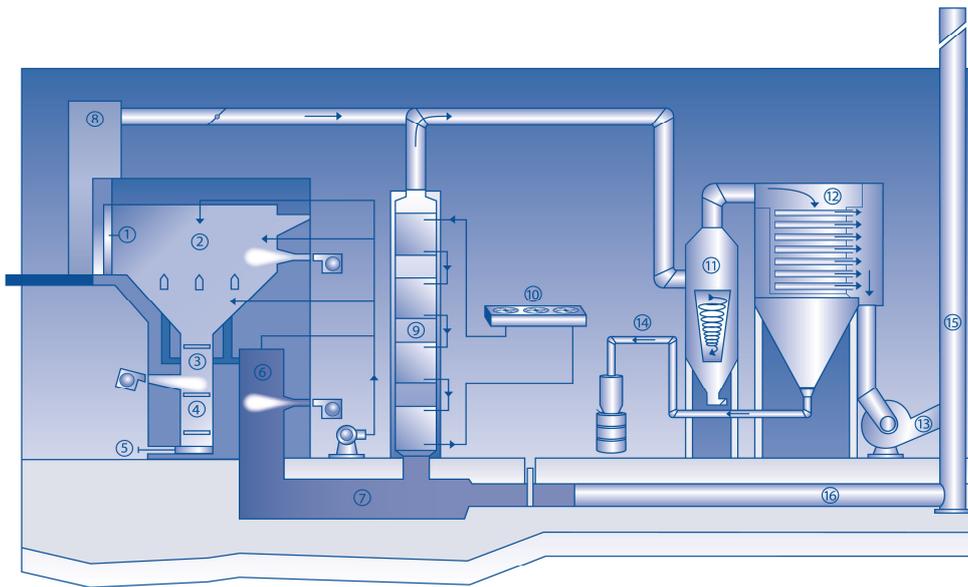


Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Untersuchung der Möglichkeiten und Auswirkungen der Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer bei der Einäscherung in Krematorien



Schlussbericht

Projektbearbeitung:

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

in Zusammenarbeit mit

Landeshauptstadt Düsseldorf
- Gartenamt -
Kaiserswerther Straße 390
40474 Düsseldorf

Aktenzeichen:

26847

Referat:

23

Projektlaufzeit:

September 2008 / November 2009

Vorwort

Dieses mit Mitteln der DBU - Deutsche Bundesstiftung Umwelt - geförderte Forschungsvorhaben wurde von der Schetter GmbH & Co. KG (vormals Schetter GmbH) gemeinsam mit der Landeshauptstadt Düsseldorf finanziert und durchgeführt.

Die Untersuchungen erfolgten an der Linie 3 des Krematoriums Düsseldorf. Das Betriebspersonal übernahm hierbei die Versuchsüberwachung und Erfassung der Betriebsdaten. Mit der Durchführung der diskontinuierlichen Emissionsmessungen wurde das hierfür zugelassene Messinstitut, Fa. Müller-BBM, beauftragt. Fachtechnisch wurde das Vorhaben durch die Fa. Schetter GmbH & Co. KG betreut, die auch die Versuchsauswertung übernahm und den Schlussbericht erstellte.

Die Organisatoren danken der Deutsche Bundesstiftung Umwelt für die Projektmitfinanzierung. Unser besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Franz-Peter Heidenreich, der dieses Vorhaben von Beginn an unterstützte. Dank gebührt auch der Stadtverwaltung der Landeshauptstadt Düsseldorf, namentlich den Herren Dipl.-Ing. Manfred Krick, Jörg-Michael Gillet, Philipp Gerhards und Axel Zschuckelt, sowie dem Betriebspersonal des Krematoriums für die gewissenhafte Versuchsdurchführung und interessanten Diskussionen im Zuge der Projektdurchführung. Einen maßgebenden Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatte Herr Dipl.-Ing. Daniel Schwarz, der im Rahmen seiner Semesterarbeit die Koordination der Messdurchführung sowie die Datenerfassung und Datenaufbereitung übernommen hat.

Inhaltsverzeichnis

- 1. Aufgabenstellung und Zielsetzung**
- 2. Grundlagen zur Beschreibung der emissionsrelevanten Zusammenhänge bei der Einäscherung**
 - 2.1 Verbrennungstechnische Beschreibung des Einäscherungsprozesses
 - 2.1.1 Masse und Energiegehalt
 - 2.1.2 Modellansatz zur Beschreibung quasistationärer Verbrennungsvorgänge
 - 2.1.3 Absenkung der Nachverbrennungstemperatur
 - 2.1.4 Bedeutung der Feuerfestauskleidung für den Gasverbrauch
 - 2.1.5 Aufheizzeit des Feuerfestmaterials
 - 2.2 Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff
 - 2.3 Staubabscheidung
 - 2.4 Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -dibenzofurane
 - 2.4.1 Einflussnahme bei der Verbrennung
 - 2.4.2 Rauchgaskühlung (de-novo Synthese)
 - 2.4.3 Rauchgasreinigung
 - 2.4.4 PCDD-/F-Minderungsstrategie
 - 2.5 Geruchsemissionen
- 3. Betriebstechnische Untersuchungen**
 - 3.1 Das Krematorium in Düsseldorf
 - 3.2 Gliederung der Untersuchungsphasen
 - 3.3 Methodik der durchgeführten Untersuchungen
 - 3.4 Beschreibung der eingeäscherten Särge
 - 3.5 Betriebsverhalten in den einzelnen Untersuchungsphasen
 - 3.5.1 Betriebsphase 1 bei einer Mindesttemperatur von 650 °C in der Nachbrennkammer
 - 3.5.2 Betriebsphase 2 bei einer Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer – Referenzphase
 - 3.5.3 Betriebsphase 3 bei einer Mindesttemperatur von 750 °C in der Nachbrennkammer
 - 3.6 Erfassung und Bewertung des Gasverbrauchs
- 4. Diskontinuierliche Messungen**
 - 4.1 Staubkonzentrationen
 - 4.2 PCDD/F- Untersuchungen im Rauchgas
 - 4.3 PCDD/F-Gehalte in der Gewebefilterasche
 - 4.4 Geruchskonzentrationen

- 4.5 Ergebnisse aus Untersuchungen in anderen Krematorien
- 5. **Zusammenfassende Bewertung**
- 6. **Ergebnisdarstellung im Rahmen einer Tagung**
- 7. **Quellenverzeichnis**
- 8. **Geistiges Eigentum**
- 9. **Anhang**

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Siebenundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (27. BImSchV) schreibt in § 3 für den Betrieb von Krematorien vor, dass die Temperatur nach der letzten Verbrennungsluftzuführung mindestens 850 °C, als 10-Minutenwert, betragen muss **und** mit Bezug auf diese Mindesttemperatur ein neuer Sarg nicht eingefahren werden darf, wenn diese unterschritten ist /1/.

Dies führt zu einem erheblichen Energieeinsatz, der neben finanziellen Auswirkungen für die Betreiber von Krematorien auch einen zusätzlichen CO₂-Eintrag in die Umwelt zur Folge hat. Außerdem resultieren aus diesen Temperaturforderungen Belastungen für das Ofenmauerwerk und ggf. nachgeschaltete Wärmetauscherrohrbündel.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll geprüft werden, ob auch bei niedrigeren Nachverbrennungstemperaturen **keine** Überschreitungen der in der 27. BImSchV vorgegebenen Emissionsgrenzwerte, insbesondere der für polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F), zu erwarten sind und welches Energieeinsparpotential durch eine Temperaturabsenkung bei der Nachverbrennung erzielt werden kann. Die Untersuchungen an der Linie 3 des Krematoriums Düsseldorf erfolgten daher bei den Betriebseinstelltemperaturen in der Nachbrennkammer von 850 °C, 750 °C und 650 °C und beinhalteten einen betriebstechnischen sowie einen emissionstechnischen Teil mit folgenden Schwerpunkten:

- **Energieeinsatz durch Langzeitaufzeichnungen:** Für ausgewählte Betriebsfälle wurden über einen Zeitraum von jeweils 4 Wochen der Gasverbrauch und die Temperatursituation sowie weitere prozessrelevante Daten bei definierten Einäscherungsbedingungen erfasst.
- **Emissionsmessungen:** Analyse der Einäscherungsvorgänge vor dem Hintergrund der Bildungs- und Zerstörungsmechanismen für PCDD/F sowie anderer Schadstoffe und Vergleich mit Messungen unter Normalbedingungen.

2. Grundlagen zur Beschreibung der emissionsrelevanten Zusammenhänge bei der Einäscherung

Der Standard der Einäscherungstechnik in Deutschland wird einerseits durch die gesetzlichen Vorgaben der 27. BImSchV und andererseits durch den „Stand der Technik“ definiert. Als Orientierung zur Beschreibung des Standes der Technik dient die VDI-Richtlinie 3891 (VDI 3891), die in der letztgültigen Fassung im Mai 2001 erstellt wurde und derzeit aktualisiert wird /2/. Die Einäscherungsanlagen, die diesen Anforderungen entsprechen, bestehen im Wesentlichen aus den Komponenten:

- **Einäscherungsöfen:** Ausgeführt als gas- oder ölbefeuerte Etagen-, Kompakt- oder Flachbettöfensysteme, sowie in Einzelfällen als Elektroöfensysteme.
- **Rauchgaskonditionierung:** Rauchgaskühlung für die nachfolgende Rauchgasreinigung.
- **Rauchgasreinigung:** Meist unter Anwendung der Trockensorptionstechnik oder der katalytischen Filtration.
- **Prozesssteuerung:** In der Regel in speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS) ausgeführt und mit Systemen zur Prozessvisualisierung ausgestattet.
- **Emissionsmesswerterfassung:** Zur kontinuierlichen Messung und Registrierung des Sauerstoffgehalts, der Kohlenmonoxidkonzentration und der Rauchgasdichte im Reingas sowie der Rauchgastemperatur in der Nachbrennkammer.

2.1. Verbrennungstechnische Beschreibung des Einäscherungsprozesses

2.1.1. Masse und Energiegehalt

In der VDI 3891 sind Bandbreiten und Mittelwerte für die Massen und Energiegehalte des Sarges, des Leichnams sowie der Sargbeigaben zusammengestellt (Tabelle 2.1).

Basisdaten	Masse [kg] (Quelle: VDI-3891)			Heizwert [MJ/kg]			einäscherungsbezogener Energiegehalt [MJ/EÄ]		
	min	max	mittel ¹⁾	min	max	mittel ¹⁾	min	max	mittel ¹⁾
Sarg	35	65	50	14	20	17	490	1.300	850
Leichnam	40	95	67,5	6	8	7	240	760	473
Sargbeigaben	4	12	8	7	11	9	28	132	72
Gesamt	79	172	125,5				758	2.192	1.395

Hinweis: ¹⁾ arithmetischer Mittelwert

Tabelle 2.1: Massen und Energiegehalte bei der Einäscherung gemäß VDI 3891

Aus den einäscherungsbezogenen Energiegehalten der Särge lassen sich unter Bezugnahme der jeweiligen dazugehörenden Massen die korrespondierenden Heizwerte berechnen, die der folgenden Betrachtung zugrunde liegen:

- minimaler Energiegehalt: 79 kg bei 9,6 MJ/kg
- mittlerer Energiegehalt: 125,5 kg bei 11,1 MJ/kg
- maximaler Energiegehalt: 172 kg bei 12,7 MJ/kg

2.1.2. Modellansatz zur Beschreibung quasistationärer Verbrennungsvorgänge

Zur näherungsweise Beschreibung der Einäscherung unter quasistationären Bedingungen wird ein vereinfachter Modellansatz gewählt, indem der gesamte Einäscherungssofen als Bilanzraum betrachtet wird (Bild 2.1).

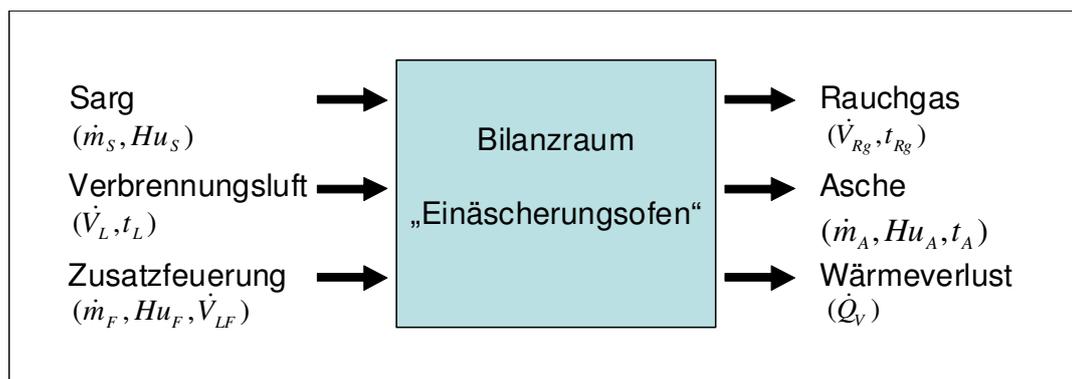


Bild 2.1: Ofenbetrachtung als Bilanzraum

Zu den Stoff- und Energieströmen, die in den Bilanzraum eintreten, gehören der Sarg einschließlich Leichnam und Sargbeigaben, charakterisiert durch \dot{m}_s und Hu_s , die für die Einäscherung benötigte Verbrennungsluft (\dot{V}_L, t_L), bestehend aus Primär- und Sekundärverbrennungsluft, sowie die Zusatzfeuerung (\dot{m}_F, Hu_F). Bei gasbefeuerten Einäscherungsanlagen, die nachfolgender Betrachtung zugrunde liegen, sind neben dem Brennstoffeinsatz (\dot{m}_s, Hu_s) auch die für die Zusatzfeuerung benötigte Verbrennungsluft (\dot{V}_{LF}) zu berücksichtigen. Bei dieser vereinfachten Betrachtung wird **nicht** zwischen den Einzelvorgängen in den einzelnen Brennkammern, d.h. Hauptbrennkammer, Nachbrennkammer und Ascheausbrennkammer, unterschieden. Daher gelten diese Ausführungen für Etagen-, Flachbett- und Kompaktofensysteme gleichermaßen. Als wesentlicher Stoff- und Energiestrom verlässt das Rauchgas diesen Bilanzraum, wobei sich der resultierende Rauchgasvolumenstrom (\dot{V}_{Rg}) auf die Nachverbrennungstemperatur (t_{Rg}) erwärmt hat. Die Bilanzierung wird durch die entnommene Urnenasche (\dot{m}_A, Hu_A, t_A) und den Wärmeverlust des Ofens (\dot{Q}_v) sowie unter Bezugnahme auf die Umgebungstemperatur (t_u) vervollständigt.

Somit ergeben sich nachfolgende Bilanzgleichungen:

(a) Massenbilanz:

$$\dot{m}_S + \rho_L \cdot \dot{V}_L + \dot{m}_F + \rho_L \cdot \dot{V}_{LF} = \rho_{Rg} \cdot \dot{V}_{Rg} + \dot{m}_A \quad (1)$$

(b) Energiebilanz:

$$\begin{aligned} \dot{m}_S \cdot Hu_S + \rho_L \cdot c_{pm,L} \cdot \dot{V}_L (t_L - t_U) + \dot{m}_F \cdot Hu_F + \rho_L \cdot c_{pm,LF} \cdot \dot{V}_{LF} (t_{LF} - t_U) \\ = \rho_{Rg} \cdot c_{pm,Rg} \cdot \dot{V}_{Rg} (t_{Rg} - t_U) + \dot{m}_A \cdot Hu_A (t_A - t_U) + \dot{Q}_V \end{aligned} \quad (2)$$

In diese Bilanzierungsbetrachtung fließt die Verbrennungsrechnung ein. Sie beschreibt die bei der chemischen Reaktion resultierende Umwandlung von „festen“ Bestandteilen in die Gasphase, z. B. Kohlenstoff in Kohlendioxid. Da es sich in der Summe um eine exotherme Reaktion handelt wird Energie freigesetzt, die über das Rauchgas aus dem Ofen abgeführt wird. Des Weiteren wird zur Beschreibung der Verbrennungsvorgänge die klassische Verbrennungsrechnung herangezogen, die sich wie folgt angeben lässt:

(c) Verbrennungsrechnung:

$$\dot{V}_L = \lambda_S \cdot l_{\min,S} \quad \text{und} \quad \dot{V}_{LF} = \lambda_F \cdot l_{\min,F} \quad (3)$$

$$\dot{V}_{Rg} = \dot{m}_S \cdot [v_{\min,S} + (\lambda_S - 1) \cdot l_{\min,S}] + \dot{m}_F \cdot [v_{\min,F} + (\lambda_F - 1) \cdot l_{\min,F}] \quad (4)$$

In den Gleichungen (1) bis (4) sind Stoffgrößen, wie Dichte (ρ) und mittlere spezifische Wärmekapazität (c_{pm}), enthalten, die sowohl von der Temperatur als auch von der jeweiligen Gaszusammensetzung abhängen. Unter Verwendung empirisch ermittelter Näherungsansätze lassen sich diese Stoffgrößen, ebenso wie die stoffabhängige Mindestluftmenge (l_{\min}) und Mindestrauchgasmenge (v_{\min}), mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit berechnen.

Die Qualität der Ofenisolierung wird durch den Wärmeverlust (\dot{Q}_V) bestimmt. Dieser lässt sich über die Gleichung

$$\dot{Q}_V = k \cdot A \cdot (t_{Rg} - t_U) \quad (5)$$

mit dem Wärmedurchgangskoeffizient (k)

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (6)$$

näherungsweise abschätzen. Die Wärmedurchgangskoeffizienten von gut isolierten Ofensystemen liegen etwa im Bereich von 0,25 bis 0,35 W/(m²K). Bei einer Oberfläche des Ofens von etwa 45 bis 50 m² und einer mittleren Verbrennungstemperatur von 850 °C ergibt sich demnach ein Wärmeverlust des Ofens im Bereich von 9,3 bis 14,4 kW. Verglichen mit der bei der Kremation eingetragenen Energie beträgt dieser Anteil etwa 2 bis 4 %. Bei weniger gut isolierten Ofensystemen sowie unter Berücksichtigung weiterer Verluste, wie Restkohlenstoffgehalte in der Urnenasche, können die Verluste zum Teil deutlich über 10 % im kontinuierlichen Einäscherungsbetrieb liegen. Den weiteren Berechnungen liegt ein einheitlicher Verlustfaktor von

$$\eta_V = \frac{\dot{Q}_V}{\sum \dot{Q}_{Zu}} = 0,1$$

zugrunde. Ferner werden weitere, in der Praxis übliche Annahmen getroffen:

- die Brennerluft wird aus dem Raum angesaugt: $t_{LF} = t_U$,
- die Ascheentnahme erfolgt bei Umgebungstemperatur: $t_A = t_U$,
- die Zusatzfeuerung (Gas) erfolgt nahezu stöchiometrisch: $\lambda_F \sim 1$.

Somit ergibt sich aus der Energiebilanz (2) unter Verwendung von Gleichung (4) der Verbrennungsrechnung und einigen Umformungen folgende Gleichung zur Berechnung der Rauchgastemperatur

$$t_{Rg} = t_U + \frac{(1 - \eta_V) \cdot [(1 - \eta_A) \cdot \dot{m}_S \cdot Hu_S + \dot{m}_F \cdot Hu_F]}{c_{pm,RG} \cdot \rho_{Rg} \cdot [\dot{m}_S \cdot (v_{\min,S} + (\lambda_S - 1) \cdot l_{\min,S}) + \dot{m}_F \cdot v_{\min,F}]} \quad (7)$$

Bei selbstgängiger Verbrennung, d. h. $\dot{m}_F = 0$, zeigen diese theoretischen Betrachtungen folgende Abhängigkeiten:

- 1) Die Rauchgastemperatur t_{Rg} ist praktisch von der Sargmasse **unabhängig**.
- 2) Der Heizwert des Sarges (Sarg, Leichnam und die Sargbeigaben) beeinflusst direkt die Rauchgastemperatur.
- 3) Die Rauchgastemperatur ist umgekehrt proportional zur Luftüberschusszahl.

Auf der Basis vorgenannter Ausführungen lassen sich nun die Konsequenzen für die Prozessführung bei der Kremation untersuchen. Die Verbrennungsrechnung zeigt, dass der sich ergebende Rauchgasvolumenstrom dabei maßgeblich von dem Verbrennungsluftangebot, charakterisiert durch die Luftüberschusszahl λ , bestimmt wird. Im Idealfall der stöchiometrischen Verbrennung liegt die Luftüberschusszahl bei $\lambda=1$. Damit während der instationären Vorgänge in jedem Betriebsfall ausreichend Verbrennungsluft zur Verfügung steht, wird der Prozess in der Praxis mit einem überstöchiometrischen Luftangebot, d. h. $\lambda > 1$, betrieben. Dies führt zu einer Zunahme des Rauchgas-

volumenstromes und bei gleichbleibender Energiefreisetzung zur Abnahme der sich einstellenden Verbrennungstemperatur (Bild 2.2).

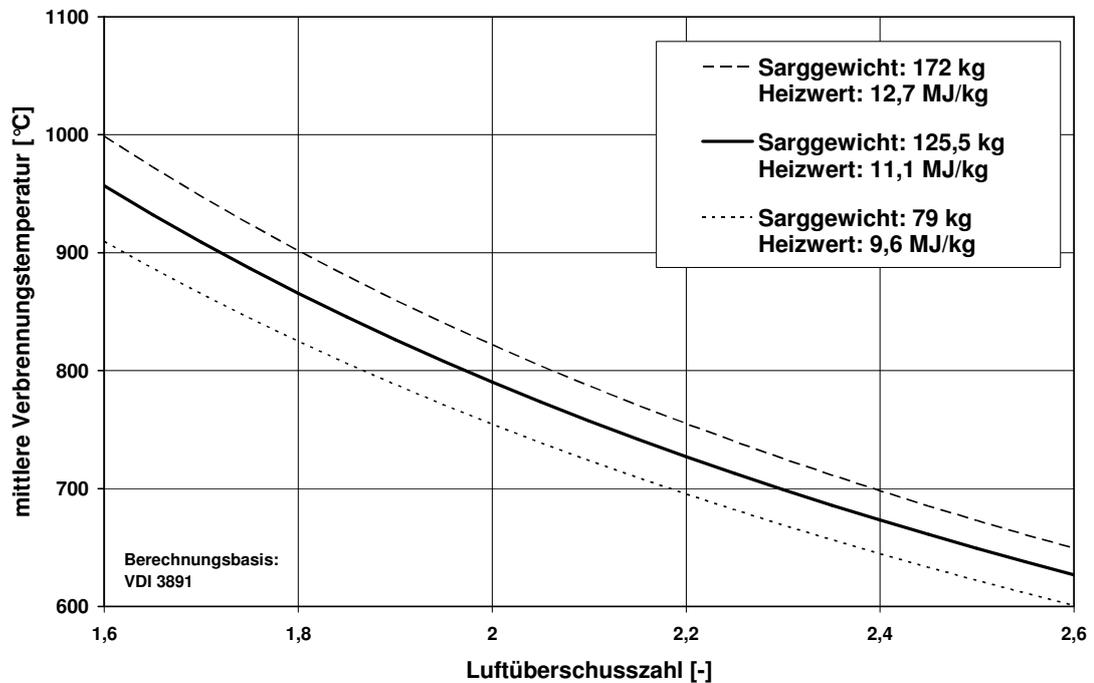


Bild 2.2: Einfluss der Luftüberschusszahl auf die mittlere Verbrennungstemperatur

Die Festlegung der Luftüberschusszahl und der sich daraus ergebenden Konsequenzen gehört vor dem Hintergrund der im Innern des Ofens verwirklichten Luft- und Rauchgasführung und des eigens hierauf abgestimmten Prozessregelungssystems zur herstelllerspezifischen Auslegung.

Um Temperaturforderungen, wie sie in der 27. BImSchV für die Nachverbrennung mit 850 °C definiert sind, zu genügen, muss bei Bedarf mittels Stützbrenner dem Prozess Energie zugeführt werden. Die hierfür benötigte Brennerleistung wird einerseits von der geforderten Temperatur in der Nachbrennkammer (NBK) und andererseits von dem in Bild 2.2 dargestellten Verbrennungsergebnis bestimmt.

Im Krematorium Düsseldorf wird zur Stützfeuerung Erdgas mit einem Heizwert von 36,9 MJ/m³ eingesetzt. Als Konsequenz höherer Luftüberschusszahlen und des damit verbundenen größeren Rauchgasvolumenstromes bei niedrigerem Temperaturniveau, steigt, wie Bild 2.3 zeigt, die erforderliche Zusatzenergie um das Rauchgas auf die gewünschte Nachverbrennungstemperatur zu erwärmen.

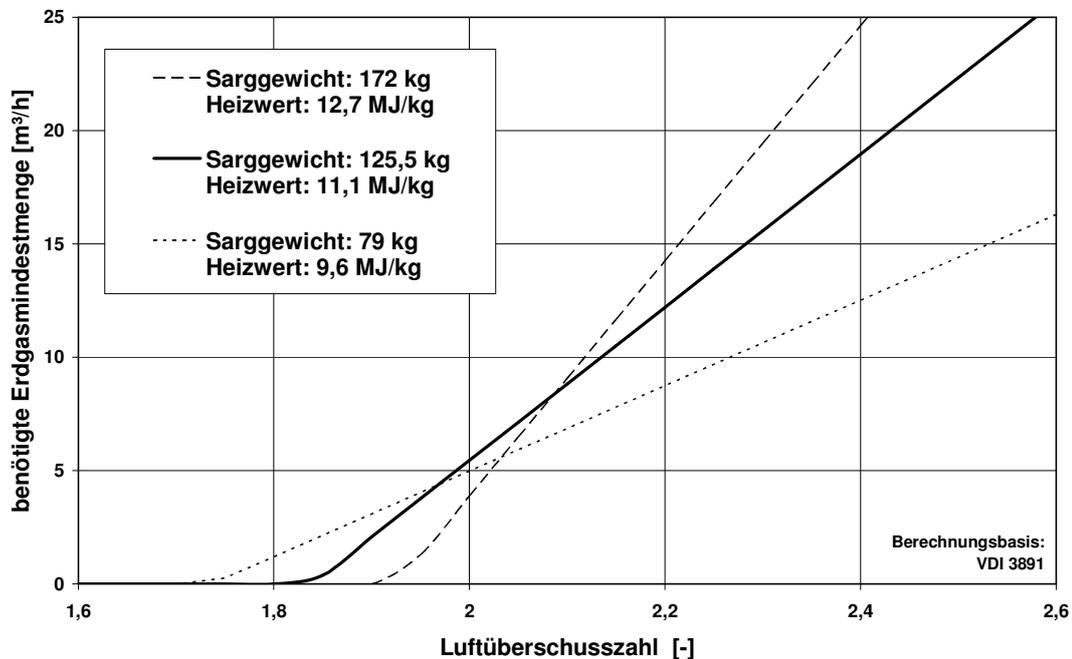


Bild 2.3: Einfluss der Luftüberschusszahl auf die benötigte Zusatzfeuerung

Der sich aus den beiden Prozessschritten Einäscherung und Zusatzfeuerung ergebende gesamte Rauchgasvolumenstrom ist in Bild 2.4 angegeben.

Da in der Praxis als Prozessregelgröße der im Rauchgas gemessene trockene Sauerstoffgehalt ($O_{2,tr}$) verwendet wird, muss zur Interpretation vorgenannter Zusammenhänge die Relation zwischen der Luftüberschusszahl und dem Sauerstoffgehalt hergestellt werden. Diese ergibt sich aus der Verbrennungsrechnung gemäß /3/ zu:

$$\lambda = 1 + \frac{v_{\min}}{l_{\min}} \cdot \frac{O_2}{21 - O_2} \quad (8)$$

Die graphische Darstellung dieser Gleichung zeigt unter Verwendung der Kennzahlen v_{\min} und l_{\min} , dass der Betriebsbereich ($\lambda \sim 2,0$ bis $2,2$) einem Sauerstoffgehalt von 11 %, also dem Bezugswert der 27. BImSchV, entspricht (Bild 2.5). Eine erhebliche Abweichung des gemessenen Sauerstoffgehaltes von über 11 % im Nachverbrennungsbereich ist daher ein Indiz dafür, dass der Kremationsofen mit zusätzlichen Verbrennungsluftreserven betrieben wird, die sich bei Einhaltung vorgegebener Nachverbrennungstemperaturen direkt auf den Gasverbrauch auswirken. Diese Reserven können sowohl gezielt von der Prozessführung bereit gestellt werden als auch aus unerwünschten Effekten, wie beispielsweise Undichtheiten am Ofen und im Rauchgasfuchs, resultieren.

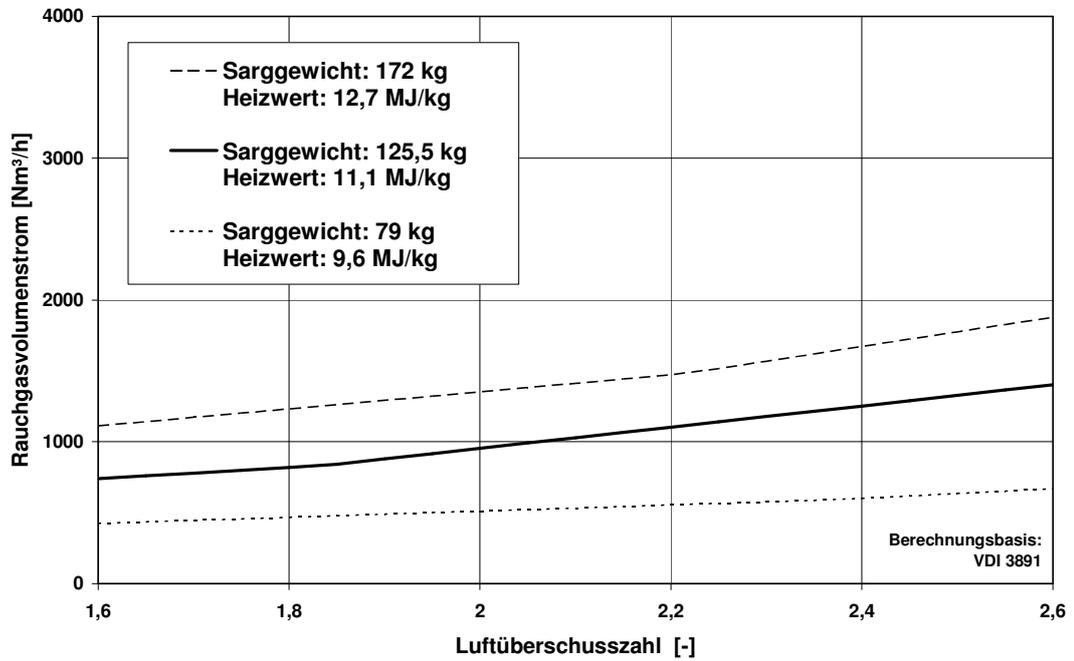


Bild 2.4: Gesamter Rauchgasvolumenstrom als Funktion der Luftüberschusszahl

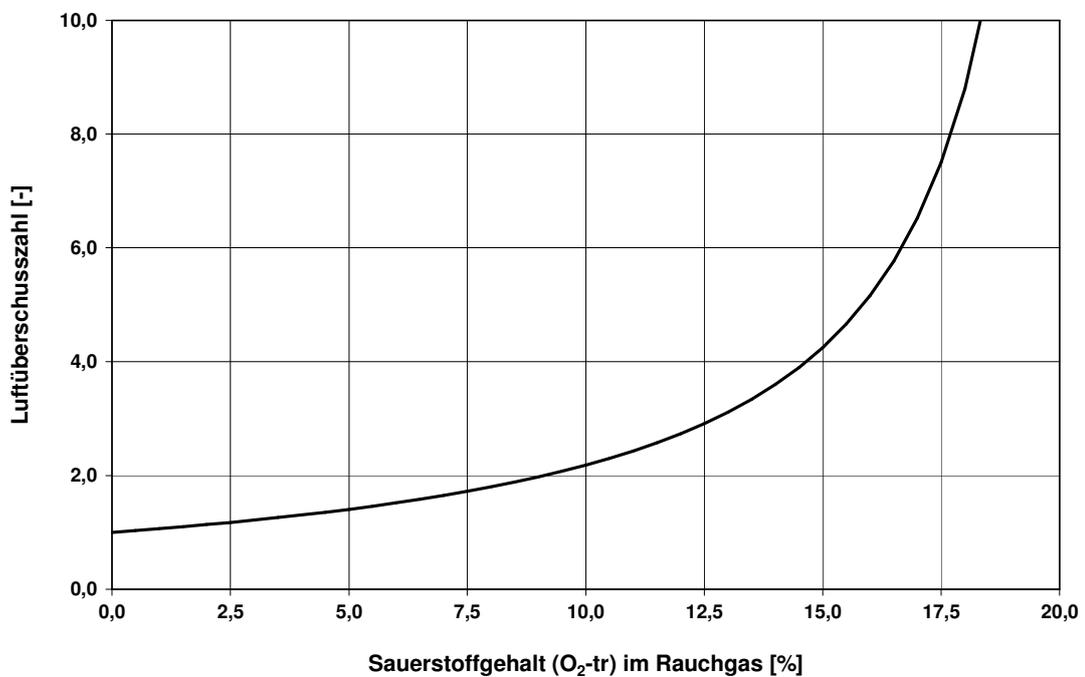


Bild 2.5: Zusammenhang zwischen Luftüberschusszahl und O_2 -Gehalt im Rauchgas.

2.1.3. Absenkung der Nachverbrennungstemperatur

Aus dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen quasistationären Modellansatz lässt sich nun in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl der reduzierte Gasverbrauch für unterschiedliche Temperaturabsenkungen berechnen (Bild 2.6).

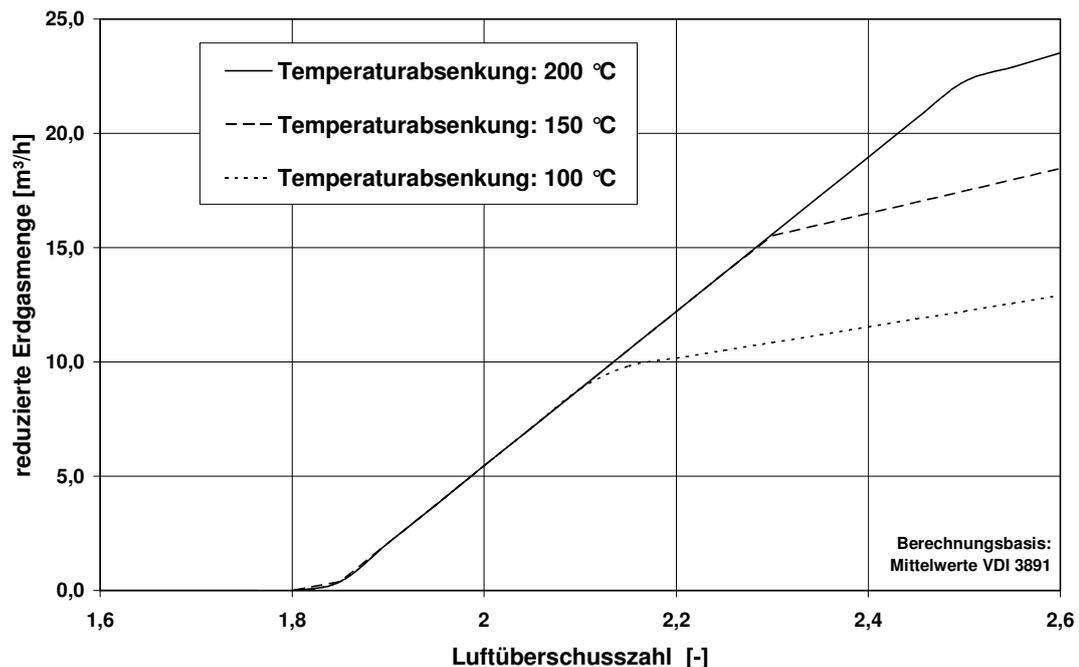


Bild 2.6: Minderung des Erdgasverbrauchs durch Temperaturabsenkung

Aus diesen Betrachtungen lässt sich bereits für den quasistationären Betriebsfall ein beachtliches Einsparpotenzial ableiten, das unter Berücksichtigung der tatsächlichen, instationären Verbrennungsbedingungen bei der Einäscherung noch deutlicher zu erwarten ist.

2.1.4. Bedeutung der Feuerfestauskleidung für den Gasverbrauch

In der Regel werden Einäscherungsanlagen nachts, an den Wochenenden und an Feiertagen nicht betrieben. Als Folge davon findet eine mehr oder minder intensive Abkühlung der Feuerfestauskleidung des Ofens (Ofenmauerwerk) sowie der mit Feuerfestmaterialien ausgekleideten Rauchgaskanäle (Rauchgasfuchs) statt. Vor Wiederinbetriebnahme der Einäscherungsanlage muss die gesamte Feuerfestauskleidung (Index „FA“) aufgeheizt werden. Eine überschlägige Berechnung der hierfür benötigten Wärmemenge erlaubt folgender Ansatz:

$$Q_{FA} = M_{FA} \cdot c_{pm,FA} \cdot (t_{FA,St} - t_{FA,O}) \cdot \quad (9)$$

Maßgebend für die Wärmeaufnahme sind die dem Rauchgasstrom zugewandten Feuerfestschichten, die bei Etagen- sowie schweren Flachbett-/Kompaktofen und in Abhängigkeit der Länge des ausgekleideten Rauchgaskanals ca. 20 bis 25 Mg betragen können. Die Wärmekapazität der Feuerfestmaterialien schwankt üblicherweise zwischen 0,8 und 1,2 kJ/kgK. Demnach benötigt man, abhängig vom Ausgangszustand, d.h. der Wandtemperatur ($t_{FA,0}$), die nach betriebsfreien Wochenenden bei etwa 250 °C liegen kann, bis zum stationären Zustand $t_{FA,St} \sim 750$ °C, eine beachtliche Wärmemenge, die in der Feuerfestauskleidung während des Aufheizbetriebes eingespeichert wird (Bild 2.7). Selbst durch die regelmäßige Nachtabschaltung sinkt das Temperaturniveau in der Feuerfestauskleidung in manchen Fällen um bis etwa 250 °C, so dass selbst an Wochentagen ein nicht unwesentlicher Energieeintrag in der Aufheizphase benötigt wird. Bei einem Durchschnittswert von 1 kJ/kgK und einer Feuerfestmasse von 20 Mg ergibt sich rechnerisch für eine erforderliche mittlere Wochentagserwärmung um etwa 250 °C ein Energiebedarf von 5000 MJ, der einem Erdgasäquivalent von etwa 135 m³ entspricht. Zum Wochenbeginn kann bei einer zu überbrückenden Temperaturdifferenz von 500 °C unter sonst gleichen Bedingungen demnach die doppelte Gasmenge erforderlich werden.

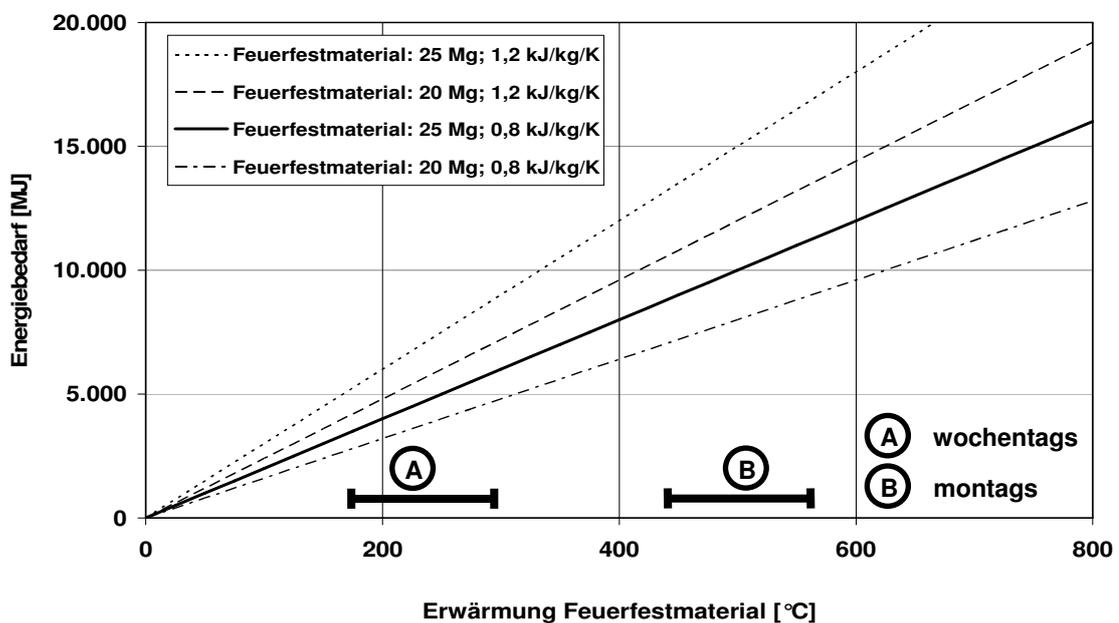


Bild 2.7: Energiebedarf zur Aufheizung des Feuerfestmaterials

Der Nachteil des höheren Energiebedarfs zur Erwärmung des Feuerfestmaterials bei schweren Ofensystemen wird insbesondere bei höheren Einäscherungszahlen dadurch kompensiert, dass die in der Feuerfestauskleidung eingespeicherte Energie in Wechselwirkung mit dem Einäscherungsvorgang wieder zur Verfügung gestellt wird. Vor

diesem Hintergrund zeichnen sich schwere Ofensysteme vor allem bei höheren Einäscherungszahlen aus.

2.1.5. Aufheizzeit des Feuerfestmaterials

Angesichts der im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Auswirkung des Feuerfestmaterials (Masse und Wärmekapazität) auf den Energiebedarf während des Aufheizvorgangs stellt sich die Frage nach den erforderlichen Aufheizzeiten, da während des Aufheizens auch Wärmeverluste, insbesondere Abgasverluste, auftreten. Um dies zu quantifizieren wird der Ofenraum (stellvertretend für das enthaltene Feuerfestmaterial) als ein System betrachtet, dessen Temperatur einer zeitlichen Änderung unterliegt (Bild 2.8).

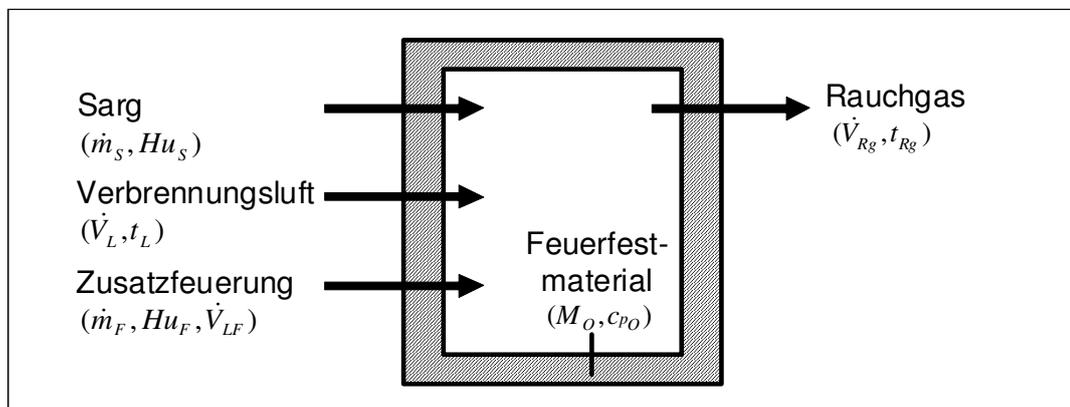


Bild 2.8: Modell zur instationären Ofenraumbilanzierung

Unter Verwendung der Nomenklatur in Abschnitt 2.1.2. liefert die Wärmebilanz für den Ofenraum unter der Annahme, dass die Temperatur des Rauchgases gleich der Wandtemperatur ist, folgende Gleichung

$$M_O \cdot c_{pO} \cdot \frac{dT}{d\tau} = \dot{m}_S \cdot Hu_S + \dot{m}_F \cdot Hu_F - \rho_{Rg} \cdot c_{pm_{Rg}} \cdot \dot{V}_{Rg} (T - T_u). \quad (10)$$

Mit der Abkürzung $\vartheta = T - T_u$ erhält man die Differentialgleichung 1. Ordnung zu

$$\frac{d\vartheta}{d\tau} + \frac{\rho_{Rg} \cdot c_{pm_{Rg}} \cdot \dot{V}_{Rg}}{M_O \cdot c_{pO}} \cdot \vartheta = \frac{\dot{m}_S \cdot Hu_S + \dot{m}_F \cdot Hu_F}{M_O \cdot c_{pO}}. \quad (11)$$

Die Lösung dieser Gleichung erhält man unter Anwendung der Variation der Konstanten nach einigen Umformungen zu

$$\vartheta = \frac{\dot{m}_S \cdot Hu_S + \dot{m}_F \cdot Hu_F}{\rho_{Rg} \cdot c_{pm_{Rg}} \cdot \dot{V}_{Rg}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-\rho_{Rg} \cdot c_{pm_{Rg}} \cdot \dot{V}_{Rg} \cdot \tau}{M_O \cdot c_{pO}}} \right), \quad (12)$$

wobei für den Rauchgasvolumenstrom die Verbrennungsrechnung (Gl. (4)) anzuwenden ist. Der reine Aufheizvorgang wird durch den Ansatz $\dot{m}_S = 0$ beschrieben. Das Ergebnis dieser Betrachtungen zeigt Bild 2.9, in dem der Anheizvorgang in Abhängigkeit von der Feuerfestmasse (mittlere Wärmekapazität 1 kJ/kgK) bei einer gesamten Brennerleistung von 90 m³/h simuliert ist. Demnach muss für die in Bild 2.7 ausgewiesenen Fallbetrachtungen „montags“ und „wochentags“ in Abhängigkeit der Feuerfestmassen mit Aufheizzeiten von 1,5 bis 3,5 h (Montagsbetrieb) respektive von 0,5 bis 1,5 h (Wochentagsbetrieb) gerechnet werden.

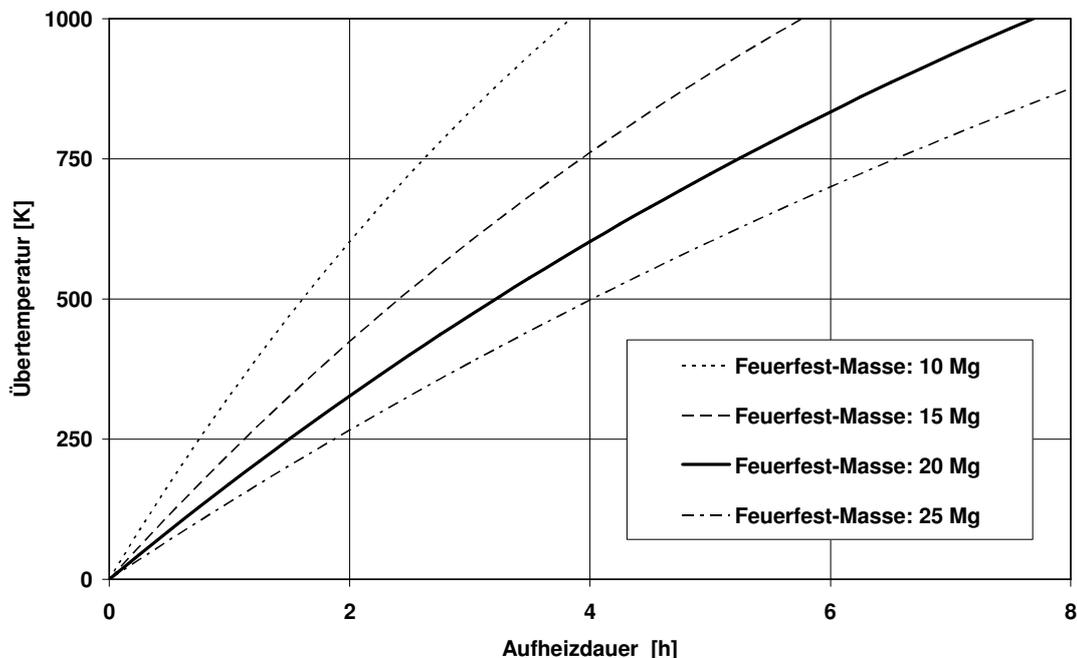


Bild 2.9: Aufheizvorgang des Feuerfestmaterials (Ofen und Rauchgasfuchs)

Die Aufheizzeit und damit auch der Gasverbrauch lassen sich deutlich reduzieren, wenn die erste Sargeinfahrt bei niedrigerer Temperatur erfolgt. Hierzu wird ab Erreichen der Sargeinfahrtstemperatur die Energiefreisetzung durch die Einäscherung mitberücksichtigt, d. h. die Funktionsterme \dot{m}_S und Hu_S der Gl. (12) werden in die Betrachtung einbezogen. Wie das Ergebnis dieser Variationen zeigt (Bild 2.10), steigt bei einer Sargeinfahrtstemperatur von 650 °C mit Beginn der Sargeinfahrt das mittlere Temperaturniveau um rund 150 °C unter der Maßgabe unveränderter Zusatzfeuerung. Durch Reduzierung der Zusatzfeuerung – in diesem Fallbeispiel um etwa 20 bis 30 % – lässt sich die Erwärmung der Feuerfestauskleidung vergleichbar zur reinen Aufhei-

zung mittels Gasbeheizung erreichen. Eine weitere Reduzierung der Zusatzfeuerung in dieser ersten Betriebsphase würde das Temperaturniveau im Ofen absenken, so dass aus diesen theoretischen Betrachtungen deutlich wird, dass insbesondere bei schweren Ofensystemen (große Feuerfestmassen) die Gasverbrauchswerte bei den ersten Einäscherungen zu Wochenbeginn erheblich durch die Aufheizung der Feuerfestauskleidung bestimmt werden.

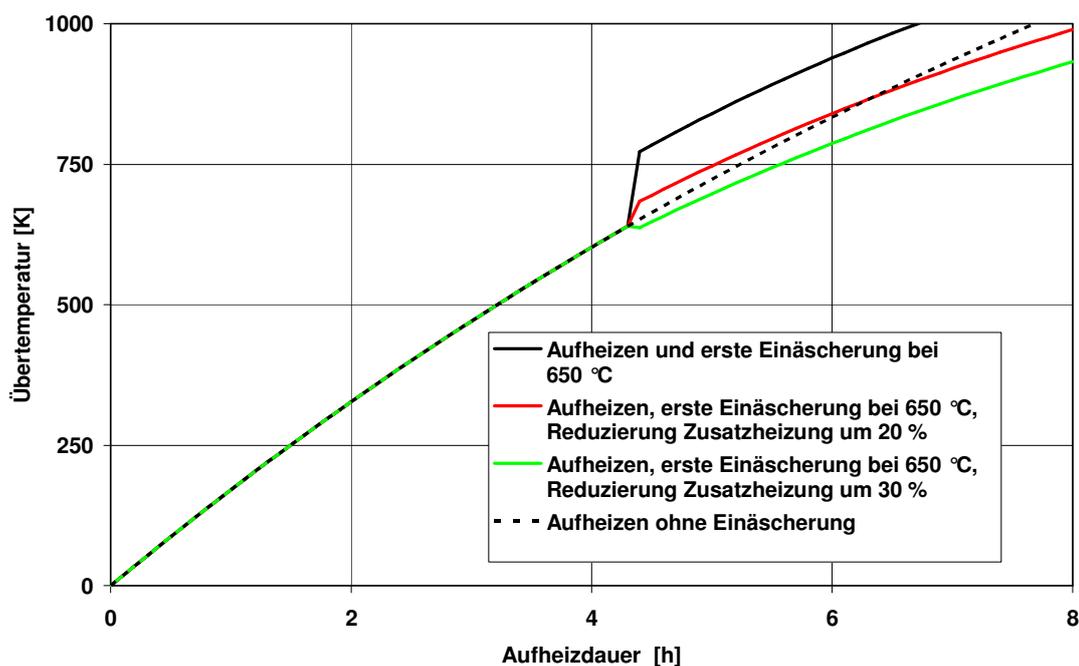


Bild 2.10: Simulation Aufheizvorgang und Beginn der ersten Sargeinfahrt

2.2. Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff

Vor dem Hintergrund der Schadstoffminimierung ist der Einäscherungs-ofen so zu konzipieren, dass einerseits eine möglichst vollständige Umsetzung des über den Sarg eingetragenen Kohlenstoffs zu Kohlendioxid erfolgt (**vollständige Verbrennung**) und andererseits organische Verbindungen, insbesondere polychlorierte Aromate, z. B. polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF), thermisch zerstört werden. Wie hinlänglich bekannt ist, können diese beiden primärseitigen Forderungen erreicht werden, wenn ausreichende Temperatur- und Verweilzeitbedingungen zur Aktivierung chemischer Reaktionsabläufe geschaffen werden und nach dem reaktionskinetischen Grundsatz „**gemischt = verbrannt**“ für eine ausreichende Vermischung der Gase mit Verbrennungsluft in den Verbrennungsräumen gesorgt wird.

Daraus lassen sich folgende wesentliche Bestandteile und Anforderungen an die Ofentechnik ableiten:

- Automatische Sargeinfahrvorrichtung.
- Kompakter Ofenaufbau.
- Mehrkammerofen, bestehend aus Hauptbrennkammer, Ascheausbrennkammer sowie Nachbrennkammer.
- Feuerraumauskleidung (Standfestigkeit, Wärmedämmung, schlackeabweisend).
- Niedrige Wärmeverluste.
- Stützfeuerung.
- Verbrennungsluftverteilung.
- Turbulenzonen.

Der Verbrennungsablauf beginnt mit der Sargeinfahrt, die im Krematorium Düsseldorf über eine automatische Unterflureinfahrmaschine erfolgt. Nach der Einfahrt und Verschluss durch den Ofenschieber finden die Prozessschritte Trocknung, Ent- und Vergasung sowie Primärverbrennung unter intensivem Wärmeaustausch mit den Feuerraumwänden und dosierter Verbrennungsluftzugabe in Form von Primärluft statt. Die gewünschten Verbrennungstemperaturen werden in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes (korrespondierend zur Luftüberschusszahl) eingestellt und bei Bedarf durch Zusatzfeuerung unterstützt.

Der Hauptbrennkammer schließt sich die gasseitige Nachbrennkammer an, in der mittels Sekundärluft die Rauchgase unter turbulenten Strömungsbedingungen nachverbrannt werden. Dabei gilt es, die in Bild 2.11 qualitativ angegebenen Zusammenhänge zwischen Kohlenmonoxid, dem Sauerstoffgehalt (Luftüberschusszahl) und der Verbrennungstemperatur zu berücksichtigen /4/. Über die Gestaltung der Brennkammern und die darauf abzustimmende Prozessführung ist dafür zu sorgen, dass Strähnen unvollständiger Verbrennung, charakterisiert durch CO und Kohlenwasserstoffe, vermieden werden.

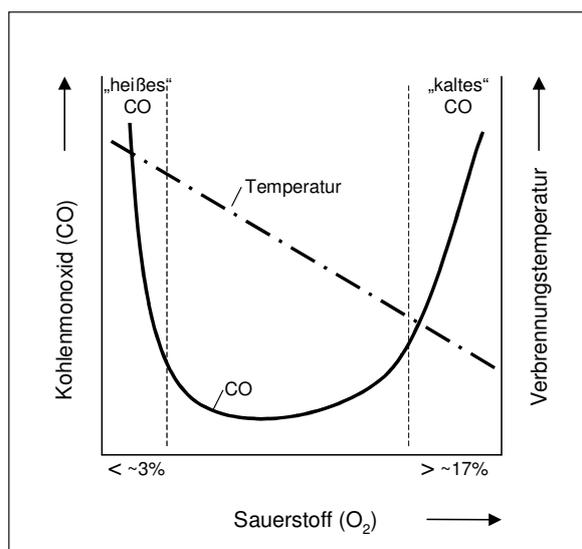


Bild 2.11: Einflussnahme auf den CO-Ausstoß bei der Verbrennung

2.3. Staubabscheidung

Zur Staubabscheidung stehen der Kremationstechnik erprobte Systeme zur Verfügung:

- Zyklonabscheider.
- Elektrofilter.
- Gewebefilter.

Dabei hat sich für Krematorien und anderen Kleinverbrennungsanlagen die Verfahrenskombination bestehend aus Zyklonabscheider und Gewebefilter bewährt, zumal diese Baugruppen häufig in Verbindung mit Trockensorptionsverfahren eingesetzt werden. Der Zyklonabscheider, der in Ruppmann Anlagen als Multizyklon ausgeführt ist, ist eine wichtige Baugruppe, um die im nachgeschalteten Filter installierten Gewebefilterschläuche vor Funkenflug zu schützen. Das Gewebefilter dient nicht nur zur Feinstaubabscheidung sondern ist, durch die sich außen auf den Filterschläuchen aufbauenden Staubschichten, auch eine zusätzliche Reaktionsstrecke zur Adsorption und Abscheidung gasförmiger Schadstoffe.

2.4. Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -dibenzofurane

Die Mechanismen der Bildung und Zerstörung von polychlorierter Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und -dibenzofurane (PCDF) unterliegen in den einzelnen Bereichen einer Einäscherungsanlage unterschiedlichen Einflussgrößen /5, 6/. Das dualistische Prinzip der PCDD/F-Bildung und -Zerstörung ist in Bild 2.12 zusammenfassend dargestellt.

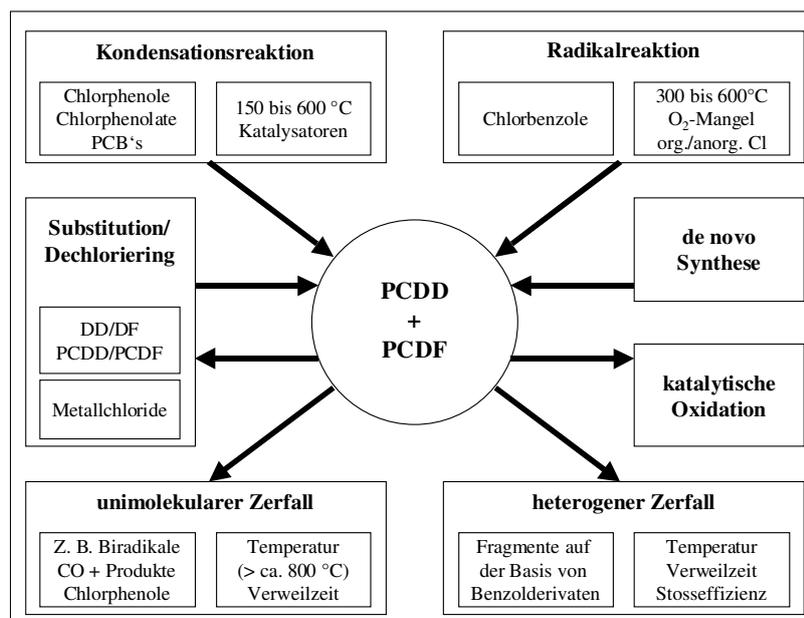


Bild 2.12: Mechanismen der Bildung und Zerstörung von PCDD/F

Aus dem Zusammenwirken der Bildungs- und Zerstörungsmechanismen geht hervor, dass diese Mechanismen parallel ablaufen und sich in den einzelnen Anlagenbereichen überlagern können. Demzufolge gilt es die verfahrenstechnischen Bereiche, Ofen, Rauchgaskühlung und Rauchgasreinigung getrennt zu analysieren und eine Gesamtstrategie zur PCDD/F-Minderung zu verfolgen.

2.4.1. Einflussnahme bei der Verbrennung

Die für den Einäscherungsprozess maßgebenden PCDD/F-Bildungsmechanismen sind **Kondensation** zweier o-Chlorphenole oder o-Chlorphenolate und **Radikalreaktion** von Chlorbenzolen als Ausgangsstruktur und OH•. Beide Reaktionsmechanismen laufen bevorzugt im Temperaturbereich unterhalb von 600 °C ab, also in einem Temperaturbereich, den das Rauchgas passieren muss.

Andererseits findet im Einäscherungs-ofen, insbesondere im Nachverbrennungsraum, ein Zerfall zwischenzeitlich gebildeter PCDD/F statt. Für den Zerfall dieser Verbindungen kommen sowohl **Gasphasenreaktionen (unimolekularer Zerfall)** als auch **heterogene Zerfallsreaktionen** in Frage /7, 8/. Die theoretische Betrachtung der Gasphasenreaktion zeigt, dass die Reaktionskinetik durch die Temperatur und die Verweilzeit bei entsprechender Temperatur bestimmt wird (Bild 2.13). Sofern der PCDD/F-Zerfall im Nachverbrennungsraum eines Einäscherungs-ofens ausschließlich nach der Gasphasenreaktion erfolgen würde, müsste demnach die Nachverbrennungstemperatur mehr als 900 °C betragen.

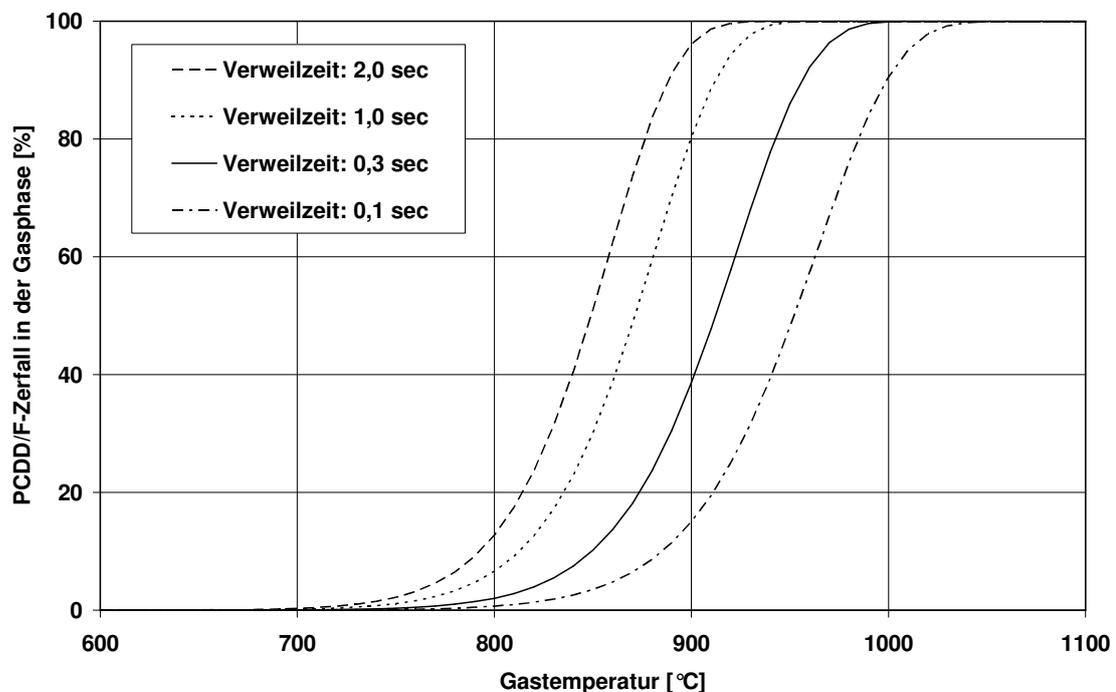


Bild 2.13: Unimolekularer Zerfall von PCDD und PCDF

Infolge mitgeführter Staubpartikel kommen auch heterogene Zerfallsreaktionen in Betracht, deren Wirkung entscheidend von der Stoßeffizienz der Staubpartikel, also von der Turbulenz der Rauchgasführung im Nachverbrennungsraum bestimmt wird. Wie in Bild 2.14 exemplarisch für 2,3,7,8-TCDD dargestellt, resultiert bereits bei einer geringen Stoßeffizienz von 0,1 (d.h. nur jeder zehnte Stoß löst eine Zerfallsreaktion aus) ein erheblicher Zerfall der einzelnen Kongenere. Diese Effekte lassen sich durch turbulenzbildende Maßnahmen deutlich verbessern, wodurch die Stoßeffizienz mit mitgeführten Partikeln erhöht wird. Diese Verbrennungsbedingungen korrespondieren weitgehend mit denen für Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe (Gesamtkohlenstoff), weshalb es sich in der Praxis als hilfreich erwiesen hat, Kohlenmonoxid als Leitgröße für die primärseitige Zerstörung von PCDD und PCDF zu verwenden.

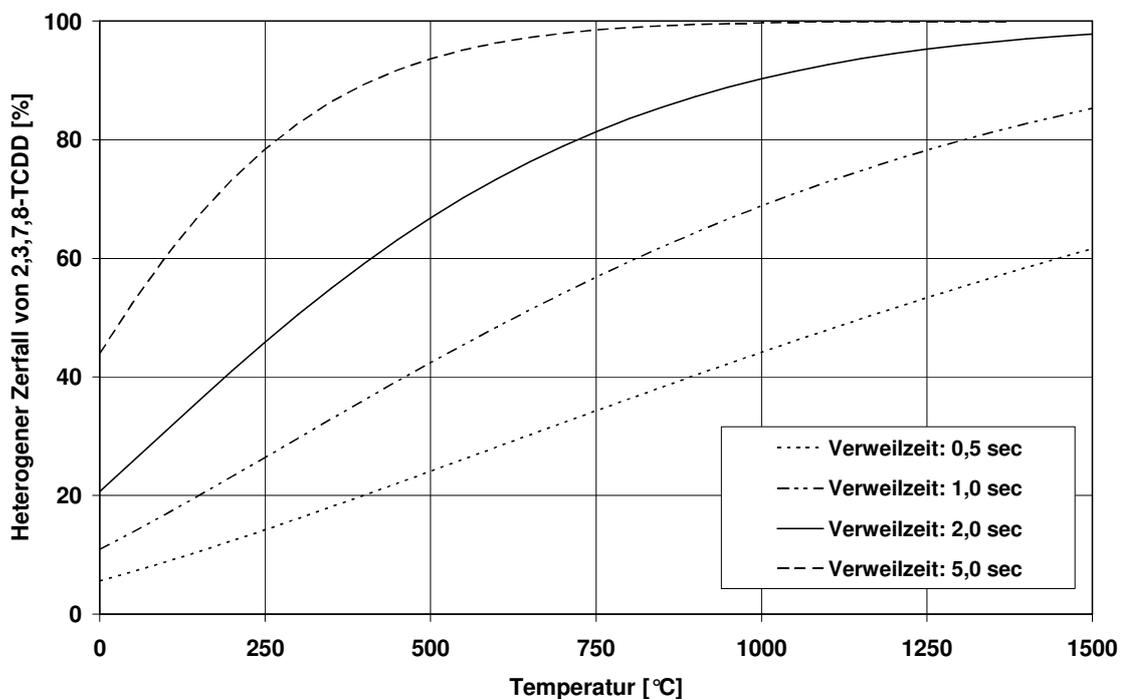


Bild 2.14: Heterogener Zerfall am Beispiel von 2,3,7,8-TCDD

2.4.2. Rauchgaskühlung (de-novo Synthese)

Eine besondere Bedeutung kommt der Rauchgasabkühlung für das Emissionspotential der Dioxine und Furane zu, da in diesem Temperaturbereich unter Sauerstoffüberschussbedingungen die PCDD/F-Rückbildung nach der de-novo Synthese erfolgen kann. Aus umfangreichen Untersuchungen an einer Abfallverbrennungsanlage ist bekannt /9/, dass sich im Verlauf der Abkühlung zunächst PCDF-Kongenere bilden bevor PCDD-Kongenere entstehen. Vergleicht man typische PCDD-/F-Homologen-

verteilungen im Rohgas nach einer schnellen ($< 0,5$ s) oder einer langsamen Abkühlung (ca. $> 5,0$ s) (Bild 2.15), so ist zu folgern, dass die Wärmetauschereinheit möglichst kompakt auszuführen ist. Die kompakte Gestaltung der Wärmetauschereinheit erfordert Rohrbündelwärmetauscher, die sowohl mit einer engen Gassenbreite versehen sind und gleichzeitig zur Steigerung der wärmeübertragenden Fläche als be-rippte Rohrbündel ausgeführt werden.

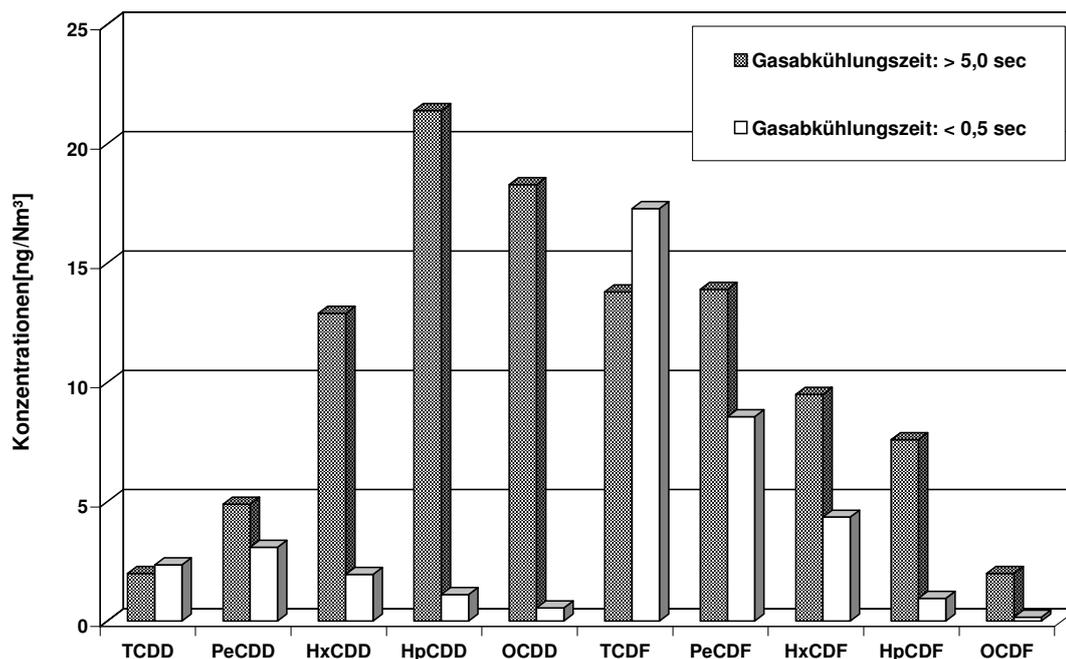


Bild 2.15: Schnelle Gaskühlung zur Unterdrückung der de-novo Synthese

2.4.3. Rauchgasreinigung

Um die nach der Rauchgaskühlung noch im Rauchgasstrom enthaltenen PCDD/F-Kongenerer einer ubiquitären Ausbreitung nach Verlassen der Kaminanlage zu entziehen, haben sich bei Krematorien folgende Rauchgasreinigungsverfahren etabliert:

- **Adsorption nach dem Flugstromprinzip**, wobei die gasförmig vorliegenden PCDD/F-Kongenerer in einem ersten Verfahrensschritt an zudosierte Additive angelagert und danach über ein Gewebefilter aus dem Rauchgasstrom zur Endlagerung unter Tage abgeschieden werden /10/.
- **Adsorption im Festbettabsorber**, der dem Gewebefilter nachgeschaltet und mit Additiven befüllt ist /10/.
- **Katalytische Filtration**, die in Gewebefiltern mit eingewobenem Katalysatormaterial stattfindet. Hierbei werden PCDD- und PCDF-Kongenerer im Temperaturbereich von etwa 200 °C zerstört, d.h. in unkritische Verbindungen, wie CO_2 , H_2O und vernachlässigbare Spuren von HCl , zerlegt /11/.

2.4.4. PCDD-/F-Minderungsstrategie

Für die als besonders toxisch eingestuft PCDD/F ist eine Gesamtstrategie, wie in Bild 2.16 dargestellt, erforderlich [5]. Die hierfür notwendigen Minderungsmaßnahmen beginnen bereits während der Primärverbrennung im Einäscherungs-ofen, wobei auch für diese Schadstoffgruppe die Einhaltung bestmöglicher Ausbrandbedingungen, also Verbrennungstemperatur, Verweilzeit und Turbulenz, von entscheidender Bedeutung sind. Da diese Anforderungen mit denen für eine wirkungsvolle Kohlenmonoxidreduzierung konform sind, kann die CO-Konzentration als geeignete Leitgröße zur Prozessführung herangezogen werden (siehe auch 2.1.5).

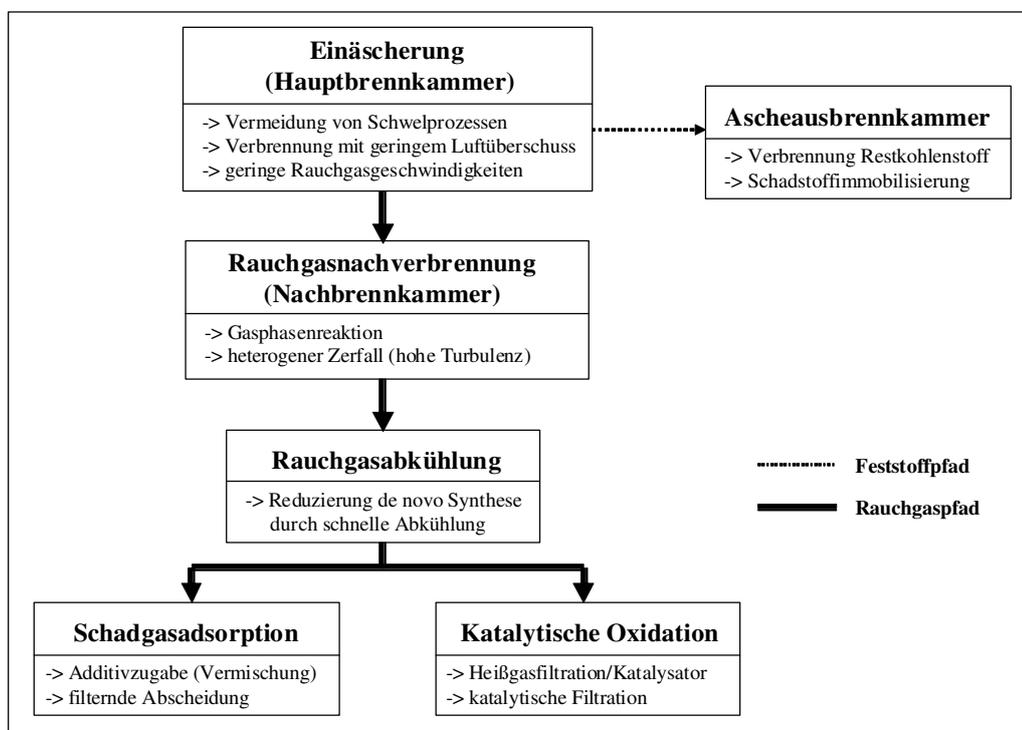


Bild 2.16: Gesamtstrategie zur Minderung der Dioxin- und Furanemissionen

In Verbindung mit einer schnellen Rauchgaskühlung zur Reduzierung der PCDD/F-Rückbildung nach der de novo Synthese und dem Einsatz vorgenannter Aktivkohle-Kalkhydrat Additive werden die im Gasstrom noch vorhandenen Spuren an PCDD/F adsorbiert und im nachgeschalteten Gewebefilter abgeschieden. Unter diesen Bedingungen kann der geforderte Emissionsgrenzwert von $0,1 \text{ ngTE/Nm}^3$ gesichert eingehalten werden.

2.5. Geruchsemissionen

Obwohl weder in Deutschland noch in anderen europäischen Ländern Geruchsemissionsgrenzwerte für Krematorien vorgegeben sind, hat die für das Krematorium Düssel-

dorf zuständige Aufsichtsbehörde für dieses Untersuchungsprogramm konsequenterweise die Erfassung der Geruchsemissionen gefordert, da als mögliche Auswirkung durch die Absenkung der Nachverbrennungstemperatur eine Veränderung der Geruchsemissionen nicht grundsätzlich auszuschließen ist.

Die Vielzahl möglicher gasförmiger Bestandteile einerseits sowie deren oftmals kaum messbaren Konzentrationen andererseits erschwert die Zuordnung betrieblicher Einstellungen. Hinzu kommt, dass Gerüche eine subjektive Wahrnehmung von Emissionen darstellen, die je nach persönlichem Empfinden von „eklig“ und „belästigend“ bis hin zu „aromatisch“ oder „angenehm“ reicht. Das persönliche Empfinden wird von der psychischen und physischen Verfassung eines Menschen ebenso beeinflusst wie durch das Alter und kann sich im Laufe der Zeit ändern. Zur Quantifizierung von Gerüchen oder Geruchsereignissen hat sich die sogenannte **Olfaktometrie** als anerkanntes Verfahren durchgesetzt /12,13/. Hierbei wird die menschliche Nase als Detektor genutzt, wodurch **hedonische**, also gefühlsspezifische, Wirkungen in die Messung mit einfließen können.

Da keine Informationen über gemessene Geruchsemissionskonzentrationen im Abgas von Krematorien, geschweige denn über mögliche Einflussgrößen vorliegen, kann eine Einordnung einer möglichen Belastung nur durch Vergleich mit anderen Emittenten erfolgen, wie sie beispielhaft in Tabelle 2.2 zusammengestellt sind. Hierbei wurden vor dem Hintergrund hedonischer Geruchswirkung die Emission aus Krematorien eher als „unangenehm“ eingestuft und somit nur Emittenten berücksichtigt, die einer vergleichbaren Kategorie zuzuordnen sind /14/.

Verbrennungsanlage	Geruchsemissionskonzentration [GE/m ³]
Pelletfeuerung	ca. 300
Reststoffverbrennung	ca. 400 (50 bis 4.000)
Gas- /Ölfeuerung	ca. 100
BHKW (Biogas)	500 bis 10.000

Tabelle 2.2: Geruchskonzentrationen anderer Verbrennungsanlagen

3. Betriebstechnische Untersuchungen

3.1. Das Krematorium in Düsseldorf

Das Krematorium Düsseldorf wurde im Jahr 1980 mit zwei gasbefeueten Etagenofenanlagen, System Ruppman, mit nachgeschalteten Gewebefilter zur Staubabscheidung ausgerüstet. Zur Unterstützung der Abscheidung gasförmiger Schadstoffe wurde ursprünglich Kalk nach dem Flugstromprinzip dem Rauchgasstrom beigegeben. Im Jahr 2000 wurde das Krematorium um eine dritte Kremationslinie erweitert. Auch hier fiel die Entscheidung für den Etagenofen, System Ruppman, der zur Rauchgasreinigung jedoch mit katalytisch wirkenden Filterschläuchen ausgerüstet wurde. Nach den positiven Erfahrungen mit der katalytischen Filtration an Linie 3 erfolgte im Zuge der Erneuerung der Einäscherungslinien 1 und 2 in den Jahren 2001 und 2002 ebenfalls die Umrüstung auf die katalytische Filtration zur Rauchgasreinigung. Mit den im Krematorium Düsseldorf installierten drei Einäscherungslinien werden jährlich rund 8000 Einäscherungen durchgeführt.

Die Kremationslinie 3 (Bild 3.1), an der die Untersuchungen zur Temperaturabsenkung durchgeführt wurden, besteht somit im Wesentlichen aus folgenden verfahrenstechnischen Kernkomponenten:

- vollautomatisch arbeitende Sargeinfahrmaschine, die in Unterflurbauweise zur freien Nutzung des Ofenvorraumes ausgeführt ist.
- erdgasbefeuerter Etagenofen, ausgeführt als Mehrkammerofensystem.
- kompakter Wärmetauscherturm zur schnellen Rauchgaskühlung.
- Wärmeabführung über einen geschlossenen Wasser-/Glykolkreis an ein Wärmetauschersystem bzw. über ein Rückkühlwerk an die Umgebung.
- Multizyklonabscheider zur Rauchgasdurchmischung und Funkenflugabscheidung.
- Gewebefilter, bestückt mit katalytisch wirkenden Filterschläuchen zur Zerstörung von polychlorierten Dibenz-p-Dioxinen (PCDD) und Dibenzofuranen (PCDF).
- Rauchgasableitung über ein Saugzuggebläse und eine 27 m hohe Schornsteinanlage.

Das Kernstück bildet der Etagenofen bei dem die Hauptbrennkammer zur Einäscherung und die sich anschließende Entaschung, bestehend aus einer Ascheausbrennkammer mit nach geschaltetem Ascheabkühlraum, übereinander angeordnet sind. Damit verbunden ist eine klare räumliche Trennung zwischen Sargeinfahrt und Entnahme der Urnenasche, die in zwei Geschossebenen erfolgt. In der Hauptbrennkammer läuft der Einäscherungsvorgang im Wärmeaustausch zwischen den Feuerraumwänden und dem Sarg unter gezielter Primärluftzugabe ab. Bei Bedarf wird über den gasbefeueten Hauptbrenner der Einäscherungsprozess unterstützt. Die konstruktive Gestaltung des Ofenraumes in Verbindung mit dem Sargauflegerost bewirkt eine intensive Vermischung der Flammengase mit der Verbrennungsluft unter Ausbildung turbulenter

Strömungsverhältnisse /4/. Das aus der Hauptbrennkammer abgeführte Rauchgas gelangt in eine Nachbrennkammer und wird dort unter Sekundärluftzugabe nachverbrannt. Die Einhaltung der gewünschten Nachverbrennungstemperatur wird durch einen weiteren Gasbrenner sichergestellt.

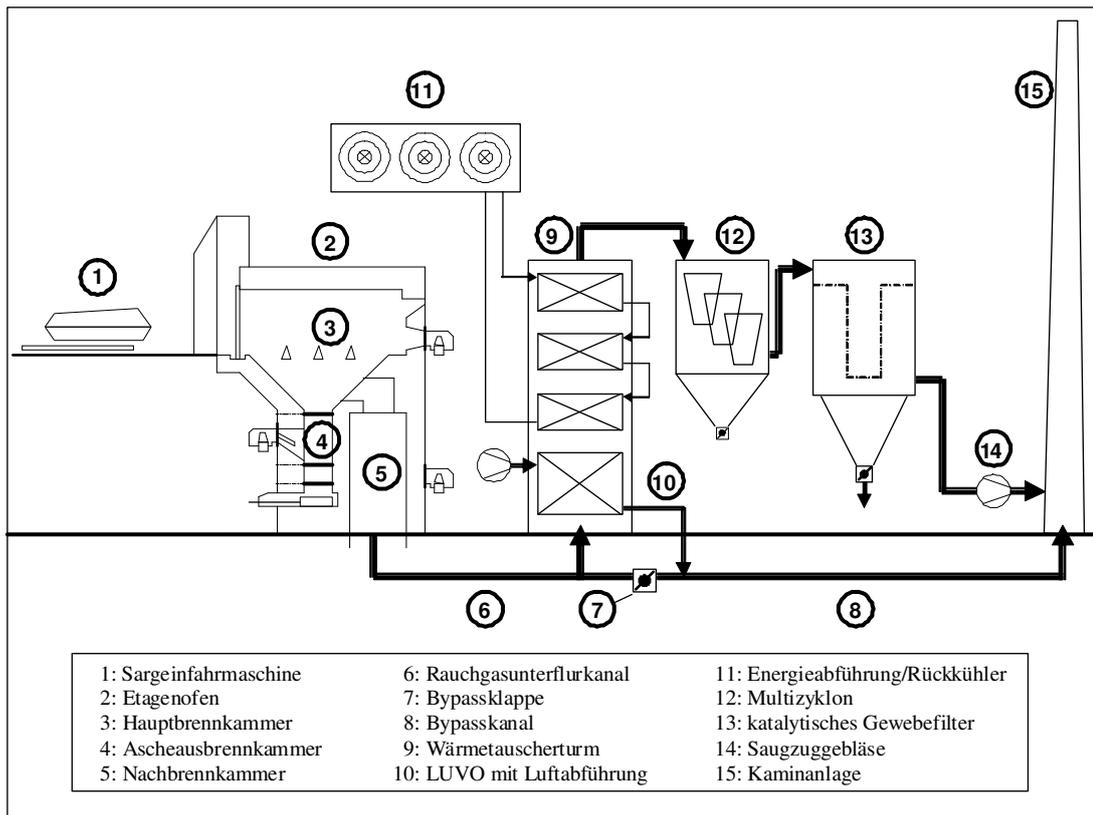


Bild 3.1.: Einäscherungslinie 3 im Krematorium Düsseldorf

Die aus dem Ofen austretenden Rauchgase werden im Wärmetauscherturm thermisch konditioniert, d. h. sie werden auf die erforderlichen Gewebefilterbetriebstemperaturen abgekühlt. Zur Minderung von PCDD/F-Rückbildungseffekten durch die „de-novo Synthese“ ist der Wärmetauscherturm als kompakte Einheit zur schnellen Rauchgaskühlung mit Abkühlzeiten von ca. 0,5 s konzipiert.

Die Rauchgasreinigung erfolgt mittels katalytischer Filtration. In einem ersten Verfahrensschritt durchströmt das Rauchgas zunächst einen Multizyklonabscheider, der aus mehreren Einzelzyklonen besteht, in denen gröbere Partikel (Funkenflug) abgeschieden werden. Die abgeschiedenen Grobstäube werden im Trichter gesammelt und in regelmäßigen Abständen über das Gewebefilter aus dem System ausgetragen. Im zweiten Verfahrensschritt werden die Rauchgase über ein Gewebefilter zur Feinstaubabscheidung geführt, das mit katalytisch wirkenden Filterschläuchen bestückt ist. Dort findet die katalytische Zerlegung der im Rauchgasstrom vorhandenen polychlorierten

Dioxine und Furane in unkritische Komponenten, wie CO₂, H₂O sowie Spuren von HCl, statt. In diesen Filterschläuchen (System GORE) /11/ sind die Katalysatorpartikel fest verankert und bewirken auf diese Weise die Zersetzungsreaktion bei Filtertemperaturen im Bereich von etwa 180 bis 220 °C.

Um einen sachgerechten Umgang des Betriebspersonals mit der anfallenden Filterasche zu ermöglichen, sind die Filtertrichter aller drei Linien an eine zentrale Staubabsaugvorrichtung angebunden. Dort werden die Stäube in 200 l Fässer für die Endlagerung unter Tage abgefüllt.

Auf einige auswertungsrelevante Besonderheiten, die sowohl die technische Konzeption als auch das Betriebsregime betreffen, sei nachfolgend verwiesen:

- Markantes Abkühlverhalten der Ofenanlage infolge einer erheblichen Zugwirkung der Schornsteinanlage (maßgebende Schornsteinhöhe 30 m) während der Stillstandsphasen (z. B. nachts und an Wochenenden).
- Keine Verschlussmöglichkeit des Rauchgaskanals während der Stillstandszeiten.
- Erheblicher Wärmeaustrag durch Brennernachbelüftung nach Beendigung des täglichen Einäscherungsbetriebes.
- Betriebliche Abläufe mit einer Mindesteinäscherungszeit von 75 Minuten.
- Deutlicher Anstieg des Sauerstoffgehaltes entlang des Rauchgasweges zwischen Ofenaustritt (Regelgröße für den Ofenbetrieb) und Kamin (Bezugsgröße für die Emissionsmessung) durch die Kühlluft, die über den Luftvorwärmer (LUVVO) dem Bypasskanal zugeführt wird.

3.2. Gliederung der Untersuchungsphasen

Die im Rahmen dieses Projektes im Krematorium Düsseldorf durchgeführten Untersuchungen wurden in 3 Betriebsphasen untergliedert:

- **Phase 1 (Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer: 650 °C):**
Die Betriebsphase mit den kontinuierlichen Messwertaufzeichnungen erstreckte sich auf den Zeitraum vom 4.11. bis 18.12.2008, die mit der Rauchgasbeprobung zur messtechnischen Erfassung der diskontinuierlich zu ermittelnden Konzentrationen für Staub, PCDD/F und Geruchsstoffe in der Zeit vom 16.12. bis 18.12.2008 abgeschlossen wurde.
- **Phase 2 (Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer: 850 °C):**
Die Untersuchungen der zweiten Betriebsphase im Zeitraum 19.12.2008 bis 29.01.2009 dienen als Referenzmessung um den Einfluss der abgesenkten Nachverbrennungstemperatur aufzuzeigen. Die Probenahme zur Ermittlung der Staubgehalte sowie PCDD/F- und Geruchsstoffkonzentrationen fanden vom 27.01. bis 29.01.2009 statt.

- **Phase 3 (Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer: 750 °C):**
Die letzte Betriebsphase fand in der Zeit vom 30.01. bis 25.02.2009 statt und beinhaltete die Erfassung der Betriebsgrößen sowie die oben beschriebenen kontinuierlichen Kohlenmonoxid- und Gesamtkohlenstoffemissionskonzentrationen. Außerdem wurden am 25.02.2009 die Beprobung des Rauchgases zur Geruchsstoffkonzentrationsbestimmung sowie die Probenahme zur Ascheuntersuchung durchgeführt. Da im Rahmen der periodisch wiederkehrenden Emissionsmessungen im Februar 2007 die PCDD/F-Reingasemissionsmessungen an Linie 3 auch bei 750 °C durchgeführt wurden, wurde auf eine erneute Rauchgasbeprobung zur PCDD/F-Bestimmung verzichtet.

3.3. Methodik der durchgeführten Untersuchungen

Die an der Einäscherungslinie 3 des Krematoriums Düsseldorf durchgeführten Untersuchungen beinhalteten:

- **Manuelle Erfassung der Betriebsdaten:** Hierbei wurden für jeden Arbeitstag die wichtigsten Kenndaten erfasst. Im Wesentlichen gehörten hierzu die Sarggewichte, Einäscherungszeiten, Besonderheiten bei den jeweiligen Einäscherungen sowie Gasverbrauchswerte der einzelnen Brenner.
- **Kontinuierliche Emissionsaufzeichnungen:** Neben den über das vorhandene Visualisierungssystem gespeicherten Betriebsdaten, wie Temperaturen entlang des Rauchgasweges, Ofendruck und Sauerstoffkonzentrationen im Rohgas, wurden über ein zusätzlich installiertes Messwerterfassungssystem die Reingasemissionen für Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff sowie die Sauerstoffkonzentration im Reingas kontinuierlich aufgezeichnet.
- **Diskontinuierliche Roh- und Reingasuntersuchung zur Ermittlung der Staub- und PCDD/F-Emissionskonzentrationen:** Die diskontinuierlichen Untersuchungen erfolgten durch das hierfür zugelassene Messinstitut Müller BBM GmbH - Niederlassung Stuttgart, die schon mehrfach die behördlich vorgeschriebenen Emissionsmessungen im Krematorium Düsseldorf durchgeführt haben und mit den Örtlichkeiten somit vertraut sind. Da gleiche Messstandards zugrunde gelegt sind, ist eine hohe Vergleichbarkeit zu früheren Messungen gegeben. Die Staubkonzentrationsmessung erfolgte nach DIN 13284-1 während für die PCDD/F-Messung die DIN EN 1948 – Blatt 1 zugrunde gelegt wurde.
- **Reingasbeprobung zur olfaktometrischen Bestimmung der Geruchsbelastung:** Ergänzend zu früheren Untersuchungen erfolgte eine Beprobung des Reingases zur Geruchsstoffkonzentrationsbestimmung. Die Untersuchung, bestehend aus drei Einzelbestimmungen pro Betriebsphase, wurde ebenfalls durch Müller-BBM entsprechend DIN 13725 (07/03) im Reingas durchgeführt.

- **PCDD/F-Gehalte in den Aschen:** Probenahme und Analyse jeweils als Mischprobe über den Untersuchungszeitraum der diskontinuierlichen Messphase.

Die analytische Auswertung der Proben erfolgte in hierfür zugelassenen Instituten.

Die Datenerfassung und -auswertung bestand im Wesentlichen darin, Datensätze, die sowohl manuell als auch über kontinuierlich arbeitende Messwertaufzeichnungssysteme erfasst wurden einer einheitlichen Datenanalyse zuzuführen. Die gewählte Vorgehensweise zeigt schematisch Bild 3.2.

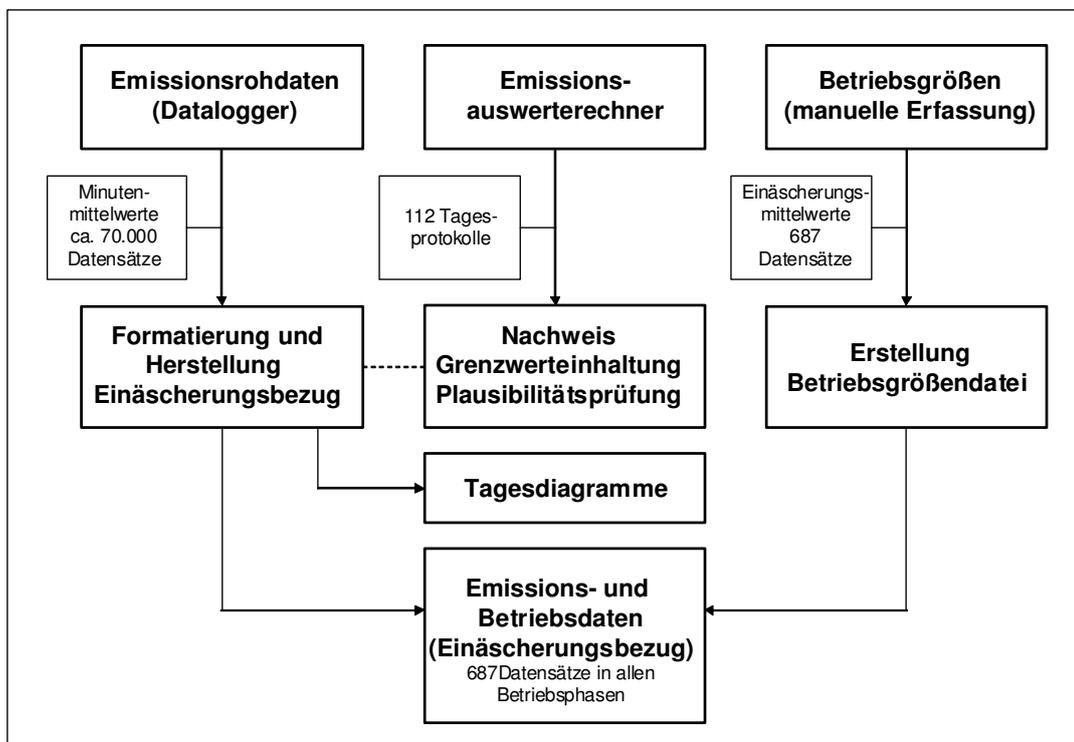


Bild 3.2: Betriebs- und kontinuierliche Messdatenerfassung

Die bei der kontinuierlichen Messwerterfassung anliegenden Rohdaten wurden als 1-Minuten-Mittelwerte, jeweils normiert auf 11 % O₂, gespeichert. Zur internen Dokumentation wurden die Datensätze als tägliche Betriebsschaubilder abgelegt. Über die vom Betreiberpersonal ausgefüllten Datenblätter konnte für diese kontinuierlich ermittelten Emissionsdaten der Einäscherungsbezug hergestellt werden. Diese einäscherungsbezogene Auswertung ist notwendig um den Einfluss der Temperaturabsenkung auf den Gasverbrauch und den damit verbundenen reduzierten CO₂-Eintrag zu erfassen. Die nach Betriebsphasen untergliederten Messwertaufzeichnungen führten zu insgesamt 687 Datensätzen, die zur Auswertung herangezogen werden konnten. Parallel hierzu fand mit den Aufzeichnungen des Emissionswerterechners ein Datenabgleich zur Plausibilitätsprüfung statt.

Ergänzend zur einäscherungsbezogenen Auswertung wurden die nach 27. BImSchV relevanten Stundenmittelwerte ebenfalls erfasst und konnten zum Vergleich mit den einäscherungsbezogenen Daten herangezogen werden.

3.4. Beschreibung der eingäscherten Särge

Die eingäscherten Särge entsprachen der üblichen Bandbreite der von unterschiedlichen Bestattern angelieferten Särge. Mit Ausnahme von Kindersärgen wurden während der durchgeführten Untersuchungen keine Särge ausgeschlossen. Von den untersuchten 687 Einäscherungen waren 270 Särge lackiert und die restlichen 417 Särge unbehandelt. Die Sargmassen variierten zwischen 61 und 169 kg; der Mittelwert über den Untersuchungszeitraum lag bei 103,8 kg (Bild 3.3). Verglichen mit den in der aktuellen Fassung der VDI-Richtlinie 3891 angegebenen Sargmassen liegen, von wenigen Unterschreitungen abgesehen, die ermittelten Sargmassen im Bereich dieser Richtlinie.

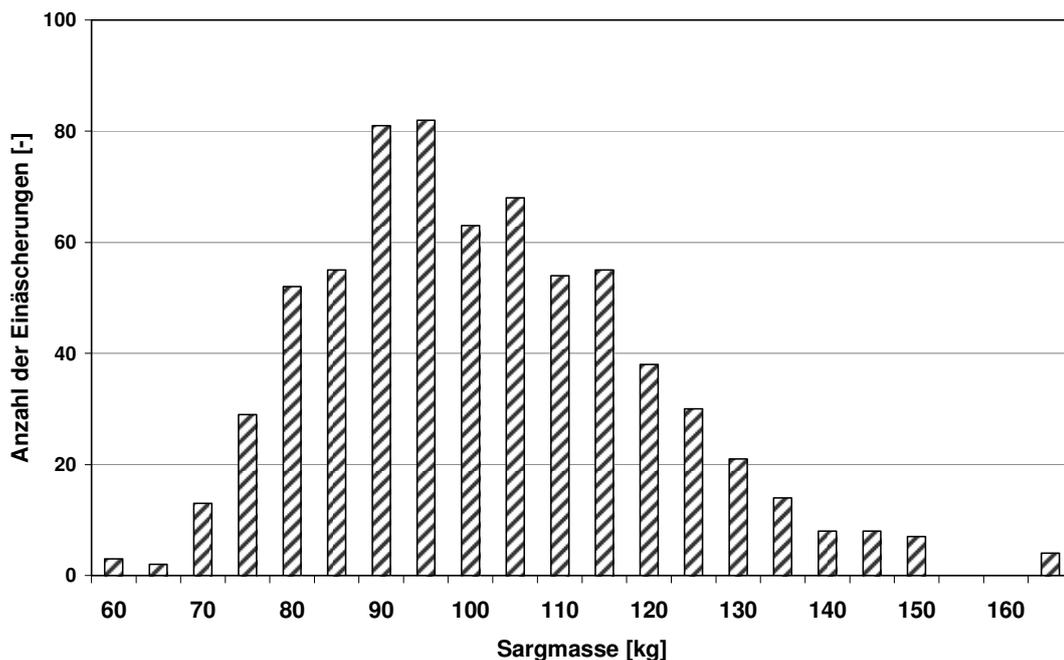


Bild 3.3: Verteilung der Sargmassen

Im Verlauf der Untersuchungen wurde entschieden, weitere anonymisierte Strukturdaten über die eingäscherten Verstorbenen zu erfassen (insgesamt bei 461 Einäscherungen). So bestätigte sich im Rahmen dieser Untersuchungen die aus den bekannten Alterspyramiden zu erwartenden Altersunterschiede „weiblich – männlich“ (Bild 3.4), wobei der Anteil der weiblichen Verstorbenen bei ca. 55 % lag.

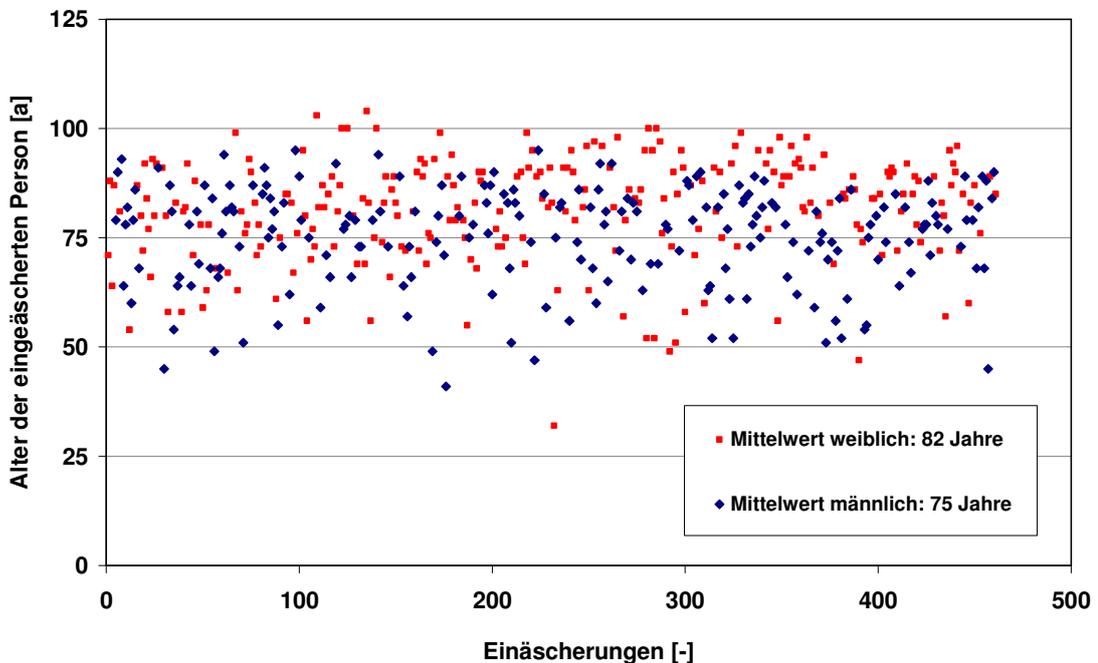


Bild 3.4: Altersangaben der eingeäscherten Verstorbenen

Die Auswertung der anonymisierten Strukturdaten der Verstorbenen hat keinen signifikanten Einfluss auf die hier durchgeführten Untersuchungen ergeben.

3.5. Betriebsverhalten in den einzelnen Untersuchungsphasen

Die Einäscherungslinie 3 des Krematoriums Düsseldorf wurde während der gesamten Untersuchungen, von der Einstellung der Nachverbrennungstemperatur abgesehen, nach den Vorgaben der 27. BImSchV betrieben. Dabei ergaben sich während des Untersuchungszeitraumes betriebliche Besonderheiten, die vor dem Hintergrund einer präzisen Gesamtauswertung vorab einer detaillierten Betrachtung zu unterziehen sind.

3.5.1 Betriebsphase 1 bei einer Mindesttemperatur von 650 °C in der Nachbrennkammer

In der ersten Betriebsphase wurde als Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer für die Sargeinfahrt 650 °C gewählt; d. h. der Sarg wurde erst eingefahren, sobald diese Temperatur erreicht war. Die ermittelten Messaufzeichnungen sind mit Blick auf das Untersuchungsziel im Wesentlichen nach Betriebstagen mit vorangegangenen ein- oder mehrtägigen Betriebsstillständen (nachfolgend kurz „Montagsbetrieb“ genannt) und nach Betriebstagen mit einem ebenfalls vorangegangenen Betriebstag (kurz „Wochentagsbetrieb“) charakterisiert. Ein typischer Betriebsverlauf für einen Montagsbetrieb zeigt Bild 3.5.

Kontinuierliche Datenerfassung 10.11.2008

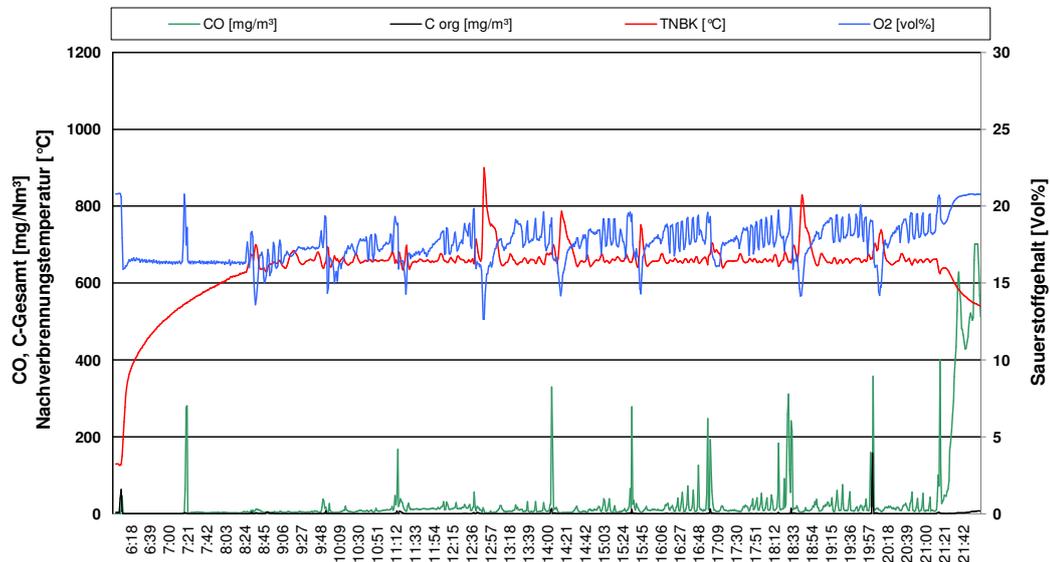


Bild 3.5: Messwertaufzeichnungen für einen „Montagsbetrieb“ der Betriebsphase bei einer Mindesttemperatur von 650 °C in der Nachbrennkammer

Mit Beginn der Brennerzuschaltung unterliegt die Temperatur in der Nachbrennkammer (T-NBK) einem schnellen Temperaturanstieg um etwa 200 °C. Danach mindert sich der Temperaturanstieg deutlich bis die Einfahrttemperatur erreicht ist. Der gemessene zeitliche Temperaturverlauf korrespondiert tendenziell mit den theoretischen Modellvorstellungen, die die Wärmeeinspeicherung in das Ofenmauerwerk berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.1.5.). Der erste schnelle Temperaturanstieg lässt sich allerdings nur mit der Umkehr des Wärmestromes im Austausch zwischen Rauchgas und Wand erklären. Während in der nächtlichen Stillstandsphase das Feuerfestmauerwerk Wärme an das Rauchgas abgibt, d. h. die Oberflächentemperatur der dem Rauchgas zugewandten Feuerfestschicht ist größer als die Rauchgastemperatur, ist der Aufheizevorgang durch einen Wärmefluss vom Rauchgas in die Wand gekennzeichnet. Dass die eingestellte Mindesttemperatur von 650 °C während des Einäscherungsbetriebes zum Teil deutlich, bis 200 °C, überschritten wird, lässt sich durch die erhöhte Energiefreisetzung bei der Einäscherung erklären, die sich wenige Minuten nach der Sargeinfahrt einstellt.

Während der erhöhten Energiefreisetzung benötigt der Verbrennungsprozess mehr Verbrennungsluft, die aus dem Luftüberschussangebot in den Brennkammern aufgenommen wird. Damit reduziert sich der Sauerstoffgehalt im Rauchgas. Über die Prozesssteuerung wird ein höheres Verbrennungsluftangebot dem Prozess zur Verfügung gestellt, wodurch sich der Sauerstoffgehalt im Rauchgas erhöht und über den höheren Rauchgasvolumenstrom sich die Nachverbrennungstemperatur reduziert (vgl. hierzu die theoretischen Grundlagen in Abschnitt 2). Der an der Emissionsmessstelle erfasste

Verlauf des Sauerstoffgehaltes (O_2) zeigt diesen Prozessmechanismus sehr anschaulich, wobei die in 3.1 beschriebene, verfahrenstechnische Besonderheit der Linie 3 im Krematorium Düsseldorf zu berücksichtigen ist. Durch den zur Rauchgaskühlung eingesetzten LUVO wird erwärmte Luft über den Bypass und damit über die Kaminanlage abgeleitet. Dadurch stellt sich an der Emissionsstelle ein deutlich höherer Sauerstoffgehalt gegenüber der Messstelle nach dem Wärmetauscher ein, die wiederum als Regelgröße für die Ofenregelung verwendet wird (Bild 3.6).

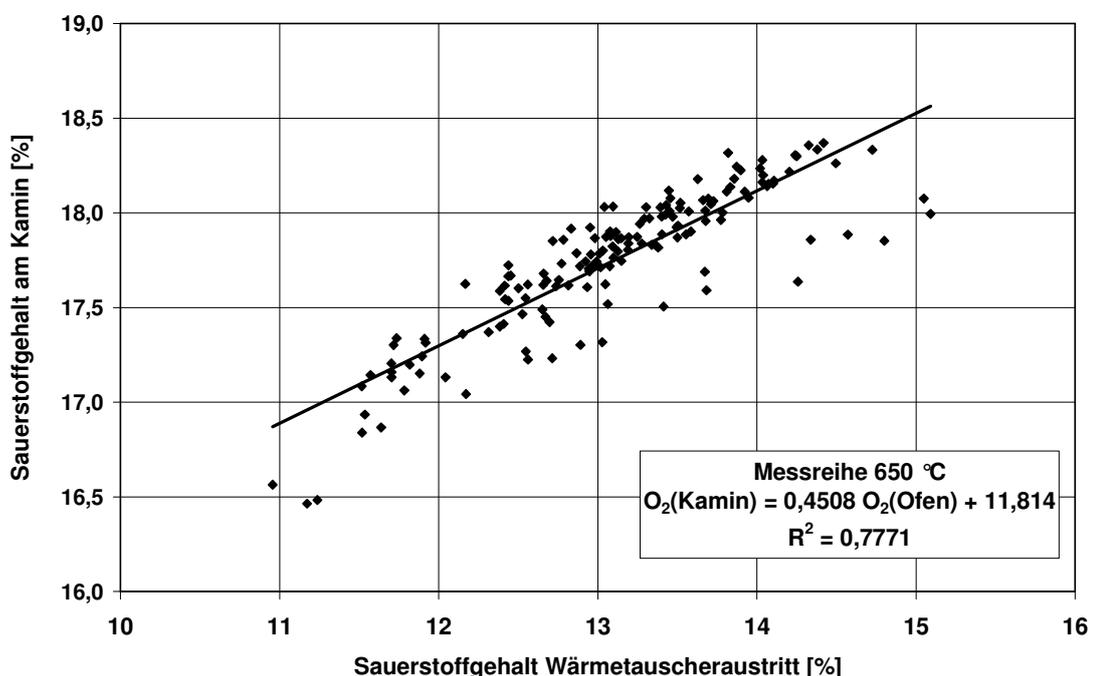


Bild 3.6: Vergleich Sauerstoffgehalte in der Nachverbrennung (Wärmetauscheraustritt) und an der Emissionsmessstelle im Kamin

Dies hat zur Folge, dass sich Messunsicherheiten bei der Sauerstoffmessung an der Emissionsmessstelle bei der Normierung der Schadgaskonzentrationsmessungen auf 11% O_2 entsprechend der Umrechnung

$$k_{norm} = k_{tat} \cdot \frac{21-11}{(21-O_{2,tat})}$$

bei hohen tatsächlichen O_2 -Gehalten deutlicher bemerkbar machen, als dies für Emissionskonzentrationen bei Sauerstoffgehalten nahe der Bezugsgröße von 11% O_2 der Fall ist. Die ebenfalls in der in Bild 3.5. angegebenen Tagesaufzeichnung enthaltenen CO -Spitzen sind ursächlich auf das instationäre Verbrennungsverhalten bei der Einäscherung zurückzuführen und können als typisch für Einäscherungsanlagen einge-

stuft werden. Die Intensität der festgestellten CO-Spitzen, vor allem am Ende des Tages, und die gleichzeitig festgestellten hohen O₂-Konzentrationen im Bereich von 18 bis 20 % lassen sich auch auf den vorgenannten Einfluss zurückführen. Nach Abschalten der Anlage – der O₂-Gehalt im Kamin erreicht 21 % und die Temperatur in der Nachbrennkammer fällt ab – wird ein auffallend hoher CO-Wert gemessen, der die Ableitung von entstandenen Pyrolysegasen über den Naturzug der Kaminanlage dokumentiert.

Ein typischer Tagesverlauf eines Wochentagsbetriebes der ersten Betriebsphase zeigt Bild 3.7. Die Aufheizphase ist gegenüber der eines Montagbetriebs deutlich verkürzt, während die zuvor beschriebenen Zusammenhänge auch in diesem Tagesprotokoll erkennbar sind.

Kontinuierliche Datenerfassung 11.11.2008

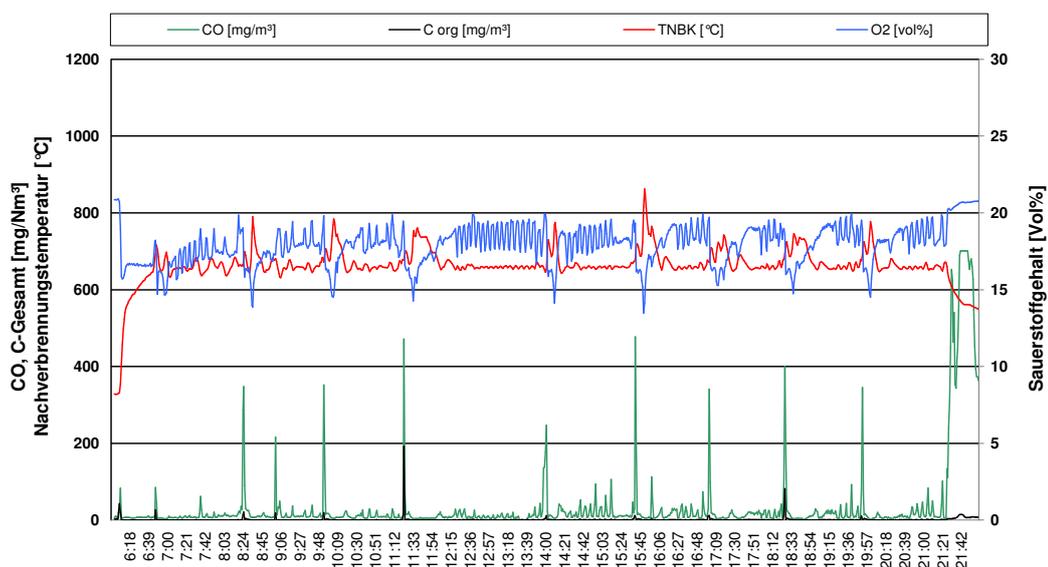


Bild 3.7: Messwertaufzeichnungen für einen „Wochentagsbetrieb“ der Betriebsphase bei einer Mindesttemperatur von 650 °C in der Nachbrennkammer

Die aus den kontinuierlichen Messwertaufzeichnungen ermittelten einäscherungsbezogenen mittleren Emissionskonzentrationen an Kohlenmonoxid (CO) und Gesamtkohlenstoff (C_{ges}) sind in Bild 3.8 über die gesamte Untersuchungsphase dargestellt. In dieser Betriebsphase stellte sich eine mittlere CO-Emissionskonzentration von insgesamt 16,9 mg/Nm³ ein. Auffallend sind die insgesamt sehr niedrigen Gesamtkohlenstoffwerte, die während der gesamten Betriebsphase im Mittel bei 0,8 mg/Nm³ lagen. Im Verlauf dieser ersten Betriebsphase (650°C) traten folgende betrieblichen Besonderheiten/Anlagenstillstände auf:

- 24.11. (zwischen EÄ 141 & 142): Ofenreinigung (Anlagenstillstand)
- 2.12. (zwischen EÄ 191 & 192): Umbau Ringwaage (Drucksignal Ofenunterdruck)

3.-5.12. (EÄ 197 bis 226):	Ausfall der Emissionsmesstechnik
8.12. (zwischen EÄ 226 & 227):	Brennerwartung; Änderung der Brenneinstellung
11.12. (EÄ 263):	Betriebsablaufsstörung durch intensive Verbrennungsreaktion mit Druckabfall im Ofen sowie CO-Grenzwertüberschreitung
15.12. (zwischen EÄ 268 & 269):	Ofenreinigung (Anlagenstillstand)

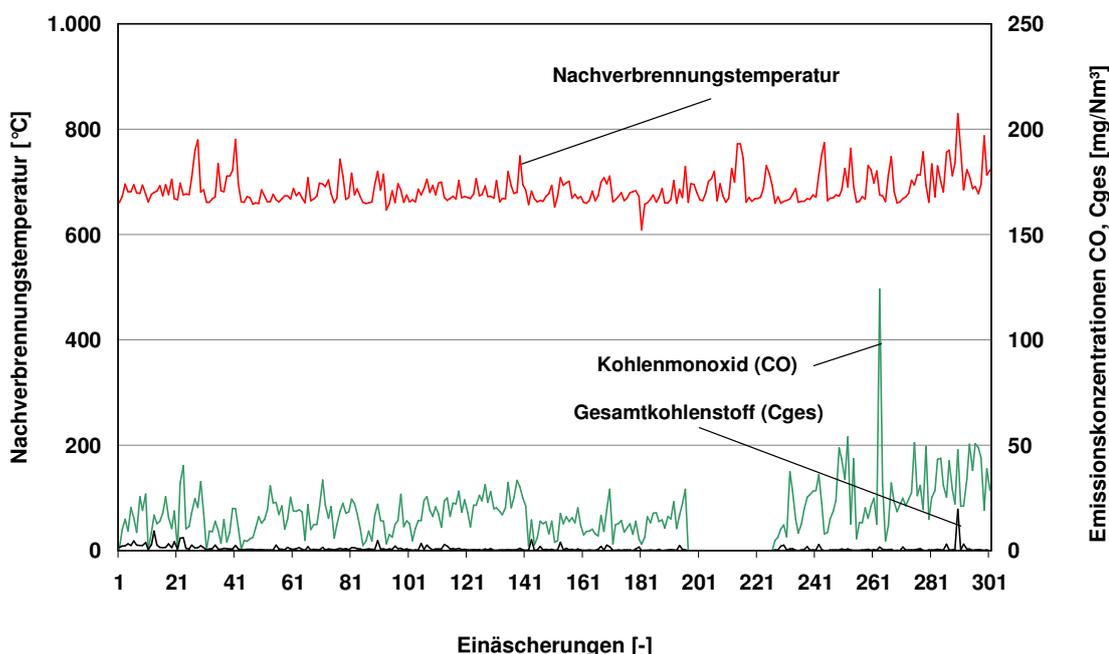


Bild 3.8: Einäscherungsbezogene Mittelwerte der kontinuierlichen Messwertaufzeichnungen – Betriebsphase 1 (4.11. – 18.12.2008)

Abgesehen von den üblichen Schwankungsbreiten hat sich ab der 214. Einäscherung ein deutlich unruhigeres Brennverhalten eingestellt. Inwieweit dies auf die veränderte Brenneinstellung oder auf die neu installierte Ofenunterdruckmessung zurückzuführen ist, konnte nicht abschließend geklärt werden. Dieser Umstand führte auch zu einem erhöhten Emissionsniveau von Kohlenmonoxid, das im ersten Teil dieser Betriebsphase (bis EÄ Nr. 196) bei 15,4 mg/Nm³ und ab der Einäscherung Nr. 227 bei 27,4 mg/Nm³ lag.

Bei einer Einäscherung, Nr. 263, trat infolge einer besonders intensiven Verbrennungsreaktion, die mit einem deutlichen Druckabfall im Ofen einher ging, eine CO-Grenzwertüberschreitung auf. In drei weiteren Fällen lag die CO-Emission geringfügig über 50,0 mg/Nm³, wohingegen der Emissionsauswerterechner an den betroffenen Tagen die Klassierung mit jeweils einem Messwert in den Klasse 9,10, 11 und 12 auswies. Der Grund liegt in der einäscherungsbezogenen Zuordnung der in Bild 3.8 dar-

gestellten Emissionskonzentrationen, wohingegen für die vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte Stundenmittelwerte heranzuziehen sind. Auch wenn bei der vorgenannten Einäscherung Nr. 263 eine signifikante CO-Überschreitung auftrat, die bei Einäscherungsprozessen nie gänzlich auszuschließen ist, zeigen die Untersuchungen, dass bei den abgesenkten Nachverbrennungstemperaturen (Mindesttemperatur: 650 °C) keine Auswirkungen auf die CO-Emission festzustellen sind.

Die in dieser Betriebsphase ermittelten Gesamtkohlenstoffkonzentrationen zeigten keine Grenzwertüberschreitung, wenngleich bei der Einäscherung Nr. 290 mit einem Emissionswert von 19,6 mg/Nm³, der Grenzwert von 20 mg/Nm³ nahezu ausgeschöpft war. Insgesamt ist für die ermittelten Gesamtkohlenstoffkonzentrationen festzuhalten, dass sie meist mit deutlichem Sicherheitsabstand unterhalb des vorgegebenen Grenzwertes lagen, so dass auch von diesem Blickwinkel auf ein solides Verbrennungsverhalten rückgeschlossen werden kann.

3.5.2 Betriebsphase 2 bei einer Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer - Referenzphase

In der zweiten Betriebsphase wurde die Referenzsituation bei einer Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer untersucht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit der Einäscherungslinie 3 des Krematoriums Düsseldorf eine Linie gewählt wurde, die bereits seit 2000 in Betrieb ist. Sie weist, trotz regelmäßiger Wartungs- und Erhaltungsmaßnahmen, nicht zuletzt aufgrund der technisch limitierten Prozesssteuerung (Siemens S5) aus dem Jahr 2000 und anderen baulichen Rahmenbedingungen (z. B. Schornsteinanlage mit 27 m), verfahrenstechnische Kompromisse auf, die bei der Gesamtbewertung zu berücksichtigen sind.

Diese Umstände machen sich insbesondere bei der Aufheizung der Ofenanlage nach einem Wochenendstillstand bemerkbar, weshalb vereinzelte Einäscherungen bei der Einfahrt nicht die gewünschte Nachverbrennungs-Mindesttemperatur erfüllten (Bild 3.9). So erfolgte nach einer Aufheizzeit von etwa 3 Stunden die erste Einäscherung bei einer Nachverbrennungstemperatur von etwa 750 °C. Auch die folgenden Einäscherungen waren von der Aufheizung der Feuerfestauskleidung bestimmt, weshalb die Einfahrttemperaturbedingung von mindestens 850 °C an diesem Tag erst ab der 4. Einäscherung gegeben war. Der weitere Temperaturverlauf zeigt die für Einäscherungsprozesse typischen Merkmale mit gelegentlichen deutlichen Temperaturspitzen, die an diesem Tag 1100 °C in der Nachbrennkammer erreichten. Gegenüber den vorgestellten Tagesprotokollen aus der Betriebsphase 1 (650 °C) lag der gemessene Sauerstoffgehalt an der Emissionsmessstelle im Kamin um 1 bis 2 % niedriger, wodurch die gemessenen CO-Konzentrationsspitzen weniger deutlich ausgefallen sind als in der Betriebsphase 1 (vgl. hierzu die Erläuterungen in Abschnitt 3.5.1).

Ein für diese Referenzphase typischer Wochentagsbetrieb ist der Vollständigkeit halber in Bild 3.10 dargestellt.

Kontinuierliche Datenerfassung 26.01.2009

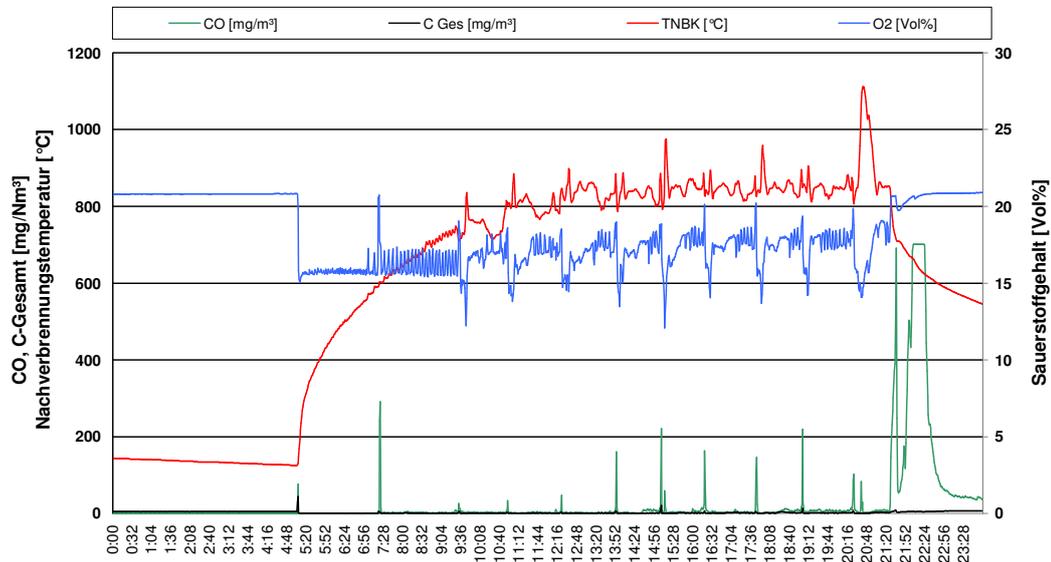


Bild 3.9: Messwertaufzeichnungen für einen „Montagsbetrieb“ der Referenzphase bei einer Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer

Kontinuierliche Datenerfassung 27.01.2009

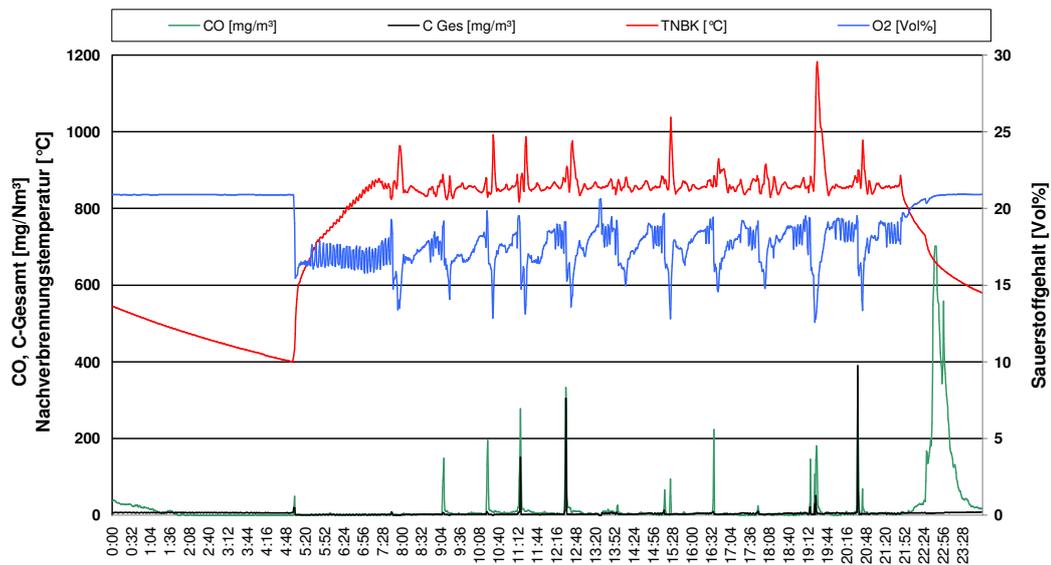


Bild 3.10: Messwertaufzeichnungen für einen „Wochentagsbetrieb“ der Referenzphase bei einer Mindesttemperatur von 850 °C in der Nachbrennkammer

Die in dieser Betriebsphase festgestellten CO-Emissionskonzentrationen lagen im Mittel bei $6,4 \text{ mg/Nm}^3$ mit einer sehr geringen Schwankungsbreite (Bild 3.11). Trotz dieser für eine „Altanlage“ günstigen CO-Emissionssituation können vereinzelte Grenzwertüberschreitungen nicht ausgeschlossen werden. So traten an einem Tag bei drei aufeinanderfolgenden Einäscherungen erhöhte CO-Emissionskonzentrationen auf, von denen zwei zu Grenzwertüberschreitungen führten (EÄ-Nr. 173 und 175). Wie die Auswertung zeigt, waren diese Einäscherungen durch erhöhte Sarggewichte charakterisiert, die kurzzeitig heftige Verbrennungsreaktionen mit deutlichen Temperaturspitzen bis zu ca. $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ zur Folge hatten, die durch die in ihrer Wirkungsweise limitierten Prozesssteuerung (Siemens S5) offensichtlich nicht vollständig kompensiert werden konnten. Bei diesen drei Einäscherungen kam es auch zu geringfügigen Überschreitungen des Grenzwertes für Gesamtkohlenstoff. Die über den gesamten Untersuchungszeitraum festgestellte mittlere Gesamtkohlenstoffkonzentration ergab sich zu $3,0 \text{ mg/Nm}^3$ bei einer ebenfalls geringen Schwankungsbreite und lag im Vergleich zur Betriebsphase 1 etwas höher.

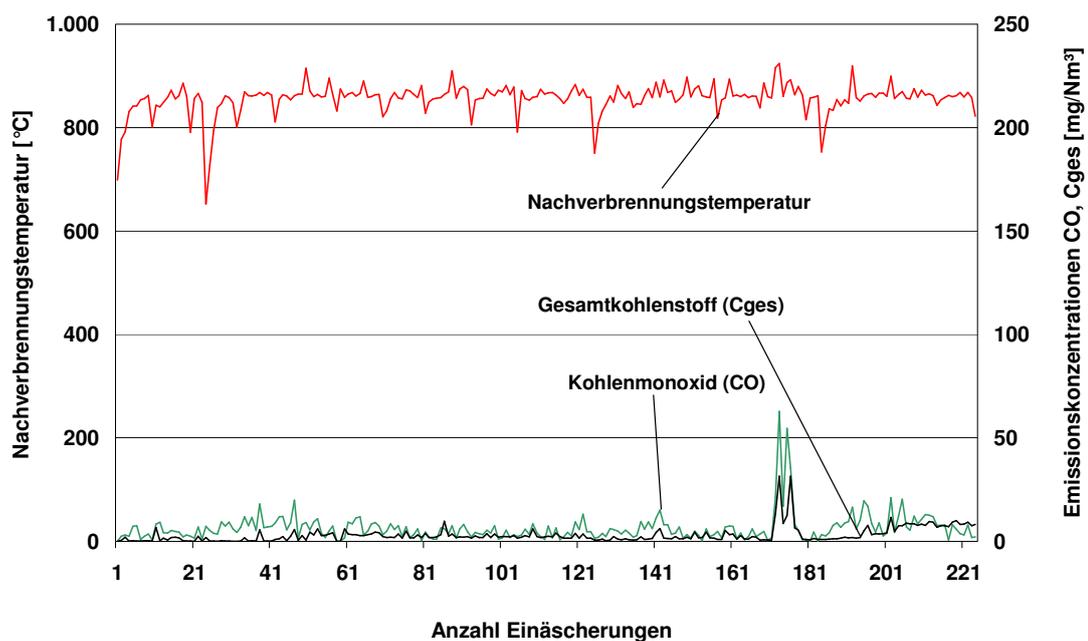


Bild 3.11: Einäscherungsbezogene Mittelwerte der kontinuierlichen Messwertaufzeichnungen – Betriebsphase 2 (19.12.2008 – 29.01.2009)

Im Verlauf der zweiten Betriebsphase ($850 \text{ }^\circ\text{C}$) traten folgende betrieblichen Besonderheiten/Anlagenstillstände auf:

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 2.- 6.1.(zwischen EÄ 45 & 46): | Ausfall der Emissionsmesstechnik |
| 8.1. (zwischen EÄ 57 & 58): | Ausfall der Emissionsmesstechnik |

- 12.1. (zwischen EÄ 69 & 70): Ofenreinigung (Anlagenstillstand)
 23.1. (zwischen EÄ 173 & 176): Heftige Verbrennungsreaktionen bei Einäscherungen mit höheren Sarggewichten

3.5.3 Betriebsphase 3 bei einer Mindesttemperatur von 750 °C in der Nachbrennkammer

Zum Abschluss des Untersuchungsprogramms wurde in der dritten Betriebsphase die Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer auf 750 °C eingestellt. Die Tagesprotokolle zeigten gegenüber den Betriebsphasen 1 und 2 keine weiteren Besonderheiten, abgesehen von der Dauer der Aufheizphase, die durch die Einstelltemperatur von 750 °C bestimmt war. Wie Bild 3.12 zeigt, lagen die Kohlenmonoxidkonzentrationen in dieser Betriebsphase im Mittel bei 11,0 mg/Nm³, wenngleich vereinzelte Überschreitungen des CO Grenzwerts von 50 mg/Nm³ auftraten. Gleiches gilt für den Gesamtkohlenstoff, bei dem trotz des Mittelwerts von 6,5 mg/Nm³ ebenfalls in drei Fällen eine Überschreitung des Grenzwertes von 20 mg/Nm³ beobachtet wurde. Lassen sich die vereinzelten Grenzwertüberschreitungen, bei den Einäscherungen Nr. 19, 45 (nur C_{ges}), 103 (nur CO) und 138 noch mit intensiverer Wärmefreisetzung in Einzelfällen erklären, könnte der zwischen den Einäscherungen Nr. 57 bis 70 beobachtete kontinuierliche CO-Anstieg auf eine fortschreitende Verschmutzung des Ofens und der nach geschalteten Wärmetauscherheizflächen zurück zu führen sein. Die zwischen der 69. und 70. Einäscherung durchgeführte Ofenreinigung legt diesen Schluss nahe.

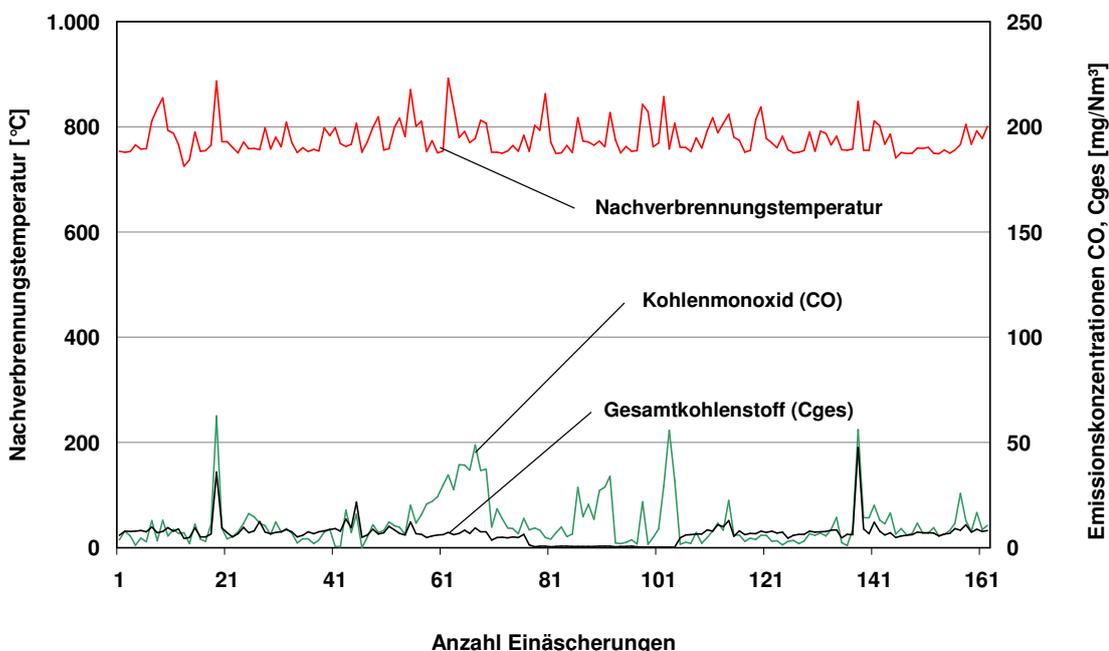


Bild 3.12: Einäscherungsbezogene Mittelwerte der kontinuierlichen Messwertaufzeichnungen – Betriebsphase 3 (30.01. – 25.02.2009)

In dieser dritten Betriebsphase (750 °C) sind folgende betrieblichen Besonderheiten und Anlagenstillstände aufgetreten:

- 9.2. (zwischen EÄ 69 & 70): Ofenreinigung (Anlagenstillstand)
- 13.-16.2.(zwischen EÄ 104 & 105): Ausfall der Emissionsmesstechnik
- 17.-20.2.(zwischen EÄ 105 - 139): zeitweiliger Austausch der Emissionsmesstechnik
- 20.2. (zwischen EÄ 144 - 145): Ofenreinigung (Anlagenstillstand)

In der Summe kann man für den gesamten Untersuchungszeitraum festhalten, dass es während der Einäscherungsvorgänge zu keinen Überschreitungen der Tagesmittelwerte für Kohlenmonoxid und Gesamtkohlenstoff gekommen ist. Ferner hat sich gezeigt, dass bei allen Betriebsphasen vereinzelt Grenzwertüberschreitungen bei Kohlenmonoxid wie auch bei Gesamtkohlenstoff aufgetreten sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der untersuchten Einäscherungslinie 3 seit Betriebsbeginn im Jahr 2000 insgesamt rund 20.000 Einäscherungen durchgeführt wurden.

3.6. Erfassung und Bewertung des Gasverbrauchs

Zur Erfassung des Gasverbrauchs wurde die Linie 3 des Krematoriums Düsseldorf mit je einem Gaszähler für die drei Brennersysteme in der Hauptbrennkammer, Nachbrennkammer und Ascheausbrennkammer ausgestattet. Jeden Morgen beim Aufheizen der Einäscherungslinie sowie unmittelbar vor jeder neuen Sargeinfahrt wurden die Zählerstände an allen drei Brennern vom Betriebspersonal manuell erfasst (siehe Abschnitt 3.3). Somit liegen für jede im Untersuchungszeitraum durchgeführte Einäscherung die einäscherungsbezogenen Gasverbrauchswerte für alle drei Brenner vor.

Obwohl die Untersuchungsphasen zeitlich in anderer Reihenfolge durchgeführt wurden, wird zunächst die gemäß 27. BImSchV vorgeschriebene Einstellung von 850 °C (Referenzsituation) betrachtet. Aus der Analyse des Betriebsverhaltens geht hervor, dass insbesondere bei der Referenzsituation das Aufheizen des Ofenmaterials den Gasverbrauch maßgeblich beeinflusst (Abschnitt 3.5.2). Um diesen Einfluss zu eliminieren, wurden nur die Einäscherungen berücksichtigt, bei denen die Einfahrttemperaturbedingung von 850 °C erreicht war. Dennoch zeigen die Auswertungen dieser Betriebsphase, die im Zeitraum vom 19.12.2008 bis 29.1.2009 stattgefunden hat und durch die Weihnachtstage und den Jahreswechsel durch längere Betriebsunterbrechungen gekennzeichnet war (Bild 3.13), dass der einäscherungsbezogene Gasverbrauch durch Aufheizeffekte beeinflusst war. So waren beispielsweise die Messtage 4 und 9 durch einen vorausgegangenen viertägigen Betriebsstillstand gekennzeichnet, bei dem die Feuerfestauskleidung bei Beginn des Aufheizens auf etwa 100 °C abgekühlt war. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2.1.4 ist an derartigen Betriebstagen mit einem Energiebedarf zur Ofenaufheizung zu rechnen, der bei eingebauten Feuerfestmassen von 20 bis 25 Mg im Bereich von über 10.000 bis 15.000 MJ liegt. Bereits ohne Berücksichtigung von Abgasverlusten, wie sie während des Auf-

heizens entstehen und bei dem theoretischen Modell 1. Ordnung (siehe 2.1.5) berücksichtigt sind, muss unter derartigen Betriebsbedingungen mit einem Energieeinsatz, ausgedrückt als Gasäquivalent, von mehr als 500 m³ gerechnet werden. Daher beeinträchtigt, wie Bild 3.13 zeigt, der Aufheizvorgang auch die ersten Einäscherungen und demzufolge den Tagesmittelwert. Bemerkenswert ist bei der Detailbetrachtung der Anteil des Gasverbrauchs in der Nachbrennkammer, der den gesamten Verbrauch insbesondere an den Tagen nach längeren Stillstandszeiten (z. B. Wochenende), maßgeblich bestimmt, während die Gasverbrauchswerte in der Haupt- und Ascheausbrennkammer einen geringeren Einfluss haben.

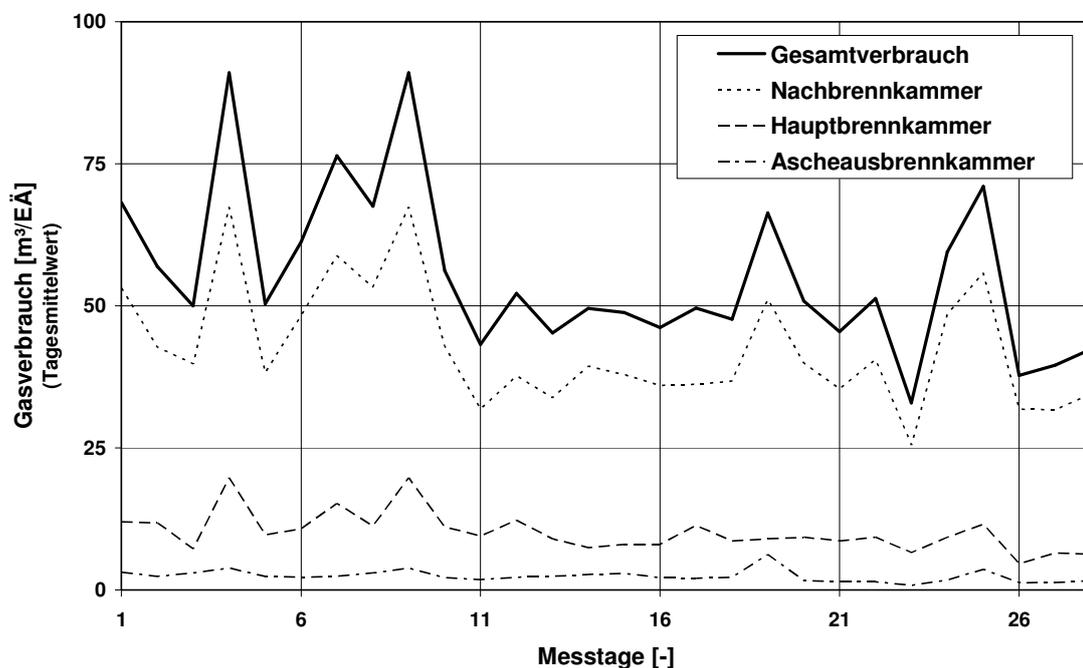


Bild 3.13: Gasverbrauch bei der Nachverbrennungstemperatur 850°C – Referenzphase

Bei der Bewertung des Gasverbrauchs der untersuchten Kremationslinie sind die in Abschnitt 3.1 ausführlich beschriebenen anlagenspezifischen und betriebsspezifischen Einflüsse, die das gesamte Gasverbrauchsniveau entscheidend bestimmen, zwingend einzubeziehen. So haben geänderte Betriebseinstellungen und Betriebsweisen nach Abschluss der drei Betriebsphasen auch für den Regelbetrieb bei 850 °C zu einer erheblichen Minderung des Gasverbrauchs in den Haupt- und Nachbrennkammern gleichermaßen beigetragen, wobei in Abstimmung mit dem Betreiber folgende Regelungsmodifikationen bzw. Änderungen des Betriebsregimes vorgenommen wurden:

- Anhebung des Regelungspunktes für den Ofenunterdruck in der Aufheizphase von -0,15 auf -0,03 mbar.
- Reduzierung des Abgasverlustes durch Absenkung des Sauerstoffgehalts um etwa 2 % durch geänderte Verbrennungsluftzuführung.

- Modifizierte verbrauchsoptimierte Brennereinstellung.
- Einfahrt eines Sarges unmittelbar nach Abschluss der vorangegangenen Einäscherung und Vermeidung von Stillstandszeiten zwischen den Einäscherungen.

Die nach gleichen Kriterien ermittelten Gasverbrauchswerte der beiden Betriebsphasen 1 (650 °C) und 3 (750 °C) sind in den Bildern 3.14 und 3.15 dargestellt. In beiden Betriebsphasen ist erwartungsgemäß vor allem der Gasverbrauch in der Nachbrennkammer gegenüber der Referenzphase zurückgegangen. Auch in diesen beiden Betriebsphasen liegen die Gasverbrauchswerte in den Haupt- und Ascheausbrennkammern praktisch in der gleichen Größenordnung wie bei der Referenzphase, wenngleich in der Betriebsphase 1 ein leicht erhöhter Gasverbrauch in der Hauptbrennkammer festzustellen war. Angesichts der Vielzahl möglicher Einflussgrößen lassen sich hierzu keine qualitativ prüfbaren Gründe anführen.

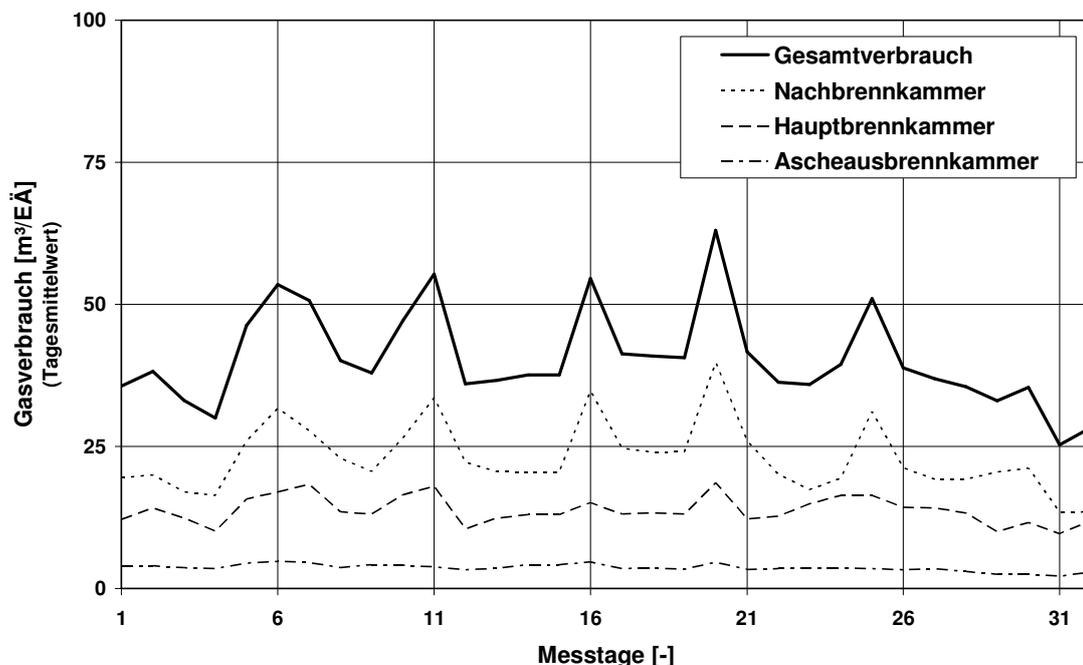


Bild 3.14: Gasverbrauch bei Betriebsphase 1 (650 °C)

Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass bei den vorgefundenen Betriebsbedingungen, die sich im täglichen Ablauf der Anlagenbetriebsweise als zweckmäßig herausgestellt haben, allein durch die Absenkung der Nachverbrennungstemperatur beachtliche Einsparungen im Gasverbrauch möglich sind. So konnte in der Nachbrennkammer der Gasverbrauch in der Größenordnung um 45 % gesenkt werden. Für die gesamte Ofenanlage ergab sich in der Betriebsphase bei 650 °C eine Reduktion um 30 % gegenüber der Referenzphase; in der Betriebsphase mit 750 °C wurden sogar 35 % ermittelt. Es bleibt allerdings festzuhalten, dass der Grad der Zusatzenergieeinsparung maßgeblich auch durch die sonstigen Betriebseinstellungen bestimmt wird,

weshalb eine Übertragung der festgestellten Reduktionsraten des Gasverbrauchs auf andere Anlagen nur mit Einschränkungen möglich ist. In der Tendenz sind diese Auswirkungen jedoch auch bei anderen Anlagen zu erwarten, so dass, insbesondere bei Altanlagen, ein nicht unerhebliches Minderungspotential gegeben ist.

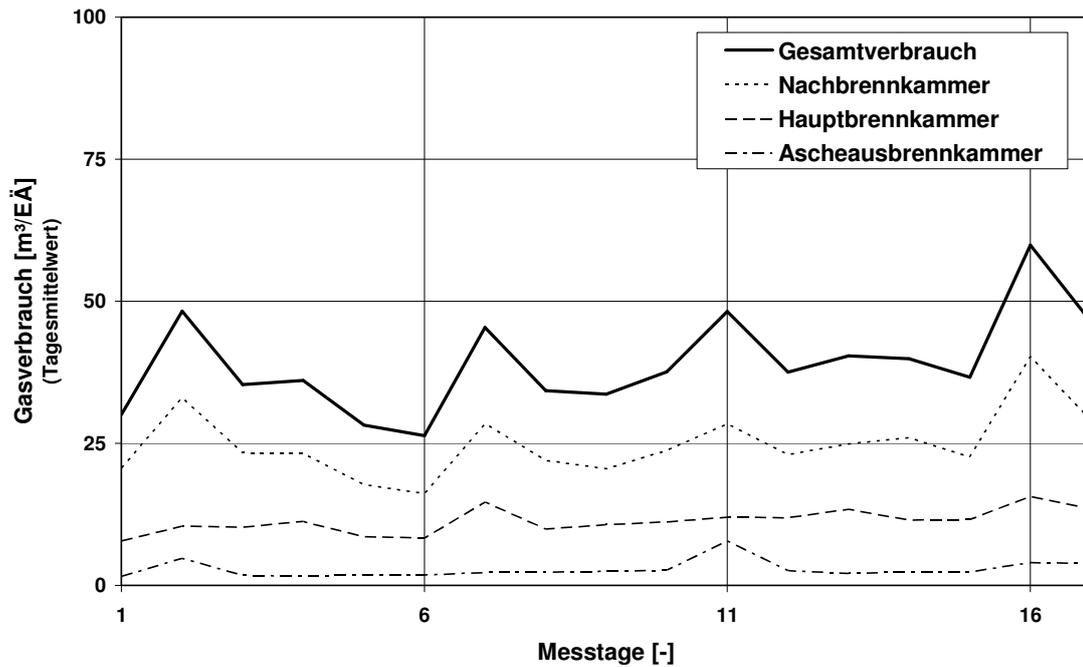


Bild 3.15: Gasverbrauch bei Betriebsphase 3 (750 °C)

4. Diskontinuierliche Messungen

Die nach der jeweiligen Betriebsphase bei unterschiedlichen Temperatureinstellungen durchgeführten diskontinuierlichen Emissionsmessungen umfassten die Staubkonzentrationsbestimmung sowie die Probenahme zur PCDD/F-Analyse bzw. zur Geruchskonzentrationsbestimmung (vgl. hierzu 3.3). Um die Kosten der Probenahme und Dioxinanalyse zu begrenzen, wurden die PCDD/F-Emissionsmessungen der periodisch wiederkehrenden Emissionsmessung vom 13. bis 15.2.2007, die bei einer eingestellten Nachverbrennungstemperatur von 750 °C durchgeführt wurden, in die Betrachtung einbezogen. Das Messprogramm ist in Bild 4.1 zusammengefasst.

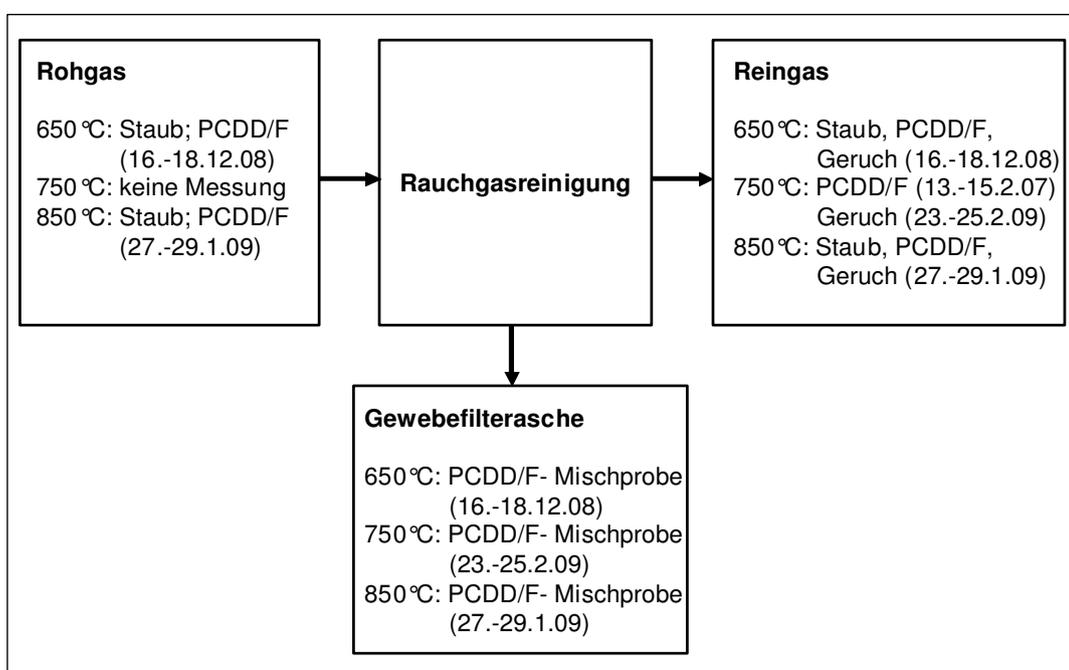


Bild 4.1: Messprogramm – diskontinuierliche Messungen

Die Rohgasbeprobung erfolgte im unterdruckseitigen Rauchgaskanal vor der Rauchgasreinigungseinheit. Die Reingasbeprobung wurde nach dem Saugzuggebläse, druckseitig, und nach Zuführung des Bypasskanals (vgl. hierzu Anmerkungen in 3.5) im senkrechten Abgasrohr durchgeführt. Die für die PCDD/F-Bilanzierung notwendige Beprobung und Analyse der Gewebefilterasche erfolgte durch Entnahme jeweils einer Aschemischprobe während der in Bild 4.1 genannten Untersuchungszeiträume.

4.1. Staubkonzentrationen

Anhand der in Roh- und Reingas ermittelten Staubkonzentrationen (Tabelle 4.1) lässt sich der Staubabscheidegrad mit den katalytisch arbeitenden Filterschläuchen im Be-

reich von etwa 99% (98,38/ 99,04) angeben. Die Reingasstaubkonzentrationen weisen mit Ausnahme von zwei Messwerten einen deutlichen Sicherheitsabstand zum Grenzwert der 27. BImSchV auf, der mit 10 mg/Nm³ festgelegt ist. Die beiden erhöhten Reingaskonzentrationen (7,1 und 6,2 mg/Nm³) lassen sich nicht durch eindeutige Ereignisse oder Messbedingungen erklären; Filterdefekte waren jedenfalls nicht erkennbar.

Phase 1 650 °C	Rohgas [mg/Nm³]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	136	128	182	104	164	92,2	94,2	134	177
	± 37,13	± 35,16	± 49,8	± 28,21	± 44,57	± 25,09	± 25,38	± 36,11	± 48,31
	Mittelwert: 134,6								
	Reingas [mg/Nm³]								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
7,1	<0,6	6,2	1,6	1	0,8	1,4	<0,6	<0,3	
± 1,97		± 1,69	± 0,443	± 0,279	± 0,227	± 0,385			
Mittelwert: 2,18									
Phase 2 850 °C	Rohgas [mg/Nm³]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	121	94,7	99,5	109	73,3	103	43,9	88	35,6
	± 3,4	± 2,99	± 3,42	± 3,47	± 2,83	± 3,49	± 1,81	± 3,15	± 1,63
	Mittelwert: 85,3								
	Reingas [mg/Nm³]								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<0,5	0,6	2,3	<0,5	0,7	<0,5	1,2	<0,5	0,6	
	± 1,214	± 1,428		± 1,411		± 1,206		± 1,014	
Mittelwert: 0,82									

Tabelle 4.1: Ermittelte Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas
(Angaben in mg/Nm³)

4.2. PCDD/F- Untersuchungen im Rauchgas

Die in den Bildern 4.2 und 4.3 dargestellten Homologenverteilungen der ermittelten Dioxin- und Furankonzentrationen bestätigen das bei schneller Rauchgaskühlung häufig zu beobachtende Verteilungsmuster /5/. Rückbildungseffekte der Dioxinhomologe sind hierbei deutlich unterdrückt, während bei den Furanhomologen ein Anstieg der Konzentration mit abnehmendem Chlorierungsgrad festzustellen ist.

Dabei zeigt bereits die Rohgassituation, dass die Absenkung der Nachverbrennungstemperatur keinen Anstieg der Dioxin-/Furankonzentrationen zur Folge hatte, sondern tendenziell ein um etwa 50 % niedrigeres Konzentrationsniveau gegenüber der Referenzphase ergab. Die im Rohgas ermittelten Größenordnungen von 1 bis 2 ng TE/Nm³ entsprechen üblichen Rohgaskonzentrationen anderer Verbrennungsprozesse.

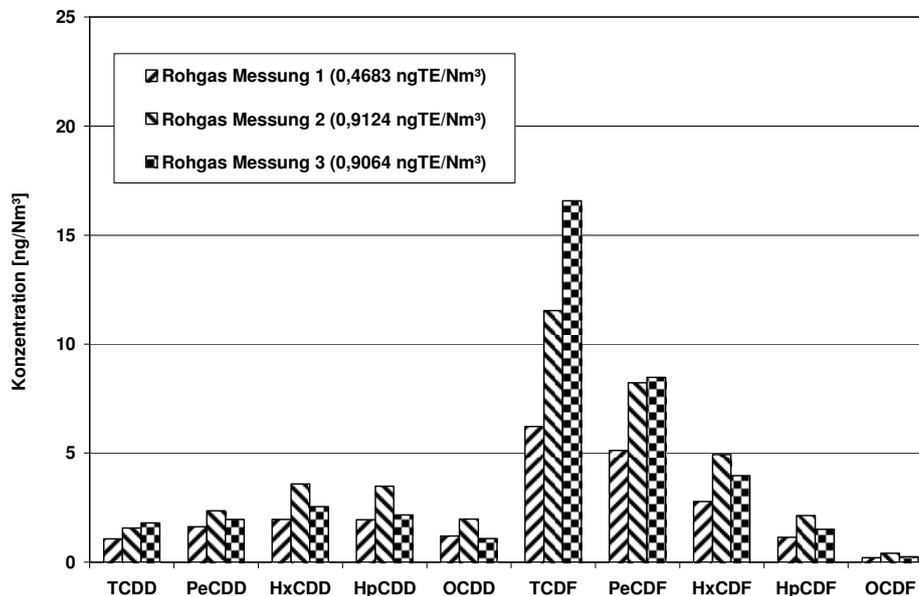


Bild 4.2: PCDD/F-Homologenverteilung im Rohgas in der Betriebsphase 1 (650 °C)

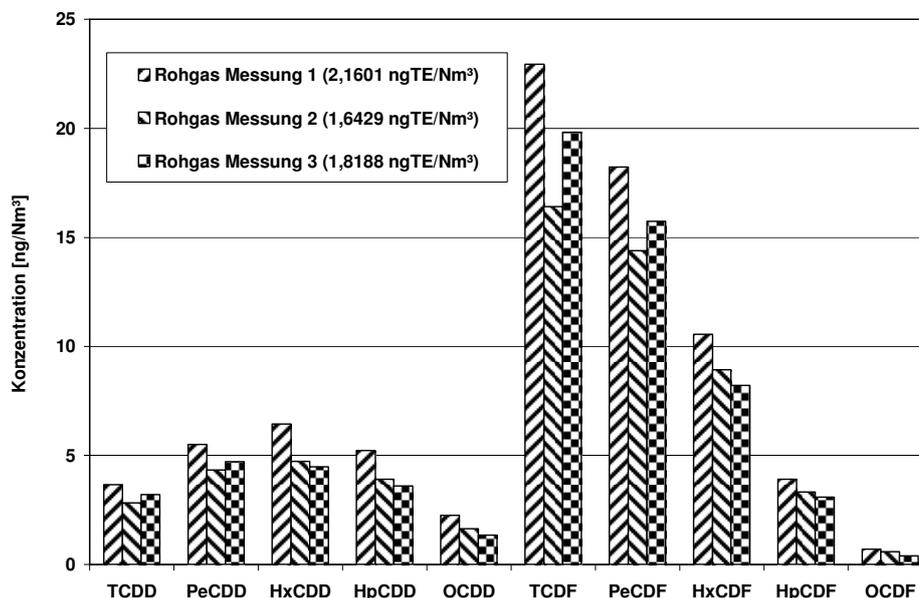


Bild 4.3: PCDD/F-Homologenverteilung im Rohgas in der Betriebsphase 2 (850 °C)

Das Rohgashomologenmuster ist auch im Reingas erkennbar, wenngleich die Furanverteilung in der 650°-Phase nicht mehr so ausgeprägt ist, wie dies üblicherweise der Fall ist (Bilder 4.4 bis 4.6). Mit den gemäß der Berechnungsvorschrift für Toxizitätsäquivalente berechneten Reingaskonzentrationen von 0,0091 bis 0,0157 ng TE/Nm³ in der Betriebsphase 1 (650 °C), 0,0093 bis 0,0106 ng TE/Nm³ in der Betriebsphase 2

(750 °C) /15/ bzw. 0,0197 bis 0,0221 ng TE/Nm³ in der Referenzphase bei 850 °C ergibt sich ein PCDD/F-Konzentrationsniveau, das einen deutlichen Sicherheitsabstand in der Größenordnung des Faktors 5 bis 10 zum Grenzwert der 27. BImSchV aufweist.

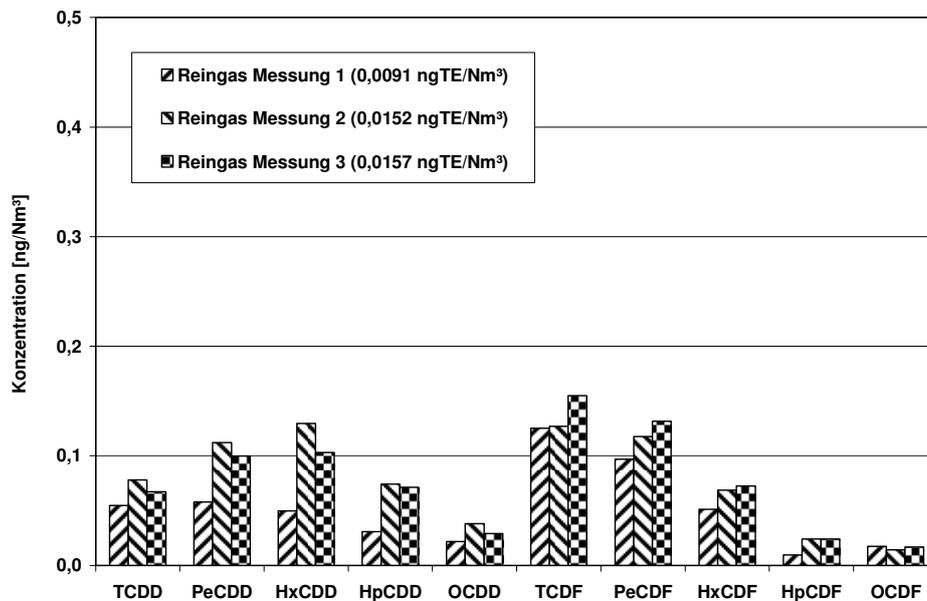


Bild 4.4: PCDD/F-Homologenverteilung im Reingas in der Betriebsphase 1 (650 °C)

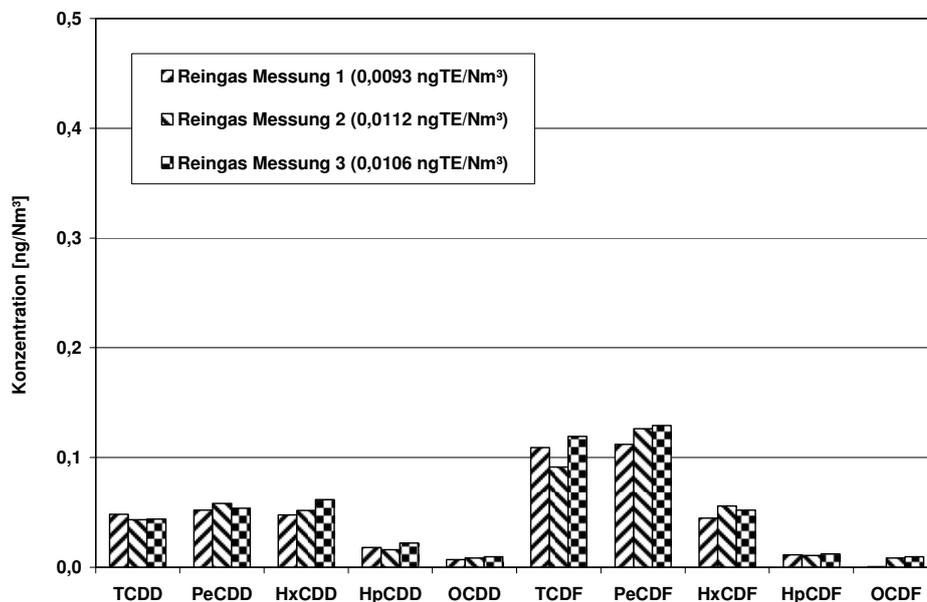


Bild 4.5: PCDD/F-Homologenverteilung im Reingas bei 750 °C in der Nachbrennkammer gemäß /15/

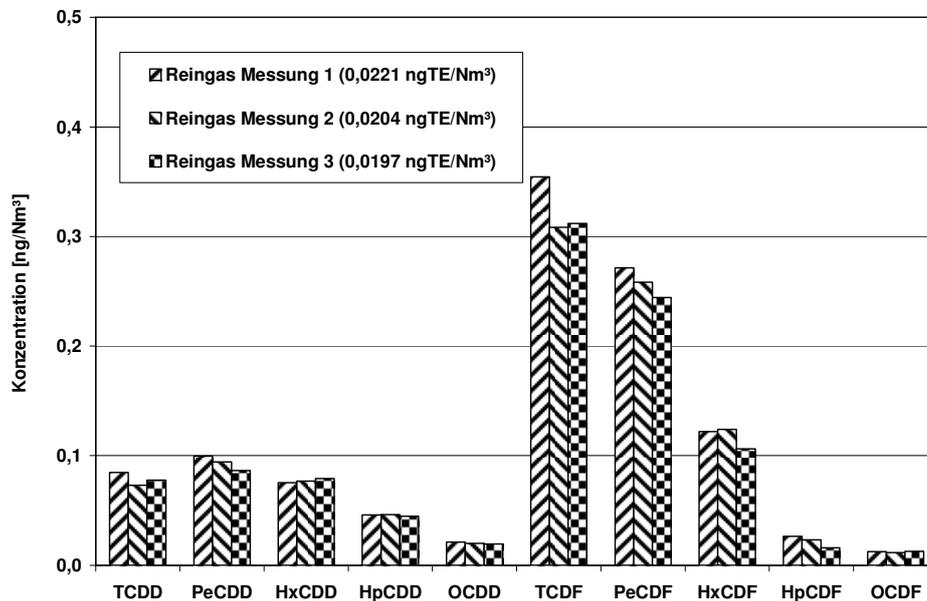


Bild 4.6: PCDD/F-Homologenverteilung im Reingas in der Betriebsphase 2 (850 °C)

Aus dem Vergleich Roh- und Reingas lässt sich direkt die rauchgasseitige Reduktionsrate im katalytischen Gewebefilter ermitteln. Sie liegt, wie Bild 4.7 zeigt, in der Größenordnung von 94 bis 99 %. Die scheinbar geringere Reduktionsrate bei der Betriebsphase 1 ist teilweise auf die Messunsicherheit bei extrem geringen Reingaskonzentrationen zurückzuführen.

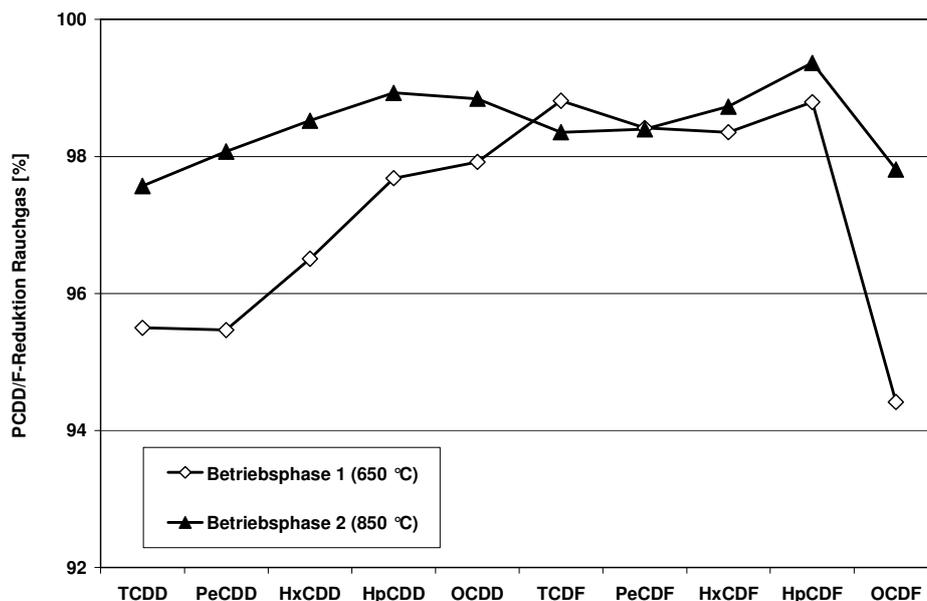


Bild 4.7: Ermittelte rauchgasseitige Reduktionsraten

4.3. PCDD/F-Gehalte in der Gewebefilterasche

Die Analyse der im Zuge der diskontinuierlichen Messphasen entnommenen Mischproben der Gewebefilterstäube zeigt ebenfalls für alle drei Untersuchungsphasen (650°, 750° und 850°) ein tendenziell gleiches PCDD/F-Homologenverteilungsmuster (Bild 4.8), das jedoch gegenüber dem Rohgasverteilungsmuster (Bilder 4.2 und 4.3) einen Anstieg der Dioxin homologen mit zunehmendem Chlorierungsgrad aufweist. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass in den Stäuben, die in den Filtertrichtern sowie in den darunter befindlichen Staubsammeltonnen gesammelt werden, PCDD-/F-Rückbildungseffekte auftreten /16, 7/. Inwieweit diese Interpretation der festgestellten Verteilungsmuster allgemeingültig ist und weiterführende Konsequenzen nach sich zieht, kann aufgrund des vorliegenden Datenmaterials nicht abschließend beurteilt werden. Zur endgültigen Absicherung dieser Feststellung und abschließenden Klärung möglicher Konsequenzen für Krematorien sind weitere Untersuchungen erforderlich.

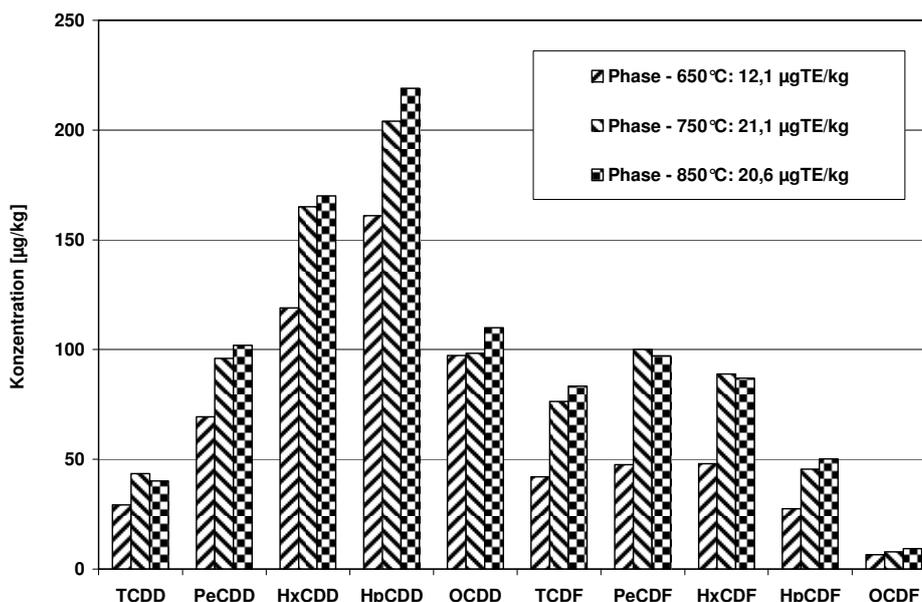


Bild 4.8: PCDD-/F-Homologenverteilung in den Staubschmischproben des Gewebefilters in den unterschiedlichen Betriebsphasen

4.4. Geruchskonzentrationen

Zur Bestimmung der während der unterschiedlichen Betriebsphasen auftretenden Geruchsemissionskonzentrationen wurde das sogenannte **olfaktometrische Messverfahren** angewandt. Hierbei wird die menschliche Nase als Detektor genutzt, wodurch hedonische, also gefühlsspezifische Wirkungen in die Messung mit einfließen können (Bild 4.9). In einem ersten Verfahrensschritt wurde zunächst an der Messstelle ein geruchsneutraler Probebeutel (PET-Schlauchfolie; Volumen: ca. 6 l) mit der zu untersu-

chenden Gasprobe befüllt. Die Probenahme wurde jeweils über einen Zeitraum von 30 min bei einem eingestellten Gasdurchfluss von 0,2 l/min an der Reingasmessstelle vor dem Saugzuggebläse als auch zu Referenzzwecken in der Ascheausbrennkammer des Etagenofens durchgeführt. Die gezogenen Proben wurden anschließend unverzüglich in Frankfurt-Linsengericht, durch ein dafür ausgewähltes Probandenkollektiv (vier Probanden) olfaktometrisch nach den einschlägigen Bestimmungen analysiert. Der Zeitraum bis zur Analyse lag unter 5,5 h.

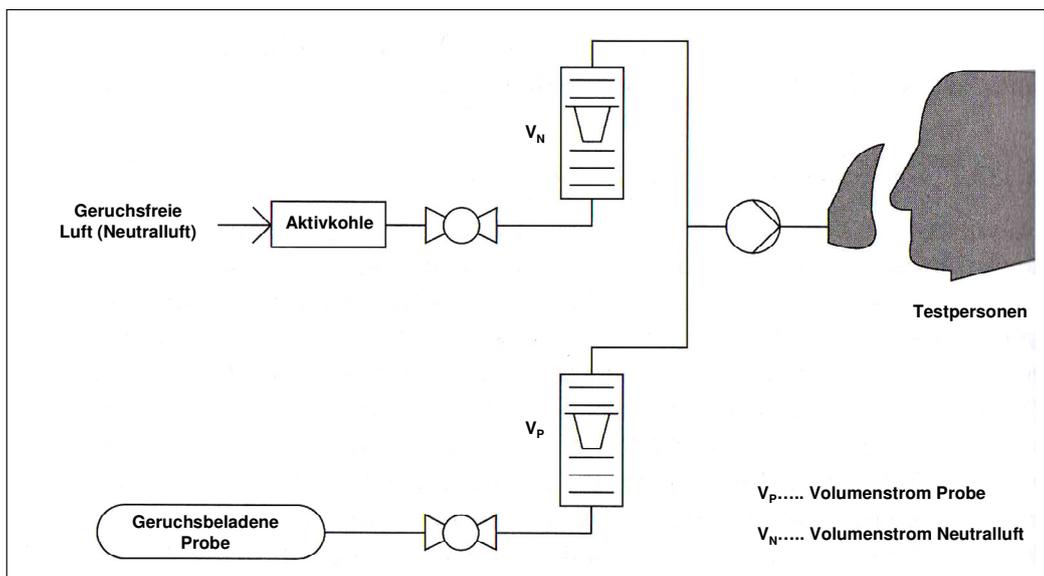


Bild 4.9: Funktionsprinzip des Olfaktometers nach /17/

Die nach diesem Verfahren ermittelten Geruchskonzentrationen, angegeben als Z(50)-Werte, sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Dabei zeigten sich, von einem in der Betriebsphase 3 erhöhten Messwert abgesehen, keine Auffälligkeiten, wenn man die beim olfaktometrischen Messverfahren zu berücksichtigende Messunsicherheit in die Bewertung einbezieht. Ferner bestätigten auch die vom Messinstitut gezogenen Referenzproben die Größenordnung der im Reingas während des Einäscherungsbetriebes ermittelten Geruchsemissionskonzentrationen:

- **Referenzprobe Reingas Brennerbetrieb:** die Probenahme erfolgte in der letzten Phase während einer Einäscherung, die im Wesentlichen durch den Brennerbetrieb gekennzeichnet ist.
- **Referenzprobe Rauchgas Ascheausbrennkammer:** der Ort der Probenahme repräsentiert das Geruchsbild für eine Einäscherungsanlage.

Proben	Olfaktometrische Messung [GE/Nm ³]		
	Betriebsphase 1 650 °C	Betriebsphase 2 850 °C	Betriebsphase 3 750 °C
Reingas - Kremationsbetrieb ¹⁾	240 160 151	180 113 240	891 151
Reingas - Brennerbetrieb ²⁾	226	269	170
Rauchgas - Ascheausbrennraum ³⁾	101	50	170

Hinweise: ¹⁾ Probenahme am letzten Tag der jeweiligen Betriebsphase
²⁾ Probenahme in der letzten Phase einer Einäscherung
³⁾ Probenahme im Ascheausbrennraum am letzten Tag der jeweiligen Betriebsphase

Tabelle 4.2: Ergebnis der olfaktometrischen Messung

4.5. Ergebnisse aus Untersuchungen in anderen Krematorien

Die möglichen Auswirkungen reduzierter Nachverbrennungstemperaturen auf die Emissionskonzentrationen wurde auch in anderen Krematorien, z.B. in Berlin-Ruhleben, Reutlingen und Saarbrücken, untersucht /4, 18, 19/. Im erstgenannten Krematorium sind vier Etagenofenlinien (Fabrikat Ruppman, älterer Bauart) installiert, deren Abgase nach dem Trockensorptionsverfahren gereinigt werden. Nachdem in 1999 die Neuauskleidung der Etagenofen abgeschlossen war, bestätigten die im November 2000 von einem unabhängigen Institut durchgeführten Emissionsmessungen, dass auch bei niedrigeren Nachverbrennungstemperaturen (650 °C, 800 °C) keine negativen Auswirkungen auf die Emissionssituation erkennbar sind (Tabelle 4.3). Vielmehr zeigen die Messungen, dass die einzelnen Einäscherungslinien in ihrem Betriebs- und Emissionsverhalten geringe Unterschiede aufweisen, die sich jedoch im Rahmen der vom Gesetzgeber vorgegebenen Grenzwerte bewegt haben.

Zu vergleichbaren Ergebnissen führen die im Zuge der Erst- bzw. wiederkehrenden Emissionsmessungen an den Krematorien Reutlingen und Saarbrücken durchgeführten Untersuchungen bei abgesenkten Nachverbrennungstemperaturen. In beiden Krematorien sind ebenfalls Etagenofenanlagen, System Ruppman, installiert, denen jeweils Rauchgasreinigungssysteme nach dem Trockensorptionsverfahren nachgeschaltet sind. Die Messungen in beiden Krematorien zeigten ebenfalls, wie schon im Krematorium Berlin-Ruhleben, dass bei niedrigeren Nachverbrennungstemperaturen von 700 °C, respektive 750 °C im Rahmen der üblichen Messunsicherheiten keine Auswirkungen auf die Emissionssituation nachgewiesen werden konnten.

Emissionsmessungen an Krematorien		Nachverbrennungstemperatur [°C]	CO [mg/Nm³]	Cges [mg/Nm³]	Staub [mg/Nm³]	PCDD/F [ngTE/Nm³]
27. BImSchV		850	50	20	10	0,1
Berlin-Ruhleben Inbetriebnahme: 1987/8 Ofenauskleidung: 1999 Messung: Nov. 2000	Linie 1	850	11,73	2,33	0,56	0,0061
		800	5,02	2,32	0,45	0,0066
		650	2,25	3,65	0,54	0,0115
	Linie 2	850	26,09	2,77	0,65	0,0039
		800	12,13	4,70	0,25	0,0050
		650	15,37	3,04	0,11	0,0088
	Linie 3	850	5,20	1,42	1,16	0,0095
		800	6,52	1,28	0,96	0,0017
		650	7,70	2,50	8,70	0,0033
	Linie 4	850	5,89	3,49	1,25	0,0063
		800	6,23	3,20	0,78	0,0091
		650	4,07	2,56	2,44	0,0091
Reutlingen Inbetriebnahme: 2002 Messung: März 2002	Linie 1	850	16,6	<4	2,1	0,0118
		850	16,3	<4	1,7	0,0135
		850	13,7	<4	n.n.	0,0150
		700	10,9	<4	n.n.	0,0131
		700	8,6	<4	n.n.	0,0127
		700	7,5	<4	n.n.	0,0105
Saarbrücken Inbetriebnahme: 1995 Messung: Aug. 2002	Linie 1	850	n. d.	<2	0,86	0,003
		750	n. d.	<2	n.g.	0,002
	Linie 2	850	n. d.	<2	0,64	0,015
		750	n. d.	<2	n.g.	0,018

Hinweise:

- n.n. nicht nachweisbar
 - n.g. nicht gemessen: Staubgehalt wurde jeweils bei 850 °C bereits erfasst
 - n.d. nicht dokumentiert:
- Die diskontinuierliche Messung schloss die kontinuierlich CO-Erfassung aus.
Nach Aussage des Betreibers, wurde während der Messungen keine CO-Grenzwertverletzungen festgestellt.

Tabelle 4.3: Reingaskonzentrationen bei reduzierter Nachverbrennungstemperatur

5. Zusammenfassende Bewertung

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens an der Einäscherungslinie 3 des Krematoriums Düsseldorf durchgeführten Untersuchungen haben trotz einiger wesentlichen anlagentechnischen und betriebsbedingten Besonderheiten allgemein gültige Auswirkungen durch die Absenkung der Nachverbrennungstemperatur aufgezeigt:

- 1) **Reingasemissionen:** Keiner der in der 27. BImSchV festgeschriebenen Emissionsgrenzwerte wurde durch die Temperaturabsenkung in einer Weise beeinflusst, dass dadurch erkennbare und auf diese Betriebsweise zurückzuführende Emissionsgrenzwertverletzungen verursacht worden wären. Vielmehr haben sich unter Berücksichtigung der bei Einäscherungen üblichen Schwankungen des Verbrennungsablaufes nur geringfügige Unterschiede zwischen den Messphasen ergeben, die auch auf nicht näher bestimmbare äußere Einflüsse im Anlagenbetrieb zurückzuführen sind (Tabelle 5.1). Dabei zeigen sowohl die reinen verbrennungsabhängigen Schadgaskonzentrationen, CO und C_{ges}, als auch die PCDD/F-Gehalte keine eindeutigen Tendenzen, weshalb die vom Gesetzgeber mit 850 °C geforderte Mindesttemperatur in der Nachbrennkammer, allenfalls eine hinreichende Bedingung für ein günstiges Emissionspotenzial sein kann. Vielmehr kommt es darauf an, durch turbulente Strömungsführung den erforderlichen Gasausbrand zu gewährleisten.

	Kohlenmonoxid - CO - [mg/Nm ³] ¹⁾	Gesamtkohlenstoff - C _{ges} - [mg/Nm ³] ¹⁾	Staub [mg/Nm ³]	Dioxine/Furane - PCDD/F - [ngTE/Nm ³]
27.BImSchV	50	20	10	0,1
650 °C	16,9 (13,0)	0,8 (1,5)	2,18 ²⁾	0,0091 ²⁾ 0,0152 ²⁾ 0,0157 ²⁾
750 °C	11,6 (11,2)	6,6 (5,2)	n.g.	0,0093 ³⁾ 0,0112 ³⁾ 0,0106 ³⁾
850 °C	6,4 (6,8)	3,0 (3,8)	0,82 ⁴⁾	0,0221 ⁴⁾ 0,0204 ⁴⁾ 0,0197 ⁴⁾

Hinweise: ¹⁾ CO, C_{ges}: kontinuierliche Messung (11/2008 bis 02/2009)-Mittelwert und Standardabweichung

²⁾ Staub, PCDD/F: diskontinuierliche Messung (12/2008)

³⁾ PCDD/F: diskontinuierliche Messung (02/2007)

⁴⁾ Staub, PCDD/F: diskontinuierliche Messung (01/2009)

Tabelle 5.1: Ermittelte Reingasemissionen

Die im Zuge der Untersuchungen olfaktometrisch ermittelten Geruchskonzentrationen im Reingas der Anlage, liegen, von einer Messung mit 891 GE/m³ abgesehen, im Bereich von 113 bis 240 GE/m³. Ein Einfluss der Temperaturabsenkung

konnte nicht festgestellt werden. Eine durchgeführte Literaturrecherche hat keine Vergleichswerte anderer Krematorien ergeben; aus dem Vergleich mit anderen Verbrennungsanlagen sind keine Auffälligkeiten erkennbar.

- 2) **Gasverbrauch und CO₂-Ausstoss:** Die Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer hat für die Einäscherungslinie 3 im Krematorium Düsseldorf zu einer eindeutigen Reduzierung des Gasverbrauchs in den Betriebsphasen mit 650 °C und 750 °C geführt. So ergab sich gegenüber der Referenzsituation eine Minderung des Gasverbrauchs in der Nachbrennkammer um ca. 45 %. Für den Gasverbrauch des gesamten Einäscherungsvorgangs stellte sich in der Betriebsphase bei 650 °C eine Reduktion des Gasverbrauchs um 30 % ein. In der Betriebsphase bei 750 °C wurden sogar 35 % ermittelt. Dieses Ergebnis wird maßgeblich durch den täglichen Aufheizbetrieb bestimmt und ist deshalb vor allem für Anlagen mit Einäscherungszahlen unter 2000 pro Jahr von besonderer Bedeutung. Mit dem verminderten Gasverbrauch geht eine korrespondierende CO₂-Minderung einher.
- 3) **Anlagenverschleiß:** Durch die Temperaturabsenkung in der Nachbrennkammer ist eine Minderung des thermischen Verschleißes der Feuerfestauskleidung zu erwarten. Der Grad der Verbesserung lässt sich, wenn überhaupt, nur in Langzeitbeobachtungen feststellen, wobei eine Vielzahl von Quereinflüssen zu erwarten ist.
- 4) **Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Einäscherungsanlagen:** Die Ergebnisse an der gewählten Einäscherungslinie wurden maßgeblich durch die vorhandene Anlagenkonfiguration sowie die sich über Jahre entwickelten und bewährten Betriebs- und Einstellbedingungen bestimmt. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Anlage wurde gezielt eine Altanlage gewählt, deren Aufstellungskonfiguration durch vorgegebene bauliche Rahmenbedingungen bestimmt ist. Aus diesen Gründen ist eine Übertragung der festgestellten Reduktionsraten des Gasverbrauchs auf andere Anlagen nicht möglich. In der Tendenz sind diese Auswirkungen jedoch auch bei anderen Einäscherungsanlagen zu erwarten, so dass insbesondere bei Altanlagen ein nicht unerhebliches Minderungspotenzial gegeben ist. Hinsichtlich der zu erwartenden Emissionswerte ist eine Übertragung auf andere Einäscherungsanlagen zulässig, was durch die in dieser Studie angeführten Literaturwerte von anderen Anlagen bestätigt wird. Voraussetzung ist allerdings, dass die Maßnahmen zur Schadstoffminderung, wie in dieser Arbeit beschrieben, umgesetzt sind.
- 5) **Stand der Erkenntnisse:** Im Gegensatz zu anderen Verbrennungsanlagen wurden Krematorien nur bedingt wissenschaftlich untersucht. Die Ursachen hierfür sind zum einen, und zwar völlig zu Recht, in der Pietät im Umgang mit Verstorbenen zu suchen und zum anderen durch den Standort (meist Friedhof) sowie durch die Anlagengröße (Emissionsquelle) begründet. Die zunehmende öffentliche Diskussion, die vor allem auch durch die Privatisierung und die damit häufig verbundene Standortfrage ausgelöst wurde, erfordert weitergehende Untersuchungen, die auch die theoretische Modellierung der Kremationsvorgänge einschließen. Nur so kön-

nen betriebliche Abläufe zweifelsfrei dokumentiert und in der Konsequenz optimiert werden, um auf diese Weise den hohen Umweltstandard deutscher Krematorien zu stabilisieren.

Mit dieser Studie sollen auch Denkanstöße gegeben werden, die rechtlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Temperaturforderung in der Nachbrennkammer zu überprüfen. Dies erscheint insbesondere vor dem Hintergrund des Klimaschutzes angezeigt.

6. Ergebnisdarstellung im Rahmen einer Tagung

Um die in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse einer breiten Öffentlichkeit zur Umsetzung in anderen Krematorien zur Verfügung zu stellen, wurde eine öffentliche Vortragsveranstaltung organisiert, die am 22. und 23. Juni 2009 im Zentrum für Umweltkommunikation (ZUK) der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück stattfand. Die Tagung, die mit mehr als einhundert Teilnehmern eine große Resonanz erfahren hat (Bild 6.1), wurde als weitgefassstes Informationsforum für sämtliche Facetten der Kremation konzipiert. So lagen die Tagungsschwerpunkte einerseits in den Bereichen Technik und Umweltschutz und betrafen andererseits den Anlagenbetrieb im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Pietät. Die Tagungsbeiträge wurden in einem Buch, das über den Deutschen Bestatterverband bezogen werden kann, zusammengefasst /20/.



Bild 6.1: Osnabrücker Tagung (links: Eröffnung durch die Herren Dr. Brickwedde und Dr. Schetter; rechts: Tagungsteilnehmer)

Aus dieser Tagung, die gleichsam als orientierend für die Arbeit des VDI-DIN Arbeitskreises zur Überarbeitung der für Krematorien entwickelten VDI-Richtlinie 3891 gewertet werden kann, lassen sich folgende wichtige Aspekte ableiten /21, 22/:

- Die in Deutschland zur Verfügung stehenden verfahrenstechnischen Systeme sind geeignet, höchsten umwelttechnischen Standards zu genügen. Dennoch konnten weiterführende Entwicklungen aufgezeigt werden, die zum Ziel haben, den Energieeinsatz weiter zu senken und damit zur CO₂ – Reduzierung beizutragen.
- Der Wettbewerb zwischen den Krematorien in Deutschland führt zu einer Verbesserung des Qualitätsstandards, der durch Gütesiegel dokumentiert wird. Mit diesen Qualitätsstandards, die auch ethische Grundregeln der Kremation vorsehen, rückt

der respektvolle und würdige Umgang mit Verstorbenen in den Mittelpunkt der Kremationsabläufe.

- Anhand vorgestellter Beispiele aus der Praxis sowie in der Planung befindlicher Anlagen zeichnet sich ein klarer Trend von der „technisch geprägten Einäscherungsanlage“ hin zu einem „Ort des Abschieds“ ab.

Dessen ungeachtet, zeigte die Tagungsdiskussion einen Handlungsauftrag zum vertieften Verständnis der Einäscherungsvorgänge und damit zur technischen Weiterentwicklung der prozessgesteuerten Verfahrensbausteine mit dem Ziel die Emissionsgrenzwerte der 27. BImSchV gesichert einzuhalten und gleichzeitig auch bei Altanlagen den Gasverbrauch und damit den CO₂-Ausstoß wirkungsvoll zu mindern.

7. Quellenverzeichnis

- /1/ 27. Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV): Verordnung über Anlagen zur Feuerbestattung, 19.03.1997, Beck-Texte, 9. Auflage, Nov. 2007.
- /2/ VDI-Richtlinie 3891: Emissionsminderung Einäscherungsanlagen, Verein Deutscher Ingenieure, Mai 2001.
- /3/ Gumz, W.: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik, Springer Verlag, 2. Auflage, 1952.
- /4/ Schetter, G.: Einäscherung bei niedrigem Luftüberschuss im Etagenofen. VDI-Seminar, Nr. 43-51-02, Basel, 18./19.Juni, 2001.
- /5/ 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.
- /6/ Takeda, N. et al.: PCDDs/DFs emissions from crematories in Japan, Chemosphere, vol. 40, pp 575 – 586, 2000.
- /7/ Schetter, G.: Anwendung physikalisch-chemischer Grundlagenkenntnisse zur Reduzierung des Austrages polychlorierter Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane aus Abfallverbrennungsanlagen, Dissertationsschrift, VDI – Fortschrittsberichte, Reihe 15, Nr. 95, 1992.
- /8/ Cenerini, R., Ghezzi, U.: Die Dioxin-Frage bei italienischen Verbrennungsöfen, Phoenix International, Jahrg. 5, Nr. 3, S. 25 - 29, 1987.
- /9/ Düwel, U., Nottrodt, A., Ballschmiter, K.: Simultaneous sampling of PCDD/PCDF inside the combustion chamber and on four boiler levels of a waste incineration plant, International Dioxin Conference, Toronto, Canada, 1989.
- /10/ Esser-Schmittmann, W., Schmitz, S.: Auswahlkriterien für Sorbentien zur Schadgasadsorption im Flugstromverfahren sowie in Festbettfiltern nach Krematorienöfen, in: Krematorium – Technische und betriebswirtschaftliche Tendenzen, Dokumentation der DBU – Tagung, Osnabrück, 22./23. Juni 2009, FVB Verlag, 2009.
- /11/ Petzoldt, O.: Erfahrungsbericht über den Einsatz katalytisch arbeitender Gewebefilter zum Abbau von Dioxinen und Furanen in Krematorien, in: Krematorium

- Technische und betriebswirtschaftliche Tendenzen, Dokumentation der DBU – Tagung, Osnabrück, 22./23. Juni 2009, FVB Verlag, 2009.
- /12/ VDI- Richtlinie 3882 Bl. 1: Olfaktometrie, Bestimmung der Geruchsintensität, Verein Deutscher Ingenieure, Okt. 2008.
- /13/ VDI 3882 Bl. 2: Olfaktometrie, Bestimmung der hedonischen Geruchswirkung, Verein Deutscher Ingenieure, Okt. 2008.
- /14/ Vater, B.: Geruchsemissionen diverser Verbrennungsanlagen, pers. Mitteilung, 2009.
- /15/ Müller-BBM: Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen im Abgas der Kremationsanlagen, durchgeführt im Auftrag der Landeshauptstadt Düsseldorf, M 69 295/5, Juni 2007.
- /16/ Hagenmaier, H.: Katalytische Oxidation halogenierter Kohlenwasserstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Dioxinproblems, VDI-Berichte, Nr. 730, S. 239 – 254, 1989.
- /17/ Schön M., Hübner R.: Geruch - Messung und Beseitigung, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1996.
- /18/ Institut Prof. Dr. Jäger: Prüfbericht über die Durchführung von Emissionsmessungen entsprechend der 27. BImSchV im Abgas einer Einäscherungsanlage im Krematorium Römerschanze der Stadt Reutlingen, AZ 614111, Juni 2002.
- /19a/ TÜV Saarland: Bericht über die Durchführung von Emissionsuntersuchungen im Reingas der Rauchgasreinigungsanlage des Krematoriums Saarbrücken, durchgeführt im Auftrag der Landeshauptstadt Saarbrücken, 6030 2A 0247.02, August 2002.
- /19b/ TÜV Saarland: Bericht über die Durchführung von Emissionsuntersuchungen bezüglich PCDD/PCDF bei verminderter Nachverbrennungstemperatur im Reingas der Rauchgasreinigungsanlage des Krematoriums Saarbrücken, durchgeführt im Auftrag der Landeshauptstadt Saarbrücken, 6030 2A 0247.03, August 2002.
- /20/ Schetter, G. (Hrsg.): Krematorium – Technische und betriebswirtschaftliche Tendenzen, Dokumentation der DBU-Tagung, Osnabrück, 22./23. Juni 2009, FVB Verlag, 2009.
- /21/ Schetter, G.: Krematorium – Technische und betriebswirtschaftliche Tendenzen, Tagungsbericht in „Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft“, Bd. 69, Nr. 10, S. 438 – 440, Okt. 2009.

/22/ Schetter, G.: Krematorium – Technische und betriebswirtschaftliche Tendenzen, Tagungsbericht in „Umweltmagazin“, S. 57, Sept. 2009.

8. Geistiges Eigentum

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

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

9. Anhang

Schreiben der Fa. Müller-BBM: Zusammenfassung der Emissionsmessungen zum Emissionsverhalten an der Einäscherungslinie 3 des Krematoriums Düsseldorf bei abgesenkter Temperatur im Bereich der thermischen Nachverbrennung.