abgasreinigung nach dem Kugelrotorverfahren.
- **Krematorium München:** kommunal betriebenes Krematorium mit 5 Linien; Technik: schwerer Flachbettoven (neu ausgemauert) mit adsorptiver Abgasreinigung nach dem Kugelrotorverfahren.
- **Krematorium Pforzheim:** privat-wirtschaftlich betriebenes Krematorium mit einer Linie; Technik: mittelschwerer Flachbettoven (Neukonstruktion, ausgelegt für sehr hohe Kremationszahlen) und Verdampfungskühler, mit adsorptiver Abgasreinigung unter Einsatz eines Festbettfilters.

Bei der praktischen Umsetzung des Untersuchungsprogramms zeigten sich in den Gesprächen mit Behördenvertretern zum Teil unüberwindbare Hindernisse, weshalb beispielsweise ein Krematorium, das in idealer Weise den technischen und betrieblichen Anforderungen entsprochen hätte, nicht gewählt werden konnte, da das genehmigende Landratsamt hierfür eine umfassende öffentliche Information über mögliche Risiken gefordert hat.

3.2. Krematorium Berlin - Baumschulenweg

Das im Ostteil von Berlin im Bezirk Treptow-Köpenick errichtete Krematorium Berlin-Baumschulenweg ist neben dem Krematorium Berlin-Ruhleben eines der beiden Krematorien in der Bundeshauptstadt. Beide werden vom „Landesbetrieb Krematorium Berlin“ in kommunaler Regie geführt /22/. Das Krematorium Baumschulenweg, dessen Gebäude von den international renommierten Architekten Axel Schultes und Charlotte Frank geplant wurde, besticht durch seine außergewöhnliche Architektur und wurde in den Jahren 1996 bis 1999 errichtet (Bild 7).



Bild 7: Krematorium Baumschulenweg – Außenansicht und Feierhalle

Das Krematorium Berlin-Baumschulenweg ist in der derzeitigen Ausbaustufe mit drei Kremationslinien auf jährlich 10.000 Kremationen (3-Schicht-Betrieb an 5 Tagen/Woche) ausgelegt und kann bei Bedarf um drei weitere Linien erweitert werden. Jede der installierten Kremationslinien wird autark betrieben und besteht aus den Komponenten:

- **Etagenofen** mit Haupt-, Nach- und Mineralisierungskammer, beheizt über Erdgasbrenner mit einer Gesamtverbrennungsleistung von max. 780 kW,
- **Abgaskühler**, bestückt mit Luftvorwärmer (LUVVO)- und Economiser (ECO)-Rohrbündelwärmetauscher,
- **Schadgasadsorption** zur Abgasreinigung unter Einsatz des Kugelrotor-umlaufverfahrens /4/,
- **Speicherprogrammierbare Steuerung** (SPS) mit Prozessvisualisierung.

Daneben ist das Krematorium Berlin-Baumschulenweg mit einer vollautomatischen Sargmanagement und -transporteinrichtung ausgestattet. Die Särge werden bei Anlieferung mit einem Strichcode versehen, vollautomatisch in ein Kühllager (ausgelegt auf 628 Särge) transportiert und bis zu Kremation eingelagert. In Bild 8 sind einige Aspekte der installierten Verfahrenstechnik zusammengestellt.

Das Betriebspersonal ist entsprechend den Empfehlungen der VDI 3891 für den Kremationsbetrieb qualifiziert; derzeit sind drei Mitarbeiter zum Kremationstechniker ausgebildet.



Bild 8: Ofenschema (Fa. IFZW GmbH) und Technische Einrichtung im Krematorium Berlin-Baumschulenweg (Sargeinfahrt, Entaschung, Additivdosierung)

Im Gespräch mit dem Betreiber wurde für die geplanten Untersuchungen zunächst die Kremationslinie 2 vorgesehen, an der seit der Neuauskleidung im Jahr 2008 bis Ende November 2014 rund 17.000 Kremationen stattgefunden haben. Im Zuge der Datenerhebung in 2014 zeigten sich jedoch erhebliche Defekte an dieser Kremationslinie, die eine grundlegende Sanierung des Ofenbereiches erforderlich machte. Da diese Reparatur nicht kurzfristig durchgeführt werden konnte, wurde entschieden, die Untersuchungen zur Temperaturabsenkung an der Kremationslinie 3 durchzuführen (siehe hierzu 4.1).

3.3. Krematorium München

Die Tradition der Kremation in München geht auf das Jahr 1912 zurück, weshalb das Krematorium München zu den ältesten Krematorien in Bayern zählt. An das am Ostfriedhof in München installierte Krematorium ist eine denkmalgeschützte Trauerhalle aus dem Jahr 1929 angeschlossen, die durch den damaligen Stadtbaurat Hans Grässel erbaut wurde /23/. Das im Jahre 1980 neu errichtete technische Gebäude ist für insgesamt 5 Kremationslinien einschließlich Sargkühlräume ausgelegt (Bild 9). Die Modellierung des umgebenden Geländes erfolgte dergestalt, dass die Sargeinfahrebene ebenerdig erschlossen werden kann. Räumlich nach unten abgesetzt, befindet sich die Ascheentnahmeebene, in der u. a. die Ascheaufbereitung und die Schaltschränke für die Prozesssteuerung untergebracht sind.



Bild 9: Krematorium am Ostfriedhof in München (Außenansicht mit Abgasreinigung im Dachraum)

Das Krematorium München verfügt über 5 nahezu baugleiche Kremationslinien, die sich jeweils aus folgenden Kernkomponenten zusammensetzen:

- **Flachbettofen in schwerer Ausführung**, bestehend aus Haupt-, Nach- und Mineralisierungsbrennkammer, jeweils über gasbefeuerte Industriebrenner (installierte gesamte Brennerleistung: 1130 kW) beheizt,
- **Abgaskühler**, bestückt mit ECO-Rohrbündelwärmetauscher (Wärmeleistung: 600 kW), wobei die freiwerdende Energie aller 5 Kremationslinien zur Gebäudebeheizung (Heizleistung 80 kW) sowie über eine 80 m lange Fernleitung zur Beheizung des Verwaltungsgebäudes (Heizleistung 80 kW) genutzt wird,

- **Abgasreinigung nach dem Trockensorptionsverfahren**, ebenfalls nach dem Kugelrotorumlaufverfahren konzipiert (vgl. /4/).

Jede Kremationslinie wird über eine speicherprogrammierbare Steuerung vollautomatisch gesteuert und visualisiert. Das Führungspersonal des Betreibers ist befugt und in der Lage, manuelle Eingriffe und Anpassungen in der Prozessführung, insbesondere bei der Verbrennungsluftverteilung, vorzunehmen.

Für die Untersuchungen wurde die Kremationslinie 5 gewählt (Bild 10), die im Jahr 2013 neu mit Feuerfestmaterial ausgekleidet wurde.



Bild 10: Kremationsofen – Linie 5

Bei der Erstinstallation wurden die Kremationslinien zunächst jeweils mit einem Zyklon zur Grobpartikelabscheidung ausgerüstet. Mit der Einführung der 27. BImSchV wurden 1995/97 im Dachraum oberhalb der Ofenanlagen die erforderlichen technischen Nachrüstungen zur Abgasreinigung untergebracht. Damit stellten sich sehr beengte Platzverhältnisse ein, die die betriebliche Betreuung der Kremationsanlagen erschweren.

Der Krematoriumsbetrieb ist dem Bereich „Betrieb und Unterhalt Friedhöfe“ zugeordnet und erfolgt in kommunaler Verantwortung (Organisationsschema siehe /4/).

Ein qualifizierter Anlagenbetrieb wird durch geschultes Personal sichergestellt, wobei aktuell ein Mitarbeiter zum geprüften Kremationstechniker ausgebildet ist.

3.4. Krematorium Pforzheim

In dem ebenfalls denkmalgeschützten Gebäude aus dem Jahr 1914 ist eine Kremationslinie untergebracht, die von der Incinea GmbH betrieben wird. Hierbei handelt es um eine privatwirtschaftlich organisierte Gesellschaft, die im Jahr 2004 aus dem Grünflächenamt der Stadt Pforzheim hervorging /24/.

Im Kern baut die von der Firma Metall-Technik GmbH installierte Kremationsanlage auf einem Flachbettofen - mittelschwerer Bauart - auf. Der Mehrkammerofen, bestehend aus je einer Hauptbrenn- und Rauchgasnachbrennkammer sowie einer Aschemineralisierungskammer ist für eine Aufstellung auf einem durchgehenden Fundament mit der automatischen Sargeinfahrmaschine, also ohne Erfordernis eines Untergeschosses, konzipiert (Bild 11). Die Beheizung der Ofenanlage erfolgt mittels drei erdgasbetriebener Industriebrenner. Der eigentliche Kremationsvorgang wird im Wesentlichen durch die Verbrennungsluftzuführung bestimmt. Die Kremationszeit wird vom Hersteller mit ca. 60 Minuten angegeben; die Praxis zeigt, dass im Dreischichtbetrieb die Kremationszeit auf bis etwa 40 Minuten reduziert wird, bevor die Asche manuell mit einer Räumstange aus der Hauptbrennkammer abgezogen wird. Zur Vermeidung eines unerwünschten Rauchgasaustritts während des Einfahrtvorgangs ist oberhalb des Ofenschiebers eine Schwadenabsaugung angebracht.



Bild 11: Kremationsofen Im Krematorium Pforzheim

Das Abgas des Ofens wird über den Abgaskanal zunächst über einen Abgas-Luft-Wärmetauscher einer ersten schnellen Abgaskühlung auf eine Tempera-

tur von ca. 550 °C unterzogen. In einem weiteren Wärmetauscher wird das Abgas auf etwa 280 °C abgekühlt. Die dabei freiwerdende Wärme kann bei Bedarf zur Heizungs- und Brauchwassererwärmung für das Gebäude genutzt werden. Als dritte Abgaskühlstufe kommt ein Verdampfungskühler (Quench) zur Anwendung. Hierbei wird die Verdampfungsenthalpie des eingedüsten Wassers zur Abgaskühlung auf eine Temperatur von ca. 170 °C genutzt.

Das auf diese Weise thermisch konditionierte Abgas wird der Abgasreinigung zugeführt, die nach dem von Metall-Technik GmbH entwickelten „3-clean-System“ erfolgt (Bild 12). Zunächst werden hierbei in einem Gewebefilter Feinstaubpartikel abgeschieden. Die pneumatische Filterabreinigung erfolgt automatisch mittels Druckluft. In einem weiteren Abgas-Wasser-Wärmetauscher wird das Abgas auf eine Betriebstemperatur von ca. 130 °C gekühlt, bevor es in einen Festbettadsorber gelangt. In dem mit Aktivkohle-Pellets gefüllten Festbett werden gasförmige und an Feinstpartikel gebundene Schadstoffe, wie PCDD/F und Schwermetalle, abgeschieden.

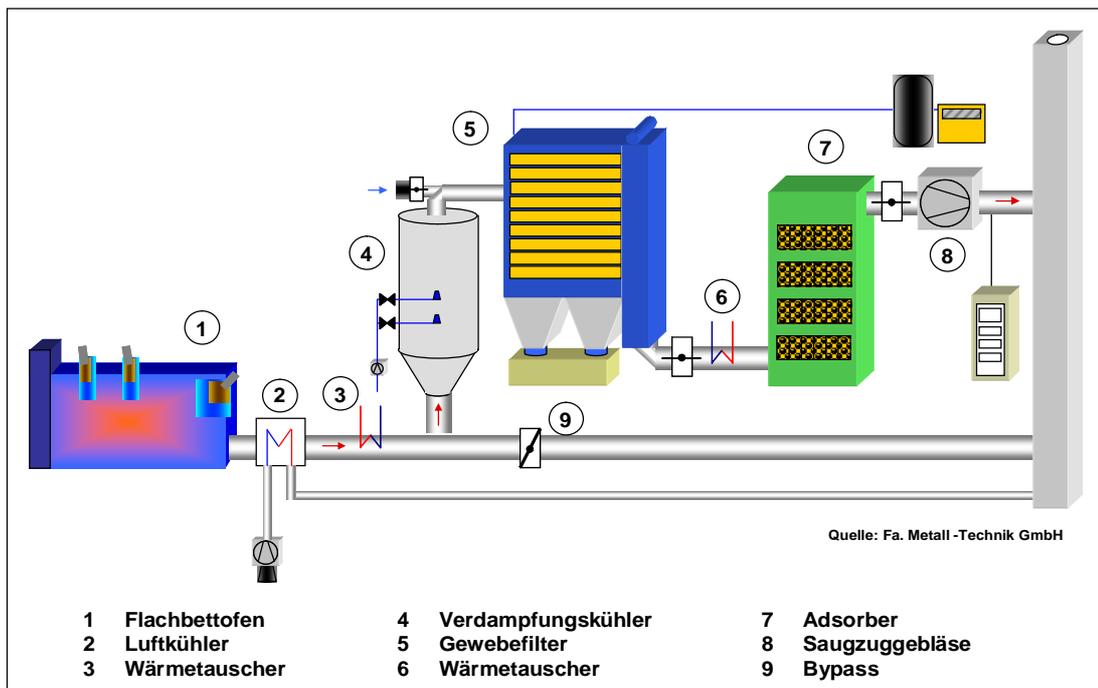


Bild 12: Verfahrenstechnischer Aufbau der Kremationsanlage Pforzheim

Über die Drehzahlregelung des Saugzuggebläses wird der Kremationsofen kontinuierlich im Unterdruck gehalten. Gemäß den Anforderungen der VDI-Richtlinie 3891 ist die Anlage sicherheitstechnisch mit einem Bypass ausgestattet, der im Fall einer Betriebsstörung automatisch öffnet und so eine gesicherte Ableitung der Abgase aus dem Ofen gewährleistet. Dieser Bypass wird bei Anlagenstillstand (z. B. nachts oder an Wochenenden) zur geregelten Un-

terdruckeinstellung des Kremationsofens genutzt, so dass einer Abkühlung des Kremationsofens entgegengewirkt wird.

Die Regelung des Kremationsvorgangs erfolgt über ein Prozessleitsystem mit zeitlicher Ablaufsteuerung unter Einbeziehung von Temperatur- und Sauerstoffmessung im Abgas sowie sonstiger Stellgrößen. Vor dem Kamineintritt erfolgt die kontinuierliche Emissionsmessung.

Das Krematorium in Pforzheim wird durch qualifiziertes Personal betrieben, von denen vier Mitarbeiter eine ergänzende Ausbildung zum Kremationstechniker vorweisen können.

4. Durchführung der Untersuchungen

Obwohl den Betreibern der Krematorien in Berlin, München und Pforzheim grundsätzliche Zustimmung zur Durchführung der Untersuchungen gegeben war, ergaben sich bei der praktischen Umsetzung Schwierigkeiten, die terminliche sowie organisatorische Änderungen nach sich zogen. Hierzu gehörten:

- **Genehmigungsrechtliche Zustimmung:** Da die Untersuchungen mit reduzierter Nachverbrennungstemperatur im Widerspruch zur 27. BImSchV steht, ist eine Zustimmung durch die jeweilige Aufsichtsbehörde erforderlich. Dies führte in einem Fall zu einer intensiven Diskussion mit der zuständigen Behörde, die die Zustimmung letztlich nur unter zusätzlichen Auflagen erteilte.
- **Betrieblichstechnische Besonderheiten:** Es ist erklärtes Ziel dieser Untersuchungen, dass die Ergebnisse unter „realen Bedingungen“ erarbeitet werden. Dies bedeutet, dass auf die ursächliche Arbeit in den Krematorien Rücksicht zu nehmen ist. Hierzu gehören auch die täglichen bzw. wöchentlichen Kremationszahlen, die im Einzelfall nur bedingt Schlussfolgerungen für die Frage der Energieeinsparung zulassen. Auch unterliegen die untersuchten Krematorien einem Verschleiß, die nicht vorhersehbare Unterbrechungen zu Reparaturzwecken nach sich ziehen bzw. noch werden.

Der Verlauf der Untersuchungen Datenerhebung war geprägt von den unterschiedlichen betrieblichen Rahmenbedingungen in den einzelnen Krematorien, die sich auf den jeweiligen Projektverlauf auswirkt.

4.1. Projektverlauf im Krematorium Berlin-Baumschulenweg

Im Gespräch mit dem Betreiber wurde für die geplanten Untersuchungen zunächst die Kremationslinie 2 vorgesehen, an der seit der Neuauskleidung im Jahr 2008 bis Ende November 2014 rund 17.000 Kremationen stattgefunden haben. Nach einer ersten Auswertung der CO-Aufzeichnungen in 2014 wurden an dieser Kremationslinie auch bei Nachverbrennungstemperaturen von mindestens 850 °C CO-Grenzwertüberschreitungen von über 5 % festgestellt (Bild 13). Dabei zeigte sich eine auffallende Erhöhung der Klassenbelegung M9 bis M13, die ein Indiz für eine unzureichende Verbrennungsluftzuteilung in den einzelnen Verbrennungszonen ist und vielfältige Ursachen haben kann, wie Falschlufteintrag über Mauerwerksdefekte, defekte O₂-Messungen oder fehlerhafte Parametrierung der Prozesssteuerung.

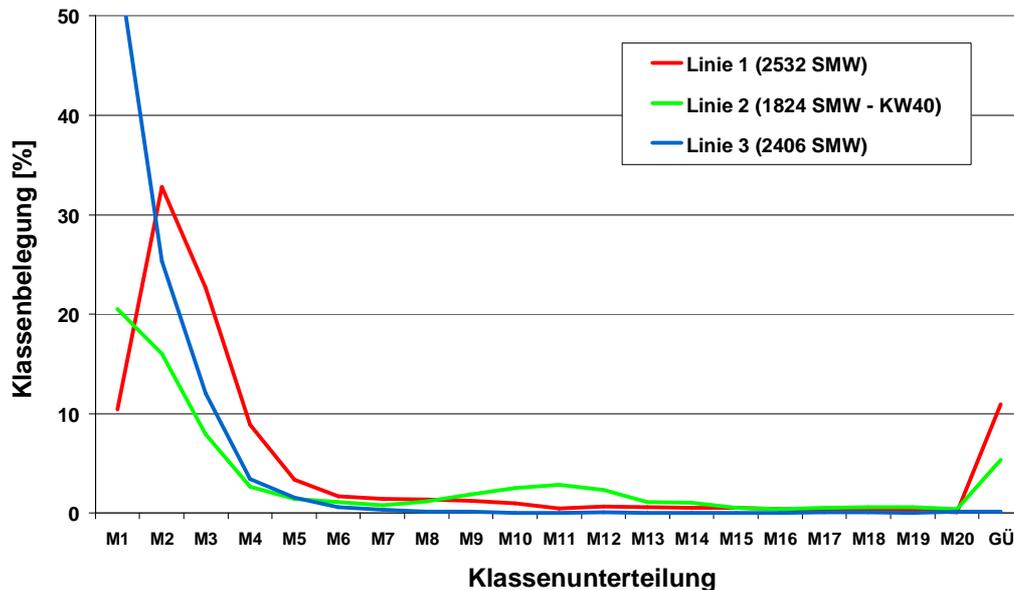


Bild 13: Vergleich der Kremationslinien 1 bis 3 bei NVT von 850 °C

Im Gegensatz hierzu zeigte sich für den Beobachtungszeitraum in 2014, dass die Linie 3 die CO-Grenzwerte unter Berücksichtigung der in der VDI 3891 formulierten Überschreitungstoleranz von 3 % bei einer Mindesttemperatur von 850 °C sehr gut einhält. Hinzu kommt, dass die unteren Emissionsklassen M1 bis M4, mit Stundenmittelwerten von weniger als 10 mg/Nm³, eine hohe Belegung aufweisen.

Da eine kurzfristige Sanierung der Kremationslinie 2 nicht möglich war, wurde entschieden die Untersuchungen zur Temperaturabsenkung im Krematorium Berlin-Baumschulenweg an der Linie 3 durchzuführen.

An Linie 3 wurde ab 05.02.2015 (KW 06/2015) die Temperatur auf 750 °C abgesenkt. Die ergänzenden Emissionsmessungen im Roh- und Reingas wurden in KW 18/15 durchgeführt.

Mit Beginn der KW 30/15 wurde die Nachverbrennungstemperatur bei Linie 3 auf 650 °C abgesenkt. Dies führte zu erheblichen betrieblichen Schwierigkeiten, weshalb auf eine Fortführung dieser Untersuchungsphase verzichtet wurde (vgl. hierzu Erläuterungen in Abschnitt 5.4).

4.2. Projektverlauf im Krematorium München

Die Untersuchungen im Krematorium München liefen weitgehend nach dem vorgesehenen Zeitplan ab. Nach einer Testphase mit 850 °C, die zur Daten-

abstimmung mit dem Betriebspersonal genutzt wurde, wurde ab KW 40/14 die Temperatur in der Nachbrennkammer auf 750 °C abgesenkt. In den KW 42/14 und 43/14 musste die Kremationsanlage zur Durchführung unvorhergesehener Reparaturarbeiten außer Betrieb genommen werden. In KW 44/14 erfolgte die Wiederinbetriebnahme. Der Betrieb mit einer Nachverbrennungstemperatur von mindestens 750 °C wurde bis in KW 04/15 fortgeführt und mit den Emissionsmessungen im Roh- und Reingas in dieser Woche abgeschlossen.

Ab Beginn der KW 05/15 wurde die Kremationsanlage mit einer Nachverbrennungstemperatur von mindestens 650 °C betrieben, wobei in KW 05/15 die Kremationsanlage zwecks Durchführung einer kleinen Reparatur für 4 Tage nicht genutzt werden konnte. Die kontinuierlichen Emissionsmessungen für diese Temperatureinstellung fanden in KW 21/15 statt.

Aufgrund der Betriebsbeobachtungen während der zweiten Messphase bei 650 °C wurde gemeinsam mit dem Betreiber der Anlage festgelegt, dass für die Dauer von KW 23/15 – KW 33/15 eine zusätzliche Zwischenphase mit einer Mindesttemperatur von 700 °C in der Nachbrennkammer durchgeführt wird. Auf zusätzliche Emissionsmessungen im Roh- und Reingas wurde verzichtet, da diese Phase lediglich dazu diente, ggf. einen optimalen Betriebspunkt zwischen den beiden Phasen 750 °C und 650 °C zu identifizieren. In KW 27/15 fand eine einwöchige Reparaturunterbrechung (Erneuerung des Herdbodens in der Hauptbrennkammer) statt.

Abschließend wurde im Zeitraum von KW 34/15 bis 43/15 die Datenerhebung für die Referenzphase mit 850 °C durchgeführt.

4.3. Projektverlauf im Krematorium Pforzheim

Die als Testphase ausgewiesenen Datenaufzeichnungen im Krematorium Pforzheim begannen in KW 34/14 bei der Betriebseinstellung von 850 °C in der Nachbrennkammer. In KW 45/14 und 46/14 wurde planmäßig der Abgaskanal der Kremationsanlage neu ausgemauert. Nach Wiederinbetriebnahme zeigte sich ein stark verändertes Betriebsverhalten, das zu überdurchschnittlich vielen Grenzwertüberschreitungen bei der Referenzeinstellung mit 850 °C führte (Bild 14).

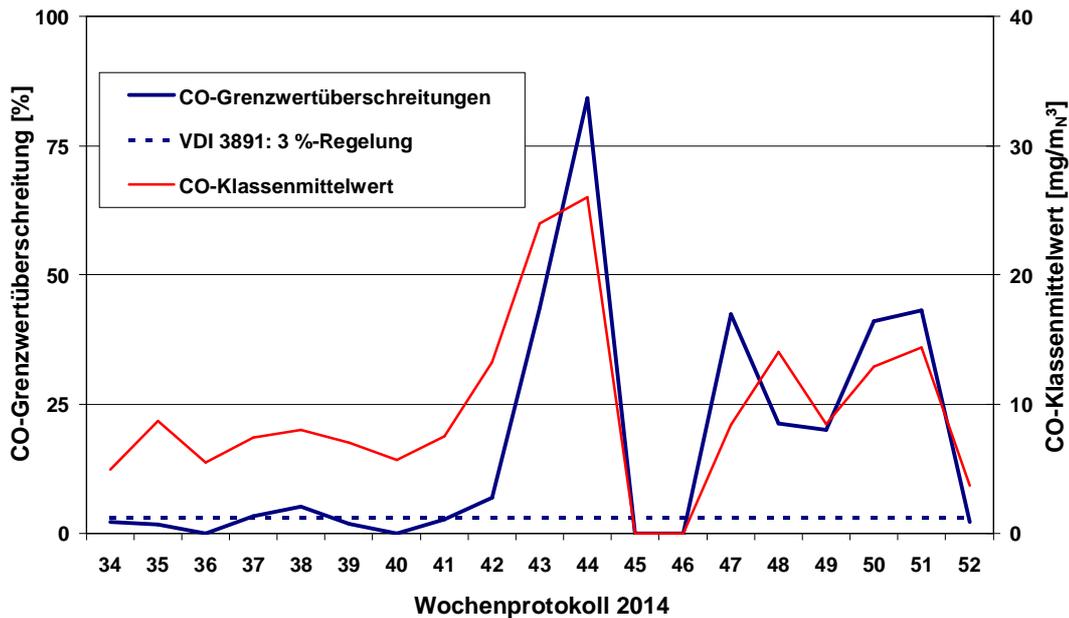


Bild 14: CO-Emission im Krematorium Pforzheim (Testphase 2014)

Nach einer Vielzahl von Prüfungen und veränderten Prozesseinstellungen wurde im Rahmen einer Begehung des Abgaskanals die Ursache (Platzierung und Defekt am Schutzrohr der Sauerstoffrohgasmessung – Bild 15) festgestellt und behoben.



Bild 15: Lamdasonde mit korrodiertem Schutzrohr (Quelle: Incinea GmbH)

Zusammenfassend ist somit festzuhalten, dass die festgestellten CO-Grenzwertüberschreitungen in 2014 (Nachverbrennungstemperatur mindestens 850°C) nahezu ausschließlich durch Defekte bei der Betriebssauerstoffmessung ausgelöst wurden. Bei einer funktionsfähigen Sauerstoffmessung

können mit diesem Ofensystem einschließlich der umgesetzten Luft- und Rauchgasführung die CO-Konzentrationen entsprechend der Vorgaben der VDI 3891 im Regelbetrieb bei mindestens 850 °C in der Nachbrennkammer eingehalten werden.

Nach Behebung dieser Ursachen und einer weiteren Beobachtungsphase zum Jahresbeginn 2015 unter den üblichen Betriebseinstellungen bei mindestens 850 °C konnte ab KW 05/15 die Temperatur auf 750 °C abgesenkt werden. In der Zeit vom 29.3.2015 bis 01.04.2015 fanden die Emissionsmessungen im Roh- und Reingas statt. Angesichts des Umstands, dass aufgrund der hohen Kremationszahlen lediglich am Montag während der ersten Kremationen die reduzierte Nachverbrennungstemperatur noch von Relevanz ist, wurde mit dem Messablauf auf diesen Umstand Rücksicht genommen.

Den Untersuchungen im Krematorium Pforzheim wurden vom zuständigen Umweltamt nur unter zusätzlichen Berichtsaufgaben und Emissionsvorgaben für CO zugestimmt. So wurden u. a. folgende zusätzliche Anforderungen gestellt:

- Die CO-Grenzwertüberschreitungen von 50 mg/Nm³ dürfen nicht mehr als 6 % betragen,
- Max. 25 % der CO-Grenzwertüberschreitungen dürfen nicht oberhalb von 100 mg/Nm³ liegen

Obwohl während der Untersuchungen regelmäßig und im Umfang üblicher Jahresemissionsprotokolle dem örtlichen Umweltamt berichtet wurde und bei störungsfreiem Betrieb im 750 °C – Betriebsmodus die CO-Grenzwertüberschreitungen im Mittel unter 3 % lagen (entsprechend der Bedingungen der VDI 3891), wurde seitens des Umweltamtes unter Androhung eines Bußgeldverfahrens weiterhin auf die Auswertung der zweiten Forderung und somit auf eine Berichtserstattung in einem unverhältnismäßigen Umfang bestanden. Vor diesem Hintergrund wurden die Untersuchungen mit reduzierter Nachverbrennungstemperatur am 09.06.2015 beendet. Die Phase mit 650 °C in der Nachbrennkammer konnte somit nicht durchgeführt werden.

Da in 2014 die Referenzphase mit 850 °C als Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer durch Reparaturen und Anlagendefekte nur bedingt gewertet werden konnte (vgl. Bild 14), wurde mit dem Betreiber vereinbart, eine nochmalige Referenzphase bei 850 °C anzuschließen, für die keine Zustimmung durch das Umweltamt erforderlich war. Die Datenerfassung und -auswertung wurde in KW 53/15 abgeschlossen.

In KW 18/15 fiel die Sauerstoffmesssonde erneut aus, wodurch ein unregelmäßiger Kremationsbetriebes mit einer gravierenden Verschlechterung des Gas-

ausbrands resultierte. Nach erfolgter Reparatur und Neujustierung der Ofenanlage wurde in Abstimmung mit dem Anlagenbetreiber festgelegt, dass ab KW 24/15 die Referenzphase bei 850 °C zur Überprüfung erneut aufgezeichnet und ausgewertet werden. In KW 53/15 wurde die Datenerfassung im Krematorium Pforzheim für diese Untersuchungen abgeschlossen.

4.4. Projektüberblick

Zusammenfassend ist der Projektverlauf in Bild 16 dargestellt. Insgesamt wurden dabei im Rahmen dieses Projektes insgesamt 8.324 Kremationen ausgewertet.



Bild 16: Projektverlauf im Überblick

4.5. Methodik zur Auswertung der kontinuierlichen Emissionsmessungen

4.5.1. Emissionsmesswerterfassung nach VDI 3891

Die Bewertung der CO-Emissionskonzentrationen erfolgte anhand des Auswerteschemas der VDI-Richtlinie 3891 /3/. Dieses sieht vor, dass die gemessenen CO-Emissionen auf 11 % $O_{2,trocken}$ zu normieren sind. Des Weiteren sind die gemessenen Werte in einem Emissionsauswerterechner zu validieren und zu klassieren (Bild 17). Da das kontinuierliche Emissionsmesswerterfassungssystem jährlich durch ein hierfür zugelassenes, unabhängiges Prüfinstitut kalibriert wird, kann es als geeignete Basis für die vergleichende Bewertung herangezogen werden. Zur detaillierten Emissionsbeurteilung gemäß § 8(2) der 27. BImSchV /2/ wurden die Klassierungsprotokolle verwendet, wobei sowohl die CO-Grenzwertüberschreitung als auch die Klassierungsverteilung in die emissionsseitige Bewertung einbezogen wurden.

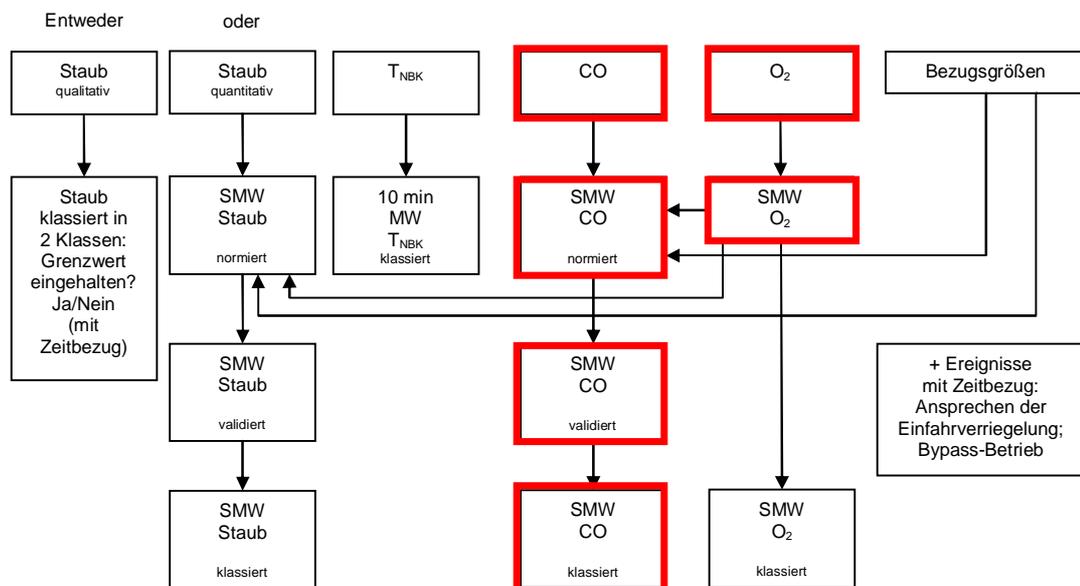


Bild 17: Auswerteschema für die CO-Emissionen (nach VDI 3891)

Nach der aktualisierten VDI-Richtlinie 3891 ist „eine vollständige Erfassung aller CO-Spitzen nur mit einer Messeinrichtung gewährleistet, die eine Messwertspanne von 0 bis 3.000 mg/m^3 abdeckt“. Um die Messwertaufösung im niedrigeren CO-Bereich zu verbessern, sollten Analysatoren mit einem weiteren CO-Messbereich von 0 bis 150 mg/m^3 eingesetzt werden und die über eine automatische Messbereichsumschaltung entsprechend den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3891 verfügen.

Die in der VDI-Richtlinie 3891 definierten Standards für die kontinuierliche Emissionsüberwachung sind bei Neuanlagen nach dem Stand der Technik vorzusehen. In Altanlagen sind diese Anforderungen beispielsweise dann umzusetzen, wenn neue Emissionsmesswerteinrichtungen installiert werden. In den untersuchten Krematorien Berlin-Baumschulenweg und München sind ältere aber zugelassene Emissionsmesswerteinrichtungen installiert, deren CO-Messbereichsendwerte nicht bis 3.000 mg/Nm³ reichen. Daher ist ein direkter Vergleich zwischen den Ofensystemen nicht zulässig und auch nicht beabsichtigt. Vielmehr kommt es darauf an, an jeder untersuchten Kremationslinie den tendenziellen Einfluss bei reduzierter Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer festzustellen und zu bewerten.

4.5.2. CO – Grenzwertüberschreitungen

Hierzu wird die Klassierung S1 (Sonderklasse 1 – Grenzwertüberschreitung) des Emissionsprotokolls herangezogen und mit dem Stand der Technik, wie er in der aktualisierten VDI-Richtlinie 3891 definiert ist, verglichen /3/. Diese, nachfolgend der Einfachheit als „97%-Regel“ bezeichnet, lautet:

Kremationsanlagen nach dem Stand der Technik halten erfahrungsgemäß unter Berücksichtigung des Verschleißes der Anlage in 97 % bis 99 % der Fälle den CO-Grenzwert ein..

4.5.3. CO – Klassenmittelwert

Anhand der CO-Klassenverteilung lässt sich der Betriebszustand (Alterung und Abnutzung sowie Betriebsweise der Ofenanlage) recht gut bewerten.

Im Zuge der Untersuchungen an bayerischen Krematorien /4/ wurde als Bewertungsgröße bei der Auswertung der Klassierungsprotokolle der „CO-Klassenmittelwert“ eingeführt. Dieser wird aus diesen Klassenzuordnungen den über die Klassen M1 bis M20 nach folgender Gleichung ermittelt:

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

Auch diese Bewertungsgröße wird in die Betrachtungen einbezogen, zumal damit auch eine Einordnung in Relation zu anderen Datenerhebungen (z. B. in /4/) gegeben ist.

4.6. Diskontinuierlichen Emissionsmessungen im Roh- und Reingas

Für die diskontinuierlichen Emissionsmessungen bei reduzierten Nachverbrennungstemperaturen wurde das Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA) mit Sitz in Duisburg gewählt. Hierbei handelt es sich um eine akkreditierte Messstelle. Da die Kremationsanlagen den wiederkehrenden Emissionsmessungen unterliegen, wurden diese vorliegenden Reingasmessergebnisse für die Referenzphase bei 850 °C verwendet.

Auf die Besonderheiten der jeweiligen Messbedingungen in den untersuchten Krematorien sei auf die jeweiligen Abschnitte (5.2; 6.2; 7.2) verwiesen. Als schwierig gestaltete sich in den jeweiligen Krematorien die Festlegung der Rohgasmessstellen, da diese bei der Aufstellungsplanung der Kremationsanlage nicht vorgesehen werden. Insofern sind Einschränkungen bei der Bewertung der Rohgasmessungen angebracht. Die Reingasmessungen wurden bei allen drei Kremationsanlagen an den bereits vorhandenen Emissionsmessstellen durchgeführt. Somit lassen sich die Reingasmessungen in Bezug zu den von vorliegenden Ergebnissen der wiederkehrenden Messungen setzen.

5. Ergebnisse im Krematorium Berlin-Baumschulenweg

5.1. Betriebliche Datenerfassung

Aufgrund der großen zu verarbeitenden Datenmenge der erfassten Kremationen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen ist es mit Blick auf die vorzunehmende Auswertung unerlässlich zusätzliche Betriebsdaten zu erfassen. Dies ermöglicht z. B. in Zweifelsfragen eine Plausibilitätsprüfung vorzunehmen. Dabei gilt es auf die vorhandenen Einrichtungen im Krematorium ebenso Rücksicht zu nehmen, wie auf die damit verbundene zusätzliche Belastung des Betriebspersonals. Im Krematorium Berlin-Baumschulenweg wurden folgende Daten vom Betreiberpersonal manuell erfasst:

- Beginn des Aufheizbetriebes und der einzelnen Kremationen (Sargeinfahrt),
- Leichnam (männlich / weiblich),
- Sarggewicht (normal / übergewichtig): In Ermangelung einer Sarggewichtsmessung wurde das persönliche Empfinden der Mitarbeiter abgefragt,
- Sargoberfläche (lackiert / nicht lackiert),
- Ablesung Gasverbrauch an den Gaszählern der Haupt- und Nach- und Restbrennkammer zum Ende des jeweiligen Kremationsvorganges.

Aufgrund der Entscheidung zum Jahresende 2014 die Untersuchungen an Linie 3 anstelle an Linie 2 durchzuführen, lagen nur die ohnehin regelmäßigen, täglich erfassten Gasverbrauchswerte an allen Brennern und die Anzahl der täglichen Kremationen zur Verfügung. Diese wurden in die Auswertung einbezogen.

5.2. Kontinuierliche Messdatenerfassung

Die Emissionsmessstation ist im Bereich der Abgasreinigung platziert, wobei die Analysegeräte aller drei Linien sowie der Emissionsauswerterechner in einem Analysenschrank untergebracht sind (Bild 18). Die Messung der CO- und O₂-Konzentrationen im Reingas erfolgt im Teilgasstrom, der über eine beheizte Messgassonde und einer unbeheizten Messgasleitung abgesaugt und einer Messgasaufbereitung, u. a. bestehend aus Messgaskühler mit Kondensatabscheidung, Analysenfilter und Messgaspumpe, zugeführt wird. Zur Analyse der CO- und O₂-Konzentrationen werden eignungsgeprüfte Gasanalytoren (MAG 23) der Fa. Dr. Födisch eingesetzt. Die CO-Messung basiert auf der Absorption nichtdispersiver IR-Strahlung (NDIR Prinzip). Die CO-Messsonde

verfügt über eine Autokalibrierung (alle 3 Stunden). Der CO-Analysator ist mit den beiden Messbereichen 0 bis 150 mg/Nm³ und 0 bis 750 mg/Nm³ ausgestattet. Für die Sauerstoffmessung wird ein elektrochemischer Sensor eingesetzt, indem die in der Brennstoffzelle durch Sauerstoff ausgelöste chemische Reaktion einen elektrischen Strom zwischen Anode und Kathode erzeugt, der ein Maß für die Sauerstoffkonzentration darstellt.



Bild 18: Emissionsauswertesystem / CO-Klassierung

Als elektronische Auswerteeinheit ist der in der Schaltwarte aufgestellte Emissionsauswerterechner (System D-EMS 2000 / D-MS 500, Fa. DURAG) installiert, der von der Firma VMT GmbH betreut wird. Die täglichen Klassierungsprotokolle wurden für die Auswertung herangezogen.

5.3. Betriebsverhalten und technische Besonderheiten

Üblicherweise werden die drei Ofenanlagen im Zweischichtbetrieb betrieben, wobei aus Sicherheitsgründen eine personelle Doppelbesetzung (Zweimannbetrieb) gewährleistet ist. Diese Betriebsweise korrespondiert somit mit den Sarganlieferungszeiten von täglich 6.00 bis 22.00 Uhr. Pro Schicht und Linie werden üblicherweise 5 bis 6 Kremationen durchgeführt, wobei an Montagen aufgrund der regelmäßigen Ofenreinigung, insgesamt geringere Kremationszahlen zu verzeichnen waren. Bei Bedarf werden an den Anlagen auch im Dreischichtbetrieb bis zu ca. 18 Kremationen pro Linie und Tag durchgeführt.

Die Arbeitsabläufe im Krematorium Berlin orientieren sich am 3-Linien-Betrieb, der sich im Laufe der Jahre als zweckmäßig herauskristallisiert hat. Die Sargeinfahrt erfolgt bei allen drei Linien nahezu gleichzeitig, wodurch die Arbeitsabläufe – Sargbereitstellung, Sargeinfahrt und Ascheentnahme – optimiert sind. Nach Auskunft des Betriebspersonals beträgt die Kremationszeit ca. 1 Stunde und 20 Minuten. Verzögert sich eine Kremation, so wird versucht die nächste an diesem Ofen stattfindende Kremation in einem kürzeren Intervall (mindestens jedoch 1 Stunde) durchzuführen, um den zeitgleichen Einfahrzyklus wie bei den anderen Ofenlinien zu erreichen. Diese Betriebsweise hat ihre Vorteile in den Arbeitsabläufen, kann aber einen höheren Gasverbrauch für den Haltebetrieb nach sich ziehen.

Der Anlagenbetrieb (Ofen, Abgaskühlung und -reinigung) erfolgt prozessgesteuert. Der prozessgesteuerte Anlagenbetrieb wird visualisiert und steht dem Betriebspersonal als Orientierungshilfe für den aktuellen Betriebszustand zur Verfügung. Beispielhaft zeigt Bild 19 den Temperaturverlauf in den drei Brennkammern des Ofens während der Untersuchungsphase bei einer eingestellten Solltemperatur in der Nachbrennkammer von 750 °C (hier ein Montagbetrieb einschließlich Aufheizung).

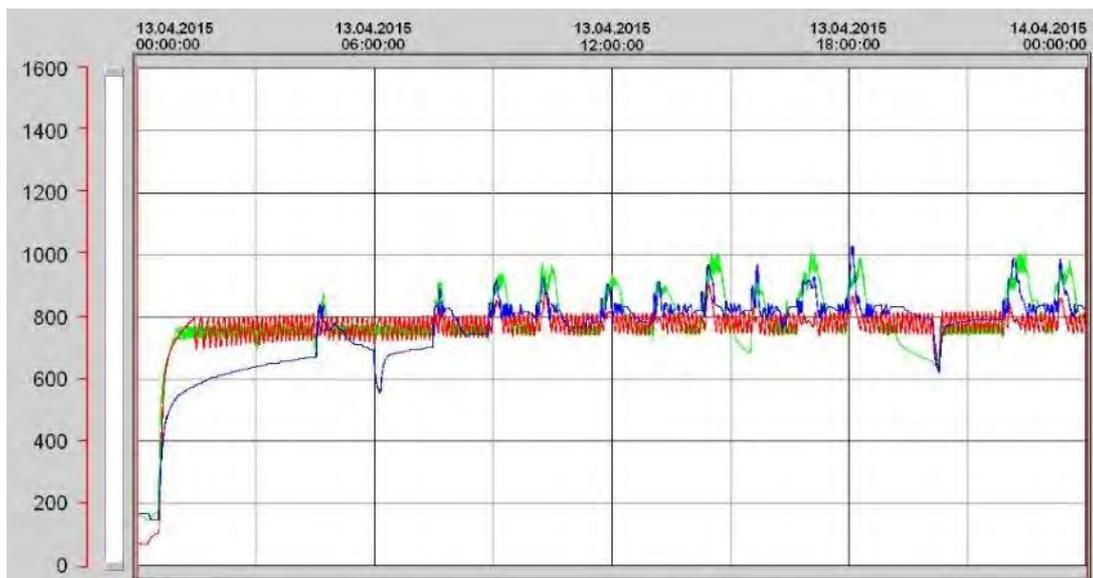


Bild 19: Temperaturverlauf bei mindestens 750 °C in der Nachbrennkammer (HBK(grün), NBK (rot), RBK (blau))

5.4. Kohlenmonoxid-Emissionen

Basierend auf der in Abschnitt beschriebenen Auswertemethodik werden die Datenaufzeichnungen der installierten kontinuierlichen Emissionsmesswerter-

fassungsanlage zugrunde gelegt. Die in Bild 20 angegebenen Klassenverteilungen repräsentieren die einzelnen Untersuchungsphasen:

- 850 °C: 1171 Stundenmittelwerte (SMW) – KW 35/14 bis KW 06/15
- 750 °C: 1241 Stundenmittelwerte (SMW) – KW 06/15 bis KW 29/15
- 650 °C: 301 Stundenmittelwerte (SMW) – KW 30/15 bis KW 35/15.

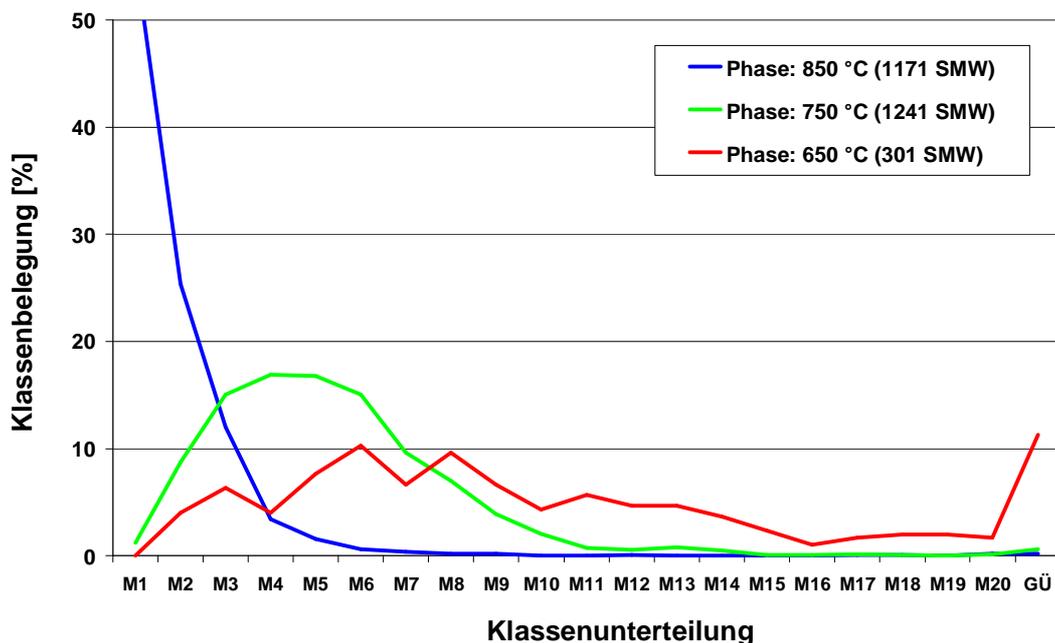


Bild 20: Auswertung der Klassierungsprotokolle im Krematorium Berlin

In der Referenzphase bei einer eingestellten Nachverbrennungstemperatur von mindestens 850 °C zeigt sich eine deutliche Belegung der unteren Klassen M1 bis M5; insgesamt wurden in dieser Zeit zwei Grenzwertüberschreitungen festgestellt (0,2 %). Mit Reduzierung der Nachverbrennungstemperatur auf 750 °C stellt sich eine Verschiebung der Klassenverteilung ein, wobei überwiegend die CO-Klassen M1 bis M10 belegt sind. In dieser Phase ergaben insgesamt 8 Grenzwertüberschreitungen (0,6 %). Beide Phasen repräsentieren somit einen Anlagenbetrieb, der gemäß VDI 3891 dem Stand der Technik entspricht und im Vergleich zu den Datenerhebungen in Bayern /4/ dem oberen Viertel zuzuordnen ist.

Ein völlig anderes Bild ergibt sich für die Phase mit 650 °C in der Nachbrennkammer. Hier zeigt sich eine gravierende Verschlechterung der CO-Situation. So wurden bei 301 Stundenmittelwerten nicht nur 34 Grenzwertüberschreitungen, respektive 11,3 %, festgestellt, sondern darüber hinaus auch die hohen Emissionsklassen (M11 bis M20) überdurchschnittlich belegt. Dieser Betriebszustand genügt also nicht dem Stand der Technik, weshalb von einer Fortfüh-

zung der Untersuchungen bei diesen Temperaturverhältnissen verzichtet wurde.

Betrachtet man die CO-Klassenmittelwerte (vgl. 4.5.2), die den Charakter der Klassenverteilung repräsentieren, so ergibt sich ein vergleichbares Bild, d. h. die Auswertung ergab für die Referenzphase (850 °C) einen Klassenmittelwert von 4,5 mg/Nm³ und für die 750 °C Phase von 13,2 mg/Nm³. Bei der 650 °C Phase lag der CO-Klassenmittelwert von 22,1 mg/Nm³.

Vor diesem Hintergrund wurde zur Klärung der Luft- und Rauchgasführung eine Ofenbegehung durchgeführt /25/. Sie zeigte eine für Etagenofensysteme der Firma IFZW GmbH untypische Einbindung der Restebrennkammer in den Rauchgasweg (Bild 21), die von einer Fremdfirma im Zuge von Reparaturarbeiten vorgenommen wurde.

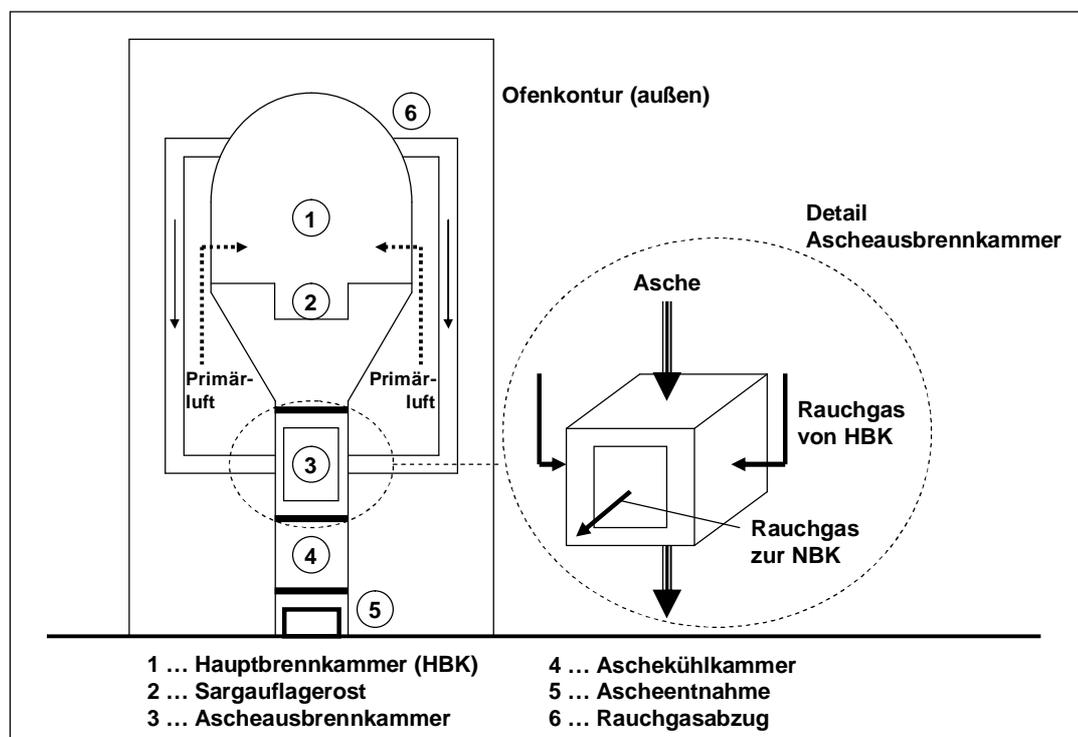


Bild 21: Rauchgasführung durch die Ofenkammern in Linie 3 im Krematorium Berlin-Baumschulenweg

Die aus der Hauptbrennkammer entweichenden Rauchgase werden über die Restebrennkammer geführt und von dort zusammen mit den darin freigesetzten Rauchgasen der Nachbrennkammer zugeführt. Dabei kann das aus der Hauptbrennkammer abgeführte Rauchgas in den Seitenkanälen abkühlen und sich „kalte“ Gasstrahlen ausbilden, die einer Nachverbrennung entgegenstehen. Bei Nachverbrennungstemperaturen von etwa 700 bis 750 °C ist es noch

denkbar, dass, unterstützt durch ofeninterne Wärmeflüsse, diese Rauchgasstrahlen nachverbrannt werden können. Bei niedrigeren Nachverbrennungstemperaturen ist dies sehr unwahrscheinlich. Mit dieser Wahl der ofeninternen Luft- und Rauchgasführung sind die Möglichkeiten der Temperaturabsenkung offensichtlich limitierter als bei der üblicherweise in Etagenofensystemen vorherrschenden Ausführung.

5.5. Emissionskonzentrationsmessungen im Roh- und Reingas

In KW 18/15 wurden die diskontinuierlichen Emissionsmessungen im Roh- und Reingas bei Nachverbrennungstemperatur von 750 °C durchgeführt.

Die Probenahmestelle „Rohgas“ befindet sich in einer horizontal verlaufenden Abgasleitung in ca. 1,5 m über dem Boden nach dem Zyklon - Vorabscheider und vor dem Kugelrotorreaktor im Aufstellungsraum „Abgasreinigungstechnik“ auf Ebene 2 des Betriebsgebäudes (Bild 22). Für die Messungen wurde ein senkrecht angebrachter Flansch geöffnet und ein Gegenflansch mit zwei ca. 6,5 cm großen Öffnungen angebracht. Die Probenahmestelle entspricht nicht den Anforderungen der DIN EN 15259. Technisch bedingt lässt sich jedoch keine normkonforme Probenahmestelle einrichten.



Bild 22: Probenahmestellen an Linie 3 des Krematoriums Berlin - Baum-
schulenweg (links: Rohgas; rechts: Reingas; Bildquelle: IUTA)

Die Probenahmestelle „Reingas“ befindet sich ebenfalls auf Ebene 2 im Betriebsgebäude, jedoch in einer Höhe von ca. 4,5 m über dem Boden im horizontal verlaufenden Abgasrohr vor dem Übergang zum eigentlichen Abgaskamin (Bild 22). Diese Probenahmestelle, die auch für die wiederkehrenden Emissionsmessungen genutzt wird, verfügt über zwei um 90° versetzte Messachsen mit jeweils einem 3" - Messstutzen. Zusätzlich ist auf der gegenüberliegenden Seite des Abgaskanals ein weiterer 2" - Messstutzen angebracht. Die freie Einlaufstrecke liegt bei ca. 1,10 m (erforderlich • 1,90 m); die freie Auslaufstrecke beträgt 0,50 m (erforderlich • 0,76 m). Die Probenahmestelle

entspricht bezüglich der Ein- und Auslaufstrecke nicht den Anforderungen der DIN EN 15259. Die notwendigen Anforderungen an das Strömungsprofil gemäß der DIN EN 15259 wurden erfüllt, so dass die Probenahmestelle als geeignet angesehen werden kann. Vom Messinstitut wurde konstatiert, dass für die Reingasmessungen die Messergebnisse hinsichtlich der Betriebszustände während der Messungen plausibel und repräsentativ sind.

Die Ergebnisse, der in KW 18/15 durchgeführten Emissionsmessungen sind in Tabelle 5 dargestellt. In diesen Überblick sind die Emissionsmessergebnisse der letzten wiederkehrenden Emissionsmessung (IFU, April 2014) als Referenzmessung mit aufgeführt.

Krematorium Berlin- Baumschulenweg	Kohlenmonoxid - CO - [mg/Nm ³] ¹⁾	Gesamtkohlenstoff - C _{ges} - [mg/Nm ³] ²⁾	Staub [mg/Nm ³] ²⁾	Dioxine/Furane - PCDD/F - [ng-TE/Nm ³] ³⁾	Quecksilber - Hg - [mg/Nm ³] ⁴⁾
27.BImSchV	50	20	10	0,1	-
850 °C Reingas (IFU-April 2014)	keine Messungen	0,2 (0,1 - 0,4)	1,6 (1,4 - 1,9)	0,03	keine Messung
750 °C Rohgas (IUTA-Mai 2015)	keine Messungen	siehe Reingas	101 (47 - 170)	0,206 0,132	0,238 (0,01 - 1,71)
750 °C Reingas (IUTA-Mai 2015)	25,3 (15,4 - 33,5)	4,6 (4,2 - 5,3)	0,51 (0,3 - 0,7)	0,0031 0,0026	0,0562 (0,01 - 0,321)

Hinweise:

¹⁾ Stundenmittelwerte aus kontinuierlicher Messung (IUTA)

²⁾ Mittelwert (Minimal - Maximalwert)

³⁾ PCDD/PCDF: Einzelwerte, 6-h-Beprobung

⁴⁾ Quecksilber: Einzelwerte, 1-h-Beprobung, partikelgebunden und gasförmig

Tabelle 5: Krematorium Berlin – Überblick Emissionsmessungen

Die einzelnen Schadgaskonzentrationen lassen sich wie folgt bewerten:

- Kohlenmonoxid:

Im Zuge der diskontinuierlichen Emissionsmessungen wurde parallel zur Gesamtkohlenstoff auch Kohlenmonoxid gemessen. Hierbei wurde ein Analysator (Fisher Rosemount, NGA 2000 MLT) mit zwei Messbereichen, eingestellt auf 0 bis 150 mg/m³ und 0 bis 4.000 mg/m³, verwendet. In Bild 23 ist der Verlauf am Messtag 28.4.2016 dargestellt. Die sich daraus ergebenden Stundenmittelwerte sind in Tabelle 5 enthalten. Im Vergleich zur Auswertung der Emissionsklassen am Messwerterechner, die an diesem Messtag eine Klassenmittelwert von 13,0 mg/Nm³ ergab, ist es nicht überraschend, dass die unter Einbeziehung dieser Emissionsspitzen von IUTA ermittelte CO-Konzentration höher ausfällt.

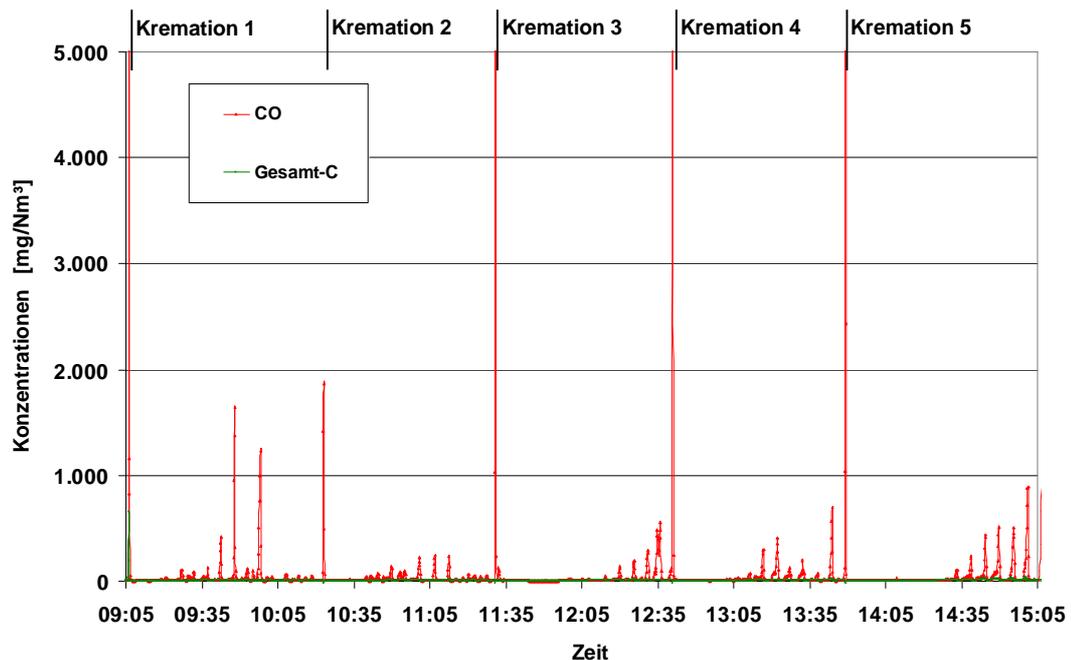


Bild 23: CO- und Gesamtkohlenstoffmessungen bei 750 °C in der NBK
(Quelle: IUTA, Messtag: 28.4.2016)

Besonders markant sind die CO-Spitzenkonzentrationen, die sich bei der Sargeinfahrt ergeben. So wurden Konzentrationen um 5.000 mg/Nm³ festgestellt, die in Verbindung mit der Öffnungszeit des Ofenschiebers entscheidend für die CO-Stundenmittelwerte sein können. Auffallend sind ferner die regelmäßigen CO-Spitzen während der zweiten Hälfte der Kremation, die möglicherweise auf Aschebewegungen im Ofen oder auf zusätzliche Luftzuführung (z. B. Brennerluft) zurückzuführen sind. Dieses Messprotokoll zeigt sehr anschaulich, dass sich einige für die Ermittlung des CO-Emissionsstundenmittelwertes relevante Einflüsse eines Kremationsvorgangs nicht mit reaktionskinetischen Modellen erklären lassen.

- **Gesamtkohlenstoff:**

Im Gegensatz zur Kohlenmonoxidkonzentration fallen die Konzentrationspitzen bei Gesamtkohlenstoff deutlich geringer aus. Mit festgestellten Stundenmittelwerten im Bereich von 4,2 bis 5,3 mg/Nm³ ist selbst bei eingestellter Mindestverbrennungstemperatur von 750 °C in der Nachbrennkammer ein guter Gasausbrand mit einem deutlichen Sicherheitsabstand zum Grenzwert von 20 mg/Nm³ gegeben. Der Vergleich zu dem im Zuge der wiederkehrenden Messungen festgestellten Wertebereich von 0,1 bis 0,4 mg/Nm³ weist eine Erhöhung aus. Ob dies auf die Temperaturabsenkung zurückzuführen ist, ist insofern zu hinterfragen, da die bei den wie-

derkehrenden Messungen festgestellten Messwerte als ungewöhnlich gering einzustufen sind.

- **Staub:**

Die Rohgasstaubbelastung hängt maßgeblich von den Rauchgasgeschwindigkeiten im Ofen und den nachfolgenden Bereichen ab. Die gemessenen Rohgasstaubbelastungen liegen eher im unteren Bereich der erwarteten Bandbreite, die bis zu 1 g/Nm³ betragen kann. Möglicherweise sind bei diesen Rohgasstaubmessungen Messunsicherheiten aufgrund der schwierigen Messstelle für dieses günstige Ergebnis verantwortlich. Die gemessenen Reingasstaubgehalte von weniger als 1 mg/Nm³ belegen, dass das vorhandene Gewebefilter keine Defekte aufweist, wodurch eine sehr gute Staubabscheidung erzielt wird. Im Vergleich zur wiederkehrenden Messung sind keine Unterschiede erkennbar.

- **Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Furane (PCDD/F):**

Wie in Abschnitt 2.2 behandelt, ist zur Einhaltung des in der 27. BImSchV geforderten Emissionsgrenzwertes für PCDD/F eine ganzheitliche Strategie erforderlich, die neben den in Abschnitt 5.4 diskutierten Gasausbrandbedingungen eine schnelle Abgaskühlung zur Verminderung der de novo Synthese und im Fall der hier installierten Abgasreinigung eine hohe Adsorptionswirkung beinhaltet.

Die gemessenen PCDD/F-Rohgaswerte liegen im Vergleich zu den Messungen der anderen in diesem Projekt untersuchten Krematorien sowie im Vergleich zu den Ergebnissen im Krematorium Düsseldorf (vgl. /1/) im unteren Bereich, das möglicherweise den schwierigen messtechnischen Bedingungen geschuldet ist. Da die Messungen nach der Abgaskühlung erfolgten, kann man jedoch folgern, dass die primärseitigen Voraussetzungen für ein niedriges Dioxin-/Furan-Potential auch bei reduzierter Nachverbrennungstemperatur (750 °C) gegeben sind.

Mit der Trockensorptionstechnik nach dem Kugelrotorlaufverfahren werden PCDD/F wirkungsvoll abgeschieden, so dass mit einer Reingaskonzentration von rund 0,003 ngTE/Nm³ ein deutlicher Sicherheitsabstand zum Grenzwert von 0,1 ngTE/Nm³ festgestellt werden konnte. Das Reingasergebnis ist praktisch identisch zu den in den wiederkehrenden Messungen ermittelten Reingaskonzentrationen.

- **Quecksilber:**

Die gemessenen Quecksilberrohgaskonzentrationen zeigen, dass abhängig vom Amalgamgehalt des Leichnams in Einzelfällen sehr hohe Kon-

zentrationen (hier: 1,71 mg/Nm³) auftreten können. Bei den zeitgleich durchgeführten Reingasmessungen ergab sich immerhin noch ein Maximalwert von 0,321 mg/Nm³ (Tabelle 6), woraus sich eine Abscheideleistung von etwa 83 % errechnet. In anderen Fällen ergeben sich auch höhere Abscheideraten, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Rohgasbe-
probung mit Messunsicherheiten behaftet ist (s. oben) und in vielen Fällen die Rohgaskonzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze von 0,1 mg/Nm³ lag.

Rohgas [mg/Nm ³]	Reingas [mg/Nm ³]
0,01	0,010
0,01	0,009
0,17	0,015
0,02	0,019
0,03	0,044
0,02	0,016
1,71	0,321
0,14	0,019
0,19	0,077
0,08	0,032

Tabelle 6: Quecksilber-Einzelmessungen im Krematorium Berlin

5.6. Gasverbrauch

Der Gasverbrauchsdaten wurden vom Betriebspersonal durch regelmäßige Aufzeichnungen der Gaszähler erfasst (vgl. Abschnitt 5.1). Losgelöst hiervon werden im Krematorium Berlin-Baumschulenweg generell die täglichen Gasverbrauchswerte sowie Anzahl der Kremationen erfasst und intern ausgewertet. Daher liegen diese Daten auch für 2014 vor, so dass ohne Verzicht auf diese Schlüsselinformationen die Auswertung an der Kremationslinie 3 für die Referenzphase bei 850 °C vorgenommen werden konnte (vgl. hierzu Ausführungen in Abschnitt 4.1.).

Aus den täglichen Gasverbrauchsaufzeichnungen und Kremationszahlen wurde der kremationsbezogene Gasverbrauch ermittelt und über den betrachteten Untersuchungszeitraum der Referenzphase dargestellt (Bild 24). Es zeigt sich, dass in Kremationslinie 3 meist 10 bis 12 Kremationen (2-Schicht-Betrieb) durchgeführt wurden. Die deutlich ausgeprägten kremationsbezogenen Gasverbrauchswerte nach den Wochenenden sind nicht überraschend. Zum Einen wird der Kremationsofen aus einem niedrigeren Temperaturniveau erwärmt und zum Anderen werden montags wegen der Ofenreinigung tendenziell weniger Kremationen durchgeführt. Da in der Zeit KW 49/14 bis KW 01/15 aus betriebsinternen Gründen eine wochenweise Verbrauchsdatenermittlung

durchgeführt wurde, wurde für dieses Zeitfenster auf eine graphische Darstellung in Bild 28 verzichtet. Die Daten wurden jedoch in die Gesamtbewertung der Referenzphase einbezogen. Somit wurden während der Referenzphase insgesamt 824 Kremationen durchgeführt. Der gesamte Gasverbrauch (alle drei Brenner) wurde zu 33.144 m³ Erdgas ermittelt, woraus sich ein mittlerer kremationsbezogener Verbrauch von 40,2 m³/Kremation ergibt.

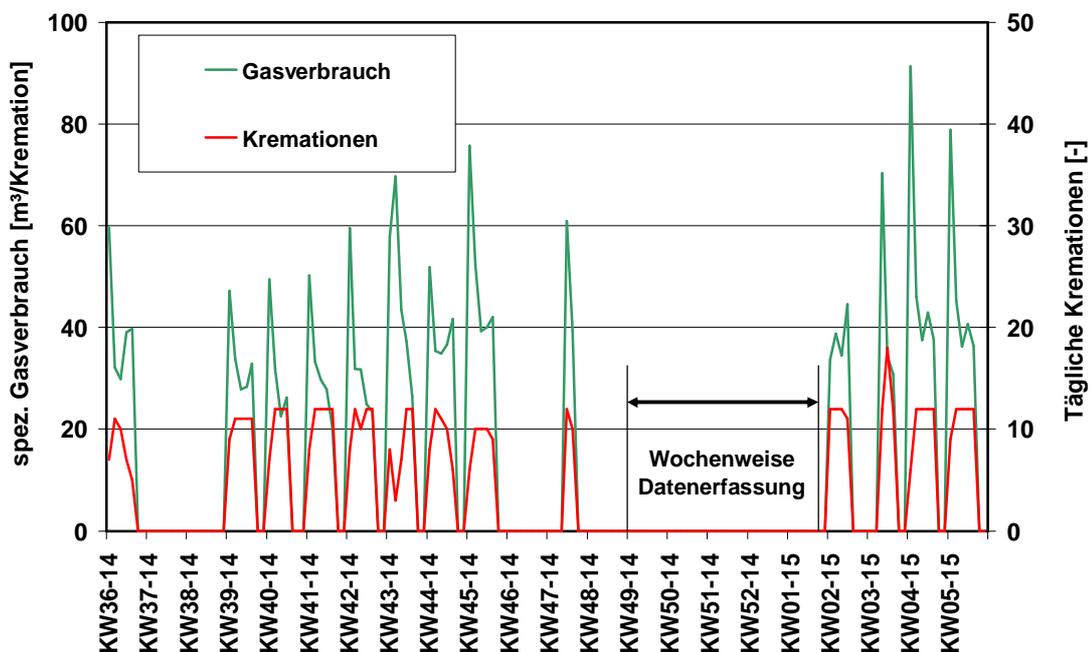


Bild 24: Kremationsbezogener Gasverbrauch in der Referenzphase

Die Verteilung des Energieeinsatzes zwischen den einzelnen Brennkammern lässt sich aus Bild 25 ableiten. Hierbei zeigt sich, dass der Hauptenergieeinsatz mit rund 64 % in der Nachbrennkammer erfolgt, wohingegen in den beiden anderen Brennkammern (HBK: 17 % und RBK: 19 %) nur ein Drittel des restlichen Energieeinsatzes anliegt. Der für Etagenofenanlagen sehr hohe Gasverbrauch in der Restebrennkammer ist der untypischen ofeninternen Rauchgasführung geschuldet (vgl. hierzu Abschnitt 5.4, insbesondere Bild 21).

Die Auswirkung der Temperaturabsenkung auf mindestens 750 °C in der Nachbrennkammer zeigt Bild 26. In dieser Phase war ebenfalls ein sehr regelmäßiger Kremationsbetrieb (üblicherweise 2-Schicht-Betrieb) gegeben. Während vier Kalenderwochen waren höhere tägliche Kremationszahlen (3-Schicht-Betrieb) zu verzeichnen. Insgesamt umfasste diese Phase 1.128 Kremationen. Der gesamte Gasverbrauch wurde zu 32.461 m³ ermittelt. Hieraus errechnet sich ein mittlerer kremationsbezogener Gasverbrauch von 28,8 m³. Dies entspricht einer Gaseinsparung gegenüber der Referenzphase von rund 28 %.

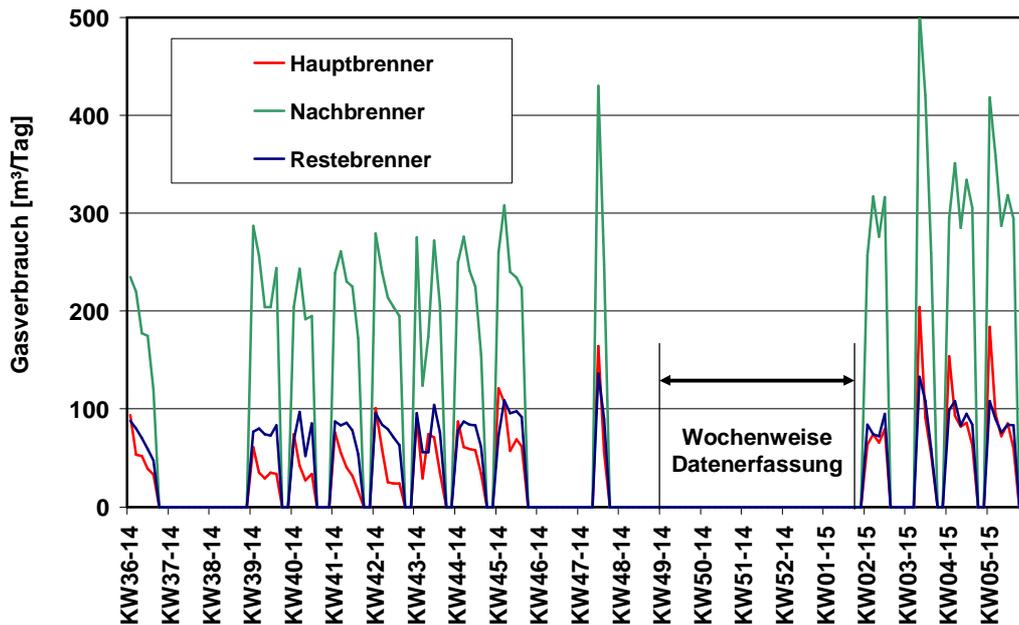


Bild 25: Gasverbrauch in den einzelnen Brennkammern (Referenzphase)

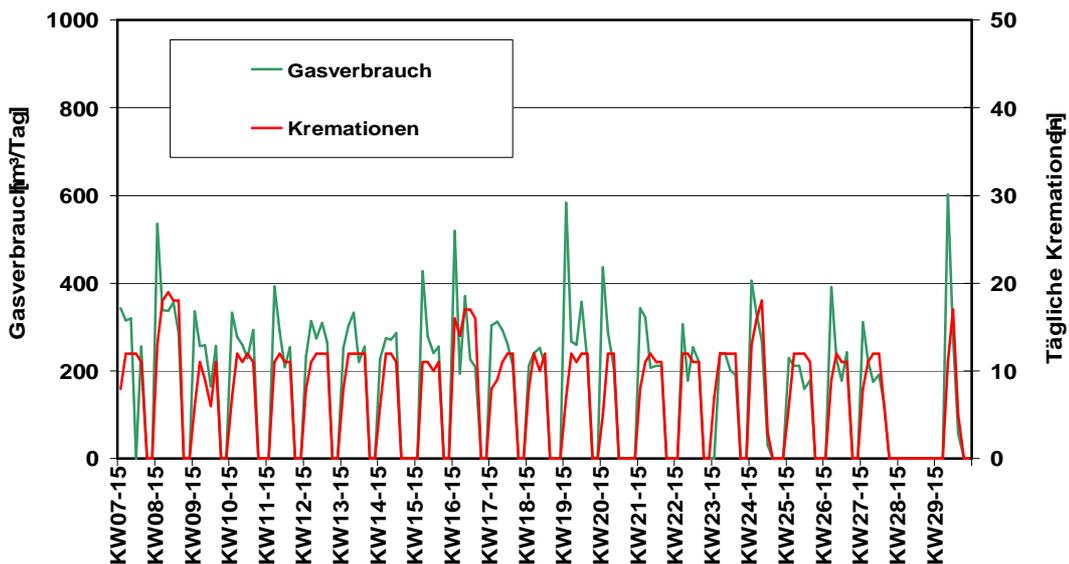


Bild 26: Kremationsbezogener Gasverbrauch bei mindestens 750 °C in der Nachbrennkammer

Von Interesse ist in dieser Betriebsphase ferner die Verteilung des Energieeinsatzes zwischen den einzelnen Brennkammern (Bild 27). Im Vergleich zur

Referenzphase zeigt sich, dass die sich Reduzierung der Nachverbrennungstemperatur ausschließlich auf den Gasverbrauch in der Nachbrennkammer auswirkt. Eine indirekte Einflussnahme auf den Energieeinsatz in anderen Brennkammern, wie er beispielsweise im Krematorium Düsseldorf /1/ festzustellen war, hat sich hier nicht gezeigt.

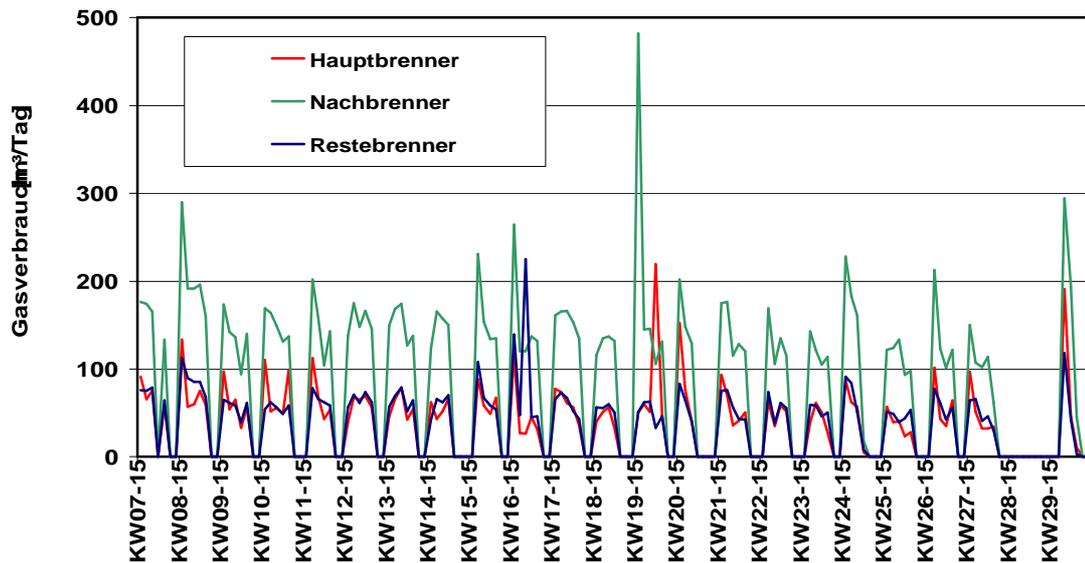


Bild 27: Gasverbrauch in den einzelnen Brennkammern bei mindestens 750 °C in der Nachbrennkammer

In der Zeit von KW 30/15 bis KW 35/15 wurde die Temperatur in der Nachbrennkammer auf eine Mindesttemperatur von 650 °C abgesenkt. Dieser Betriebszustand führt, wie die Ausführungen in Abschnitt 5.4 (Bild 20) zeigte zu nicht akzeptablen CO-Emissionen, weshalb diese Betriebsphase nach 285 Kremationen abgebrochen werden musste. Rein informativ sei der dabei mit 24,2 m³/Kremation ermittelte kremationsbezogene Gasverbrauch genannt.

5.7. Zusammenfassende Bewertung mit Bezug auf das Gesamtprojekt

Die Untersuchungen im Krematorium Berlin-Baumschulenweg haben die Grenzen der Temperaturabsenkung für diese Kremationsofenanlage mit etwa 750 °C aufgezeigt. Die Besonderheiten der ofeninternen Luft- und Rauchgasführung spielen hierbei eine nicht unwesentliche Rolle. Die Auswertung der kontinuierlich ermittelten CO-Emissionsmesswerte zwischen den einzelnen Phasen kann in der Relation untereinander zur Bewertung der Betriebszustände verwendet werden. Weitergehende direkte CO-Emissionsmesswertvergleiche zu anderen Kremationsanlagen sind nicht zulässig.

Sehr deutlich zeigen sich die Besonderheiten des Prozessablaufes einer Kremation, die man technisch gesehen als „Chargenbetrieb“ einstufen muss, und deren Einflüsse auf die CO-Emissionen. So führen die notwendigen Eingriffe in das Ofensystem, wie Sargeinfahrt bei offener Ofentüre und Aschebewegungen und -entnahme, zu deutlichen Kohlenmonoxidkonzentrationsspitzen, die erst beim Einsatz von CO-Analysatoren mit hohen Messbereichsendwerten in ihrem Ausmaß ersichtlich werden. Die Bewertung der einzuhaltenden CO-Emissionsgrenzwerte muss daher diese unvermeidbaren Einwirkungen insbesondere beim Einsatz hochauflösender Messanalysatoren zwingend berücksichtigen.

Von Interesse ist der Umstand, dass vereinzelt signifikant erhöhte Quecksilberkonzentrationen sowohl im Rohgas als auch im Reingas auftreten, die sich nur über den Eintrag erklären lassen. Die mit der installierten Abgasreinigungsanlage erzielten Abscheideleistungen liegen bei diesen extremen Rohgaskonzentrationen bei nahezu 90 %, wobei aufgrund der schwierigen Rohgasmessstelle messtechnische Unsicherheiten zu berücksichtigen sind.

6. Ergebnisse im Krematorium München

6.1. Betriebliche Datenerfassung

In Abstimmung mit dem Betreiber und unter Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten wurde das Schema für die Aufnahme der täglichen Betriebsdaten definiert. Dies beinhaltet folgende Informationen, die von den Mitarbeitern manuell erfasst wurden:

- Beginn des Aufheizbetriebes und der einzelnen Kremationen (Sargeinfahrt),
- Leichnam (männlich / weiblich),
- Sarggewicht (schwer / normal / leicht): In Ermangelung einer Sarggewichtsmessung wurde das persönliche Empfinden der Mitarbeiter abgefragt,
- Sargoberfläche (lackiert / nicht lackiert),
- Ablesung Gasverbrauch an den Gaszählern der Haupt- und Nachbrennkammer zu Beginn / Ende des jeweiligen Kremationsvorganges.

6.2. Kontinuierliche Messdatenerfassung

Zur Messung der CO- und O₂-Konzentrationen im Reingas werden die Gase über eine Messgasleitung abgesaugt und einer Messgasaufbereitung, u. a. bestehend aus Messgaskühler mit Kondensatabscheidung, Analysenfilter und Messgaspumpe zugeführt. Die eigentliche Messung der CO- und O₂-Konzentrationen im Messgasstrom erfolgt in einem eignungsgeprüften Gasanalysator (UNOR 611) der Fa. Maihak (Bild 28). Die CO-Messzelle basiert auf der berührungslosen selektiven Infrarotadsorptionsmessung, d. h. es wird die Eigenschaft von Kohlenmonoxid genutzt bei bestimmten Wellenlängen (IR-Band) Strahlung zu adsorbieren. Der Adsorptionsgrad der IR-Strahlung entspricht der CO-Konzentration des Messgases. Die Sauerstoffmessung erfolgt nach dem Prinzip der Brennstoffzelle, indem die in der Brennstoffzelle durch Sauerstoff ausgelöste chemische Reaktion einen elektrischen Strom zwischen Anode und Kathode erzeugt, der ein Maß für die Sauerstoffkonzentration darstellt.

Die kontinuierlich erfassten Messdaten (CO, O₂, NV-Temperatur) werden im Emissionsauswerterechner (System MEAC 2000, Fa. Maihak), der von der Firma Airtec GmbH installiert und betreut wird, validiert und klassiert. Sie wurden von Airtec in digitaler Form als 5-Sekunden-Mittelwerte zur Verfügung gestellt. Um die Datenmenge überschaubar zu gestalten, erfolgte in einem ersten Bearbeitungsschritt die Umwandlung der Datensätze des Emissionsaus-

werterechners in Minutenmittelwerte und im Weiteren die Aufarbeitung des zeitabhängigen Verlaufs der einzelnen Kremationen.

Die tägliche Messwerverfassung erfolgt über ein Freigabesignal, das vom Betreiber mit der ersten Kremation ausgelöst wird. Auch die Abschaltung der Emissionsmesswerverfassung erfolgt manuell, in der Regel mit einem Ausschalter am Steuerschrank.



Bild 28: Emissionsauswertesystem / typische CO-Klassierung (Fa. Airtec)

Außerdem wurden die täglichen Emissionsprotokolle (Klassierung in Emissionsklassen) erfasst und zusammen mit den betrieblichen Datenaufzeichnungen in einen zeitlichen Bezug gesetzt und auf diese Weise ausgewertet.

6.3. Betriebsverhalten und betriebstechnische Besonderheiten

Die Betriebsabläufe im Krematorium München sind auf einen Fünf-Linien-Betrieb ausgerichtet. Dies bedeutet, dass die Sargeinfahrten in die fünf Kremationsofenanlagen jeweils kurz hintereinander erfolgen, mit der Konsequenz, dass die Kremationszeiten nahezu gleichbleibend sind. Sie liegen meist in der Größenordnung von 90 Minuten pro Kremation. Soweit aus den Aufzeichnungen für Kremationslinie 5 erkennbar, unterliegen die täglichen Kremationszahlen nur geringen Schwankungen. Von Freitag und gelegentlichen Ausnahmen

abgesehen, wurden montags bis donnerstags, täglich jeweils 8 bis 9 Kremationen durchgeführt.

Der eigentliche Kremationsprozess lässt sich, wie Bild 29 zeigt, in 3 Phasen untergliedern:

Phase 1: Erwärmung und Abbrand des Sarges von außen

Phase 2: Sargbruch und Kremation

Phase 3: Ausbrand der Kremationsreste.

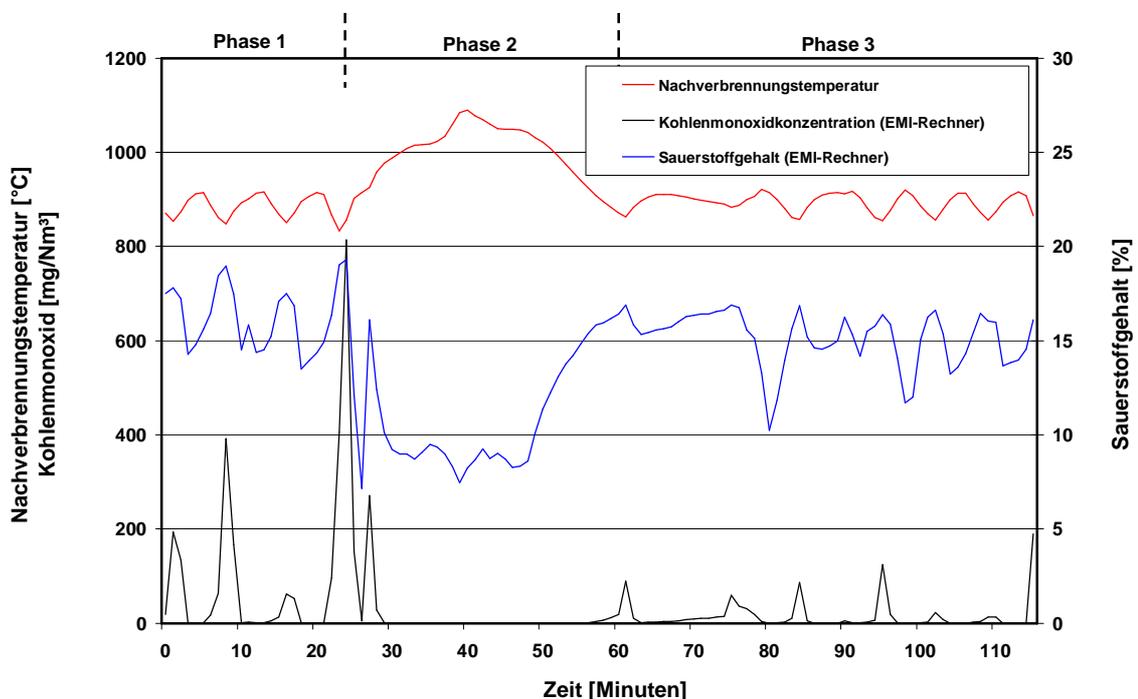


Bild 29: Typischer Kremationsverlauf einer bei einer Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer (10. Sept. 2014)

Die Phase 1 ist im Wesentlichen gekennzeichnet durch die Erhitzung des Sarges über die Strahlungswärme von den vorgewärmten Feuerraumwänden der Hauptbrennkammer. Dies impliziert auch die Wärmeübertragung innerhalb des Ofens von der unterhalb der Hauptbrennkammer angeordneten Nachbrennkammer. Sofern die Temperatur in der Nachbrennkammer größer ist als die in der Hauptbrennkammer, ist der über die Bodenplatte übertragene Wärmestrom für den Kremationsvorgang nicht unerheblich. Die Versorgung des Sargunterbodens mit Verbrennungsluft ist beim Flachbettofen durch den Abstand über die „Sargfüße“ zum Herdboden gegeben. Daher werden im Krematorium München die Sargfüße nicht entfernt.

Der Beginn von Phase 2 (Sargbruch) ist häufig durch eine meist sehr ausgeprägte CO-Spitze gekennzeichnet. Dies lässt sich damit erklären, dass plötzlich eine vergleichsweise große Menge an Vergasungsprodukten freigesetzt wird. Der für die vollständige Oxidation benötigte Sauerstoff wird zumindest lokal in hohem Maße aufgezehrt, das mit einer deutlichen Reduzierung der Sauerstoffkonzentration im Abgas einher geht. Durch die Zunahme der Verbrennungsreaktionen steigt gleichzeitig die Nachverbrennungstemperatur deutlich an. Dieser Vorgang ist qualitativ in Bild 2 mit der Entstehung von „heißem“ CO beschrieben. Anzumerken ist, dass der in Bild 29 aufgezeichnete Sauerstoffverlauf an der Emissionsmessstelle vor Eintritt in den Kamin gemessen wurde. Die korrespondierenden Betriebssauerstoffgehalte nach dem Wärmetauscherturm, die zur Verbrennungsregelung herangezogen werden, liegen je nach Kremationszeitpunkt bis zu 8 % niedriger. In dieser Phase ist der temperaturgeregelte Hauptbrenner in der Regel nicht zugeschaltet.

Die Phase 3 dient lediglich dem weiteren Ausbrand der verbleibenden Kremationsreste und der Aufrechterhaltung der gewünschten Ofentemperaturen. Wie aus dem Verlauf der Nachverbrennungstemperatur in dieser Phase ersichtlich, erfolgt dies durch entsprechende Unterstützung der Brennersysteme in den einzelnen Brennkammern. Nach Abschluss der Kremation wird der verbleibende Ascherest manuell mittels Räumgerät in die räumlich von der Hauptbrennkammer getrennte Resteausbrennkammer geschoben. Dort folgt, analog zum Etagenofen, eine weitere thermische Behandlung der Asche, während parallel die nächste Kremation durchgeführt wird.

6.4. Kohlenmonoxid-Emissionen

Die Untersuchungen im Krematorium München erstreckten sich über den Zeitraum KW37/14 bis KW 43/15. Ohne Berücksichtigung der Aufzeichnungen in der Testphase wurden an Linie 5 insgesamt 1.931 Kremationen durchgeführt und 2.871 Stundenmittelwerte ausgewertet. Einen Überblick gibt Tabelle 7 (vgl. hierzu auch Abschnitt 4.3.).

Krematorium München		Stundenmittelwerte [-]	CO-Grenzwert- überschreitungen		CO-Klassen- Mittelwert [mg/m ³]
			[-]	[%]	
850 °C	Testphase	183	2	1,1	7,4
750 °C	ohne Verbrennungsluftanpassung	122	10	8,2	16,0
750 °C	mit Verbrennungsluftanpassung	623	1	0,2	8,4
650 °C		980	20	2,0	15,2
700 °C		535	40	7,5	20,3
850 °C	Referenz	611	2	0,3	5,9

Tabelle 7: Krematorium München – Überblick Untersuchungsphasen

Zur Bewertung der Güte der CO-Emissionssituation in den einzelnen Untersuchungsphasen werden zunächst die jeweiligen Emissionsklassenverteilung herangezogen (Bild 30). Aufgrund der Klassenverteilung bei 850 °C (Referenz – violett - sowie Testphase – blau -) ist festzuhalten, dass der bestimmungsgemäße Betrieb bei 850 °C keine Auffälligkeiten zeigt. Dies wird auch bestätigt durch die prozentual geringen CO-Grenzwertüberschreitungen und die CO-Klassenmittelwerte unterhalb 10 mg/Nm³. Die Kremationsanlage ist dem Alter entsprechend gut eingestellt und wird fachgerecht betrieben.

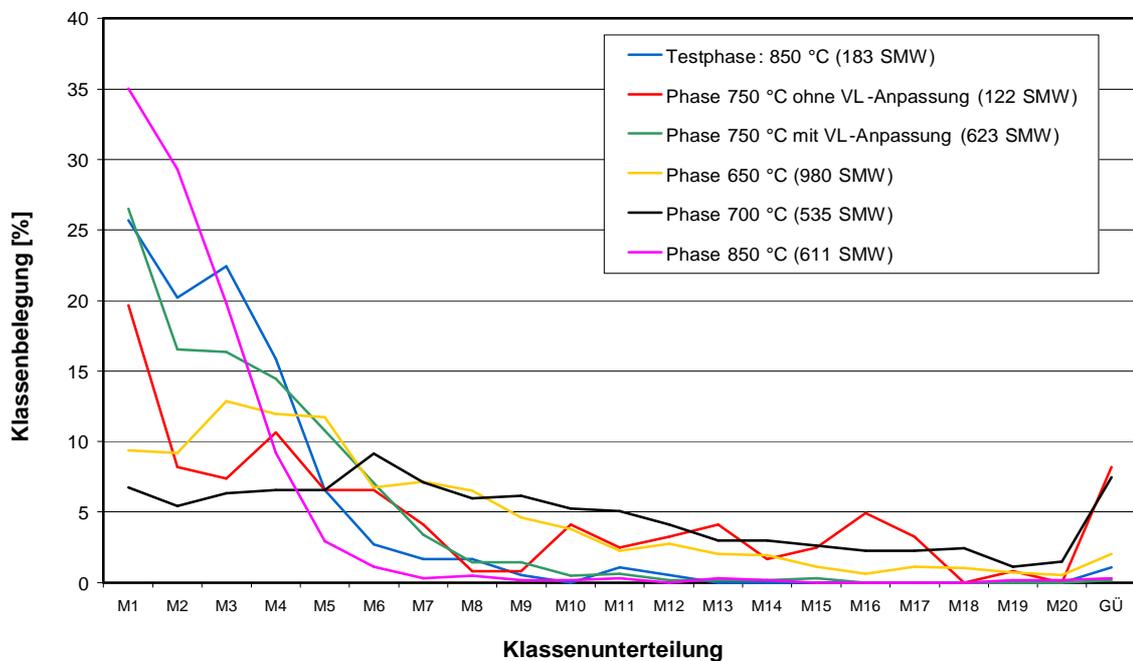


Bild 30: Auswertung der Klassierungsprotokolle

Nach der Absenkung der Nachverbrennungsmindertemperatur auf 750 °C **ohne** Anpassung der Verbrennungsluftverteilung auf die veränderten Betriebsbedingungen, stellte sich eine markante Verschlechterung des gasförmigen Ausbrands ein. In dieser Zeit wurden 122 Stundenmittelwerte (78 Kremationen) erfasst, wobei die CO-Grenzwertüberschreitung bei rund 8 % lag. Ferner wurde eine signifikante Verschiebung der CO-Klassenverteilung zugunsten höherer Klassen festgestellt.

Da zudem am Ende der KW 41/14 ein Defekt an der Herdplatte des Flachbettofens festgestellt wurde, musste der Ofen für zwei Wochen zur Reparatur abgeschaltet werden. Mit Wiederinbetriebnahme wurde die Luftverteilung dahin gehend verändert, dass mehr Verbrennungsluft über die Hauptbrennkam-

mer zugegeben und in der Ascheausbrennkammer reduziert wurde. Damit wurde die Verbrennung in der Hauptbrennkammer intensiviert.

Die im Anschluss daran durchgeführte Untersuchungsphase mit einer Mindesttemperatur von 750 °C in der Nachbrennkammer beinhaltete 623 Klassierungsmittelwerte, wobei lediglich eine CO-Grenzwertverletzung (ca. 0,2 %) festgestellt wurde. Wie Bild 34 zeigt, stellte sich eine günstige CO-Klassenverteilung ein, die ausreichend Reserven für einen stabilen Kremationsbetrieb mit reduzierter Nachverbrennungstemperatur beinhaltet.

Nach der weiteren Temperaturabsenkung auf 650 °C wurde vom Betriebspersonal ein „unruhiger“ Verbrennungsablauf beobachtet, der sich auch in der Emissionsklassenzuordnung widerspiegelt. Nach wie vor sind zwar höhere Belegungen bei den niedrigen Emissionsklassen feststellbar; insgesamt zeigt sich aber eine Verschiebung zu höheren Emissionsklassen. Damit werden die Systemreserven gemindert, obwohl die sich über den Betrachtungszeitraum von 980 Stundenmittelwerten einstellende CO-Grenzwertüberschreitung „nur“ bei 2,0 % liegt. Hierbei ist anzumerken, dass die Emissionsmesswerterfassung zwar eignungsgeprüft ist und Bestandsschutz genießt, jedoch nicht der aktualisierten VDI-Richtlinie 3891 /3/ entspricht. Es ist davon auszugehen, dass der Einsatz von CO-Analysatoren, die auch CO-Spitzenkonzentrationen bis zu 3.000 mg/m³ erfassen, CO-Grenzwertüberschreitungen von mehr als 3 % in diesem Betriebszustand aufzeigen. Des Weiteren wurde vom Betriebspersonal festgestellt, dass die Urnenasche tendenziell mehr unverbrannte Aschebestandteile aufwies.

Eine mögliche Erklärung hierfür lässt sich aus den veränderten Wärmeströmen am Herdboden zwischen Haupt- und Nachbrennkammer ableiten (Bild 31). Betreiberinformationen zufolge ist die Einstelltemperatur für die Hauptbrennkammer auf 700 °C festgesetzt. Sofern die Nachverbrennungstemperatur größer ist als die in der Hauptbrennkammer ergibt sich ein zusätzlicher Wärmestrom von der Nachbrennkammer in die Hauptbrennkammer. Dieser unterstützt den Kremationsvorgang insbesondere in den Phasen 1 und 3.

Vor diesem Hintergrund war zu erwarten, dass bei sicherer Einhaltung der CO-Emissionskonzentrationen die Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer bei dieser Kremationslinie auf einen Wert zwischen 650 °C und 750 °C abgesenkt werden kann. Um dies weiter zu prüfen, wurde die Einstellung mit einer Mindesttemperatur von 700 °C in der Nachbrennkammer gewählt. Das vom Betriebspersonal bei diesen Einstellungen wahrgenommene sehr „unruhige“ Brennverhalten zeigt sich auch aus den Datenaufzeichnungen am Beispiel von Bild 32. So war bei diesen Bedingungen eine Verlängerung der Phase 1 bis zum vollständigen Sargbruch festzustellen. Gleichzeitig trat eine signifikante Verschlechterung der CO-Emissionen auf, die nicht nur zu häufigeren Grenzwertüberschreitungen führte, sondern auch bei der CO-Klassenver-

teilung (siehe Bild 30 - schwarze Linie -) eine deutliche Verschiebung zu höheren Klassen zur Folge hatte.

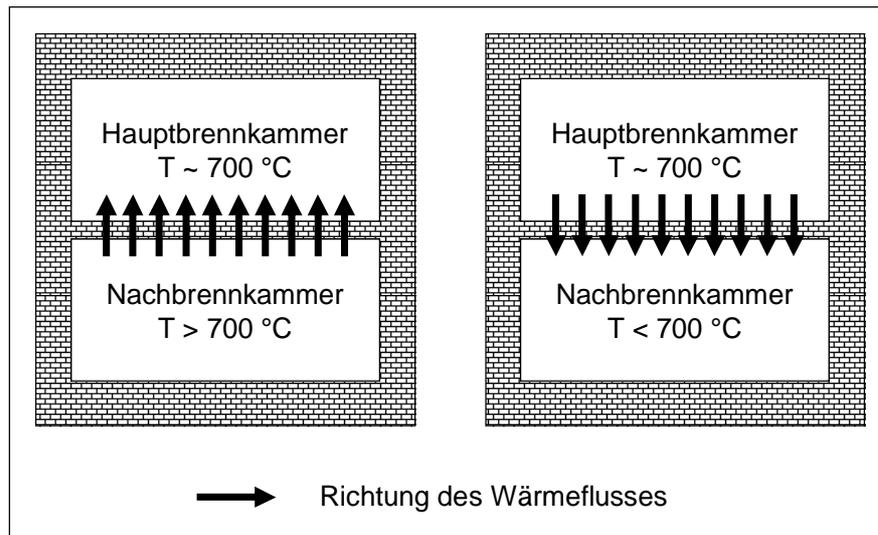


Bild 31: Schematische Darstellung des Wärmeflusses bei unterschiedlichen Temperaturen in der Haupt- und Nachbrennkammer

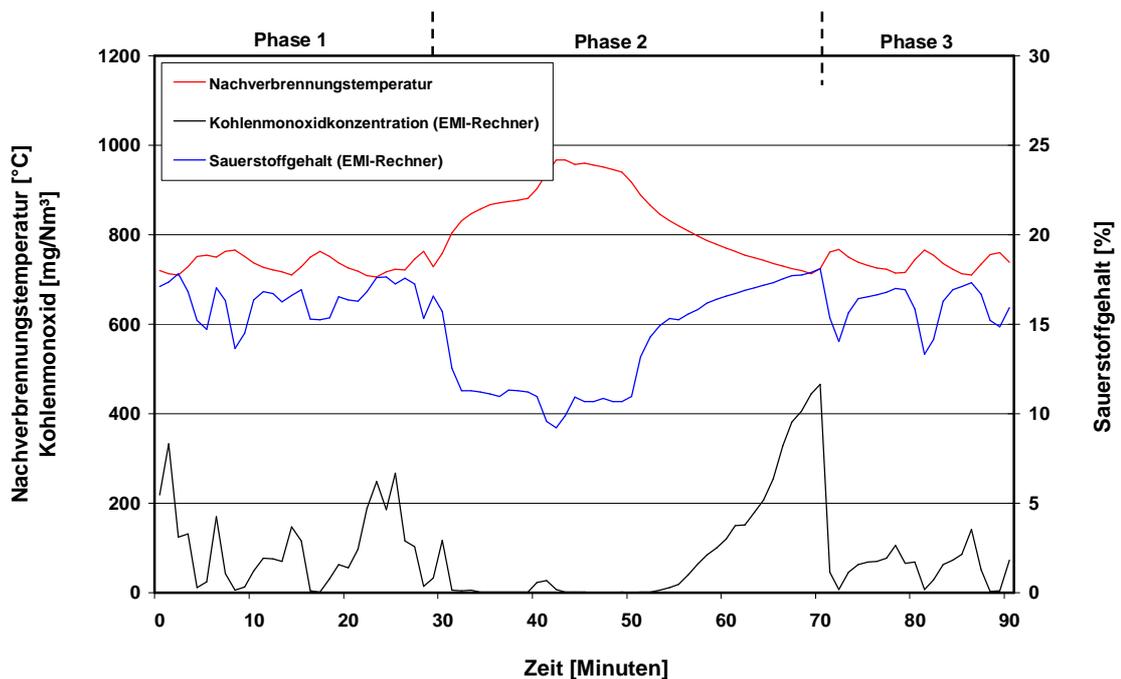


Bild 32: Kremationsverlauf einer bei einer Mindesttemperatur von 700 °C in der Nachbrennkammer (27. Juli 2015)

Für den untersuchten Flachbettofen im Krematorium München kann man demnach festhalten, dass das Limit für diesen Ofen in Verbindung mit der regelungstechnischen Parametrierung bei etwa 700 bis 750 °C liegt. Maßgebend erscheinen hierfür die Temperaturverhältnisse in der Haupt- und Nachbrennkammer und die sich dabei einstellenden Wärmeflüsse (vgl. Bild 31). Es ist beim Flachbettofen darauf zu achten, dass über die Herdplatte, die Wärmezufuhr von unten sicher gestellt ist.

6.5. Emissionskonzentrationsmessungen im Roh- und Reingas

In KW 04/15 sowie in KW 21/15 erfolgten die diskontinuierlichen Emissionsmessungen im Roh- und Reingas bei den Mindesttemperaturen in der Nachbrennkammer von 750 °C respektive von 650 °C.

Die Probenahmestelle „Rohgas“ befindet sich nach dem Zyklonvorabscheider im vertikal verlaufenden Abgasrohr (Bild 33). Die freie Einlaufstrecke liegt bei ca. 0,40 m (erforderlich • 1,75 m); die freie Auslaufstrecke beträgt 0,15 m (erforderlich • 0,70 m). Sie entspricht daher nicht den Anforderungen der DIN EN 15259. Die notwendigen Anforderungen an das Strömungsprofil gemäß der DIN EN 15259 wurden erfüllt, so dass sie nach Einschätzung des Messinstituts als geeignet angesehen werden kann. Wie das Messinstitut ferner feststellte sind die Messergebnisse hinsichtlich der Betriebszustände während der Messungen plausibel und repräsentativ.



Bild 33: Probenahmestellen an Linie 5 des Krematoriums München
(links: Rohgas; rechts: Reingas; Bildquelle: IUTA)

Für die Beprobung „Reingas“ wurde die bereits bei den früheren wiederkehrenden Emissionsmessungen Probenahmestelle verwendet. Sie befindet sich ebenfalls innerhalb des Betriebsgebäudes im vertikal verlaufenden Abgasrohr vor dem Übergang zum eigentlichen Abgaskamin (Bild 33). Die freie Einlaufstrecke liegt bei ca. 2,00 m (erforderlich • 1,75 m); die freie Auslaufstrecke

beträgt 1,10 m (erforderlich • 0,70 m). Sie entsprechen somit den Anforderungen der DIN EN 15259. Des Weiteren sind die notwendigen Anforderungen an das Strömungsprofil gemäß der DIN EN 15259 erfüllt, so dass die Probenahmestelle als geeignet angesehen werden kann. Auch für die Reingasmessungen wurde vom Messinstitut konstatiert, dass die Messergebnisse hinsichtlich der Betriebszustände während der Messungen plausibel und repräsentativ sind.

Einen Überblick über die im Zuge der beiden Messkampagnen gewonnenen Emissionsmessergebnisse gibt Tabelle 8. In diesen Überblick sind die Emissionsmessergebnisse der letzten wiederkehrenden Emissionsmessung (Jan 2014) als Referenzmessung einbezogen.

Krematorium München	Gesamtkohlenstoff - C _{ges} - [mg/Nm ³] ¹⁾	Staub [mg/Nm ³] ¹⁾	Dioxine/Furane - PCDD/F - [ng-TE/Nm ³] ²⁾	Quecksilber - Hg - [mg/Nm ³] ³⁾
27.BImSchV	20	10	0,1	-
850 °C Reingas (Dekra-Jan 2014)	1,9 (5,1)	< 0,1	0,0028	keine Messung
750 °C Rohgas (IUTA-Jan 2015)	siehe Reingas	135 (198)	1,00 1,50	0,26 (0,01 - 1,62)
750 °C Reingas (IUTA-Jan 2015)	1,8 (2,9)	0,13 (0,2)	0,0029 0,0019	0,04 (0,01 - 0,20)
650 °C Rohgas (IUTA-Mai 2015)	siehe Reingas	236 (568)	1,31 1,28	0,034 (0,01 - 0,14)
650 °C Reingas (IUTA-Mai 2015)	1,8 (8,3)	0,44 (0,9)	0,0047 0,0025	0,01 (<0,01 - 0,02)

Hinweise:

¹⁾ Mittelwert (Maximalwert)

²⁾ PCDD/PCDF: Einzelwerte, 6-h-Beprobung

³⁾ Quecksilber: Einzelwerte, 1-h-Beprobung, partikelgebunden und gasförmig

Tabelle 8: Krematorium München – Überblick Emissionsmessungen

Die einzelnen Schadgaskonzentrationen lassen sich wie folgt bewerten:

- Gesamtkohlenstoff:

Vergleichbar zur Kohlenmonoxidkonzentration korrespondiert der Gesamtkohlenstoffgehalt im Roh-/Reingas mit den Verbrennungsbedingungen im Kremationsofen. Ein guter Gasausbrand, charakterisiert durch geringe CO-Konzentrationen, führt ebenfalls zu niedrigen Gesamtkohlen-

stoffkonzentrationen. Im Mittel lagen die festgestellten Gesamtkohlenstoffkonzentrationen bei weniger als 10 % des Grenzwertes der 27. BImSchV; lediglich ein Stundenmittelwert der 650 °C – Phase zeigte einen erhöhten Wert der dennoch einen deutlichen Sicherheitsabstand zum Grenzwert beinhaltete. Im Vergleich zur Referenzmessung waren durch die Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer keine Einflüsse bei Gesamtkohlenstoff erkennbar.

- **Staub:**

Die Rohgasstaubbelastung hängt maßgeblich von den Rauchgasgeschwindigkeiten im Ofen und den nachfolgenden Bereichen ab. Die gemessenen Rohgasstaubbelastungen entsprechen der erwarteten Bandbreite, die bis zu etwa 1 g/Nm³ reichen können. Die gemessenen Reingasstaubgehalte von weniger als 1 mg/Nm³ belegen, dass das vorhandene Gewebefilter keine Defekte aufweist, wodurch eine sehr gute Staubabscheidung erzielt wird.

- **Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Furane (PCDD/F):**

Die gemessenen PCDD/F-Rohgaswerte liegen im Vergleich zu den Messungen in den hier untersuchten Krematorien sowie zu den Messergebnissen der Untersuchungen im Krematorium Düsseldorf (vgl. /1/) in der vergleichbaren Größenordnung. Da die Probenahmen nach der Abgaskühlung erfolgten, kann man festhalten, dass die primärseitigen Voraussetzungen auch bei reduzierter Nachverbrennungstemperatur für ein niedriges Dioxin-/Furan-Potential auch in diesem Fall gegeben sind. Dies gilt auch unter Berücksichtigung der schwierigen messtechnischen Rahmenbedingungen, die bei der Rohgasmessung im Krematorium vorlagen.

Mit der Abgasreinigung, die in diesem Fall als KUV-Verfahren (vgl. Abschnitt 3.3) ausgeführt ist, werden PCDD/F, angegeben als Toxizitätsäquivalent, mit über 99 % abgeschieden. Zum Einen spricht dies für eine sehr gute Additivvermischung mit dem Rauchgasstrom im Kugelrotorreaktor und zum Anderen für die hohe Qualität des Gewebefilters mit einer Partikelabscheidung (Stäube und beladene Additive) von deutlich über 99,5 %.

- **Quecksilber:**

In Analogie zu den vorgenannten Messungen im Krematorium Berlin lassen auch die im Krematorium München gemessenen Quecksilberrohgaskonzentrationen den Schluss zu, dass in Einzelfällen, abhängig vom Amalgamgehalt des zu kremierenden Leichnams, sehr hohe Konzentrationen (hier: 1,62 mg/Nm³) auftreten können. Bei den zeitgleich durchgeführten Reingasmessungen ergab sich immerhin noch eine Größenord-

nung von 0,2 mg/Nm³ (Tabelle 9), woraus sich eine Abscheideleistung von etwa 87 % errechnet. In anderen Fällen ergeben sich auch höhere Abscheideraten, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Rohgasbeprobung mit Messunsicherheiten behaftet ist (s. oben) und in vielen Fällen die Rohgaskonzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze von 0,1 mg/Nm³ lag.

Messphase 1 - KW 04/15 750 °C		Messphase 2 - KW 21/16 650 °C	
Rohgas [mg/Nm ³]	Reingas [mg/Nm ³]	Rohgas [mg/Nm ³]	Reingas [mg/Nm ³]
0,01	0,01	0,01	0,01
0,01	0,01	0,01	0,01
0,01	0,01	0,01	0,01
0,01	0,01	0,01	0,01
1,62	0,20	0,02	0,01
0,04	0,01	0,14	0,01
0,39	0,11	0,03	0,01
0,04	0,01	0,02	0,02
0,06	0,01	0,05	0,01
0,39	0,02	0,04	0,01

Tabelle 9: Quecksilber-Einzelmessungen beider Messreihen

In wieweit die Quecksilberabscheidung verbessert werden kann (z. B. durch schwefeldotierte Additive) war nicht Gegenstand der Untersuchungen und lässt sich aufgrund der geringen Datenbasis zum derzeitigen Stand nicht bewerten.

6.6. Gasverbrauch

Der Gasverbrauchsdaten wurde vom Betriebspersonal durch regelmäßiges Ablesen der Gasuhren erfasst (vgl. Abschnitt 6.1). Aus diesen Aufzeichnungen und den ebenfalls erfassten täglichen Kremationszahlen wurden die kremationsbezogenen täglichen Gasverbrauchswerte für die Haupt- und Nachbrennkammern ermittelt. Der Bezug für die nachfolgenden Betrachtungen steht die Referenzphase bei mindestens 850 °C in der Nachbrennkammer dar (Bild 34).

In dem betrachteten Zeitraum wurde die Kremationslinie sehr gleichförmig betrieben. Die täglichen Kremationszahlen lagen montags bis donnerstags nahezu immer bei 9 Kremationen. Lediglich freitags wurde dem Bedarf entsprechend weniger Kremationen durchgeführt. Nach dem Abkühlen des Ofens über das Wochenende errechneten sich montags höhere spezifische Gasverbrauchswerte und zwar sowohl für die Haupt- als auch Nachbrennkammer.

Der gesamte spezifische Gasverbrauch errechnete sich für die Referenzphase zu 26,0 m³ Erdgas pro Kremation. Dabei ist der Gasverbrauch für das wöchentliche und tägliche Aufheizen des Ofens enthalten.

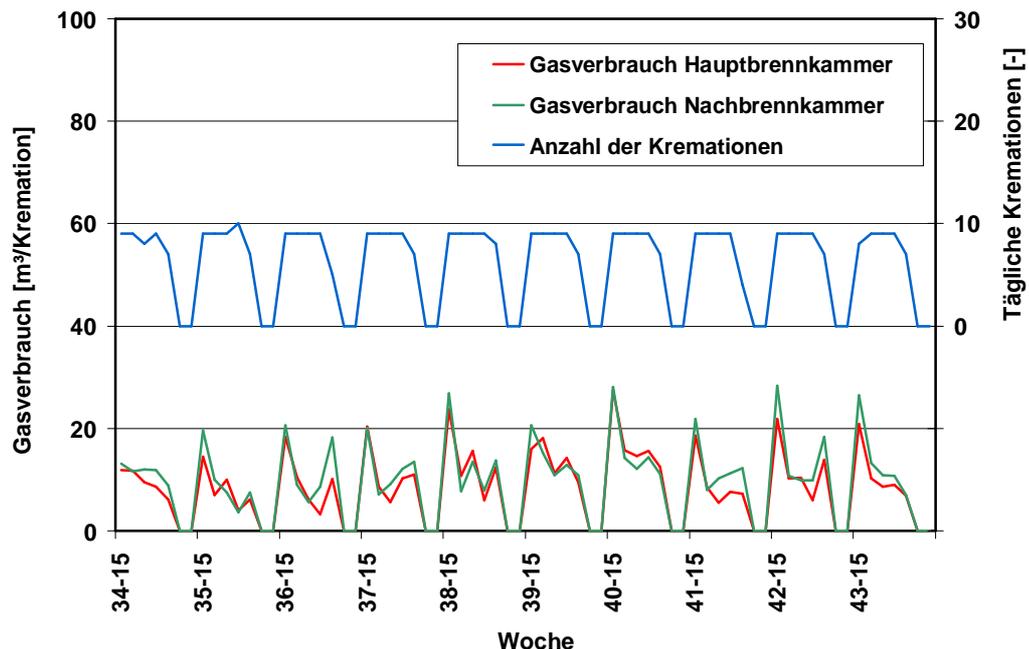


Bild 34: Kremationsbezogener Gasverbrauch bei mindestens 850 °C in der Nachbrennkammer

Die Auswirkung der reduzierten Nachverbrennungstemperatur bei mindestens 750 °C zeigt Bild 35. Wie bei der Bewertung der CO-Emissionen bereits ausgeführt, wurde nach den ersten beiden Wochen (KW 40-14 und KW 41-14) der Kremationsofen für eine Erneuerung der Herdplatte abgestellt. Am Donnerstag und Freitag der KW 44-14 erfolgte der Aufheizbetrieb, wobei an beiden Tagen auch Kremationen durchgeführt wurden. Die sich ergebenden kremationsbezogenen Gasverbrauchswerte liegen an diesen beiden Tagen nachvollziehbar deutlich höher als üblich. Nicht ganz so ausgeprägt sind die Auswirkungen zum Jahresende (KW 51-14 und KW 52-14), die durch den temporären Anlagenstillstand aufgrund der Weihnachtsfeiertage verursacht wurden.

Im Vergleich zur Referenzphase bei 850 °C zeigt sich dennoch eine deutliche Reduzierung des Gasverbrauchs in der Nachbrennkammer, der jedoch teilweise durch einen leicht erhöhten Gaseinsatz in der Hauptbrennkammer kompensiert wurde. Diese Effekte sind durch Wärmeströme im Mauerwerk des Ofens zu erklären

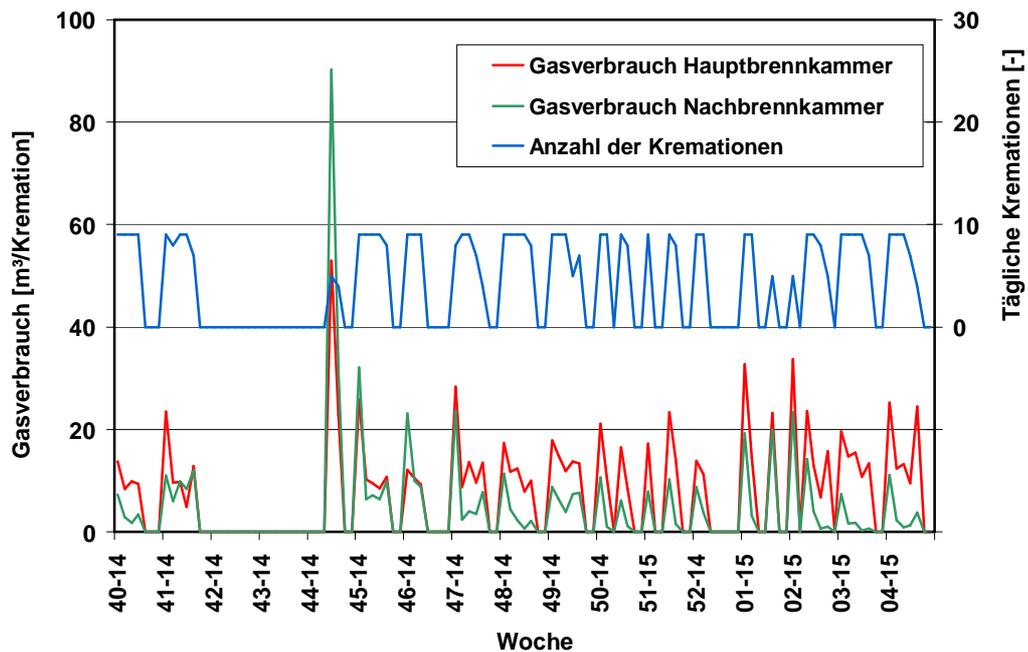


Bild 35: Kremationsbezogener Gasverbrauch bei mindestens 750 °C in der Nachbrennkammer

Unter Einbeziehung des Gasverbrauchs für die Ofenaufheizung nach einem längeren Stillstand errechnete sich der gesamte spezifische Gasverbrauch für diese Phase zu 24,1 m³ Erdgas pro Kremation. Im Vergleich zur Referenzphase bei 850 °C würde sich eine Energieeinsparung von nur 7,2 % ergeben. Klammert man die Ofenaufheizung in KW 44-14 einschließlich der an den beiden Tagen durchgeführten Kremationen aus, so errechnet sich der spezifische Gasverbrauch zu 22,6 m³ Erdgas pro Kremation, das einer Energieeinsparung gegenüber der Referenzphase von 13,1 % entspricht.

Die Auswirkungen einer weiteren Absenkung der Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer auf 650 °C sind für den Gasverbrauch in Bild 36 dargestellt. Die gesamte Untersuchungsphase ist durch einen weitgehend gleichmäßigen Kremationsbetrieb gekennzeichnet. Der Gasverbrauch in der Nachbrennkammer ist markant gesunken, wohingegen ein deutlicher Anstieg des Gasverbrauchs in der Hauptbrennkammer gegenüber der 750 °C-Phase sowie der Referenzphase zu verzeichnen war. Die im Ofenmauerwerk auftretenden Wärmeströme von der Haupt- zur Nachbrennkammer sind in dieser Untersuchungsphase bei 650 °C sehr ausgeprägt und untermauern die schematische Darstellung in Bild 31. Diese Effekte wurden auch bei den Untersuchungen am Etagenofen des Krematoriums Düsseldorf beobachtet /1/. Der in dieser Phase errechnete mittlere Gasverbrauch ergab sich zu 17,4 m³ Erdgas pro Kremation. Gegenüber der Referenzphase stellte sich eine Minderung des Gasverbrauchs um 33,1 % ein.

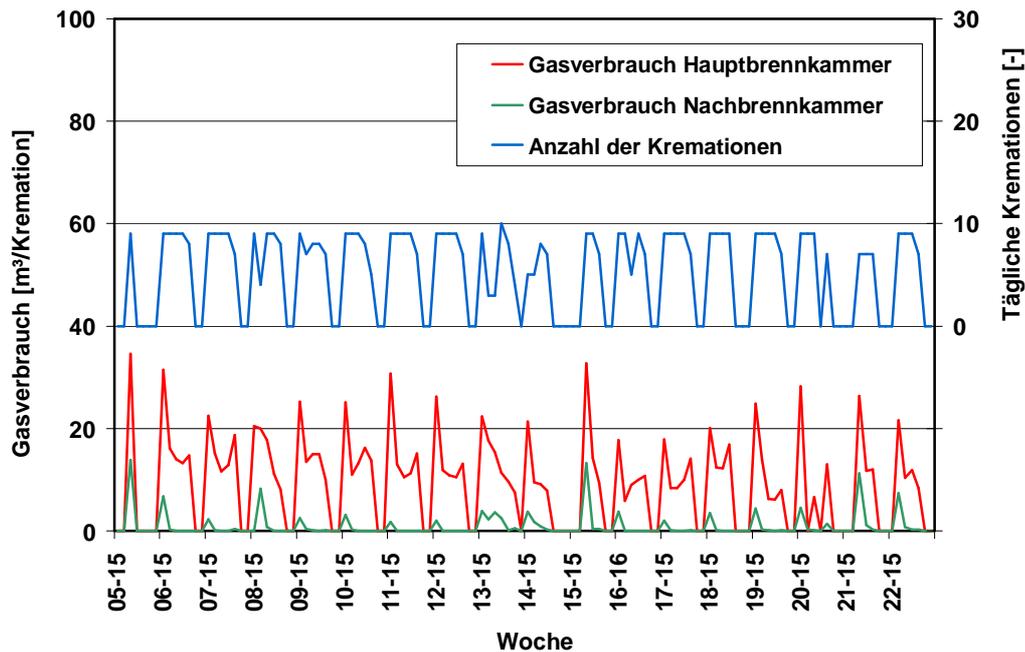


Bild 36: Kremationsbezogener Gasverbrauch bei mindestens 650 °C in der Nachbrennkammer

Die zusätzlich durchgeführte Untersuchungsphase bei einer Mindesttemperatur von 700 °C zeigt Bild 37. Auch in dieser Phase gab es einwöchigen Stillstand durch eine notwendig gewordene Ofenreparatur. Bemerkenswert ist, dass in dieser Untersuchungsphase auch der Energieeinsatz in der Hauptbrennkammer deutlich geringer ist als bei der zuvor beschriebenen 650 °C – Phase. Vor diesem Hintergrund sind die in Abschnitt 6.4. beschriebene „unruhige“ Verbrennungsverhalten und die erhöhten CO-Emissionswerte plausibel. Der in dieser Untersuchungsphase festgestellte Gasverbrauch ergab sich zu 13,4 m³ Erdgas pro Kremation, das einer Energieeinsparung gegenüber der Referenzsituation von 48,5 % entspricht. In der Summe ist festzuhalten, dass in dieser Betriebsphase der Ofen für einen ordnungsgemäßen Kremationsbetrieb in der Gesamtheit zu „kalt“ war. Das Limit der Temperaturabsenkung war bei diesen Einstellungen überschritten.

Ein plausible Erklärung, weshalb das Betriebsverhalten bei der Einstellung von 700 °C als Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer deutlich schlechter war als bei der Betriebsphase mit 650 °C in der Nachbrennkammer konnte nicht gefunden werden.

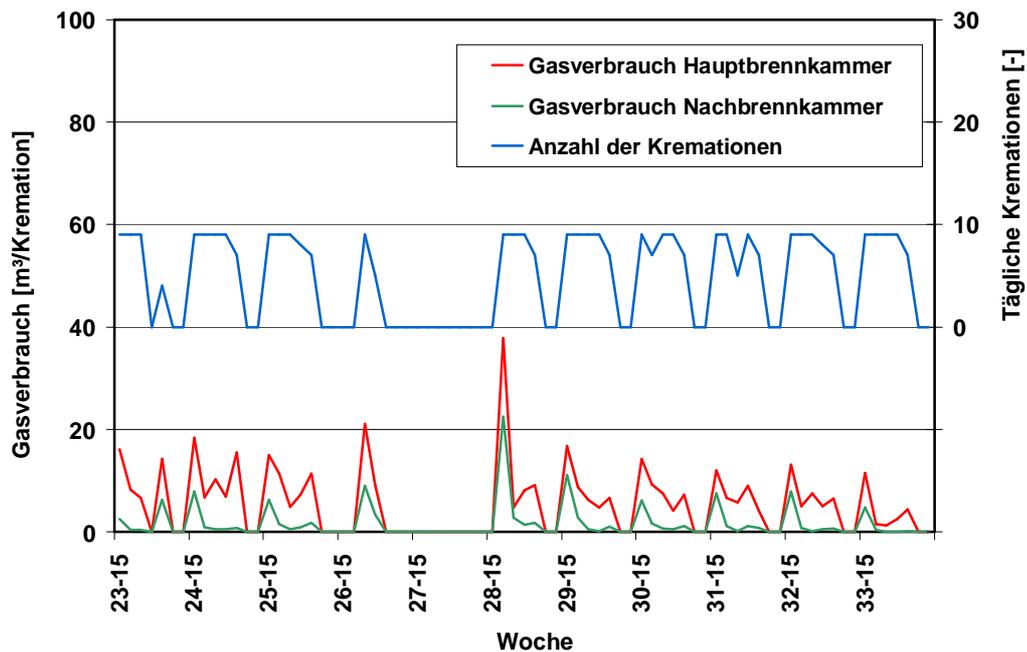


Bild 37: Kremationsbezogener Gasverbrauch bei mindestens 700 °C in der Nachbrennkammer

6.7. Zusammenfassende Bewertung in Bezug auf das Gesamtprojekt

Ähnlich zu den Ausführungen im Krematorium Berlin-Baumschulenweg waren auch für die untersuchte Kremationslinie 5 im Krematorium München Grenzen der Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer feststellbar. Diese liegen ebenfalls im Bereich von etwa 750 °C, vorausgesetzt, dass die Verbrennungsluftführung dieser Betriebsweise angepasst ist (Tabelle 10). Auch für den Flachbettofen waren die für einen „Chargenbetrieb“ charakteristischen Einflüsse (Sargeinfahrt, Ascheberäumung der Herdplatte, usw.) auf die CO-Emission feststellbar. Die Temperaturabsenkung wirkte sich, wie nicht anders zu erwarten, auch auf den Gasverbrauch aus. Aus den festgestellten Reduktionsraten lassen sich keine weiteren Rückschlüsse auf den Einfluss des Ofensystems schließen. Auch für diesen untersuchten Kremationsofen ist festzuhalten, dass die Möglichkeiten und Grenzen der Temperaturabsenkung auf die CO-Emissionen und den Gasverbrauch von vielen Faktoren abhängen und einer Einzelfallprüfung zu unterziehen sind.

Auswirkungen auf die Konzentrationen Gesamtkohlenstoff und PCDD/F konnten auch bei abgesenkter Nachverbrennungstemperatur nicht festgestellt werden. Auch erfüllt die installierte Abgasreinigungstechnologie die gewünschten Adsorptionsgrade, so dass in allen Betriebsphasen Emissionsgrenzwerte der

27. BImSchV für Staub und PCDD/F sowie Gesamtkohlenstoff mit großem Sicherheitsabstand eingehalten werden.

Krematorium München	Kohlenmonoxid - CO - [mg/Nm ³] ¹⁾	mittlerer Gasverbrauch [m ³ /Kremation]	Reduzierung Gasverbrauch [%] ²⁾
Referenzphase 850 °C	5,9 (2/611)	26,0	-
750 °C	16,0 (10/122) ohne VL-Anpassung	22,6	13,1
	8,4 (1/623) mit VL-Anpassung		
650 °C	15,2 (20/980)	17,4	33,1
zusätzliche Phase 700 °C	20,3 (40/535)	13,4	48,5

Hinweis:

¹⁾ CO: Klassenmittelwert (GÜ/Messwerte)

²⁾ Bezug: Referenzphase bei 850 °C

Tabelle 10: Überblick über die CO-Emission und Gasverbrauch bei reduzierter Nachverbrennungstemperatur

Die Quecksilbermessungen ergaben auch für Linie 5 des Krematoriums München einzelne signifikant erhöhte Rohgaskonzentrationswerte, die sich auch im Reingas bemerkbar machten.

7. Ergebnisse im Krematorium Pforzheim

7.1. Betriebliche Datenerfassung

Bei der Versuchsplanung hat man sich aufgrund der Erfahrung des Betreibers mit hohen täglichen Kremationszahlen darauf verständigt, auf die Ablesung des Gaszählers zwischen den einzelnen Kremationen zu verzichten. Zur manuellen tabellarischen täglichen Betriebsdatenerfassung gehörten demnach:

- Beginn des Aufheizbetriebes und der einzelnen Kremationen (Sargeinfahrt),
- Leichnam (männlich / weiblich),
- Sarggewicht,
- Sargoberfläche (lackiert / nicht lackiert),
- Ablesung Gasverbrauch am Hauptzähler zu Beginn / Ende der jeweiligen Tagesschicht.

7.2. Kontinuierliche Messdatenerfassung

Bei der installierten kontinuierlichen Emissionsmesswerterfassungsanlage handelt es sich um ein von der Firma Afriso GmbH geliefertes und konfigurierbares System, das in einem Messschrank untergebracht ist (Bild 38). Zur Messung der CO- und O₂-Konzentrationen im Reingas werden die Gase über eine beheizte Messgasleitung abgesaugt und einer Messgasaufbereitung, u. a. bestehend aus Messgaskühler mit Kondensatabscheidung, Analysenfilter und Messgaspumpe zugeführt.



Bild 38: Emissionsauswertesystem

Zur Messung der CO- und O₂-Konzentrationen im Messgasstrom kommen beim eingesetzten und eignungsgeprüften Gasanalysator (Ultramat 23, Firma Siemens) zwei voneinander unabhängige Messverfahren zur Anwendung. Die CO-Messzelle basiert auf der berührungslosen selektiven Infrarotadsorptionsmessung, d. h. es wird die Eigenschaft von Kohlenmonoxid genutzt bei bestimmten Wellenlängen (IR-Band) Strahlung zu adsorbieren. Der Adsorptionsgrad der IR-Strahlung entspricht der CO-Konzentration des Messgases. Das installierte CO-Messgerät entspricht den Anforderungen der aktuellen VDI-Richtlinie 3891 und verfügt über zwei automatisch umschaltbare Messbereiche 0 bis 150 mg/m³ sowie 0 bis 3.000 mg/m³. Die Sauerstoffmessung erfolgt nach dem Prinzip der Brennstoffzelle, indem die in der Brennstoffzelle durch Sauerstoff ausgelöste chemische Reaktion einen elektrischen Strom zwischen Anode und Kathode erzeugt, der ein Maß für die Sauerstoffkonzentration darstellt.

Die Messwertaufzeichnung erfolgt im Messwertrechner (Emi3000, Firma ITBK). Aus den im Sekundentakt erfassten CO- und O₂-Konzentrationen werden Minutenmittelwerte gebildet, die zur Auswertung verwendet wurden. Darüber hinaus erfolgte entsprechend den Vorgaben der VDI 3891 die Erfassung und Klassierung der Stundenmittelwerte, die ebenfalls im Zuge dieser Untersuchung herangezogen werden.

Die tägliche Messwerterfassung erfolgt über ein Freigabesignal, das vom Betreiber mit der ersten Kremation ausgelöst wird. Auch die Abschaltung der Emissionsmesswerterfassung erfolgt manuell.

7.3. Betriebsverhalten und betriebstechnische Besonderheiten

Die Betriebsweise im Krematorium Pforzheim ist während des gesamten Untersuchungszeitraumes durch eine hohe tägliche Kremationsleistung gekennzeichnet, so dass Kremationszahlen von über 30 Kremationen am Tag keine Seltenheit darstellen. Im Bedarfsfall wird die Kremationslinie nahezu im 24-Stundenbetrieb genutzt. Dies hat zur Konsequenz, dass die Kremationszeit teilweise unter 40 Minuten liegt. Beispielhaft zeigt Bild 39 den Tagesverlauf am 27.1.2015 (Dienstag), mit insgesamt 29 Kremationen und einer kurzen nächtlichen Unterbrechung von etwa 3 Stunden.

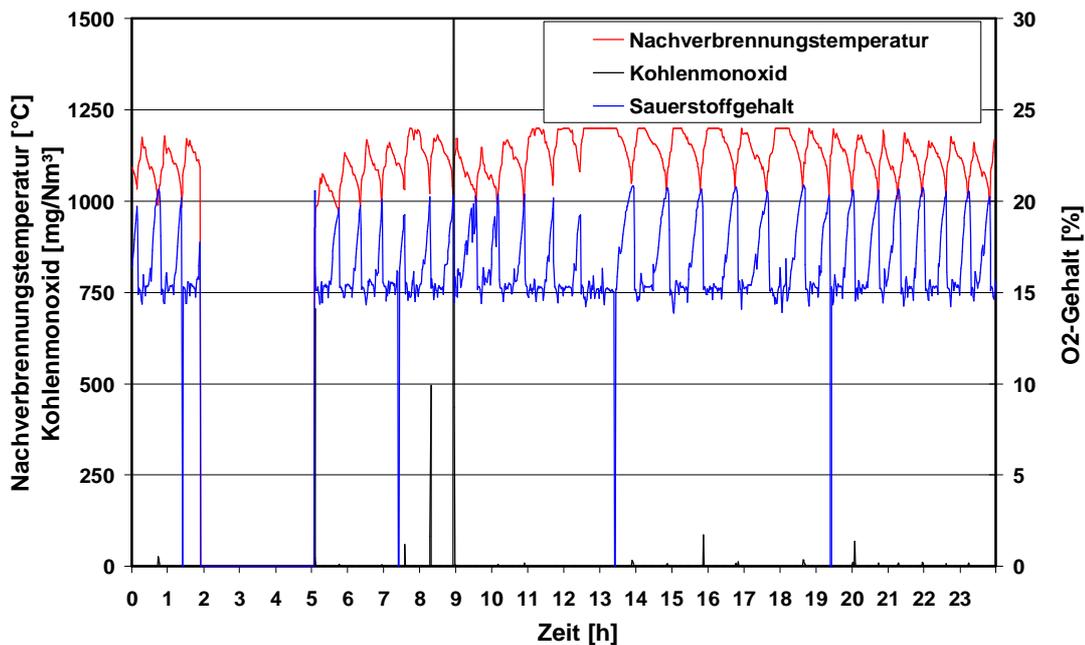


Bild 39: Aufzeichnungen des Emissionsmesswertrechners am 27.1.2015

Die an diesem Dienstag kremierten Särge zeigten keine Auffälligkeiten; das mittlere Sarggewicht lag bei etwa 110 kg. In der Zeit von 12 Uhr 25 bis 13 Uhr 48 wurde ein Sarg mit einem Gewicht von 194 kg eingeäschert, der eine deutliche Verlängerung der Kremationsdauer zur Folge hatte. Die Nachverbrennungstemperatur lag bei dieser Kremation nahezu über die gesamte Dauer oberhalb des Temperaturmessbereiches von 1200 °C. Es darf davon ausgegangen werden, dass in der Nachbrennkammer zeitweise Temperaturen von 1400 °C und mehr vorlagen. Angesichts der sich einstellenden Nachverbrennungstemperatur von meist über 1000 °C ist es nicht überraschend, dass an derartigen Betriebstagen kein Gas zur Aufrechterhaltung der Mindesttemperatur von, in diesem Fall, 750 °C erforderlich war.

Das CO-Emissionsprotokoll lieferte an diesem Tag 20 CO-Stundenmittelwerte der Klasse M1 (0 bis 2,5 mg/m³) und eine der Klasse M16 (37,5 bis 40 mg/m³), obwohl in der Zeit von 8.00 bis 9.00 Uhr zwei markante kurzzeitige CO-Konzentrationsspitzen von 495 und 3573 mg/m³ (Emissionsmesswertrechner) festzustellen waren (vgl. Bild 39). Derartige CO-Emissionsspitzen treten häufig bei der Sargeinfahrt, dem Abräumen der Asche oder in Verbindung mit dem Sargbruch auf. Wenn nun, wie es bei der Betriebsweise mit kurzen Kremationszeiten im Krematorium Pforzheim der Fall ist, mehrere derartige Ereignisse innerhalb einer Stunde (Integrationszeit des Messwertrechners) auftreten, so können selbst bei guter Luft- und Rauchgasführung höhere CO-Klassenbelegungen bzw. CO-Grenzwertverletzungen nicht ausgeschlossen werden.

Für die in diesem Vorhaben angestrebte Untersuchung bei reduzierter Nachverbrennungstemperatur ist daher vor allem der Kremationsbetrieb bei noch nicht vollständig erwärmtem Ofen, d. h. zum Wochenanfang, von Bedeutung.

Nachfolgend werden die ersten beiden Stunden des Kremationsbetriebes am 30.3.2015 betrachtet, da dieses Zeitfenster in den in Abschnitt 7.4. detailliert beschriebenen diskontinuierlichen Emissionsmessungen enthalten ist (Bild 40). Nach den manuellen Betriebsaufzeichnungen an diesem Tag mit den jeweiligen Sargeinfahrten um 6:59 Uhr (Sarggewicht: 160 kg), 8:03 Uhr (Sarggewicht: 90 kg) und 8:38 Uhr (Sarggewicht: 87 kg) stellten sich CO-Spitzen kurz nach der jeweiligen Sargeinfahrt ein. Sie gehen mit erhöhten Sauerstoffgehalten im Reingas einher. Wie auch bei der Ergebnisdarstellung in den Krematorien Berlin und München handelt es sich bei dem angegebenen Sauerstoffverlauf um den an der Emissionsmessstelle.

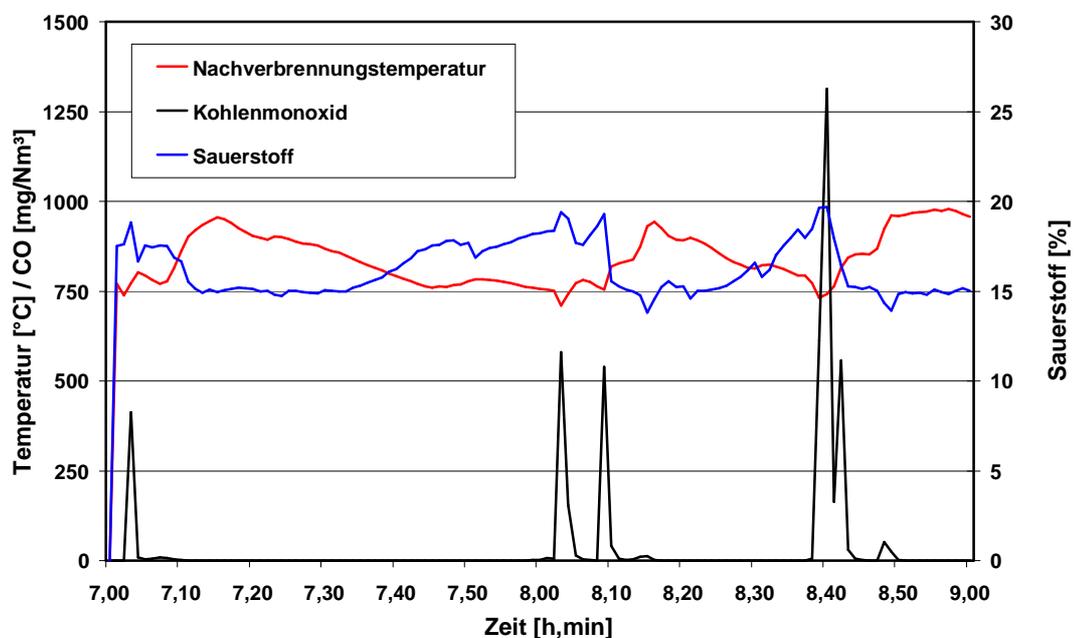


Bild 40: Aufzeichnungen des Emissionsmesswertrechners am 30.3.2015

7.4. Auswirkungen des Betriebsverhaltens auf die CO-Emissionen

Die Datenauswertung der Kremationsanlage Pforzheim erfolgte ebenfalls auf der Grundlage der VDI Richtlinie 3891 in Verbindung mit der Bundeseinheitlichen Praxis bei der Emissionsüberwachung. Es wurden die manuellen Datenaufzeichnungen (gemäß Abschnitt 7.1) mit den täglichen Aufzeichnungen des Emissionsmesswertrechners und der Klassierung der Stundenmittelwerte in den Emissionsklassen (M1 bis M20) sowie Sonderklassen (u. a. S1 für CO

Grenzwertüberschreitungen) in Relation gesetzt und über den gesamten Untersuchungszeitraum ausgewertet.

Mit abschließender Schadensbehebung zum Jahresbeginn 2015 stellte sich ein stabiler Kremationsbetrieb ein, so dass mit Beginn KW 05/15, also ab 26.1.2015, die Nachverbrennungstemperatur auf 750 °C abgesenkt wurde. Im Vergleich zwischen den Werten bei 850 °C und 750 °C zeigen sich bis KW 17/15 keine Einflüsse, die auf die Temperaturabsenkung zurückzuführen sind. In dieser störungsfreien Phase lagen die CO-Grenzwertverletzungen bei 2,5 % und erfüllten damit das 3 % - Kriterium der VDI 3891 (Bild 41).

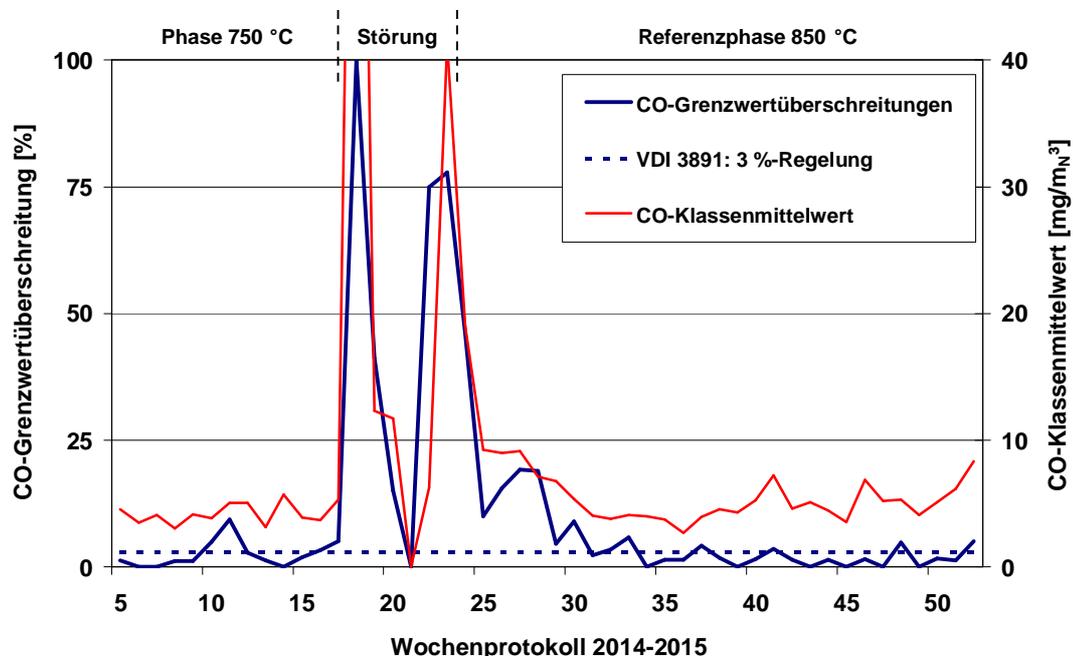


Bild 41: Emissionsjahresauswertung von KW 05 bis KW53/15

In KW 18/15 war ein Ausfall der Betriebssauerstoffmesssonde aufgetreten. Nach deren Austausch und Durchführung weiterer Reparatur- und Einstellarbeiten sowie Klärung der Untersuchungsfortführung (vgl. Abschnitt 4.3) erfolgte der Referenzbetrieb bei einer Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer, wobei sich die Datensammlung von KW 24/15 bis KW 53/15 erstreckte. Um vor dem Hintergrund der behördlichen Auflagen einen Referenzbetrieb bei bestmöglichem Ausbrandverhalten zu erzielen, wurde die Prozesssteuerung vom Anlagenlieferanten in KW 29/15 neu parametrieret. Das Betriebsverhalten bei der geänderten Prozesseinstellung (Bild 42) zeigt ebenfalls für einen Betrieb an einem Dienstag im Vergleich zu den Aufzeichnungen in Bild 40. Mit diesen geänderten Einstellparametern war ein niedrigeres Temperaturniveau in der Nachbrennkammer und etwas längere Kremationszeiten der einzelnen Kremationen festzustellen. Zu erwähnen ist ferner, dass durch die

geänderte Prozessregelung der O₂-Arbeitsbereich enger gefasst werden konnte. Mit dieser modifizierten Verbrennungseinstellung konnten die wöchentlichen CO-Grenzwertüberschreitungen ab KW 24/15 überwiegend unterhalb 3 % gehalten werden (vgl. Bild 41), obwohl bei durchschnittlichen Kremationszeiten von etwa 50 Minuten Stundenmittelwerte registriert wurden, die CO-Spitzenwerte durch Sargbruch und/oder manuelle Ascheräumung von zwei Kremationen erfassten.

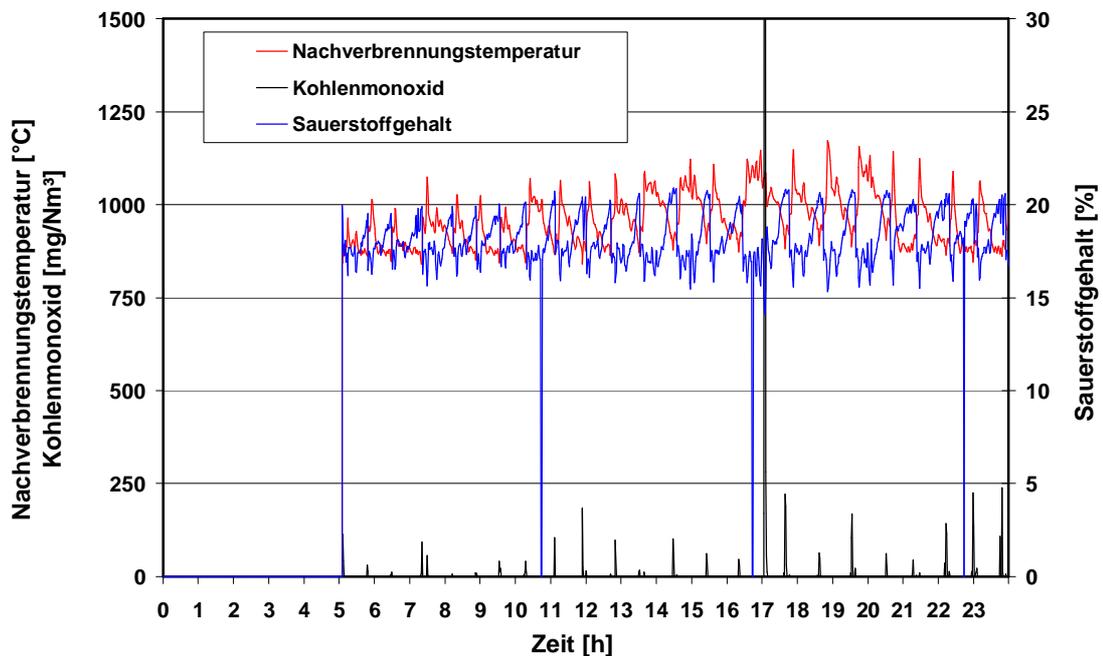


Bild 42: Aufzeichnungen des Emissionsmesswertrechners am 1.9.2015

Zusammenfassend lässt sich für CO-Emissionen im Krematorium Pforzheim festhalten, dass aufgrund der hohen täglichen Kremationszahlen (kurze Kremationszeiten) eine auf 750 °C reduzierte Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer praktisch keinen Einfluss auf die CO-Emission hat. Vielmehr kommt es darauf an, dass eine geeignete, sauerstoffgeregelte Prozessführung umgesetzt und Maßnahmen zum rechtzeitigen Erkennen von fehlerhaft arbeitenden Messfühlern und deren Schadensbehebung getroffen werden.

7.5. Emissionskonzentrationsmessungen im Roh- und Reingas

Begleitend zur kontinuierlichen Emissionswerterfassung wurden in KW14/15 Emissionskonzentrationsmessungen im Roh- und Reingas vorgenommen. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten und Anordnung der verfahrenstechnischen Baugruppen, mussten Einschränkungen an den Messorten in Kauf genommen werden. Die Messorte lassen sich wie folgt beschreiben:

Rohgasprobenahme:

Für die Messungen wurden an der Stirnseite des Abgaskühlers / Wärmetauschers (vor Eintritt in den Staubfilter) zwei Flansche angebracht (Bild 43). Die Probenahmestelle befindet sich in einer Höhe von ca. 0,3 - 0,6 m über Boden im Untergeschoß des Krematoriums. Die Probenahmestelle entspricht aufgrund der Anbringung direkt im Abgaskühler und der damit zusätzlich verbundenen geringen Ein- und Auslaufstrecke nicht den Anforderungen der DIN EN 15259. Technisch bedingt ließ sich keine normkonforme Probenahmestelle einrichten.



Bild 43: Abgasverdampfungskühler mit Rohgas-Probenahmestelle

Reingasprobenahme:

Hierbei wurden zwei Probenahmestellen ausgewählt. Die Probenahmestelle 1 befindet sich in einer Höhe von ca. 3 m über Boden im Untergeschoß des Krematoriums in einer horizontal verlaufenden Abgasleitung (Bild 44 – links). Sie entspricht aufgrund der geringen Ein- und Auslaufstrecke zwar nicht den Anforderungen der DIN EN 15259 und weist nur eine kurze Traversierfläche auf; eine andere normkonforme Probenahmestelle ließ sich technisch bedingt jedoch nicht einrichten. Andererseits wurden die notwendigen Anforderungen an das Strömungsprofil gemäß der DIN EN 15259 erfüllt, so dass die Probenahmestelle als geeignet angesehen werden kann. Diese Probenahmestelle diente der PCDD- und PCDF-Beprobung.

Die Probenahmestelle 2 befindet sich in einer Höhe von ca. 1 m über Boden im Untergeschoß des Krematoriums in einer vertikal nach unten verlaufenden Abgasleitung (Bild 44 – rechts). Für diese Probenahmestelle gilt das Gleiche

wie für die Probenahmestelle 1. Da sie in der Messachse mit einem 3" - Messstutzen und zusätzlich seitlich versetzt mit einem 1" - Messstutzen versehen ist, konnten an Letzterem die kontinuierlichen Parameter (Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, gasförmige organische Stoffe, Abgastemperatur sowie Strömungsgeschwindigkeit) gemessen werden sowie am 3" - Messstutzen die Gesamtstaub- und Quecksilbermessungen durchgeführt werden.

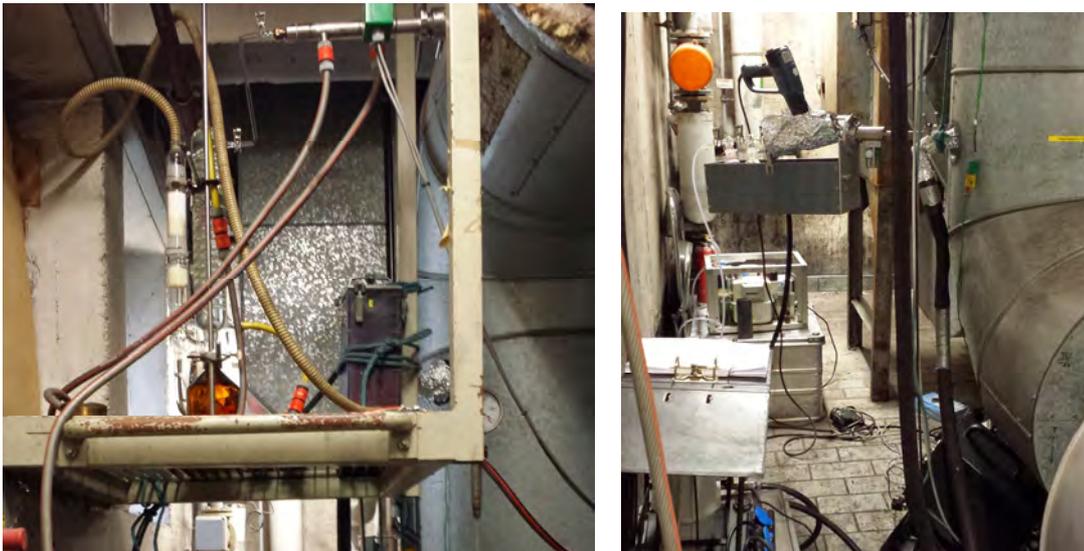


Bild 44: Probenahmestellen 1 und 2 zur Reingasmessung (Bildquelle: IUTA)

Die Roh- und Reingasmessungen und -beprobungen wurden zeitgleich durchgeführt und sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die im Zuge der diskontinuierlichen Messungen von der IUTA im Reingas der Kremationsanlage zusätzlich gemessenen Emissionskonzentration CO sowie die ebenfalls im Reingas ermittelten Gesamtkohlenstoffkonzentrationen lassen auf eine während der Messkampagne gute Verbrennungssituation schließen. Sofern also die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen betrieblichen Defekte bei der Sauerstoffmessung beseitigt sind, zeigt der installierte Flachbettofen in Verbindung mit der Luft- und Rauchgasführung und Prozessregelung ein gutes Verbrennungsverhalten.

Im Vergleich zu den wiederkehrenden Reingasmessungen, die im Mai 2014 von der DEKRA Automobil GmbH bei den üblichen Einstellungen der Nachverbrennungstemperatur von mindestens 850 °C durchgeführt wurden (Bericht: 12686/421600/20851/555013144-1), zeigen sich im Mittel gleiche Gesamtkohlenstoffkonzentrationen. Ein Einfluss der Nachverbrennungstemperatur auf das Verbrennungsverhalten und damit auf Gesamtkohlenstoff im Abgas konnte nicht festgestellt werden.

Krematorium Pforzheim	Kohlenmonoxid - CO -	Gesamt- kohlenstoff - C _{Ges} -	Staub	polychlorierte Dioxine / Furane - PCDD/F -	Quecksilber - Hg -
	[mg/Nm ³] ^{1), 2)}	[mg/Nm ³] ²⁾	[mg/Nm ³] ²⁾	[ng-TE/Nm ³] ³⁾	[mg/Nm ³] ⁴⁾
27.BImSchV	50	20	10	0,1	-
850 °C Reingas (Referenz) ⁵⁾	nicht gemessen	3,1 (3,9)	< 0,19	0,01	nicht gemessen
750 °C Rohgas	siehe Reingas	siehe Reingas	121 (179)	2,21 0,58	0,053 (0,285)
750 °C Reingas	11,5 (41,2)	3,3 (8,5)	6,6 (10,7)	1,35 0,75	0,128 (0,209)

- Hinweise:**
- 1) CO: Messungen IUTA ergänzend zur kontinuierlichen Emissionsmesswerterfassung
 - 2) Mittelwert (Maximalwert)
 - 3) PCDD/PCDF: Einzelwerte, 6-h-Beprobung
 - 4) Quecksilber: Einzelwerte, 1-h-Beprobung, partikelgebunden und gasförmig
 - 5) DEKRA-Mai 2014: wiederkehrende Messung

Tabelle 11: Zusammenstellung der Emissionsmesswerte im Krematorium Pforzheim

Auch sind die im Rohgas festgestellten Staubgehalte sowie PCDD/F- und Quecksilberkonzentrationen vergleichbar zu denen in den Krematorien in Berlin und München. Dabei ist bei den Messungen im Krematorium Pforzheim zu berücksichtigen, dass manche Kremationen einen höheren Quecksilbereintrag deshalb aufweisen, da aufgrund der während des Messzeitraums vorherrschenden Kremationszyklen von etwa 40 Minuten in einer Stundenprobe teilweise auch zwei Kremationen (höherer Amalgameintrag) erfasst werden.

Die gemessene Staubbekleidung im Reingas liegt im Mittel unterhalb des Grenzwertes der 27. BImSchV von 10 mg/Nm³; in einem Fall wurde jedoch mit einer gemessenen Konzentration von 10,7 mg/Nm³ eine geringfügige Überschreitung des Staubgrenzwertes festgestellt. Dies kann als Indiz dafür gewertet werden, dass zumindest einige Filterschläuche während der Messung Defekte aufgewiesen haben (vgl. hierzu auch Abschnitt 7.6).

Die PCDD/F-Reingasmessungen führte zu einer vergleichbaren Größenordnung wie die Rohgasmessungen, die sich trotz schwieriger Messbedingungen an der Rohgasprobenahmestelle damit nicht erklären lässt. Vielmehr muss man davon ausgehen, dass an den Messtagen Defekte in der Abgasreinigungsanlage vorhanden waren, die für dieses Ergebnis verantwortlich waren (vgl. auch Abschnitt 7.6). Aus der Analyse der PCDD/F-Homologenverteilung (Bild 45) lassen sich keine weiteren Informationen ableiten. Die Summe der PCDD ist zwar etwas geringer als die der PCDF, jedoch nicht so ausgeprägt, wie dies bei Krematorien der Fall ist, die eine geringe Rückbildungsrate nach der de novo Synthese aufweisen (vgl. hierzu /26/).

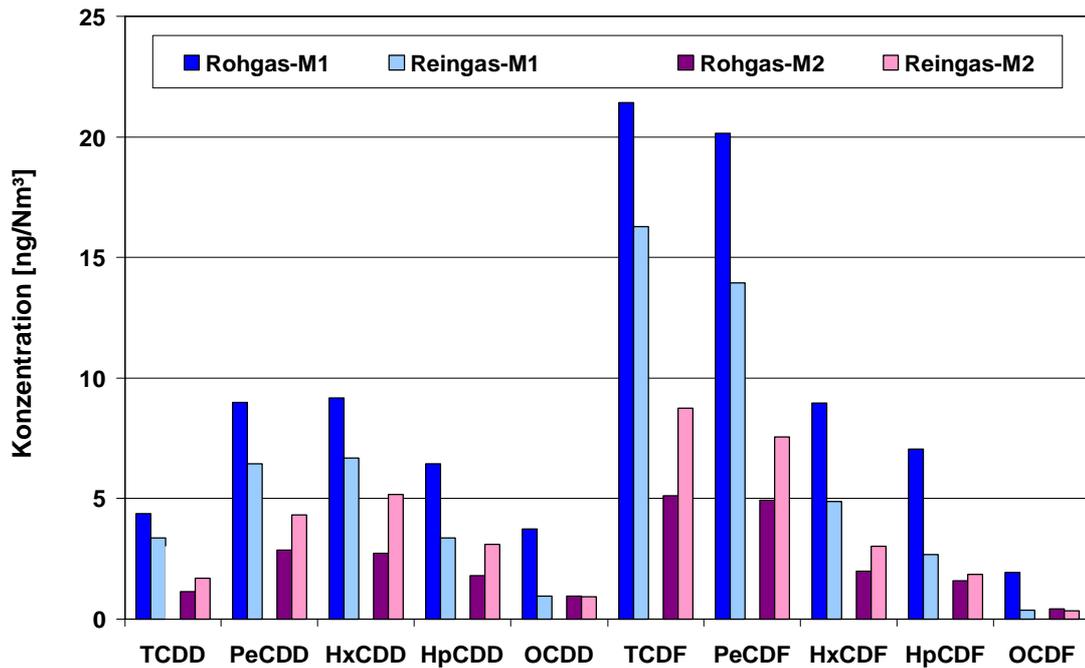


Bild 45: PCDD/F-Homologenverteilung im Roh- und Reingas

In Analogie hierzu zeigten die Quecksilbermessungen meist ebenfalls eine Zunahme zwischen Roh- und Reingas, die sich nur durch Freisetzung aus bereits im Adsorber eingespeichertem Quecksilber erklären lässt (Bild 46).

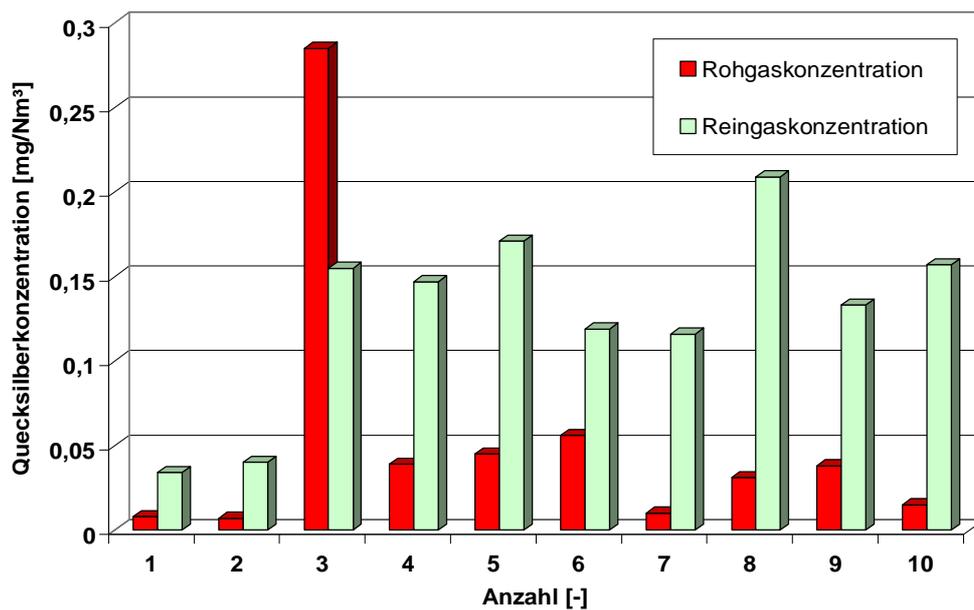


Bild 46: Quecksilbermessungen im Roh- und Reingas

7.6. Bewertung der installierten Abgasreinigung

Wie in Kapitel 3.4. beschrieben, setzt sich die Abgasbehandlung im Krematorium Pforzheim nach Verlassen des Kremationsofens aus folgenden, nacheinander durchlaufenden Bausteinen zusammen:

- Abgaskühlung:** in drei Stufen, wobei als letzte Stufe ein liegender Verdampfungskühler, System Metall-Technik, mit Wassereindüsung zum Einsatz kommt.
- Gewebefilter:** zur Feinstaubabscheidung, System PGA Anlagenbau, bestückt mit 128 Filterschläuchen (Material: Nomex mit PTFE Membran, einsetzbar laut Herstellerangaben bis 240 °C) und einer Gesamtoberfläche von 140 m². Der Staubaustrag erfolgt über eine Förderschnecke in einen „Sammelrumpf“, der zur Minderung der Brandgefahr stets mindestens zu $\frac{3}{4}$ mit Wasser befüllt ist.
- Festbettadsorber:** ausgeführt als 3-Kammeradsorber, System Metall-Technik und befüllt mit ca. 2 m³ Aktivkohlepellets, die üblicherweise im Zuge der Wartung jährlich ausgetauscht bzw. ergänzt werden. Der letzte vollständige vor der Messung durchgeführte Austausch erfolgte im Juni 2013.

Beim Einsatz des Verdampfungskühlers wird das Abgas unter Nutzung der Verdampfungsenthalpie des eingedüsten Wassers auf eine Temperatur von ca. 170 °C abgekühlt (Bild 43). Die Wasserdosierung erfolgt temperaturabhängig, wobei laut Betreiberangaben pro Kremation rund 250 l Wasser zudosiert werden. Dies vorausgesetzt, erhöht sich die Abgasmenge bei einer Kremation um den zusätzlichen Wasserdampfgehalt (1 l Wasser ergibt ca. 1,67 m³ Wasserdampf) wie folgt:

$$V_{H_2O} = 250 \text{ l} * 1,67 \text{ m}^3/\text{l} = 418 \text{ m}^3.$$

Unterstellt man ferner einen durchschnittlichen Abgasvolumenstrom bei einer Kremation mit ca. 2000 Nm³, respektive bei 100 °C ca. 2750 m³, so führt der zusätzliche Wasserdampfanteil zu einer Vergrößerung der Abgasmenge um

$$f = (2750 + 418) / 2750 = 1,15,$$

d. h. die Abgasmenge steigt um rund 15 %. Inwieweit durch den erhöhten Wassergehalt die Bildung von H₂SO₃ (schweflige Säure) bzw. H₂SO₄ (Schwefelsäure) aus Schwefeloxiden, die bei der Kremation entstehen, gemäß folgendem Schema:



unterstützt wird, kann nicht abschließend bewertet werden. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich vor allem bei Schwefelsäure um eine starke Säure handelt, die in besonderem Maße korrosionsfördernd ist.

Nach Auswertung der Reingasstaubgehalte erfolgte eine Inaugenscheinnahme des Gewebefilters durch den Betreiber. Dabei haben sich die aus den gemessenen Reingasstaubkonzentrationen vermuteten Defekte an einzelnen Filterschläuchen bestätigt (Bild 47), so dass rund 10 % der Filterschläuche auszutauschen waren. Nach Aussagen des Betreibers beträgt die Lebensdauer der Filterschläuche rund 1,5 bis 2 Jahre – üblich sind bei Gewebefilterschläuchen in Krematorien je nach Betriebsweise zwischen 5 und 10 Jahre. Ob und inwiefern dies dem Umstand der Wasserzudosierung geschuldet ist, lässt sich ohne weitere Materialuntersuchungen nicht zweifelsfrei klären.



Bild 47: Einer von mehreren defekten Filterschläuchen

Als Erklärung für die hohen PCDD/F- und Quecksilberkonzentrationen im Reingas kommen die defekten Filterschläuche nur indirekt in Frage. Vielmehr kommt der konstruktiven Ausführung eine besondere Bedeutung zu. Wie die schematische Darstellung in Bild 48 - links zeigt, wird der Abgasstrom am Eintritt in den Festbettadsorber in 3 Teilströme unterteilt. Nach Durchströmen der horizontalen Festbettschüttungen werden die einzelnen Teilgasströme (Bild 48 – rechts) wieder zusammengeführt und über ein Saugzuggebläse und Kaminanlage abgeleitet. Im Austritt ist in jeder dieser drei Abgasleitungen eine manuell einstellbare Teilluftklappe installiert um über eine Druckkompensation ei-

ne möglichst gleiche Strömungsbeaufschlagung aller drei horizontaler Festbetschüttungen zu erwirken.

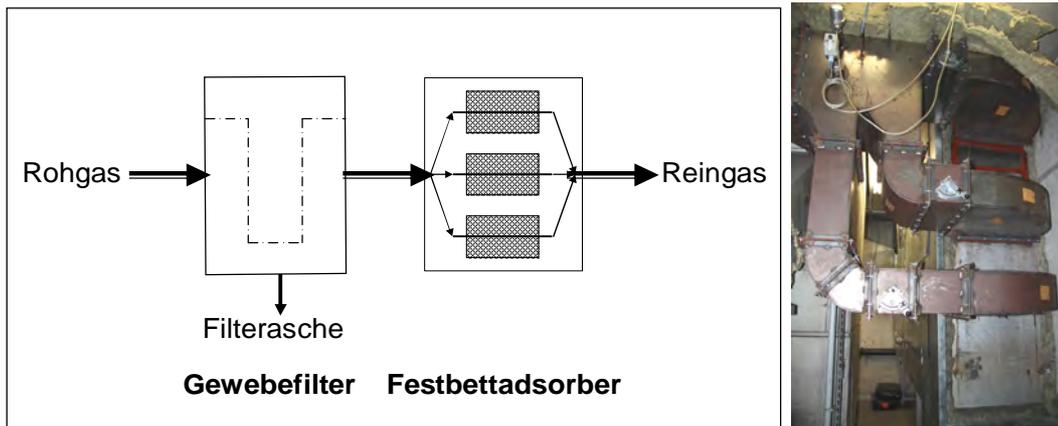


Bild 48: Festbettadsorber (Schema und Gasaustritt)

Dieser beabsichtigten Teilgasführung stehen folgende Aspekte dagegen:

- Der Kremationsvorgang ist stark instationär. Dies bedeutet, dass der Prozess erheblichen Schwankungen in der Abgasmenge und der Energiefreisetzung, charakterisiert durch die Nachverbrennungstemperatur, unterliegt (siehe hierzu Bilder 39 und 40). Verstärkt wird dieser Effekt durch die Wassereindüsung im Verdampfungskühler und zwar in der Weise, dass bei erhöhter Verbrennungsintensität die Dosiermenge steigt. Fest eingestellte Teilluftklappen sind hierfür ungeeignet.
- Durch die häufigen Defekte der Filterschläuche muss davon ausgegangen werden, dass ein erhöhter Staubeintrag in das Festbettfilter in der Vergangenheit vorlag. Dadurch verschließen sich partiell die Freiräume zwischen den Aktivkohlepellets, mit der Konsequenz, dass in den Festbettsegmenten zumindest partiell deutlich erhöhte Gasgeschwindigkeiten auftreten, die einen Teilaustrag bereits schadstoffbeladener (PCDD/F und Quecksilber) Feinstäube bewirken.
- Auch Bypassströmungen oberhalb oder seitlich der Aktivkohleschüttungen können eine Mitführung schadstoffbeladener Feinstäube nach sich ziehen.
- Aktivkohle ist zwar grundsätzlich wasserabweisend; jedoch wird bei einem Anstieg der Abgasfeuchte infolge auftretender „Porenkondensation“ die Adsorptionswirkung erheblich gemindert.

Da weder die Druck- und Strömungsverhältnisse in den einzelnen Festbetschüttungen noch die jeweils vorliegenden Temperatur- und Beladungszustände als gleichförmig verteilt anzunehmen sind, zeigt die konstruktive Ausführung des Festbettadsorbers erhebliche Mängel mit Blick auf eine betriebs-

sichere Schadstoffadsorption, zumal auch keine Informationen über den Belastungszustand der einzelnen Segmente vorlagen.

Die grundsätzlichen Bedenken gegenüber Festbettadsorbentien haben sich auch dahingehend bestätigt, da bei Betriebsstörungen eine gesicherte Rückhaltung bereits eingespeicherter Schadstoffe nicht möglich ist.

7.7. Gasverbrauch

Die Referenzmessung bei mindestens 850 °C in der Nachbrennkammer erfolgte über einen Zeitraum von 31 Kalenderwochen (Bild 49). In dieser Zeit wurden insgesamt 2.618 Kremationen durchgeführt. Einschließlich der täglichen und wöchentlichen Aufwärmphasen stellte sich ein mittlerer Erdgasverbrauch von 7,55 m³/Kremation ein. Der geringe spezifische Gasverbrauch ist insbesondere auf die hohen täglichen Kremationszahlen von meist über 20 Kremationen zurückzuführen. Wie bei den anderen untersuchten Krematorien waren zu Wochenbeginn trotz hoher Kremationszahlen Gasverbrauchswerte von bis zu 600 m³/Tag festzustellen. Diese Größenordnung ist auch bei mittelschweren Ofensystemen aufgrund der Ausführungen in /1/ nicht überraschend.

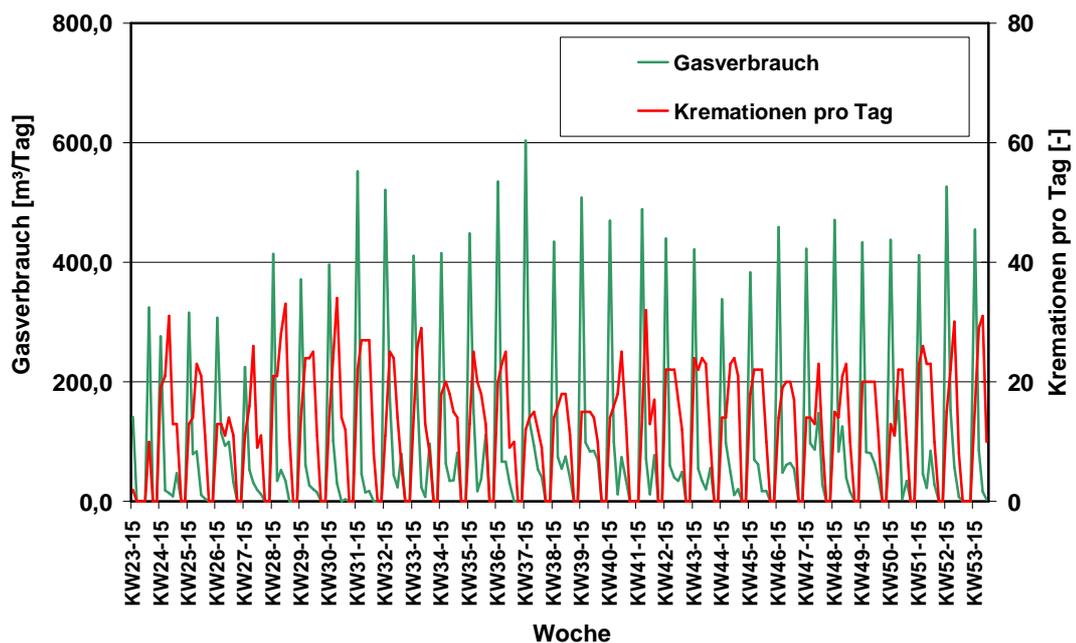


Bild 49: Täglicher Gasverbrauch bei einer Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer (Krematorium Pforzheim)

Die zeitlich vorangestellte Phase mit reduzierter Nachverbrennungstemperatur (mindestens 750 °C) zeigt Bild 50. In einem über 14 Kalenderwochen andauernden Untersuchungszeitraum wurden insgesamt 1.538 Kremationen durchgeführt. Der auf die Anzahl der durchgeführten Kremationen bezogene Gasverbrauch lag bei 1,66 m³/Kremation und somit um rund 78 % niedriger als bei 850 °C. Zu erwähnen ist ferner, dass wenn die Ofenanlage ihre Betriebstemperatur am ersten Wochentag erreicht hatte, in den folgenden Wochentagen der Gasverbrauch bei wenigen Kubikmetern lag bzw. kaum feststellbar war.

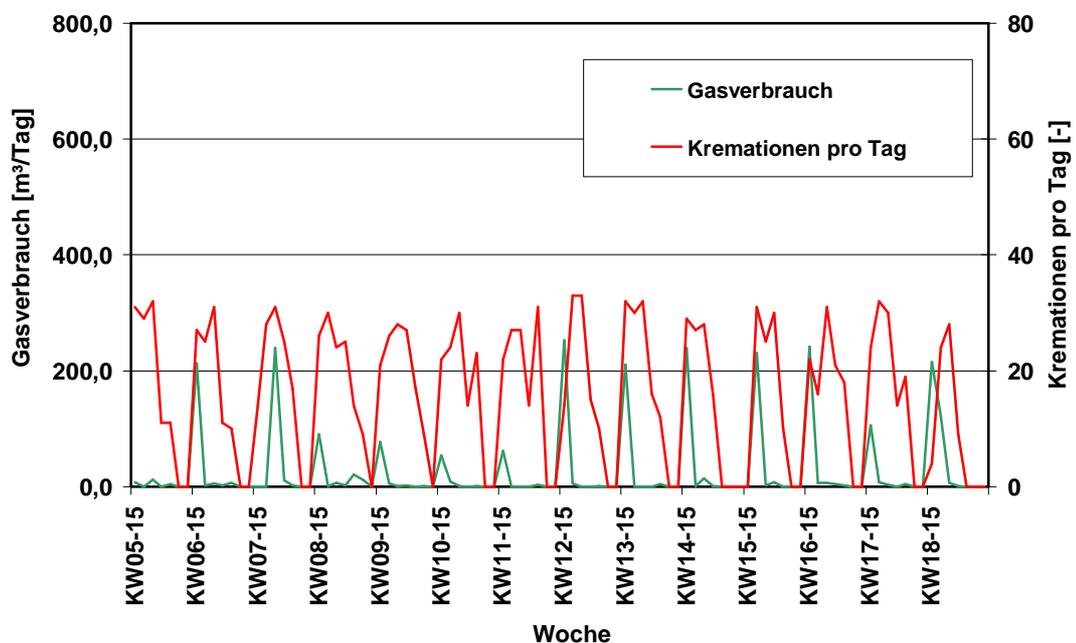


Bild 50: Täglicher Gasverbrauch bei einer Mindesttemperatur von 750 °C in der Nachbrennkammer (Krematorium Pforzheim)

7.8. Zusammenfassende Bewertung in Bezug auf das Gesamtprojekt

Mit der Auswahl des Krematoriums Pforzheim konnte ein Flachbettofen mittelschwerer Bauart in Untersuchungen aufgenommen werden. Aufgrund der hohen täglichen Kremationszahlen war zu erwarten, dass hinsichtlich des Gasverbrauchs nur bedingt Aussagen über ein mögliches Einsparpotenzial bei diesem Ofentyp zu erhalten sind.

Infolge diverser Anlagendefekte, z. B. Sauerstoffmesssonde, resultierten betriebliche Schwierigkeiten in der Luft- und Rauchgasführung der Ofenanlage und damit zusammenstehend erhebliche CO-Grenzwertverletzungen. Andererseits konnte der Nachweis erbracht werden, dass sich, sofern keine betrieb-

lichen Defekte vorlagen, auch in der täglichen Startphase bei reduzierter Mindestnachverbrennungstemperatur von 750 °C keine darauf zurückzuführenden CO-Grenzwertverletzungen einstellten. Leider war es aus genehmigungsrechtlichen Gründen nicht möglich durch eine weitere Temperaturabsenkung das Limit für diesen Ofen und Betriebsweise bei hohen täglichen Kremationszahlen auszuloten.

Die im Rohgas festgestellten Staubgehalte sowie PCDD/F- und Quecksilberkonzentrationen bestätigten die in den Krematorien Berlin und München festgestellten Größenordnungen und vor allem bei Quecksilber gelegentlich auftretende Spitzenkonzentrationen, die auf erhöhten Amalgameinsatz zurückzuführen ist. Der Vergleich zwischen den gemessenen Roh- und Reingaskonzentrationen von PCDD/F und Quecksilber zeigte erhebliche Defizite bei der Abgasreinigung. Insofern lassen sich keine weiterführenden Aussagen zum Festbettfilter aus den Untersuchungen im Krematorium Pforzheim ableiten.

Die Untersuchungen im Krematorium Pforzheim belegen, dass die Einhaltung der CO-Emissionsgrenzwerte primär durch eine betriebssichere sauerstoffgeführte Verbrennungsregelung bestimmt wird. Sofern eine betriebssichere Sauerstoffmessung gegeben ist, zeigt auch dieser Ofentyp das Potenzial die Mindesttemperatur zumindest auf 750 °C abzusenken. Zusammenfassend kann man trotz der Einschränkungen festhalten, dass aus den Untersuchungen im Krematorium Pforzheim wichtige Erkenntnisse für das Gesamtprojekt gewonnen werden konnten.

8. Untersuchungen an Feststoffproben

Um zu klären, ob ein nennenswerter Quecksilbertransfer in die verbleibende Urnenasche erfolgt, wäre diese zu untersuchen. Für derartige Untersuchungen fehlen die rechtlichen Voraussetzungen, da die Asche eines Verstorbenen nicht teilbar ist. Nach deutschem Recht dürfen demnach keine Proben für Analysen der Urnenasche entnommen werden.

Bei der Reinigung der Ofenanlagen im Rauchgasfuchs durch den Kaminkehrer fällt Asche zur Entsorgung an, die mit Blick auf mögliche Quecksilbergehalte im Mittel weitgehend der Urnenasche entsprechen dürfte. Ersatzweise wurde diese „Kaminkehrerasche“ im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen beprobt. Außerdem wurden an den Versuchstagen auch von den Gewebefilteraschen repräsentative Ascheproben entnommen. Die Analysen dieser Proben erstreckten sich auf die Schwermetallgehalte – Quecksilber und Chrom – sowie auf PCDD/F (Tabelle 12).

Krematorium	Berlin - Baumschulenweg Linie 3 (750 °C) (Messung KW 18/15)	München Linie 5 (750 °C) (Messung KW 04/15)	München Linie 5 (650 °C) (Messung KW 21/15)	Düsseldorf ¹⁾ Linie 3 (Messung 2008/2009)
Quecksilber [mg/kg]				
Kaminkehrerprobe	0,05	0,12	0,04	n.g.
Filterstaubprobe	440	385	450	n.g.
Chrom [mg/kg]				
Kaminkehrerprobe	150	101	413	n.g.
Filterstaubprobe	590	72	100	n.g.
PCDD/F [µg-TE/kg]				
Kaminkehrerprobe	0,006	0,009	0,105	n.g.
Filterstaubprobe	1,3	4,1	15,0	20,6 (850 °C) 21,1 (750 °C) 12,1 (650 °C)

Hinweis: ¹⁾ Werte entnommen aus /1/

Tabelle 12: Analysen der Ascheproben

Aus den Quecksilberanalysen kann geschlossen werden, dass praktisch das gesamte über den Leichnam eingetragene Quecksilber bei der Kremation unter den vorliegenden Temperaturen in die Gasphase übergeführt wird (siehe hierzu auch Bild 6). Dabei ist es unerheblich in welcher Oxidationsstufe (Hg(0) oder Hg(II)) Quecksilber vorliegt. Der in der Urnenasche verbleibende Restgehalt an Quecksilber kann daher als vernachlässigbar eingestuft werden.

Analog verhält es sich mit den detektierten PCDD/F-Gehalten in den Aschen. Die hohen PCDD/F-Konzentrationen in der Gewebefilterasche ist ferner ein

Indiz für die sehr gute Abscheideleistung der installierten Abgasreinigungstechnik.

Ein anderes Bild ergibt sich für Chrom. Aufgrund des deutlich höheren Siedepunkts ist es nicht überraschend, dass eingetragenes Chrom überwiegend in der Kaminkehrerasche zu finden ist und nicht über den Gaspfad mitgeführt wird. Im Gegensatz zum Eintrag von Quecksilber stellt sich im Zusammenhang mit den festgestellten Chromgehalten die Frage nach der Herkunft. Zwei mögliche Pfade zeichnen sich hierbei ab:

- **Sarg / Leichnam:** Untersuchungen von Holzaschen unbehandelter Hölzer können Chromgehalte im Bereich von 4 bis 173 mg/kg aufweisen /27/. Ob der Leichnam, von einer möglichen beruflichen Kontamination abgesehen, einen nennenswerten Beitrag liefert, ist nicht bekannt.
- **Ofen /Ofenmaterialien:** Bei einigen Ofensystemen werden Drehplatten aus Chromguss mit einem Chromanteil von 15 bis 25 % eingesetzt. Nach ersten groben Abschätzungen könnte durch Abrieb (Verschleiß der Drehplatten) 50 bis 300 mg/kg eingetragen werden /28/. Dies gilt es ebenso zu überprüfen, wie die den Abrieb des Feuerfestmauerwerks, bei dem, herstellerabhängig, auch Chromoxid (Cr_2O_3) enthalten sein kann.

9. Zusammenfassung und Empfehlungen

Der Gesetzgeber hat in der 27. BImSchV festgelegt, dass die Temperatur in der Nachbrennkammer von Krematorien mindestens 850 °C (Zehnminutenmittelwert) betragen muss, und ein Sarg nicht eingefahren werden darf, wenn diese Temperatur unterschritten ist. Dass diese Verordnung eine Temperaturforderung enthält, ist dem Umstand geschuldet, dass ein Zusammenhang zwischen erhöhten Dioxin- und Furankonzentrationen und niedrigen Nachverbrennungstemperaturen in Abfallverbrennungsanlagen festgestellt wurde. Gleichzeitig ist zur Erfüllung dieser Mindesttemperaturforderungen ein erhöhter Sekundärenergieeinsatz erforderlich, der einen zusätzlichen CO₂-Eintrag in die Umwelt bewirkt.

Erste Untersuchungen im Krematorium Düsseldorf haben gezeigt, dass die Absenkung der Nachverbrennungstemperatur in gewissen Grenzen ein Instrument darstellt, den Sekundärenergieeinsatz um etwa 30 % zu reduzieren und dennoch die emissionsseitigen Anforderungen der 27. BImSchV in Verbindung mit der VDI-Richtlinie 3891 einzuhalten. Insbesondere war kein negativer Einfluss auf die PCDD/F-Emissionen erkennbar.

Da diese Untersuchungen „nur“ an einem Anlagentyp – einem Etagenofen mit nachgeschalteter katalytischen Filtration – durchgeführt wurden, stellte sich im Zuge der Aktualisierung der VDI-Richtlinie 3891 die Frage nach der Allgemeingültigkeit dieser Erkenntnisse. Vor diesem Hintergrund wurden in einem neuen Untersuchungsprogramm die Möglichkeiten und Grenzen der Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer an anderen gasbefeuerten Kremationsanlagen untersucht. Dabei wurden nicht nur unterschiedliche Anlagenkonfigurationen

- Etagenofen mit Trockensorption nach dem Flugstromprinzip,
- schwerer Flachbettoven ebenfalls mit adsorptiver Abgasreinigung nach dem Flugstromprinzip, und
- mittelschwerer Flachbettoven unter Verwendung eines Festbettfilters

untersucht, sondern sehr unterschiedliche Betriebsweisen (Ein- bis Dreischichtbetrieb) in die Betrachtung einbezogen. Als Bewertungsmaßstab wurde, der in der VDI Richtlinie 3891, definierte Stand der Technik zugrunde gelegt, der den Besonderheiten der Kremation Rechnung trägt.

Nach Auswertung der Langzeituntersuchungen mit insgesamt 8.324 Kremationen kann die Diskussion über die Möglichkeiten und Grenzen der Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer insofern beendet werden, wenn man den Ausgangspunkt der Untersuchungen im Fokus hat, dass im betrachteten

Temperaturbereich kein Einfluss auf die PCDD/F-Rohgaskonzentration festzustellen war. Das Limit der Temperaturabsenkung wird für jeden einzelnen Kremationsofen ausschließlich an den CO-Emissionen festzumachen sein. Dass für jeden Kremationsofen, sowohl aus konstruktiver Sicht (z. B. Luft- und Rauchgasführung, Turbulenzonen, Feuerfestmaterial, elektrische Beheizung, usw.) wie auch aus betrieblichen Aspekten, unterschiedliche Einstellbedingungen für die Nachverbrennungstemperatur resultieren, liegt auf der Hand. Insofern bestätigen die von anderer Seite durchgeführten reaktionskinetischen Betrachtungen zwar die Größenordnung der zu erwartenden Nachverbrennungstemperaturen, ein zwingender Nachweis für eine sichere Einhaltung der CO-Emissionsgrenzwerte kann aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen jedoch auch aus diesen theoretischen Modellen jedoch nicht abgeleitet werden. So zeigen die Untersuchungen, dass gerade die mit dem „Chargenbetrieb“ von Krematorien einher gehenden Eingriffe (z. B. Sargeinfahrt bei offener Ofentür und Entaschung) die CO-Emissionen maßgeblich beeinflussen.

Es wäre daher nur konsequent und auch zu wünschen, wenn seitens des Gesetzgebers auf die Einhaltung der Nachverbrennungstemperatur verzichtet werden würde. Damit wäre endlich auch eine Gleichbehandlung mit elektrisch beheizten Ofensystemen gegeben, für die in der Praxis die Sargeinfahrt auch bei niedrigeren Mindesttemperaturen (meist 700 °C) in der Nachbrennkammer zulässig ist. Mit einer derartigen Entscheidung des Gesetzgebers hätte man darüber hinaus auch eine hohe Konformität mit den Anforderungen in anderen europäischen Ländern erreicht. Stattdessen sollte zügig auf die Umsetzung einheitlicher CO-Emissionsauswertestandards gedrängt werden.

An dieser Stelle sei ausdrücklich festgehalten, dass mit diesen Überlegungen und Empfehlungen nicht die Absicht verbunden ist, die hohen deutschen Emissionsstandards zu verlassen, sondern vielmehr die handelnden Personen in die Pflicht zu nehmen, die vorgegebenen Emissionsstandards bei Nutzung der jeweiligen technischen und betrieblichen Freiheitsgrade einzuhalten.

Ein weiterer Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen betraf den Eintrag von Quecksilber und die Möglichkeiten der Abscheidung in Abgasreinigungsanlagen. Aus den Auswertungen lässt sich folgern, dass praktisch die gesamte eingetragene Quecksilberfracht in die Gasphase transferiert wird, wobei bei einigen wenigen Kremationen signifikant erhöhte Quecksilberkonzentrationen im Rohgas mit Stundenmittelwerten von bis zu etwa 1,7 mg/Nm³ festzustellen war. Bei der Kremation ist demnach stets mit unvorhersehbaren signifikant erhöhten Quecksilberkonzentrationen zu rechnen.

Zur sicheren Einhaltung der in der 27. BImSchV vorgegebenen Emissionsbegrenzungen haben sich adsorptive Abgasreinigungsverfahren ebenso wie die katalytische Filtration bewährt. Die Entwicklung dieser Verfahren orientierte sich vornehmlich an den gesetzlichen Vorgaben, insbesondere an der Einhal-

tung der PCDD/F-Emissionswerte von $0,1 \text{ ngTE/Nm}^3$. So kam mit Blick auf die Zerstörung von PCDD/F die katalytische Filtration zum Einsatz. Auch wenn in Abhängigkeit vieler Faktoren über die adsorptive Wirkung der Filterstaubschicht bei der katalytischen Filtration in begrenztem Umfang Quecksilber (nach Herstellerangaben etwa 20 bis 80 %) abgeschieden wird, lassen sich die mit adsorptiven Verfahren erzielbaren Quecksilberabscheideleistungen nicht erreichen.

Falls der Gesetzgeber einen Quecksilbergrenzwert festlegen sollte, können auch für die bereits seit mehreren Dekaden eingesetzten Adsorptionsverfahren weitere Anpassungen bzw. Nachrüstungen erforderlich werden. So stellt sich angesichts einiger Einzelfälle mit erhöhten Quecksilberkonzentrationen die Frage, wie bei der überwiegend eingesetzten Flugstromtechnik die Adsorptionsleistung verbessert werden kann. Die derzeit üblicherweise verwendeten Kalk-Aktivkohlemischungen eignen sich in besonderem Maße für die Adsorption von PCDD/F und zweiwertigem Quecksilber. Zur Abscheidung (Chemisorption) von elementarem Quecksilber, bietet sich imprägnierte Kohle, z. B. mittels Schwefelsäure, an. Für die Dimensionierung und Optimierung der Schadgasadsorption und insbesondere für die Auswahl des einzusetzenden Additivs ist zu klären, in welcher Oxidationsstufe – $\text{Hg}(0)$ oder $\text{Hg}(\text{II})$ z. B. in Form von HgCl_2 – das in der Gasphase mitgeführte Quecksilber vorliegt. Auch beim Einsatz von Festbettfiltern, die, je nach Beladungszustand, über eine meist ausreichende Aufnahmekapazität von kurzzeitig erhöhten Quecksilberkonzentrationen verfügen, ist die Verwendung von imprägnierter Kohle zu prüfen.

Ungeachtet möglicher Optimierungsmaßnahmen bei der Quecksilberabscheidung wird sich der Gesetzgeber bei der möglichen Festlegung von Quecksilberemissionsgrenzwerten mit dem Umgang von erhöhten Emissionen in Einzelfällen auseinandersetzen müssen. Eine Limitierung für Quecksilber in Analogie zur 17. BImSchV mit $0,03 \text{ mg/Nm}^3$ als Tagesmittelwert, respektive $0,05 \text{ mg/Nm}^3$ als Halbstundenmittelwert, würde angesichts der in dieser Arbeit vorgelegten Daten ein gravierendes Nachrüstungspotenzial bei den meisten Krematorien zur Konsequenz haben. Gerade mit Blick auf die Mitberücksichtigung von Quecksilberspitzenkonzentrationen in Einzelfällen, die bei der Kremation nicht auszuschließen sind, wäre im Fall einer gesetzlichen Quecksilberemissionsbegrenzung die Einführung eines Tagesmittelwertes, beispielsweise mit $0,05 \text{ mg/Nm}^3$, aus heutiger Sicht für Krematorien durchaus eine Anforderung, die nur mit einer funktionstüchtigen Abgasreinigungstechnologie unter Einsatz adsorptiver Verfahrenbausteine erreicht werden kann. Weitergehende Anforderungen, die nur mittels Festbettadsorber erreicht werden können, sollten vor dem Hintergrund der damit verbundenen hohen Investitionskosten und erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen, kritisch hinterfragt werden, zumal der Abgasvolumenstrom mit ca. $2.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ pro Kremationslinie

im Vergleich zu anderen Verbrennungsanlagen, wie beispielsweise Anlagen der 17. BImSchV, vergleichsweise gering sind.

10. Literaturquellen

- /1/ Schetter, G.: Untersuchung der Möglichkeiten und Auswirkungen der Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer bei der Einäscherung in Krematorien, DBU Schlussbericht (AZ 26847), Januar 2010.
- /2/ 27. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV): Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung, 19.03.1997, Beck-Texte, 9. Auflage, Nov. 2007.
- /3/ VDI-Richtlinie 3891: Emissionsminderung - Anlagen zur Humankremation (Emission control - Human cremation facilities), Berlin: Beuth-Verlag, Juli 2015.
- /4/ Schetter, G., Djeradi, B.: Handbuch für bayerische Krematorien, Fachverlag des deutschen Bestattungsgewerbes GmbH, 1. Auflage, 2013.
- /5/ Schetter, G.: Primärmaßnahmen zur Schadstoffminimierung in Krematorien, Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft, Bd. 72, Nr. 6, S. 235 – 240, 2012.
- /6/ Moore, W. J., Hummel, D. O.: Physical Chemistry, 4th Edition, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1972.
- /7/ Bachmann, J., Kiecherer, J., Sommerer, J., Olzmann, M.: Einfluss der Temperatur in der Nachbrennkammer von Kremationsöfen auf die CO-Konzentration im Abgas, Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft, Bd. 75, Nr. 4, S. 146 – 149, 2015.
- /8/ Schetter, G.: 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, 2009.
- /9/ Hagenmaier, H. P.: Katalytische Oxidation halogener Kohlenwasserstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Dioxinproblems, VDI-Berichte, Nr. 730, S. 239-254, 1989.
- /10/ Düwel, U., Nottrodt, A., Ballschmiter, K.: Simultaneous sampling of PCDD/PCDF inside the combustion chamber and on four boiler levels of a waste incineration plant, Dioxin Conference, Toronto, Canada, 1989.
- /11/ Schetter, G.: Anwendung physikalisch-chemischer Grundlagenkenntnisse zur Reduzierung des Austrages polychlorierter Dibenzop-dioxine und Dibenzofurane aus Abfallverbrennungsanlagen. Dissertation, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 15, Nr. 95, 1992.

-
- /12/ Eguchi, S.; Takeda, N; Sakai, S.: PCDDs / PCDFs Emissions from a Crematory, Organohalogen Compounds, vol 27, pp 127 – 133, 1996.
- /13/ Schetter, G.: Möglichkeiten zur Verminderung des Austrages polychlorierter Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und -furane (PCDF) bei der Einäscherung, VDI-Seminar, Düsseldorf, 6./7.Dez. 2000.
- /14/ Launhardt, T.: Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen: Schadstoffemissionen, Aschequalität und Wirkungsgrad, Dissertation an der TU München, 2005.
- /15/ Nussbaumer, T.: PCDD/F-Emissionen der illegalen Abfallverbrennung: Einflussgrößen, Korrelationen und Konsequenzen für Holzfeuerungen, Immissionsschutz, Nr. 2, S. 43 - 49, 2005.
- /16/ Blumenstock, M.; Zimmermann, R.; Schramm, K.; Kettrup, A: Elucidation of relationships between chloroaromatics in full scale incinerators: high temperature formation and long-term concentration increase, 21th International Symposium on Formation and Destruction of Halogenated Environmental Organic Pollutants & POPs, Gyeongju, Korea, 9.-14.9.2001, Organohalogen Compounds, Vol. 50, S. 301-306, 2001.
- /17/ Esser-Schmittmann, W., Semmler, R.: Sicherheitstechnische Maßnahmen für Aktivkohlefilter; in „Krematorium – Emission und Energie“, FVB-Verlag, ISBN 978-3-936057-45-4, 2014.
- /18/ Umweltbundesamt: Quecksilberemissionen aus Krematorien in Deutschland; OSPAR-Bericht, 17.8.2010.
- /19/ Matter-Grütter, C., Baillod, R., Imfeld, Th., Lutz, F.: Quecksilber-Emissionsmessungen in einem Krematorium, Schweizer Monatsschrift Zahnmedizin, S. 1023 – 1028, Vol. 105, Nr. 8, 1995.
- /20/ Scholz, J., Beckmann, M. Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren: Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte: B.G. Teubner Verlag, ISBN 978-3-519-00402-1, 2001.
- /21/ Bittig, M., Haep, S.: Quecksilberemissionen und Minderungsmöglichkeiten in Krematorien; in „Krematorium – Emission und Energie“, FVB-Verlag, ISBN 978-3-936057-45-4, 2014.
- /22/ www.krematorium-berlin.de und www.schultesfrank.de.
- /23/ www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/.../Krematorium.html.

- /24/ www.incinea-pforzheim.de.
- /25/ Burk, H.: persönliche Mitteilungen.
- /26/ Schetter, G.: Available options for emission reduction of PCDD/F in cremation, UNEP workshop for “National action on measures to reduce or eliminate the releases of by-products from unintentional production as requested by the Stockholm Convention on POPs”, Bangkok, Thailand, 13th - 15th March 2002.
- /27/ Gras, B. (Institut für Hygiene und Umwelt – Hamburg): Untersuchung von Holzaschen aus Kleinfeuerungsanlagen, 2006.
- /28/ Schetter, G.: Krematorium – Ascheproben, Kurzvortrag DBU-Tagung „Urnenasche – Gefahr für Boden und Grundwasser?“, 10.1.2016.

11. Danksagung

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ganz besonderer Dank gebührt den Betreuern des Vorhabens, Herrn Dr. Roland Digel und Herrn Franz Peter Heidenreich, die durch konstruktive Diskussionen das Projekt maßgeblich unterstützt haben.

Gedankt sei auch den Verantwortlichen und dem Betriebspersonal der Krematorien:

- Berlin-Baumschulenweg, insbesondere

Herrn Helmut Siering – Geschäftsführer Grün Berlin Service GmbH
Herrn Olaf Moné – Technischer Leiter
Herrn Jens Hofmann – Systemadministrator
Herrn Adrian Meyer – Schichtführer

- München, insbesondere

Frau Kriemhild Pöllath-Schwarz – Amtsleiterin
Herrn Arndt Schulte Döinghaus – Sachgebietsleiter / Leiter Krematorium
Herrn André Ludwiczak – Technischer Leiter Krematorium

- Incinea GmbH (Krematorium Pforzheim)

Herrn Aike Kremser – Geschäftsführer
Herrn Sebastian Krolkowski – Technischer Leiter

Besonderer Dank gebührt ferner Herrn Dipl.-Ing. Ingo Schmidt von der Firma Airtec GmbH, für die Datenaufbereitung im Krematorium München zur Auswertung.

Gedankt sei insbesondere den Mitarbeitern der IUTA e. V. für die Durchführung der Messungen unter schwierigen Messbedingungen.

12. Geistiges Eigentum

Die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse sind geistiges Eigentum der Fa. Schetter GmbH & Co. KG und dürfen nur mit schriftlicher Zustimmung der Fa. Schetter GmbH & Co. KG weiterverwendet werden.

Der vorliegende Bericht darf nur in seiner Gesamtheit vervielfältigt, gezeigt oder weiterverwendet werden. Jedwede Veröffentlichung, auch in Auszügen, bedarf eines Quellenverweises und der schriftlichen Genehmigung durch Fa. Schetter GmbH & Co. KG.