



RUPPMANN
VERBRENNUNGSANLAGEN GMBH

Vor dem Lauch 4, 70567 Stuttgart

Telefon: 0711 / 7156013, Fax: 0711 / 7222722

Theorie und Praxis der Kremationstechnik

von Dr. Gebhard Schetter

Sonderdruck aus:

Krematorium – Aktualisierung der VDI-Richtlinie 3891

Fachverlag des deutschen Bestattungsgewerbes GmbH
ISBN 978-3-936057-32-4

1. Auflage

Dr.-Ing. Gebhard Schetter
Dipl.-Ing. Ruppmann Verbrennungsanlagen GmbH, Stuttgart

Theorie und Praxis der Kremationstechnik

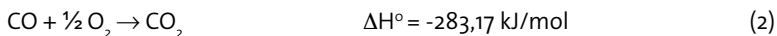
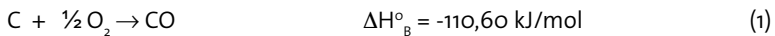
Wunschenken trifft auf Realität

In der täglichen Akquisition technischer Anlagen, zu denen Kremationsanlagen zweifelsohne gehören, trifft man stets auf den verständlichen Wunsch nach geringsten Emissionen, niedrigstem Primärenergieverbrauch, einfachster Bedienung, höchstmöglicher Standzeit und selbstverständlich geringstem Wartungs- und Instandhaltungsaufwand, um nur einige Anforderungen zu nennen. Durch Gesetze und Verordnungen, wie die 27. BImSchV¹, und technische Richtlinien, z. B. die VDI 3891², werden einige Prioritäten gesetzt. Dennoch verbleiben Grauzonen, die oftmals dem Geschick des Verkäufers ausgesetzt sind.

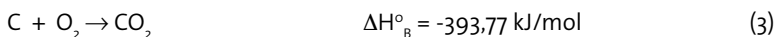
Mit dieser Arbeit wird versucht, anhand einiger ausgewählter Aspekte das technisch Machbare in der Kremationstechnik zu analysieren, um so den Abwägungsprozess zu versachlichen.

Kremation

Der Begriff der Kremation ist aus dem lateinischen *cremare* (verbrennen) abgeleitet. Unter Verbrennung versteht man eine exotherme Redoxreaktion, bei der brennbare Stoffe (Reaktionsedukte) mit Hilfe von Oxidationsmitteln, z. B. Sauerstoff, umgesetzt werden. Die bei der Kremation vorherrschende Reaktion ist die Umsetzung von Kohlenstoff mittels Sauerstoff nach folgendem Schema:



wobei das Umsetzungsverhältnis zwischen CO_2 und CO durch das Boudouard Gleichgewicht bestimmt wird. Die Verbrennung ist dann vollständig abgeschlossen, wenn der gesamte Kohlenstoff in Kohlendioxid umgesetzt ist, d. h.



Obwohl das hier beschriebene Verbrennungsschema in der Summe einen exothermen Reaktionsablauf repräsentiert, wird zum Start (Zündung) Aktivierungsenergie benötigt. Diese ist entweder durch zusätzliche Stützfeuerung und/oder aus der freigesetzten Reaktionswärme bereitzustellen.

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 Rauchgas charakterisiert. Wie aus vorgenanntem Reaktionsschema hervorgeht, wird zur vollständigen Umsetzung des Kohlenstoffs im Idealfall eine exakt definierte Sauerstoffmenge (Mindestsauerstoffbedarf) benötigt, wobei unterstellt wird, dass jeder Kohlenstoff mit Sauerstoff reagiert. Dies lässt sich bei Verbrennungsprozessen mit heterogenen Einsatzstoffen, wie sie bei der Kremation gegeben sind, nicht erreichen. Deshalb werden derartige Anlagen unter Sauerstoff-, respektive Luftüberschussbedingungen betrieben. Andererseits stellt der Verbrennungsluftüberschuss eine Belastung des Verbrennungsprozesses dar, da ein zusätzliches, an der Verbrennung nicht teilnehmendes Rauchgasvolumen erwärmt werden muss, wodurch sich die resultierende Verbrennungstemperatur reduziert³. Vor diesem Hintergrund stellt die sich ergebende Verbrennungstemperatur eine repräsentative und einfach zu messende Hilfsgröße zur Beurteilung des Verbrennungsablaufes dar.

Der Verbrennungsvorgang einer Kremation wird in Bild 1 zusammenfassend dargestellt. Wie die Praxis zeigt, können bei heterogenen Einsatzstoffen lokale und zeitlich variierende Sauerstoffmangelbedingungen auftreten, die trotz lokal hoher Verbrennungstemperaturen nur eine unvollständige Verbrennung zulassen („heißes“ CO). Bei zu hohem Sauerstoffüberschuss dagegen sinkt die Verbrennungstemperatur und damit die Aktivierungsenergie, so dass die zweite Teilreaktion, von CO zu CO₂, behindert wird („kaltes“ CO).

Bei Verbrennungsprozessen mit gasförmigen Brennstoffen lässt sich durch intensive Vermischung der Reaktionspartner eine nahezu vollständige Verbrennung bei geringem Sauerstoffüberschuss (ca. 3 %) erzielen. Bei festen Einsatzstoffen muss der eingebrachte Kohlenstoff durch Energiezufuhr zunächst in die Gasphase übergeführt werden, bevor er an der Verbrennung teilnimmt. Es versteht sich von selbst, dass dieser Teilprozess bei der Kremation nicht durch eine intensive Verwirbelung der entstehenden Rauchgase gestützt werden kann, da es das Bestreben ist, die Asche über den Aschepfad aus dem System auszutragen. Daher ist es zwingend, die Vorgänge bei der Kremation auch räumlich zumindest in **Hauptbrennkammer** und **Nachbrennkammer** zu trennen.

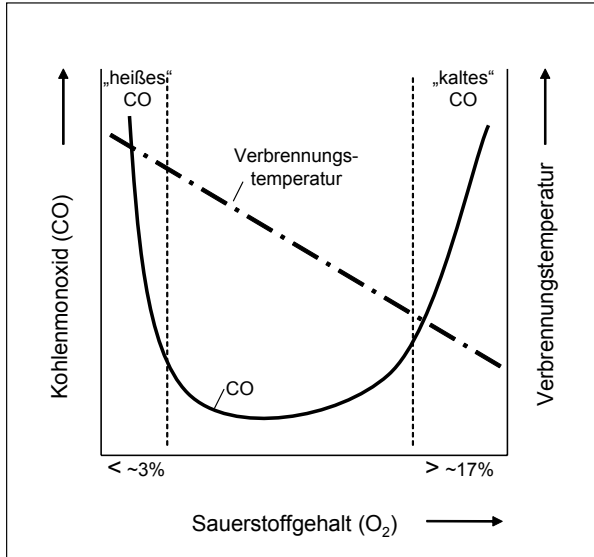


Bild 1: Qualitative Zusammenhänge im Rauchgas von Verbrennungsprozessen

Die in der Hauptbrennkammer stattfindende Kremation des Sarges ist so zu gestalten, dass eine **allseitige** Energiezuführung und Sauerstoffversorgung gegeben ist. Dies wird durch den Strahlungsaustausch zwischen Feuerraumwand und Sarg in Verbindung mit einem Verbrennungsluftverteilungssystem, zweckmäßigerweise bestehend aus Ober-, Seiten- und Unterluftzuführung, sichergestellt. Damit lassen sich trotz hoher Energiedichte niedrige Rauchgasgeschwindigkeiten in der Hauptbrennkammer erzielen. Im Ergebnis stellt sich ein flammenumhüllender Abbrand des Sarges ein (Bild 2).

Die Abgasnachbrennkammer ist insbesondere auf die Umsetzung des oben beschriebenen Reaktionsschemas ausulegen. Dabei gilt es, die Reaktionsteilnehmer einer intensiven Vermischung zu unterziehen und bei ausreichenden Temperatur- und Verweilzeitbedingungen zu verbrennen. Mit Blick auf die beschriebene Bedeutung des Sauerstoffstoffgehaltes sind Maßnahmen zur sauerstoffgeregelten Verbrennungsluftzuführung vorzusehen. In der Praxis hat sich ein Arbeitsbereich von etwa 6 bis 15 Vol.-% $O_{2, \text{tr}}$ als anzustrebender Bereich für Kremationsanlagen herausgestellt.



Bild 2: Entwicklung des Flammenbildes bei der Kremation

Feuerfestauskleidung und Primärenergieeinsatz

Zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von Krematorien wird zunehmend der Primärenergieeinsatz, in der Regel der Gasverbrauch, zugrunde gelegt. Um dies zu untersuchen, wird ein Ofensystem, bestehend aus Kremationsofen einschließlich nachgeschaltetem, mit Feuerfestmaterial ausgekleidetem Rauchgaskanal, betrachtet, das von Umgebungstemperaturen auf die gewünschte Ofenraumtemperatur erwärmt wird⁴. Des Weiteren werden unterschiedliche Massenansätze und Materialien für die Feuerfestauskleidung angenommen. Variiert man die Feuerfestmassen im Bereich von 20 bis 30 Mg bei Wärmekapazitäten dieser Materialien zwischen 1,0 und 1,2 kJ/kgK, so ergibt sich der in Bild 3 dargestellte Energiebedarf in Abhängigkeit des Ausgangszustands, d. h. der Wandtemperatur, aus der der Kremationsofen erwärmt wird.

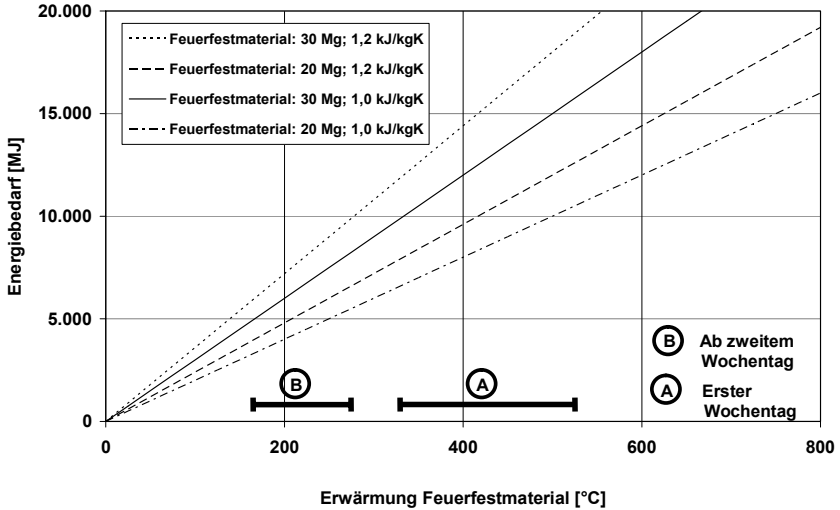


Bild 3: Energiebedarf zur Aufheizung des Feuerfestmaterials (vgl. hierzu auch ⁴⁾)

Im laufenden Betrieb der Kremationsanlagen kühlen die Systeme unter der Woche sowie am Wochenende unterschiedlich stark ab. Während zu Wochenbeginn (Punkt A) das Feuerfestmaterial oftmals über 400 °C erwärmt werden muss, reduziert sich der Energiebedarf zur Ofenaufheizung ab dem zweiten Wochentag infolge geringerer Nachtabkühlung beträchtlich. Dies gilt umso mehr, wenn die Kremationsanlage mehrschichtig betrieben wird. Unterstellt man eine spezifische Wärmekapazität der Feuerfestmasse von 1,1 kJ/kgK bei 20 Mg, so ergibt sich rechnerisch für eine erforderliche angenommene Wochentagserwärmung von etwa 200 °C ein Energiebedarf von rund 5000 MJ, der einem Erdgasbedarf von etwa 135 m³ äquivalent ist. Zum Wochenbeginn kann bei einer zu überbrückenden Temperaturdifferenz von 400 °C unter sonst gleichen Bedingungen demnach die doppelte Gasmenge erforderlich werden.

Im praktischen Kremationsbetrieb wird dieser Energiebedarf zum Erwärmen der Kremationsanlage nur zum Teil vor der jeweils ersten Kremation aufgebracht, da sich infolge der trägen Wärmeleitvorgänge im Feuerfestmauerwerk zunächst die dem Rauchgas zugewandte Mauerwerksseite erwärmt. Daher ist es nicht überraschend, dass während der ersten Kremationen eines Tages der kremationsbezogene Gasverbrauch unter Einbeziehung der Aufheizphase deutlich höher ist als im weite-

ren Tagesverlauf (Bild 4). Im Tagesmittel stellte sich in diesem Fall, trotz Berücksichtigung des Energieverbrauchs für die Ofenaufheizung, ein auf die Anzahl der Kremationen bezogener Gasverbrauch (inkl. Aufheizen) von rund 17,5 m³ pro Kremation ein.

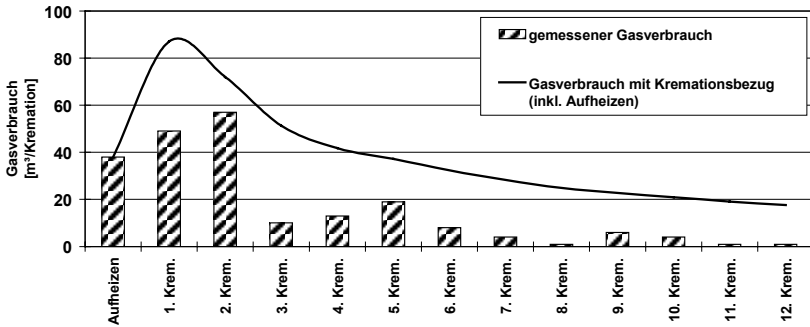


Bild 4: Gemessener Gasverbrauch an einem Etagenofen

Kohlenmonoxid – Leitgröße für PCDD und PCDF?

Mit Blick auf die betriebliche Überwachung der Kremationsanlagen ist es hilfreich, Leitgrößen für die nur mit hohem Messaufwand zu erfassenden polychlorierten Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und -furane (PCDF) heranzuziehen. In einer früheren Arbeit wurden die Mechanismen zwischen Bildung und Zerstörung von PCDD und PCDF unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung auf Krematorien ausführlich beschrieben⁵. Demnach treten die PCDD-/F-Bildungsreaktionen, die Kondensations- und Radikalreaktionen, vornehmlich bei Temperaturen unter 600°C auf (Bild 5). Diesen Bildungsmechanismen stehen Zerstörungsreaktionen gegenüber, die während des Verbrennungsprozesses vorzugsweise in der Nachbrennkammer ablaufen. Dabei handelt es sich um die beiden ebenfalls in Bild 5 angegebenen Zerfallsreaktionen. Während der unimolekulare Zerfall in der Gasphase wesentlich von der Temperatur und der Verweilzeit bestimmt wird, handelt es sich bei den heterogenen Zerfallsreaktionen um Mechanismen, die erheblich über die Stoßrate mit im Rauchgas vorhandenen Staubpartikeln beeinflusst und somit durch turbulente Strömungsverhältnisse begünstigt werden.

Diese Bedingungen für einen wirkungsvollen Abbau von PCDD/F korrespondieren mit den Anforderungen, die an eine möglichst vollständige Verbrennung, charak-

terisiert durch niedrige CO- und C_{ges} -Konzentrationen, gestellt werden. Vor diesem Hintergrund ist es also naheliegend, die kontinuierlich gemessene CO-Konzentration als Leitgröße für ein günstiges PCDD/F-Potenzial nach der Nachverbrennung zu wählen. Um die Einflüsse der Rauchgasreinigung auszuschließen, sind in diesem Zusammenhang Rohgaskonzentrationen von Interesse. Da PCDD/F im Rohgas von Krematorien üblicherweise nicht gemessen wird, sind kaum Messwerte verfügbar. Die wenigen im Krematorium Düsseldorf gemessenen Rohgaskonzentrationen zeigen keine Korrelation zwischen Kohlenmonoxid und PCDD/F (Tabelle 1).

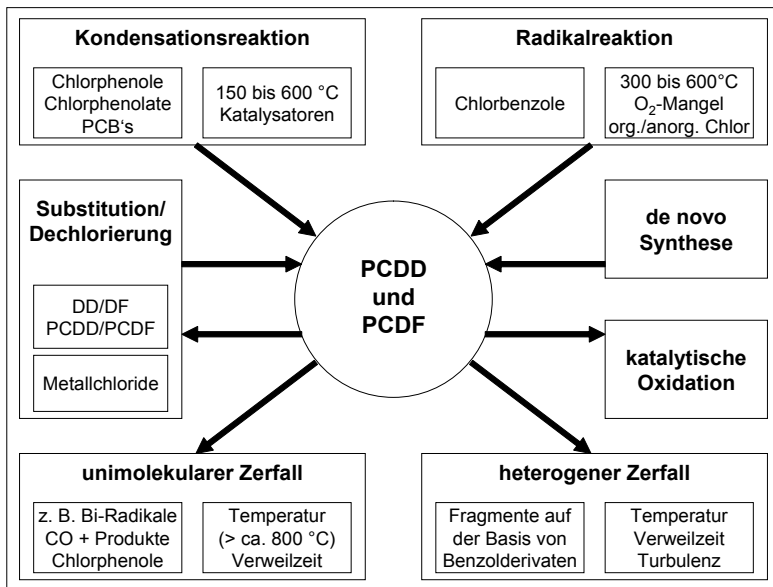


Bild 5: Zusammenwirken von Bildung und Zerstörung von PCDD und PCDF (nach ⁵)

Dieses Ergebnis wird beispielsweise durch Untersuchungen an einer Kleinverbrennungsanlage für Biomasse⁶ bestätigt, wonach bei CO-Konzentrationen bis zu 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 Konzentrationen an C_{ges} und PCDD/F führen können^{7,8}.

Krematorium Düsseldorf (Linie 1 und 2)		Linie 1	Linie 2
Etagenofen: Inbetriebnahme 1980 Messungen: 1992			
Nachverbrennungstemperatur	[°C]	800	800
Kohlenmonoxid	[mg/Nm³]	16,4	46,1
Gesamtkohlenstoff	[mg/Nm³]	< 2	2,7
PCDD/F	[ngTE/Nm³]	2,501	0,755
Krematorium Düsseldorf (Linie 3)			
Etagenofen: Inbetriebnahme 2000 Messungen: 2008/9			
Nachverbrennungstemperatur	[°C]	850	650
Kohlenmonoxid	[mg/Nm³]	6,4	16,9
Gesamtkohlenstoff	[mg/Nm³]	3,0	0,8
PCDD/F	[ngTE/Nm³]	2,1601	0,4683
	[ngTE/Nm³]	1,6429	0,9124
	[ngTE/Nm³]	1,8188	0,9064

Tabelle 1: Rohgasmessungen

Reduzierung des Primärenergieeinsatzes durch Temperaturabsenkung in der Nachverbrennung

Aus den vorgenannten Betrachtungen lassen sich der Primärenergieeinsatz und damit auch der Ausstoß an Kohlendioxid durch folgende Maßnahmen reduzieren:

- Prozessführung bei niedrigem Luftüberschuss,
- Gute Isolierung der Ofenanlage,
- Verminderung der Stillstandsverluste.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Nachverbrennungstemperatur abzusenken⁴. Um das energetische Potenzial abzuschätzen, wird der Ofenraum als ein System betrachtet, das einer zeitlichen Änderung unterliegt (Bild 6).

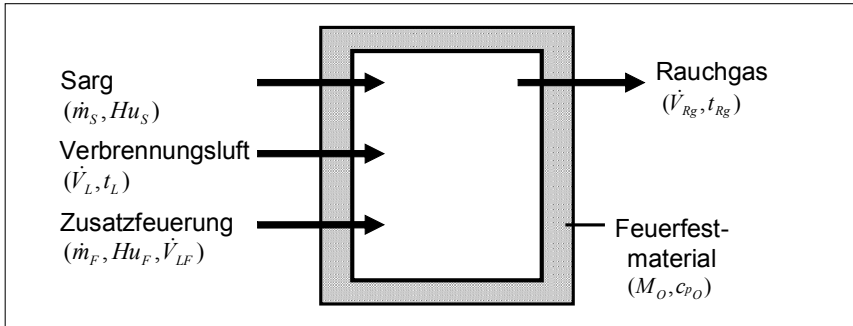


Bild 6: Modell zur instationären Ofenraumbilanzierung (nach 4)

Unter gewissen Vereinfachungen führt die Wärmebilanz zu einer Differentialgleichung erster Ordnung, deren Lösung zur Berechnung der Übertemperatur $\vartheta = T - T_u$ führt⁴

$$\vartheta = \frac{\dot{m}_S \cdot Hu_S + \dot{m}_F \cdot Hu_F}{\rho_{Rg} \cdot c_{pmRg} \cdot \dot{V}_{Rg}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-\rho_{Rg} \cdot c_{pmRg} \cdot \dot{V}_{Rg} \cdot \tau}{M_O \cdot c_{pO}}} \right). \quad (4)$$

Das Ergebnis für den reinen Aufheizvorgang ($\dot{m}_S = 0$) dieser Betrachtungen zeigt Bild 7, in dem der Anheizvorgang in Abhängigkeit von der Feuerfestmasse (mittlere Wärmekapazität 1,1 kJ/kgK) bei einer gesamten Brennerleistung von 90 m³/h simuliert ist. Demnach muss für die in Bild 3 ausgewiesenen Fallbetrachtungen in Abhängigkeit der Feuerfestmassen mit Aufheizzeiten von 1,5 bis 3,5 h (Betrieb am ersten Wochentag) respektive von 0,5 bis 1,5 h (Betrieb ab zweitem Wochentag) gerechnet werden. Die Aufheizzeit und damit auch der Gasverbrauch lassen sich deutlich reduzieren, wenn die erste Sargeinfahrt bei niedrigerer Temperatur erfolgt. Dabei wird ab Erreichen einer vorgegebenen Temperatur (z. B. 650 °C) die Energiefreisetzung durch die Einäscherung mitberücksichtigt. Das mathematische Modell liefert ab Erreichen von 650 °C mit Beginn der Sargeinfahrt einen Anstieg des mittleren Temperaturniveaus um rund 150 °C, wenn man die Zusatzfeuerung nicht verändert (Bild 8).

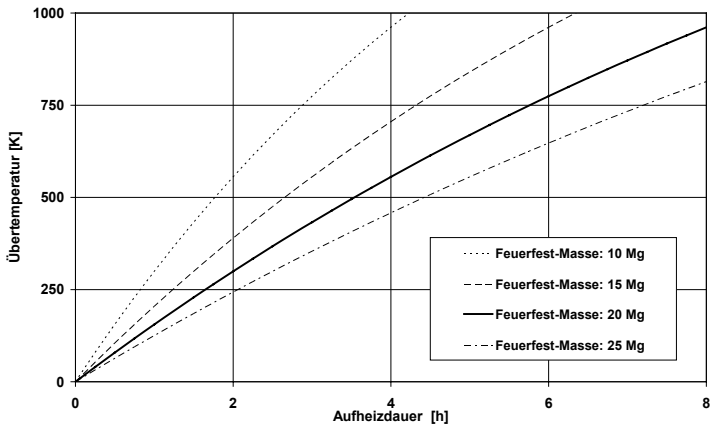


Bild 7: Aufheizvorgang des Feuerfestmaterials (Ofen und Rauchgasfuchs)

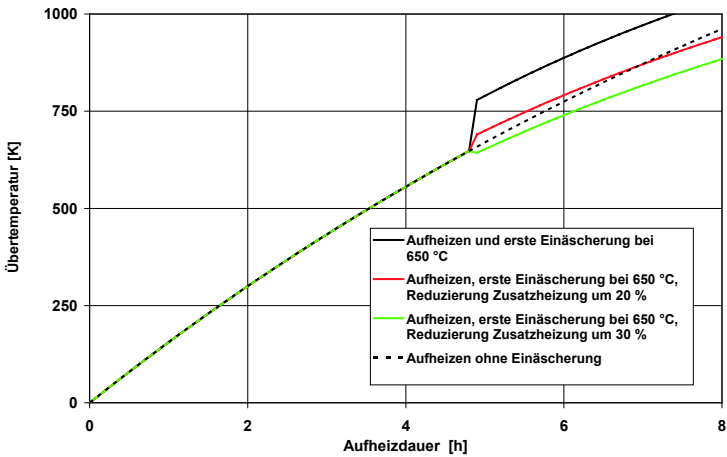


Bild 8: Simulation Aufheizvorgang und Beginn der ersten Sargeinfahrt

Durch Reduzierung der Zusatzfeuerung – in diesem Fallbeispiel um etwa 20 bis 30 % – lässt sich die Erwärmung der Feuerfestauskleidung vergleichbar zur reinen

Aufheizung mittels Gasbeheizung erreichen. Diese Größenordnung der Energieeinsparung konnte durch die Untersuchungen am Krematorium Düsseldorf bestätigt werden, wonach rund 30 bis 35 % des Primärenergieeinsatzes eingespart werden konnte. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass die Emissionsgrenzwerte der 27. BImSchV, und insbesondere PCDD und PCDF, auch bei niedrigeren Nachverbrennungstemperaturen mit entsprechendem Sicherheitsabstand eingehalten werden⁴. Angesichts der im vorangegangenen Abschnitt zu den Mechanismen zu PCDD/F vorgestellten Ausführungen ist dies nicht überraschend.

■ Auswahl des Ofensystems

Die Auswahl des Ofensystems lässt sich aufgrund der vorgenannten Ausführungen sicher nicht an einem einzigen Kriterium festmachen. Vielmehr kommt es auf die Konzeption des Krematoriums und die damit verbundene Betriebsstrategie an, die viele Facetten vom „Ort des Abschieds“ bis hin zu einer „kremationsintensiven technischen Einrichtung“ aufweisen kann. In diese Entscheidungsfindung fließen weitere Aspekte, wie beispielsweise die prognostizierten Kremationszahlen, bauliche Rahmenbedingungen, z. B. mehrgeschossige Bauweise und Hanglage, Vorstellungen zur räumlichen Gestaltung, Arbeitsabläufe und vieles mehr, ein. Die beiden in Bild 9 dargestellten Beispiele veranschaulichen die unterschiedlichen Ansätze zur Raumplanung und damit auch für die Auswahl der Ofensysteme. So eröffnen sich in Verbindung mit einem freistehenden Ofensystem vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten, die dem Bedürfnis einer individuellen Verabschiedung seitens der Angehörigen entgegenkommen, während der eher technisch konzipierte Einfahrraum Vorteile in den Arbeitsabläufen mehrerer, parallel betriebener Kremationslinien aufweist.



Bild 9: Freistehender Etagenofen im Krematorium Augsburg und Einfahrraum im Krematorium Dresden

Zusammenfassung

Die in dieser Arbeit im Detail diskutierten Aspekte der Kremationstechnik zeigen anschaulich, dass die Verbrennungsluftzuführung (Menge und Verteilung) der Schlüssel für die Abgasqualität und die sich hierdurch einstellenden Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen darstellt. Bedingt durch die Heterogenität des menschlichen Körpers unterliegen die Kremationsvorgänge einem stark variierenden Verbrennungsverhalten, das in Einzelfällen den angestrebten vollständigen Gasausbrand behindert, so dass erhöhte CO- und C_{Ges} -Emissionswerte nicht ausgeschlossen werden können.

Das in der 27. BImSchV vorgegebene niedrige CO-Emissionspotenzial erlaubt keine Rückschlüsse auf die Rauchgasqualität hinsichtlich der Emissionen an PCDD/F. Vielmehr kommt es darauf an, dass die Komponenten der Rauchgaskühlung und -reinigung im Sinne einer ganzheitlichen Strategie zur Minimierung dieser Substanzen ausgelegt sind. Das gleiche gilt für die Nachverbrennungstemperatur, die aufgrund der vorliegenden Datenlage oberhalb von 650 °C keine Bedeutung für die Qualität des Verbrennungsprozesses im Allgemeinen und für die PCDD-/F-Emissionen im Besonderen aufweist. Vor diesem Hintergrund sollte die in der 27. BImSchV formulierte Bedingung für die Nachverbrennungstemperatur, insbesondere vor dem Hintergrund der Reduzierung des Primärenergieeinsatzes, überdacht werden.

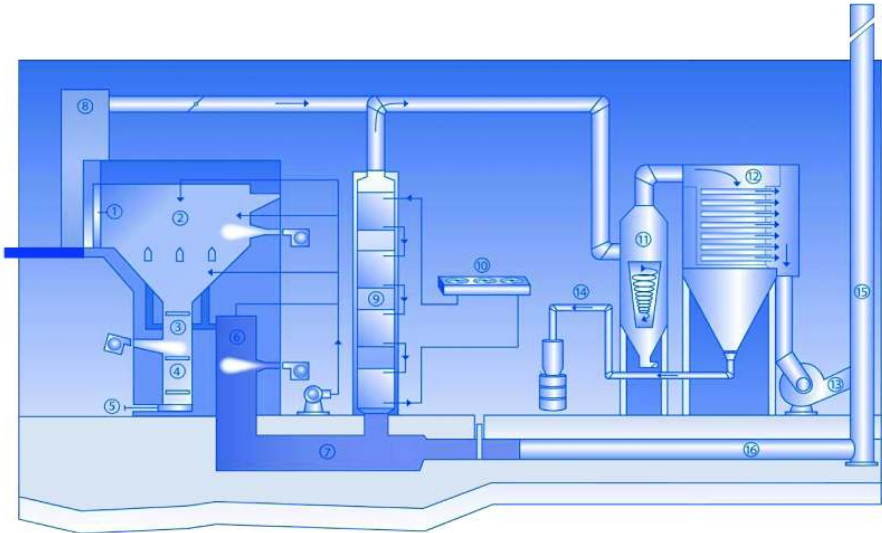
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in Deutschland für Krematorien entwickelten Standards, wie sie in der 27. BImSchV und der VDI-Richtlinie 3891 definiert sind, bei konsequenter Umsetzung nur durch qualitativ hochwertige Kremationssysteme, wie hier beschrieben, erfüllt werden können.

Fußnoten

- 1 27. BImSchV: Siebenundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung – 27. BImSchV) vom 19. März 1997 (BGBl. I S. 545), die durch Artikel 11 des Gesetzes vom 3. Mai 2000 (BGBl. I 632) geändert worden ist.
- 2 VDI-Richtlinie 3891: Emissionsminderung – Anlagen zur Humankremation, Gründruck, (Beuth Verlag), Berlin i. E.
- 3 Schetter, G.: Einäscherung bei niedrigem Luftüberschuss im Etagenofen. VDI-Seminar, Basel, 18./19. Juni 2001.
- 4 Schetter, G.: Untersuchung der Möglichkeiten und Auswirkungen der Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer bei der Einäscherung in Krematorien, DBU-Schlussbericht, Januar 2010.
- 5 Schetter, G.: Möglichkeiten zur Verminderung des Austrages polychlorierter Dibenzop-dioxine (PCDD) und -furane (PCDF) bei der Einäscherung, VDI-Seminar, Düsseldorf, 6./7. Dezember 2000.

- 6 Launhardt, T.: Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen: Schadstoffemissionen, Aschequalität und Wirkungsgrad, Dissertation an der TU München, 2005.
- 7 Nussbaumer, T.: PCDD/F-Emissionen der illegalen Abfallverbrennung: Einflussgrößen, Korrelationen und Konsequenzen für Holzfeuerungen, Immissionsschutz, Nr. 2, S. 43–49, 2005.
- 8 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, 09.–14.9.2001, Organohalogen Compounds, Vol. 50, S. 301–306, 2001.

Mehr als 100 Jahre Erfahrung in der Kremationstechnik



- Konzeptentwicklung
- Genehmigungsplanung
- Aufstellungsplanung
- Detailplanung
- Lieferspezifikation und Materialbeschaffung
- Qualitätssicherung
- Montageendkontrolle
- Inbetriebnahme
- Abnahme
- Wartung und Instandhaltung

Dipl.-Ing. **RUPPMANN** Verbrennungsanlagen GmbH
Vor dem Lauch 4 • 70567 Stuttgart
Telefon: 0711 / 7156013 • Fax: 0711 / 7222722
E-Mail: info@ruppmann.de • www.ruppmann.de